



**IMAZAMOX TÜREVİ PESTİSİT KALINTILARININ
KİMYASAL İŞLEM GÖRMÜŞ BİYOKÖMÜR KULLANARAK
İÇME SULARINDAN GİDERİMİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

EVREN ŞAHİNCİ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Füsun EKMEKYAPAR

2024

T.C.
TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**IMAZAMOX TÜREVİ PESTİSİT KALINTILARININ KİMYASAL İŞLEM
GÖRMÜŞ BİYOKÖMÜR KULLANARAK İÇME SULARINDAN
GİDERİMİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

EVREN ŞAHİNCİ

ORCID: 0000-0002-7218-9602

**ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ
Danışman: Prof. Dr. Füsun EKMEKYAPAR**

**TEMMUZ-2024
Her hakkı saklıdır.**

ÖZET

IMAZAMOX TÜREVİ PESTİSİT KALINTILARININ KİMYASAL İŞLEM GÖRMÜŞ BİYOKÖMÜR KULLANARAK İÇME SULARINDAN GİDERİMİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Evren ŞAHİNCİ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Füsün EKMEKYAPAR

İklim değişikliğinin etkileri içme suyu temin edilen kaynakların korunmasını öncelikli hale getirmiştir. Etken maddesi imazamox olan ve içme suyu kaynakları açısından potansiyel riski bulunan herbisitler tarımsal faaliyetlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Imazamoxun tarımsal atık olan ayçiçeği sapından üretilen biyokömürle adsorpsiyonu araştırılmıştır. Biyokömür, ham (HBK) ve kimyasal işlemle aktifleştirilmiş (ABK) şekilde kullanılmıştır. HBK ayçiçeği sapından (400 °C ve 2 saat) pirolizle üretilmiş, farklı ABK'lar için HNO₃, H₂SO₄ ve NaOH çözeltileriyle kimyasal aktivasyona tabi tutulmuştur. Adsorbanlara pH_{pzc}, SEM, FT-IR, EDX analizleri yapılmıştır. Çalkalama ve kesikli akış kolon ön deneyleri gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma amacıyla ticari aktif karbon (AC) kullanılmıştır. Cam kolonda sürekli akışta, HBK, 0,1 N H₂SO₄ ABK ve 0,1 N NaOH ABK adsorbanları kullanılarak, pH=2 ve Co=20,8 mg/L olan 350 mL'lik sulu çözeltilerden, oda sıcaklığında, 5 cm ve 10 cm adsorban yüksekliklerinde, 5 mL/dak ve 10 mL/dak akış hızlarında adsorpsiyon incelenmiştir. Elüatlarda kalıntı imazamox tayini için LC-MS/MS metodu kullanılmıştır. En iyi giderim koşullarında adsorbanlara saf su ve 0,1N HCl çözeltisi ile desorpsiyon protokolü uygulanmıştır. Araştırma kapsamındaki deneylerde, AC ile elde edilen %100 giderim verimine en yakın sonuç olan %96,15'lik giderim verimi, 0,1 N NaOH ABK'nın adsorban olduğu 5 cm kolon yüksekliğinde ve 10 mL/dak akış hızındaki akıştaki deney setinde elde edilmiştir. Sürekli akış kolon deneylerindeki adsorpsiyonlar Langmuir İzotermine ile Yalancı-İkinci Dereceden Kinetik Modeli'ne uygundur ve R² değerleri tüm deney setleri için 0,9'un üzerindedir. Genel hatlarıyla maliyet ve atık bertarafı da değerlendirilmiştir. Ayçiçeği sapından üretilen biyokömür döngüsel ekonomi ilkelerine uygun bir adsorbandır.

Anahtar Kelimeler: Imazamox, Su Arıtımı, Biyokömür, Adsorpsiyon, Kimyasal Aktivasyon, Döngüsel Ekonomi

ABSTRACT

EVALUATION OF THE REMOVAL OF IMAZAMOX DERIVATIVE PESTICIDE RESIDUES FROM DRINKING WATER USING CHEMICALLY TREATED BIOCHAR

Evren ŞAHİNCİ

Department of Environmental Engineering

PhD Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Füsün EKMEKYAPAR

The effects of climate change have made the protection of drinking water sources a priority. Herbicides with the active ingredient imazamox, which have a potential risk for drinking water sources, are frequently used in agricultural activities. Adsorption of imazamox with biochar produced from sunflower stalk, an agricultural waste, was investigated. Biochar was used in crude (HBC) and chemically activated (ABC) form. HBC was produced from sunflower stalk by pyrolysis (400 °C and 2 h) and chemically activated with HNO₃, H₂SO₄ and NaOH solutions for different ABCs. Adsorbents were analyzed by pH_{pzc}, SEM, FT-IR, EDX. Shaking and batch flow column preliminary experiments were performed. Commercial activated carbon (AC) was used for comparison. Adsorption from 350 mL aqueous solutions with pH=2 and Co=20,8 mg/L, at room temperature, 5 cm and 10 cm adsorbent heights, 5 mL/min and 10 mL/min flow rates, using HBC, 0,1 N H₂SO₄ ABC and 0,1 N NaOH ABC adsorbents in continuous flow in a glass column. LC-MS/MS method was used for the determination of residual imazamox in the eluates. In the best removal conditions, desorption protocol was applied to the adsorbents with pure water and 0,1N HCl solution. In the experiments within the scope of the research, the removal efficiency of 96,15%, which is the closest result to the 100% removal efficiency obtained with AC, was obtained in the experimental set with column height of 5 cm and flow rate of 10 mL/min, where 0,1 N NaOH ABC was the adsorbent. The adsorption in the continuous flow column experiments fitted to the Langmuir Isotherm and the Pseudo-Second Order Kinetic Model and the R² values were above 0,9 for all sets of experiments. Cost and waste disposal were also evaluated in general terms. Biochar produced from sunflower stalk is an adsorbent in accordance with circular economy principles.

Keyword: Imazamox, Water Treatment, Biochar, Adsorption, Chemical Activation, Circular Economy

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
SİMGELER DİZİNİ	x
KISALTMALAR DİZİNİ	xi
TEŞEKKÜR	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Özeti	4
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	7
2. KURAMSAL TEMELLER	9
2.1. Ayçiçeği Tarımında Pestisit Kullanımı	9
2.2. Herbisitler	12
2.2.1. Imazamox	14
2.3. Imazamox'un İçme Sularına Girişi ve Olası Sağlık Etkileri	17
2.3.1. Imazamox'un İçme Sularına Giriş Yolları	18
2.3.2. Imazamox'un Olası Sağlık Etkileri	20
2.4. İçme Sularının Arıtımı	23
2.4.1. Mevcut İçme Suyu Arıtım Yöntemleri	27
2.4.2. Yenilikçi İçme Suyu Arıtım Yöntemleri ve Araştırmaları	35
2.5. İçme Suyu Arıtımında Adsorpsiyon Yöntemlerinin Kullanılması	37
2.5.1. Adsorpsiyon Mekanizması	39
2.5.2. Adsorban Çeşitleri ve Kullanım Alanları	42
2.6. Biyokömür	43
2.6.1. Piroliz	47
2.6.2. Tarımsal Atıklardan Biyokömür Üretimi	49
2.6.3. İçme Sularının Arıtımında Biyokömür Kullanımının Avantaj ve Dezavantajları	50
2.6.4. Biyokömürün Adsorpsiyon Kapasitesini Arttırmak Amacıyla Aktive Edilmesi	51
2.7. Adsorpsiyon Sonrası Atık Bertarafı	52
2.8. Biyokömür ile Yapılan Benzer Akademik Çalışmalar	53
2.9. Kolon Sistemleri ile Yapılan Benzer Çalışmalar	55

3. MATERYAL VE METOT	58
3.1. Biyokömür Üretimi, Aktif Edilmesi ve Karakterizasyonu	59
3.1.1. Ayçiçeği Sapından Pirolizle Biyokömür Üretimi	59
3.1.2. Biyokömürün Aktifleştirilmesi	61
3.1.3. Adsorban Özelliklerinin Belirlenmesi	65
3.2. Imazamox'un Biyokömürle Giderim Performansının Değerlendirilmesi	68
3.2.1. Biyokömürün Adsorpsiyon Kapasitesinin Belirlenmesi	69
3.2.2. Adsorpsiyon Optimum Koşullarının Belirlenmesi	69
3.2.3. Giderim Hesaplamaları	71
3.2.4. Adsorpsiyon İzotermi	72
3.2.5. Adsorpsiyon Kinetikleri	76
3.2.6. Kolon Adsorpsiyon Deneyleri	77
3.2.7. İçme Suyunda Kalıntı Imazamox Tayini	95
3.3. Desorpsiyon Çalışması	99
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	100
4.1. Ön Çalışmalar	100
4.1.1. Adsorban Özelliklerinin Belirlenmesi	100
4.1.2. Giderim Etkinliğini Etkileyen Faktörler	121
4.2. Ticari Adsorbanla Kolonda Imazamox Giderimi	130
4.3. İçme Suyundaki Imazamox'un Tarımsal Atıktan Üretilen Biyokömürle Gideriminin Laboratuvar Ölçeğinde Değerlendirilmesi	130
4.3.1. Kolonda Kesikli Akış Koşullarında Imazamox Adsorpsiyonunu Etkileyen Faktörler	130
4.3.2. Sürekli Akış Koşullarında Imazamox Giderimini Etkileyen Faktörler ve Breakthrough Eğrisi	145
4.4. Desorpsiyon Çalışmaları Sonuçları	159
4.5. Maliyet Analizi	160
4.5.1. Biyokömür Üretim Maliyeti	161
4.5.2. Aktivasyon Maliyeti	162
4.5.3. Sürekli Akış Maliyeti	162
4.5.4. Kalıntı Tayini Maliyeti	163
4.5.5. Desorpsiyon Maliyeti	163
4.5.6. Bertaraf Maliyeti	163
4.6. Tez Sonuçlarının Önceki Çalışmalar Işığında Analizi	164
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	165

KAYNAKLAR	168
EKLER	180
EK-1. KORZAMOX ULTRA GÜVENLİK BİLGİ FORMU	180
TEZDEN ÜRETİLMİŞ ESERLER	191



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Imazamox ile ilgili genel bilgiler.	15
Çizelge 2.3. Parametreler ve sınır değerleri	30
Çizelge 2.4. İçme suyu arıtma prosesleri.....	31
Çizelge 2.5. Tekirdağ'da içme ve kullanma suyu kaynaklarının arıtılma durumları	35
Çizelge 2.6. Kimyasal ve fiziksel adsorpsiyonun özellikleri.....	40
Çizelge 3.2. Kesikli akış koşullarında kolonda ham biyokömürle (HBK) adsorpsiyon deney planı	80
Çizelge 3.3. Kesikli akış koşullarında kolonda hno ₃ ile aktifleştirilmiş biyokömürle (ABK) adsorpsiyon deney planı	81
Çizelge 3.4. Sabit yataklı sürekli akıştaki kolon adsorpsiyon çalışmaları literatür özeti	90
Çizelge 3.5. H ₂ SO ₄ ile ABK ile kolonda imazamox giderimi ön deney planı	90
Çizelge 3.6. Sürekli akışta kolonda imazamox adsorpsiyonu deney planı.....	93
Çizelge 3.7. Buharla aktifleştirilmiş aktif karbonun özellikleri	94
Çizelge 3.8. Imazamoxun kolonda ticari aktif karbonla giderim deneyleri planı	95
Çizelge 3.9. Desorpsiyon çalışması deney planı	99
Çizelge 4.1. Tez çalışmasında kullanılan adsorbanların elemental içeriklerinin karşılaştırılması.....	120
Çizelge 4.2. Ayçiçeği sapından üretilen ham ve aktif biyokömürün optimum adsorpsiyon koşulları	127
Çizelge 4.3. Çalkalama deneylerinde ABK için izoterm sabitleri.....	127
Çizelge 4.4. Adsorpsiyon ortamından elde edilen izoterm sabitleri.....	128
Çizelge 4.5. Adsorpsiyon ortamından elde edilen kinetik sabitleri.....	129
Çizelge 4.6. Aktif karbon ile adsorpsiyonda imazamox giderim verimleri.....	130
Çizelge 4.7. Kesikli akış koşullarında kolonda imazamox giderimi	131
Çizelge 4.8. Sürekli akış koşullarında 1 N H ₂ SO ₄ ABK ile ön deney sonuçları	145
Çizelge 4.9. Sürekli akış koşullarında imazamox konsantrasyonunun zamana göre değişimi	147
Çizelge 4.10. Imazamox giderimi için izoterm modelleri sabitleri	155
Çizelge 4.11. Kolonda sürekli akış koşullarında adsorpsiyonun kinetik parametreleri	159
Çizelge 4.12. Desorpsiyon çalışması sonuçları	160

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Corine 2012’den uyarlanan Marmara Bölgesi Trakya bölümü topraklarının arazi kullanım tipleri	10
Şekil 2.2. Tekirdağ’da herbisit kullanım miktarı.....	14
Şekil 2.3. Korzamox Ultra güvenlik bilgi formu zararlılık ve bileşim özeti	16
Şekil 2.4. Pestisit doğal ortam döngüsü.....	19
Şekil 2.5. Türkiye ortalama sıcaklık dağılımı.	23
Şekil 2.6. Türkiye meteorolojik kuraklık haritası.....	25
Şekil 2.7. Tekirdağ su stresi haritası.....	26
Şekil 2.8. Tekirdağ’da 2019 yılında içme ve kullanma suyu temin edilen kaynaklar.....	33
Şekil 2.9. Tekirdağ İli içme suyu arıtma tesisleri	34
Şekil 2.10. Biyokömürün şematik gösterimi ve bileşenleri.....	45
Şekil 2.11. Biyokömür araştırmaların en yoğun olarak gerçekleştirildiği ülkeler.....	46
Şekil 2.12. Piroliz düzeneği örneği.....	48
Şekil 2.13. Tipik bir biyokömür karbon yakalama döngüsü.	48
Şekil 3.1. Çalışma süreci ve içeriğini gösteren akış diyagramı	58
Şekil 3.2 Tarımsal atıktan biyokömür üretimi özet şeması	60
Şekil 3.3. Biyokömür üretiminden görüntüler.....	61
Şekil 3.4. Aktivasyon akış şeması	65
Şekil 3.6. Isıl Ölçer (Bomba Kalorimetri)	66
Şekil 3.7. FT-IR Spektrometre cihazı.....	67
Şekil 3.8. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) cihazı.....	68
Şekil 3.9. Çalkalama deney düzeneği.....	70
Şekil 3.10. Langmuir adsorpsiyon izoterminin doğrusal ifadesi.	73
Şekil 3.11. Freundlich izoterminin doğrusal grafiği.....	75
Şekil 3.12. Deney düzeneği görseli	78
Şekil 3.13. Ticari olarak kullanılan imazamox herbisiti.....	79
Şekil 3.14. pH metre	79
Şekil 3.15. Elde edilen numunelerden bazıları	83
Şekil 3.16. Kesikli akış deney düzeneği şematik gösterimi	84

Şekil 3.17. Toplam organik karbon (TOC) cihazı görseli.	87
Şekil 3.18. Sabit yatak kolonunda kütle transfer bölgesi, breakthrough eğrisi ve konsantrasyon konum profilleri.....	89
Şekil 3.19. Sürekli akış deney düzeneği şematik gösterimi	91
Şekil 3.20. Sürekli akış kolon adsorpsiyonu deney düzeneği görseli.....	92
Şekil 3.22. Kütle spektrometresi.....	97
Şekil 3.24. Imazamox LC-MS/MS alıkonma zamanı eğrisi.....	98
Şekil 4.1. pH_{pzc} değerleri	102
Şekil 4.2. Ham biyokömür FT-IR analizi grafiği	103
Şekil 4.3. HNO_3 ile aktifleştirilmiş biyokömür FT-IR analizi grafiği.....	103
Şekil 4.5. $NaOH$ ile aktifleştirilmiş biyokömür FT-IR analizi grafiği	104
Şekil 4.7. Adsorbanların FT-IR analizleri	105
Şekil 4.14. HNO_3 ile aktifleştirilmiş biyokömür elemental grupları	118
Şekil 4.16. $NaOH$ ile aktifleştirilmiş biyokömür elemental grupları.....	119
Şekil 4.17. Aktif karbon elemental grupları	119
Şekil 4.18. HBK, ABK ve AC'nin karbon ve oksijen içerikleri	121
Şekil 4.19. pH'nın giderim verimine etkisi	122
Şekil 4.20. Adsorban dozunun giderim verimine etkisi	123
Şekil 4.21. Çalkalama hızının giderim verimine etkisi	124
Şekil 4.22. Başlangıç konsantrasyonunun giderim verimine etkisi.....	125
Şekil 4.23. Temas süresinin giderim verimine etkisi.....	126
Şekil 4.25. ABK İçin Langmuir izotermi	128
Şekil 4.26. ABK için yalancı ikinci derece kinetik model	129
Şekil 4.27. Kesikli akış koşullarında kolonda adsorpsiyona pH etkisi.....	135
Şekil 4.29. Kesikli akış koşullarında kolonda adsorpsiyona başlangıç konsantrasyonunun etkisi	136
Şekil 4.30. Kesikli akış koşullarında kolonda toplam karbon giderimine pH etkisi	137
Şekil 4.31. Kesikli akış koşullarında kolonda toplam karbon giderimine başlangıç konsantrasyonu etkisi	138
Şekil 4.32. Kesikli akış koşullarında kolonda toplam karbon giderimine kolon yüksekliği etkisi	138
Şekil 4.33. Kesikli akış koşullarında kolonda toplam organik karbon giderimine pH etkisi	139

Şekil 4.34. Kesikli akış koşullarında kolonda toplam organik karbon giderimine başlangıç konsantrasyonu etkisi	140
Şekil 4.35. Kesikli akış koşullarında kolonda toplam organik karbon giderimine kolon yüksekliği etkisi.....	141
Şekil 4.36. Kesikli akış koşullarında kolonda inorganik karbon giderimine pH etkisi.....	142
Şekil 4.37. Kesikli akış koşullarında kolonda inorganik karbon giderimine başlangıç konsantrasyonu etkisi	142
Şekil 4.38. Kesikli akış koşullarında kolonda inorganik karbon giderimine kolon yüksekliği etkisi	143
Şekil 4.39. Aktifleştirmenin karbon giderimine etkisi ve imazamox giderimi ile korelasyonu.....	144
Şekil 4.40. Sürekli akış koşullarında kolonda adsorpsiyona kolon yüksekliğinin etkisi...	148
Şekil 4.41. Sürekli akış koşullarında kolonda adsorpsiyona akış hızının etkisi	149
Şekil 4.42. Sürekli akış koşullarında kolonda adsorpsiyona adsorban türünün etkisi.....	150
Şekil 4.43. Breakthrough eğrisi	151
Şekil 4.46. Sürekli akışta NaOH ABK ile adsorpsiyonun Langmuir izotermi.....	154
Şekil 4.47. Sürekli akışta HBK ile adsorpsiyonun yalancı-ikinci derece kinetiği.....	156
Şekil 4.48. Sürekli akışta H ₂ SO ₄ ABK ile adsorpsiyonun yalancı-ikinci derece kinetiği .	157
Şekil 4.49. Sürekli akışta NaOH ABK ile adsorpsiyonun yalancı-ikinci derece kinetiği .	158

SİMGELER DİZİNİ

pH	Asidite ya da Baziklik Göstergesi (power of Hydrogen)
UN	Birleşmiş Milletler
SE	Elektron Dedektörü
FT-IR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
BSE	Geri Saçılan Elektron Dedektörü
IC	İnorganik Karbon
LC-MS/MS	Likit Kromatografi-Kütle Spektroskopisi
mg/L	Litre başına Miligram
ppm	Litre başına Miligram
pH _{pzc}	Sıfır Yük Noktası
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TC	Toplam Karbon
TOC	Toplam Organik Karbon
THM	Tri Halo Metan
UV	Ultraviyole
HDPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen

KISALTMALAR DİZİNİ

ABK	Aktif Biyokömür
AC	Aktif Karbon
EU	Avrupa Birliği
EBC	Avrupa Biyokömür Sertifikası
EC	Avrupa Komisyonu
FAO	Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Organizasyonu
EQS	Çevresel Kalite Standartları
DAP	Diamonyum Fosfatlı Gübre
DAY	Dolaşım Akışkan Yataklı Yakma Sistemi
WHO	Dünya Sağlık Örgütü
HBK	Ham Biyokömür
IPCC	Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli
IMI	Imidazolinon Herbisit Grubu
REC	Kaynak, Çevre ve İklim Derneği
LC ₅₀	Öldürücülük Sınırı
UHYS	Ulusal Havza Yönetim Stratejisi
IBI	Uluslararası Biyokömür Girişimi
IOC	Uluslararası Oşinografi Komisyonu
TESKİ	Tekirdağ Su ve Kanalizasyon İdaresi
TÜRKAK	Türk Akreditasyon Kurumu
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
YFG	Yüzey Fonksiyonel Grupları

TEŞEKKÜR

Doktora yolculuğumda danışmanım olan Prof.Dr. Füsün EKMEKYAPAR'a teşekkür ederim. Araştırma çalışması boyunca desteğini ve fikirlerini esirgemeyen, laboratuvarını açıp defalarca bizzat ilgilenen Tez İzleme Jüri Üyesi Prof.Dr. Atakan ÖNGEN'e yürekten teşekkür ederim. Araştırmam boyunca fikirleri ve yorumlarıyla destek veren Tez İzleme Jüri Üyesi Prof.Dr. Gül KAYKIOĞLU'na çok teşekkür ederim. Sonuçların yorumlanmasında zaman ayırıp titizlikle beni yönlendiren Prof.Dr. Temine ŞABUDAK'a çok teşekkür ederim. Laboratuvar çalışmaları boyunca titizlikle destek veren Öğr.Gör.Dr. Ayşenur ÖZVARDARLI'ya teşekkür ederim.

Evren ŞAHİNCİ

Çevre Yüksek Mühendisi

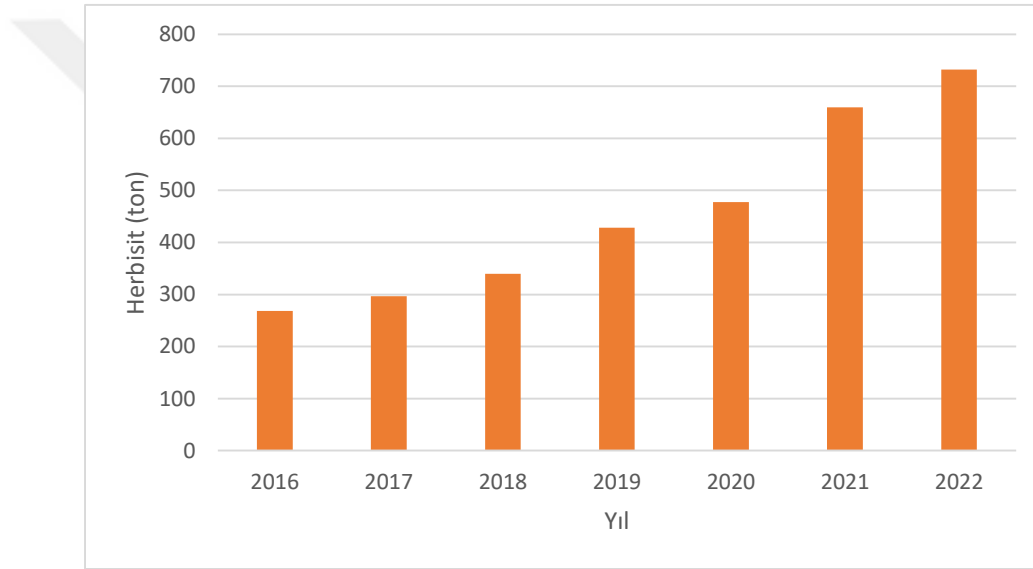
1. GİRİŞ

Sanayi devrimi ve sağlık alanındaki bilimsel gelişmeler insanın ortalama yaşam süresinin artmasına katkı sunmuştur. Bu katkının da etkisiyle UN (2022) verilerine göre 1950’de 2.477.675.000 kişi olan dünya nüfusu 2021 yılında 7.876.932.000 kişiye ulaşmıştır. Gelecek yıllar için yapılan kestirimlerde dünyada yaşayan insan sayısının 2050’de 9.8 milyar, 2100’de ise 11.2 milyar kişi olacağı tahmin edilmektedir (UN, 2024). Dünyanın çeşitli ülkeleriyle birlikte ülkemizdeki gıda yelpazesinde de ayçiçeği ve ayçiçek yağı önemli bir yer tutar. Trakya bölgesi tarım ve hayvancılığın odak noktası olduğu yerleşim merkezlerini barındırır. Tekirdağ ilinde ayçiçeği tarımı oldukça önem arz etmektedir. Tekirdağ Tarım ve Orman İl Müdürlüğü tarafından hazırlanan 2020 yılı Tarım Durum Raporu’nda (2022) il yüzölçümünün yaklaşık %65’i olan 3.827.044 da alanda tarım yapıldığı, bunun 1.424.669 da’lık kısmının ayçiçeği tarımında kullanıldığı ve bu alanda 353.982 ton ayçiçeği üretildiği ifade edilmiştir.

Nüfusla doğru orantılı olarak artan gıda gereksinimi sınırlı tarım alanından yüksek verim alınmasını öncelikli hale getirmiştir. Gıda zincirinde üretilen gıdanın tamamı verimli şekilde tüketilememekte, bazı coğrafyalarda ise gıda arzı yetersiz kalmaktadır. Talebi karşılamak için tüm coğrafi koşullarda yüksek verimde ve kaliteli ürün elde etmek amacıyla tarımsal üretimde kullanılan girdilerden maksimum yarar sağlanmaya çalışılmaktadır. İklim değişikliğinin etkisiyle çevre koşullarının tarımsal üretimin üzerinde yarattığı stres ve riskler de artış göstermektedir. Kuraklık ve sıcaklık pikleri bitki büyüme davranışlarını değiştirmektedir. Tarımsal alanlardan daha yüksek verim elde etmek amacıyla pestisitler yaygın şekilde kullanılmaktadır. Pestisitler istenmeyen organizmaları ve zararlıları yok etmek amacıyla kullanılır ve geçtiğimiz yüzyılda tarımsal verimin artışına büyük katkı sunmuşlardır. Tahıl üretiminin bu sayede %32 oranında arttığı hesaplanmıştır ancak her yıl dünya çapında kullanılan üç milyar kilogram pestisit yalnızca %1’i hedefine ulaşmaktadır (Manap, Günenç ve Doğan, 2023). Arta kalan miktarda pestisit hedef dışı organizmalar ve ekosistemde ek kimyasal kontaminasyon oluşmasına neden olur.

Pestisitlerin çevre ve insan sağlığı üzerindeki etkileri gün geçtikçe önem arz etmektedir. Pestisit kullanımının direkt etkileri hedeflenen etkileridir. Ancak göz ardı edilemeyecek kadar dolaylı etkisi de mevcuttur. Bilinçsiz kullanımının kanserojen etkileri, toksisitesi ile çevresel etkileri üzerinde durulmakta ve ciddi sonuçlara yol açabileceği

akademik çalışmalarda vurgulanmaktadır. Tarım alanlarının toplam yüzölçüme oranının yüksek olduğu bölgelerde, birden fazla seferde ürün alınan iklimlerde, bitki deseninin çok katmanlı ya da çok tekdüze olduğu tarım alanlarında görece daha fazla miktarda dolaylı etki tespiti mümkündür. Pestisitlerin bir türü olan herbisitler yabancı ot mücadelesi için yaygın olarak kullanılan kimyasal maddelerdir. Tekirdağ İl Çevre Durum Raporu'na göre 2016 yılında Tekirdağ'da 268,05 ton herbisit kullanılmıştır (Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, 2017). Bu miktar 2018 yılında 339,52 ton'a, 2020 yılında 477,57 ton'a, 2021 yılında 659,44 ton'a ve 2022 yılında ise 732,2 ton'a yükselmiştir (Tarım Raporları, 2022). Yıl bazında herbisit kullanım miktarlarındaki artış Şekil 1.1'de grafik olarak yer almaktadır.



Şekil 1.1. Tekirdağ'da herbisit kullanımı (Tarım Raporları, 2022).

Son beş yılda Trakya Bölgesi'nde Imazamox'un kullanımı iki kat artmıştır. Kırklareli İl Gıda, Tarım ve Hayvancılık Müdürlüğü'nün verilerine göre, 2015 yılında Imazamox'un kullanımı %72'lik bir payla birinci sıraya yerleşmiştir (Kanburoğlu Çebi, Özcan, Gürbüz ve Özer, 2017). Kırklareli İli 2023 yılı kullanım verilerine göre Imazamox etken maddeli herbisitler 178 tonluk satışla yine herbisitler içerisinde ilk sıradadır (Anonim, 2023).

Maksimum kalıntı limitleri (MRL) ülkemizde Türk Gıda Kodeksi ile belirlenmiştir. Burada pestisit kullanılabilecek tarım ürünü ve zamanın yanı sıra en yüksek pestisit kalıntı miktarı belirtilmiştir. İlaçlamalar bu oranlara bağlı kalınmadan yapıldığı takdirde insan sağlığını ve ekolojik çevreyi tehlikeye atmakta, gıda ürünlerinde belirlenenden fazla kalıntı bulunmasına neden olmaktadır. Dolaylı olarak bu durum insan vücudunda yavaş yavaş

kimyasal madde birikmesine yol açabilmektedir. Dünya Sağlık Örgütü ile mevzuatın ilaçlama sürelerine ve kurallarına dikkat edilmesi önemlidir (Kınacı, 2019). Gezegenimizdeki yerüstü su kaynaklarının sadece %0,3'nün içilebilir su özelliklerini taşıdığı (Koyuncu, Paşaoğlu, Türken ve Yüksekdağ, 2023) da gözönüne alınarak su kaynaklarına sızıntı riskini doğru yönetebilmek için ilaçlama yapılırken prospektüslerin ve ürün güvenlik uyarılarının dikkatlice uygulanması gerekmektedir. Ekonomik koşullar gelişmekte olan ülkelerde pestisit kullanımı kararlarında sağlık ve ekolojik sürdürülebilirlik kaygısından daha etkindir.

Tekirdağ'da son yıllarda tarımsal döngüyü zorlayacak şekilde kuraklık yaşanmaktadır. Temiz su kaynaklarının kapasiteleri kuraklık nedeniyle 2023 yılının yaz aylarında talebi karşılama yönünden alt sınır değerlere değin azalmış ve yerel otoriteler tarafından tasarruf uyarıları yapılmıştır. Sıcaklık artışları su döngüsünde yağışların azalmasına neden olduğu gibi tarımsal faaliyetlerde sulama ihtiyacı oluşturmaktadır. 2023 yılında ayçiçeği tarımıyla uğraşan bazı çiftçiler düşük verim nedeniyle tarlalarındaki ürünlerini hasat etmek yerine tarlada bırakmayı tercih etmiştir. Kuraklığın temiz suyun arz-talep dengesini bozacak şekilde devam etmesi riskini doğru şekilde yönetmek Tekirdağ İli'ndeki öncelikli çevre sorunları arasındadır. Tekirdağ, TÜİK (2024) tarafından yayımlanan 2023 yılı İşgücü İstatistiklerinde istihdam oranı en yüksek bölge olan TR21 bölgesinde yer almaktadır. İstihdamın en yüksek olduğu bölge olması sebebiyle sinai ve tarımsal faaliyetlerin devam etmesi ülke ekonomisi açısından çok önemlidir. Temiz suyun sürdürülebilir şekilde temini ilde üretim yapan sanayi kuruluşlarının faaliyetlerini devam ettirebilmesi için kritik önem taşımaktadır.

Ayçiçeği hasadından sonra oluşan ayçiçeği bitkisinin sapları bilinçli çiftçiler tarafından toprağın organik madde miktarını arttırmak amacıyla kıyılarak toprağa karıştırılmaktadır. Günümüzde tarımsal üretim ve ormancılık faaliyetleri ile %25'e ulaşan sera gazı emisyonları karbonun depolanması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Toprak sera gazlarını organik maddelere depolar. İklim değişikliğini kontrol etmeye katkı sunmak amacıyla toprağın organik madde miktarının artırılması gerekmektedir (Ekmekyapar ve Şahinci, 2022). Ancak ayçiçeği saplarının tarlada ya da ısınma amaçlı yakıldığı örnekler de sıklıkla görülmektedir. İklim Değişikliği Başkanlığı (2024) tarafından yayınlanan İklim Değişikliği Azaltım Stratejisi ve Eylem Planında ülkemizde tarım sektörünün sera gazı

emisyonlarının kaynaklarına göre payları incelendiğinde anız yakılmasının bir başlık oluşturacak kadar ağırlığı olduğu görülmektedir.

İnsani tüketim amaçlı suların korunmasına yönelik regülasyonların yurtdışında her geçen gün katılaşmakta olduğu görülmektedir. Ülkemizde de su kaynaklarının azalması ve talebin artmasıyla su kalitesini korumaya yönelik tedbirlerin artacağı öngörülmektedir. Tarımda pestisit kullanımının çevresel etkilerinin ve bunların azaltılma metotlarının incelenmesi hali hazırda öncelikli araştırma konuları arasında yer almaktadır. Mevcut durumda içme suyu arıtma tesislerinde direk olarak pestisit giderimine yönelik aşamalar bulunmasa da özellikle aktif karbonun kullanıldığı adımlarla bu giderim dolaylı olarak sağlanmaktadır. Ancak aktif karbon ithal bir ürün olduğundan ülkemiz ekonomisine ek bir döviz yükü oluşturmaktadır.

Imazamox herbisitinin su kaynaklarındaki olası kalıntılarının giderilmesi için aktif karbona alternatif olarak yerelde ikame bir adsorban oluşturulması bu yükü azaltmaya katkı sunacaktır. Tarımsal atıkların hammadde olarak kullanılması ve döngüsel biyoekonomiye geçişin ülkemizin iklim değişikliği ile mücadele stratejilerinin içerisinde yer alması sebebiyle bu adsorbanın üretiminde ayçiçeği sapı kullanılmıştır. Ayçiçeği sapından üretilerek kimyasal ön işlemle aktifleştirilen biyokömür Imazamoxun adsorpsiyonunda kullanılmıştır. Adsorpsiyon sonrası oluşan kullanılmış adsorban tehlikeli atık olacağından yakılarak bertarafına uygun kalorifik değere sahip bir hammadde belirlenmiştir. Ayçiçeği tarımının oluşturduğu ekosistem yaşam döngüsü bakış açısıyla bütüncül olarak değerlendirilmiş ve çevre mühendisliğinin temel ilkelerinden olan proaktif yaklaşıma katkı sağlanması amaçlanmıştır.

1.1. Literatür Özeti

Su kirliliği, çevre ve insan sağlığı üzerinde ciddi etkilere sahip olan karmaşık bir olaydır. Mikrobiyolojik, organik, inorganik ve termal faktörler gibi çeşitli kaynaklardan kaynaklanan kirlilik türleri, sucul ekosistemlerin doğal denge ve işlevlerini bozabilir. Pestisitler gibi kimyasal maddelerin içme suyu kaynaklarına girişi, tarım ve ormanlık alanlardan gelen yüzey akışı, erozyon ve yağışlar sonrasında sızıntı yoluyla gerçekleşir. Bu tür pestisitlerin yüksek çözünürlüğü ve sızıntı potansiyeli, içme suyu kaynaklarının kirlenme riskini artırır. Sağlık açısından, pestisitlerin insanlar üzerindeki etkileri endişe vericidir. Çalışmalar, pestisit kalıntılarının kanserojen, nörotoksik ve mutajenik etkilere sahip

olabileceğini göstermektedir. İnsan sağlığını tehdit eden bu olumsuz etkilerin yanı sıra, imazamox gibi pestisitlerin içme suyu kaynaklarına girişı, sucul ekosistemlerde yaşıyan organizmalar için de potansiyel bir tehlike oluşturabilir. Su kaynaklarının korunması ve sürdürülebilir yönetim stratejilerinin benimsenmesi hayati önem taşımaktadır. Bu konuda daha fazla araştırma yapılması ve etkili önlemlerin alınması gerekmektedir. İçme suyunun arıtılması, küresel ısınma gibi iklim değışikliği stresleri altında su kaynaklarını yönetmenin zorluklarına meydan okuyan kritik bir süreçtir. Türkiye'nin su kıtlığı riski altında olan bölgelerinde içme suyu kaynaklarının arıtılması için daha fazla çaba harcanması gerekmektedir.

Imazamox dünya genelinde 15 farklı tohumda kullanılmaktadır. Kullanımına ilk olarak fasulye bitkisi ile başlanmıştır. Imazamox'un insan ve çevre üzerindeki etkileri 2004 yılında araştırılmaya başlanmış ve 2008 yılında kullanımına sınırlamalar getirilmiştir (Hamel, 2012). Imazamox gibi selektif herbisitlerin hedef dışı bitki türlerinde ciddi fitotoksisiteye neden olma özelliğinin olması ekosistemlerde dengesizliklere yol açabilir. Imazamox, yaygın kullanımının oluşturduğu ilgili ekosistemlerde hedef dışı organizmaları da riske etme potansiyeli nedeniyle güçlü bir su kirliliğı kaynağıdır. Sınırlı bozunması ve sudaki yüksek çözünürlüğü (626 g L^{-1} , pH 7, 20°C) nedeniyle, imazamoxun yüksek bir sızıntı potansiyeli vardır (Terrón-Sánchez, Martín-Franco, Vicente, Fernández-Rodríguez, Albarrán, Peña ve López-Piñeiro, 2023).

Avrupa içme suyu direktiflerine uyum sağlamak amacıyla içme suyundaki pestisit konsantrasyonlarının belirli limitlerin altında olması gerekmektedir. Imazamoxun öldürücülük sınırı olan LC_{50} değeri $199,23 \text{ mg/L}$ olarak belirlenmiştir (Lorenzo, Di Marzio, Sáenz, Baratti, Dedonno, Iannucci, Cannicci, Messina ve Galassi, 2014). İçme suyu arıtma sürecinde geleneksel yöntemlerin yanı sıra adsorpsiyon gibi tekniklerin kullanımı son zamanlarda tercih edilmektedir. Adsorpsiyon prosesi, toksik kirleticilerin etkin bir şekilde uzaklaştırılmasında etkili ve düşük maliyetli bir yöntem olarak öne çıkar. İçme suyunun arıtılması süreci, su kaynaklarının sürdürülebilirliği ve insan sağlığı açısından kritik öneme sahiptir. Adsorpsiyon gibi arıtma yöntemlerinin geliştirilmesi ve uygulanması, su kaynaklarının korunması ve içme suyunun güvenliğinin sağlanması için önemli adımlardır.

Adsorpsiyon, su arıtımında önemli bir işlem olarak tanımlanır ve çözeltide bulunan kirleticilerin adsorban yüzeyine kimyasal veya fiziksel olarak bağlanarak sudan ayrılmasını

sağlar. Bu yöntem, askıda katı madde, koku, organik maddeler, ağır metaller ve boyar maddeler gibi kirleticilerin giderilmesinde etkili bir işlemdir. Adsorbanın seçimi, adsorpsiyon verimliliği için kritik bir parametre olarak belirtilir. Adsorbanın seçiminde bulunabilirlik, düşük maliyet, toksisite, aşındırıcılık, yüksek kapasite ve kolay rejenerasyon gibi faktörler dikkate alınmalıdır. Aktif karbon, su arıtımında yaygın olarak kullanılan bir adsorban türü olarak öne çıkar. Ancak biyokömür gibi görece uygun maliyetli adsorbanların kullanımı içme suyu arıtımında etkili ve sürdürülebilir çözümler sunabilir. Biyokömür, yenilenebilir bir adsorban olarak dikkat çeker ve içme suyu arıtımında potansiyel bir çözüm olarak önerilmektedir. Düşük maliyetli, çevre dostu ve etkili bir adsorbandır ve çeşitli kirleticileri giderme kapasitesine sahiptir. Biyokömürün su arıtımında kullanımı, mevcut düşük maliyetli yöntemlere kıyasla çeşitli avantajlar sunar ve içme suyu arıtımında yenilikçi bir yaklaşım olarak değerlendirilir.

Biyokömür üretimi, genellikle odun, kömür ve hindistan cevizi kabuğu gibi ana kaynakların yanı sıra lignoselülozik esaslı tarımsal atıklar, meyve kabukları, çeşitli organik atıklar ve petrol türevi polimerik malzemeler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bu hammaddelerin piroliz sıcaklığı ve bileşimi, üretilen aktif karbonun performansını etkileyen önemli faktörler arasında yer almaktadır. Piroliz işlemi; yüksek sıcaklıkta, inert bir ortamda gerçekleşir, hammadde içerisindeki nem ve uçucu maddelerin uzaklaştırılmasını sağlar. Bu süreçte, karbon dışı elementlerin gaz halinde uzaklaştırılmasıyla karbonun temel gözenek yapısı oluşur. Piroliz sırasında, karbonun yumuşama evresi ve sertleşme adımları dikkate alınmalıdır çünkü bu adımlar, karbonun gözenek yapısını ve özelliklerini belirleyen önemli faktörlerdir.

Biyokömür, farklı kirleticilerin giderilmesi için çeşitli çalışmalara konu olmuştur (Ekmekyapar ve Şahinci, 2022). Kirletici türlerine göre yapılan çalışmalar çeşitlenmektedir.

Sayın (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada vişne sapından üretilen biyokömür H_3PO_4 ile aktifleştirildikten sonra CIP, SDZ ve TC giderimi için kullanılmıştır. Tüm antibiyotik türleri, zwitter iyonik formlarında en iyi adsorpsiyon performansını göstermiştir. CIP, TC ve SDZ için maksimum adsorpsiyon verimleri sırasıyla, %99,95; 99,89 ve 97,81 maksimum deneysel adsorpsiyon kapasiteleri ise sırasıyla, 410,06; 310,08 ve 189,68 mg/g olarak elde edilmiştir.

Morlay, Quivet, Pilshofer, Faure ve Joly (2012) tarafından yapılan araştırmada, imidazolinon grubu olan imazamoxun doğal olarak sulu ortamdaki katyonik veya anyonik formlarının, genellikle içme ve kullanma sularından arıtılmasında önerilen ticari aktif karbon türlerinden biri olan Filtrasorb 400 (F400) ile adsorbe edilip edilmediği incelenmiştir. Elde edilen bulgulara göre, bu herbisit doğal formunun adsorpsiyona tepki verdiği belirlenmiştir. Oluşan giderimle imazamoxun adsorpsiyon izotermi sonucunda elde edilen model Langmuir-Freundlich denklemiyle tatmin edici bir şekilde örtüşmüştür.

Terrón-Sánchez vd. (2023) çalışmalarında pirinç üretiminde yaygın olarak kullanılan ve çevresel olarak hedef dışı organizmalar ile su kirliliği riski taşıyan kalıcı bir herbisit olan imazamoxun, toprak özelliklerinde ciddi değişikliklere neden olabileceğini göz önüne alarak biyokömür ile toprakta adsorpsiyonunu araştırmışlardır. Araştırmada taze ve olgun meşe talaşı biyokömürünün adsorban olduğu toprak dolgulu plastik kolonda imazamoxun taşınım mekanizmasını farklı sulama koşullarında inceleyen sistem kullanılmıştır. Yağmurlama sulamanın tek başına sızıntıyı azalttığı ve kalıcılığı düşürdüğü belirlenmiştir. Ayrıca, biyokömürün toprağa karıştırılmasıyla imazamox sızıntısının yılda %80'den %34'e düştüğü tespit edilmiştir. Taze meşe talaşından biyokömür kullanımıyla imazamox sızıntısının %80'den %34'e, olgunlaşmış meşe talaşından biyokömürle ise %74'den %50'ye düştüğü ifade edilmiştir.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Tekirdağ'ın coğrafi ve iklimsel özellikleri, tarımsal faaliyetlere yoğun şekilde izin veren bir ortam sağlamaktadır. Ayçiçeği ülke ekonomisi açısından önemli olan bir yemeklik yağ bitkisi olarak yetiştirilmektedir. Fakat ayçiçeği tarımında kullanılan pestisitlerin özellikle çevre kirliliği ve insan sağlığı açısından olumsuz etkileri olduğu bilinmektedir. Akademik çalışmalarda tarım topraklarının organik madde bakımından genellikle yetersiz olduğu ve herbisit kullanımının toprak özelliklerini olumsuz etkilediği belirtilmektedir.

Tekirdağ'da ayçiçeği tarımında sulama yapılması ender görülen bir durumdur. Ancak kurak yıllarda sulama yapılmasının verim üzerindeki olumlu etkisi tartışılmaktadır. Suyun etkin kullanımı ise su kıtlığı yaşama olasılığı yüksek görülen Tekirdağ için öncelikli bir konudur. Bu araştırma ile ayçiçeği tarımında yoğun şekilde kullanılan imazamoxun sudaki olası kalıntılarını uzaklaştırmak için etkin ve uygun maliyetli alternatif bir adsorban geliştirmenin yanı sıra bu konudaki literatürün güçlenmesine destek olmak amaçlanmıştır.

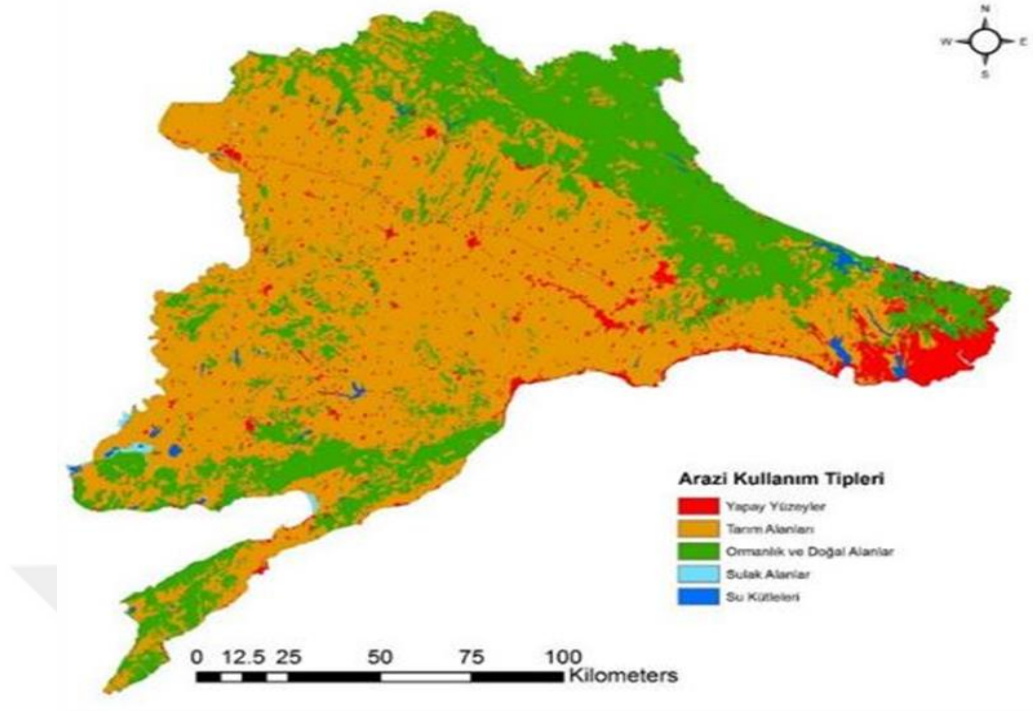
Araştırma kapsamında literatür taranarak çeşitli deneysel ve akademik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar; ayçiçeği sapından biyokömür üretimi, biyokömürün kimyasal olarak aktifleştirilmesi, elde edilen adsorbanın ham ve aktif şekillerinin kolonda farklı koşullarda imazamox adsorpsiyonunda kullanılması, kullanılmış adsorbanın desorpsiyon ve bertaraf seçeneklerinin incelenmesi ile elde edilen verilerin temel maliyetler dâhil olacak şekilde değerlendirilmesini kapsamaktadır.

2. KURAMSAL TEMELLER

Türkiye Çevre Sorunları ve Öncelikleri Değerlendirme Raporu'nda 33 İl Müdürlüğünce, kendi il sınırları içerisindeki toplam 140 adet yeraltı suyu veya izleme noktasının 100'ünde muhtemel kirlenme nedeni olarak %71 zirai ilaç ve gübre kullanımının işaretlendiği belirtilmiştir. Aynı raporda 57 ilde 370 adet yerüstü suyu veya izleme noktasının 230'unda muhtemel kirlenme nedeni olarak %62 zirai ilaç ve gübre kullanımı gösterilmiştir. 23 ilde ise yüzme sularının muhtemel kirlenme nedeninin, 233 adet yüzme suyu bölgesi/plaj veya izleme noktası için, %36 ile zirai ilaç ve gübre olduğu ifade edilmiştir (Çevresel Etki Değerlendirmesi, İzin ve Denetim Genel Müdürlüğü, 2020). Buradan da anlaşılabacağı üzere ülkemizde yerüstü, yeraltı ve yüzme suyu kirleticileri arasında zirai ilaç ve gübre kullanımı önemli bir yer tutmaktadır.

2.1. Ayçiçeği Tarımında Pestisit Kullanımı

Trakya Bölgesi, 40 ila 42 derece kuzey enlemleri ve 26 ila 29 derece doğu boylamları arasında olup, yüzölçümü 2.476.000 ha'dır. Trakya; Edirne, Tekirdağ ve Kırklareli illerinin tamamı ile İstanbul ve Çanakkale illerinin Avrupa tarafında kalan kısımlarını içerir. Tarım alanlarının 1.225.000 ha'da kuru, 160.000 ha'da ise sulu tarım yapılmaktadır. Trakya'da ortalama yağışı 600 mm civarındadır. Tarım yapılan ürünlerin başında buğday (*Triticum aestivum* L.), ayçiçeği (*Helianthus annuus* L.) ve çeltik (*Oryza sativa* L.) gelmektedir (Süzer, 2022). Gürbüz, Rovani, Araujo, Tenorio ve Masek (2019) yaptıkları ve Şekil 2.1'de özeti yer alan Trakya toprakları hakkındaki çalışmada, bu toprakların organik madde açısından 1/5'i çok az, 3/5'i az ve 1/5'i ise orta ve zengin durumda olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca yöre topraklarında organik madde düzeyinin yetersizliğinden kaynaklanan fiziksel toprak özellikleriyle ilgili sorunların belirmeye başladığını ifade etmişlerdir. Yazlık ürünlerde ekim sonrası kabuk oluşumu ve bitki çıkışının engellenmesi sonucu önemli maddi kayıpların meydana geldiğini buna çare olarak ise organik madde miktarını arttıracak yeşil gübreleme, organik gübre ve materyallerin uygulanmasında yarar görüldüğünü tespit etmişlerdir. Tekirdağ yöresinden aldıkları 20 adet toprak örneğinin fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirlemek üzere bir araştırma gerçekleştiren Bellitürk, Danışman ve Sözübek (2009) aldıkları numunelerin yaklaşık olarak yarısında pH değerinin 6 civarında olduğunu tespit etmişlerdir. Aynı çalışmada ortalama organik madde içeriğinin ise %1,44 olduğu belirlenmiştir.



Şekil 2.1. Corine 2012’den uyarlanan Marmara Bölgesi Trakya Bölümü topraklarının arazi kullanım tipleri (Gürbüz vd., 2019).

Ayçiçeği, dünyada ve ülkemizde yağlık ve çerezlik olarak tüketimine yönelik biçimde iki çeşitte yetiştirilir. Kaya (2024) “Ayçiçeği bir yağ bitkisi olarak ilk önce Rusya’da üretilmiş ve ardından tüm Avrupa’ya yayılmıştır. II. Dünya savaşından sonra 1950’li yıllarda, ayçiçeği ülkemize Bulgaristan’dan ülkemize göç eden vatandaşlarımızın getirdiği tohumlar sayesinde girmiş ve tarımı yapılmaya başlanmıştır” şeklinde ayçiçeği tarımının başlangıcını açıklamaktadır. Yemeklik yağ bitkisi olarak temel besin maddeleri arasında ayçiçeği büyük önem taşımaktadır. Ayçiçeği yağı toplumsal damak tadına uygunluğu, geniş kullanım alanı yelpazesi ve yanma derecesinin görece yüksek olması açısından önem arz eder. 2019 yılı itibarıyla dünya geneline yayılan SARS-CoV-2 salgını yaşandığında da teyit edildiği üzere ayçiçek yağı insanların kıtlık durumlarında stoklamak istedikleri bir gıdadır. Türkiye’de 2020 yılında 729.000 ha alana ayçiçeği bitkisi ekilmiş olup, bu ekim sonucu 2.067.000 ton ürün hasat edilmiştir (Bitkisel Üretim Verileri, 2021). Kanburoğlu, Özcan, Gürbüz ve Özer (2017), Trakya’daki ayçiçeği üretiminin ülke genelindeki üretimin %56,3’ünü oluşturduğunu hesaplamışlardır.

Ayçiçeği ekim döneminde toprakta yeterince rutubet yoksa bir çıkış sulaması yapılabilir. Bunun yanında bitkinin erken gelişme dönemlerinde; tarla toprağındaki faydalı

su azalırsa diğerk bir deyişle bitkilerin kuraklığı duymaya başlayıp solgunluk belirtileri gösterdikleri dönemde yaklaşık 15-20 gün aralarla 2 sulama yapılabilir. Ayçiçeğı için en kritik sulama zamanları, çiçeklenme başlangıcı ve süt olum dönemleridir. Kurak yıllarda sulama yapılması, kuru koşullara göre ayçiçeğı veriminde %100 artış sağlamaktadır (Süzer, 2022).

Tetik (2019) araştırmasında “ayçiçeğı yetiştiriciliğinin en büyük sorununun yabancı otlar ve orabanş problemi” olduğunu belirtmiştir. Ayçiçeğı tarımında gübre kullanımının yanı sıra yabancı ot ve parazit kontrolü için yoğun şekilde pestisit kullanılmaktadır (Kaya, 2024). Tarımsal ürünleri hastalıklardan, zararlılardan ve yabancı otlardan korumak ve kaliteli üretimi sağlamak amacıyla kullanılan bir tarımsal mücadele şekli olan pestisit kullanımı, 1940'lardan beri üretimi artıran en önemli faktördür. Hızlı etki göstermesi ve kullanımının kolay olması sebebiyle, pestisit kullanımı en yaygın tercih edilen yöntemdir (Tiryaki, Canhilal ve Horuz, 2010). Türkiye’de 2018 yılında 60.020 ton pestisit kullanılmıştır (Çevresel Göstergeler, 2021). Ülkemizde kullanılan pestisitlerin %19’u Marmara Bölgesinde kullanılmaktadır (Tiryaki, 2017).

Pestisitler genellikle sulandırılıp özel dağıtım aletleri kullanılarak FAO ve WHO tarafından belirlenmiş standart metotlarla doğrudan tarımsal ürünlere uygulanır. Sulandırılmayla ortaya çıkan fiziksel karışıma "formülasyon" denir ve belirli bir yüzdeyle pestisiti içerir, bu da "etkili madde" veya "aktif madde" olarak adlandırılır. Konsantre form genellikle aktif madde, yardımcı maddeler, emülgatörler ve dolgu maddeleri içerir. Sıkça kullanılan ilaçlama yöntemleri arasında yer aletleriyle yapılanlar öne çıkar. Havadan ilaçlama ise birçok ülkede tercih edilen bir yöntemdir. Katı haldeki pestisitler genellikle üretim başlangıcında tohum ilacı olarak veya hasat sonrası depolanan ürünlerde kullanılır. Granül herbisitler, insektisitler ve fungusitler doğrudan toprağa uygulanır. Pestisitler, hedef organizmada farklı etkiler gösterir. Hedef organizmadaki toksisite genellikle biyokimyasal bir süreç sonucunda ortaya çıkar. Kimyasal maddeler, iki tür toksik etki oluşturabilir. Tek bir dozda alındığında kısa sürede ortaya çıkan ve belirtileriyle tanımlanan etki akut toksisite olarak adlandırılır. Uzun bir süreçte ve öldürücü doz altındaki tekrarlı alımlarda ortaya çıkan toksisite ise kronik toksisite olarak bilinir (Çeşmeli, 2011). İnsan tüketimine uygun gıdaların %30’unu arılar tozlaştırarak üretilmelerine katkı sunmaktadır. Ancak arılar çevre kirliliğine karşı gösterge görevi yapacak kadar pestisitlere duyarlı ve hassas canlılardır (Kekillioğlu, 2020). Modern tarımda, pestisitlerin kullanılması kaçınılmaz bir gerekliliktir. Ancak,

pestisitlerin kullanımı sırasında, hem ürünlerin hastalıklara, zararlılara ve yabancı otlara karşı korunması hem de insan sağlığı ve çevre üzerindeki olumsuz etkilerinin dikkate alınması önemlidir. "Entegre Zararlı Yönetimi" olarak da bilinen bu sistem, tarımsal ürünlerin hem kalitesini hem de miktarını artırabilir ve gıda güvenliği ile tarımsal ekosistem üzerinde olumsuz etkilere neden olmaz (Tiryaki vd., 2010).

Ayçiçeği tarımında yabancı ot ve orabaş mücadelesinde ekim öncesi, çıkış öncesi ve çıkış sonrası herbisit kullanımı alışlagelen bir uygulamadır. Özellikle IMI grubu herbisitlerin kullanımı orabaşa ve herbisite dayanklı gen içeren hibrit tohumlar sayesinde yaygınlaşmıştır.

2.2. Herbisitler

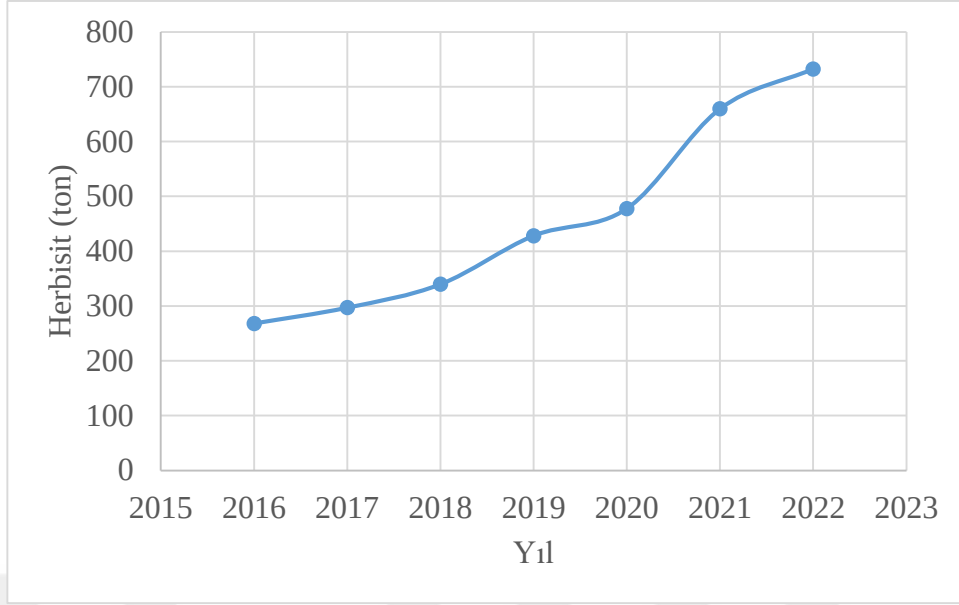
Ayçiçeği yetiştiriciliğinde yabancı ot kontrolünün önemi, özellikle bitkinin ilk gelişim aşamalarında su, besin ve ışık gibi kaynaklar açısından ayçiçeği ile rekabet etmelerinden dolayı büyüktür (Kanburoğlu vd., 2017). Yabancı otların hızlı büyüme yeteneği, özellikle ayçiçeğinin ilk bir aylık büyüme aşamasında tarla alanlarını kaplayarak ve bitki besin maddelerine ortak olarak önemli ölçüde zarar vermelerine neden olabilir. Ayçiçeğinin hayati olan ilk büyüme evresinde, yabancı otla mücadele etmek için kimyasal veya mekanik yöntemler kullanıldığında, ileriki büyüme evrelerinde ayçiçeği bitkileri boy atarak gölge oluşturabilir ve bu da diğer yabancı otların büyümesini engelleyebilir. Kimyasal mücadelede, ekim öncesi toprağa karıştırılan, ekim sonrası toprak yüzeyine serpilen ve çıkıştan sonra doğrudan yabancı otlara uygulanan herbisitler kullanılmaktadır (Süzer, 2022).

Herbisitler, yabancı bitki örtüsünü kontrol altına almak veya öldürmek için kullanılan kimyasal maddelerdir. Eskiden tuz, kil, maden eritme atıkları gibi maddeler herbisit olarak kullanılmış olmasına rağmen, Fransa'da 1896'da Bordo karışımı seçici etkisi nedeniyle yabancı otlarla mücadelede kullanılmasıyla başlamıştır. Bu dönemden 1908'e kadar, sodyum klorat, karbon bisülfid, sodyum arsenit, kainit (sulu magnezyum sülfat ve potasyum klorit karışımı), kalsiyum siyanamid ve sülfürik asit gibi maddeler herbisit olarak kullanılmıştır. 1930-1940 arasında ise bor bileşikler, tiyosiyanatlar, dinitrofenoller, amonyum sülfat ve belirli mineral tuzları seçici veya seçici olmayan herbisitler olarak yabancı otlarla mücadelede kullanılmıştır (Varshney ve Sondhia, 2021). Seçici olmayan herbisitler olarak adlandırılanlar, normal dozlarda uygulandığında yabancı otların yanı sıra diğer bitkilere de zarar verebilirler. Herbisitlerin memelilere ve böceklerle olan toksik etkileri genellikle

düşüktür. Tarımsal üretimde kullanılan herbisitlerin istenilen etkiyi gösterebilmesi için, bitkilerin büyüme mevsiminin başından sonuna kadar yaklaşık 3 ila 6 ay boyunca kalıcı olmaları arzu edilir (Sağlam, 2008). Herbisitler, 125 mL da⁻¹ dozunda, ayçiçeği bitkisinin 4 ila 10 gerçek yaprak aşamasında canavar otu, darıcan, domuz pıtrağı, horozibiği, köpek üzümü, kırmızı köklü tilkikuyruğu, sirken ve çoban değneği gibi zararlılara karşı kullanılmaktadır (Kanburoğlu vd., 2017).

Farklı etki mekanizmalarına sahip olan herbisitler şunlardır: asetil CoA dekarboksilaz enzimini baskılayanlar (klodinafop, diklofop, alloksidim, setoksidim vb.), asetolasetat sentaz enzimini baskılayanlar (imazamoks, piribenzoksim, propoksikarbazon, amidosulfuron, kloransulam metil vb.), mikrotubul birleşmesini engelleyenler (benefin, ditiyopir vb.), sentetik oksinler (2,4-D, 2,4-DB, diklorpropop, dikamba, pikloram vb.), fotosistem II sitesi A üzerinden fotosentezi engelleyenler (desmedifam, pirazon, atrazin, heksazinon, amikarbazon, bromasil vb.), site B üzerinden etki edenler (bentazon, bromoksinil, piridat vb.), site A üzerinden farklı bağlanarak etki edenler (propanil, klorotoluron vb.), lipit sentezini baskılayanlar (butilat, bensulid vb.), 5-enolipiruvil-sikimat-3-fosfat sentaz (EPSP) enzimini baskılayanlar (glifosat), glutamin sentetazı baskılayanlar (glufosinat), karotenoid biyosentezini baskılayanlar (amitrol, aklonifen vb.) ve fitoen desaturaz (PDS) enzimini baskılayanlar (norflurazon, pikolinafen, beflubtamid) (Daş ve Aksoy, 2016; Vats, 2015).

Verilerle Dünyamız sitesinde dünya çapında herbisit kullanımının 1990'larda yaklaşık 650.000 ton seviyelerindeyken bu değer 2020 yılında 1.500.000 ton'a yaklaşmış olduğu belirtilmiştir (Oxford Üniversitesi, 2024). Türkiye'de yüzden fazla çeşitte kimyasal bileşik tarımda yabancı ot öldürücü olarak kullanılmaktadır (Kanbur, 2024). Tekirdağ İl Çevre Durum Raporu'na göre ise 2016 yılında Tekirdağ'da 268,05 ton herbisit kullanılmıştır (Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, 2017). Bu miktar 2018 yılında 339,52 ton'a, 2020 yılında ise 477,57 ton'a yükselmiştir (Tarım Raporları, 2022). Yıllar bazında herbisit kullanım miktarlarındaki değişim Şekil 2.2.'de yer almaktadır.



Şekil 2.2. Tekirdağ’da herbisit kullanım miktarı (Tarım Raporları, 2022).

IMI teknolojisi, ayçiçeği tarımında imidazolinone herbisitlerinin kullanımına izin veren bir yabancı ot kontrol seçeneği olarak tasarlanmıştır. Geleneksel ayçiçeği türleri imidazolinone herbisitlerine daha duyarlı olsa da, hibrit tohumlar bu herbisite karşı dirençli bir genetik yapıdadır (Pfenning, 2008). Tekirdağ Tarım ve Orman İl Müdürlüğü yetkilileri ile bu araştırma kapsamında 2023 yılında gerçekleştirilen görüşmede Tekirdağ’da ayçiçeği tarımında IMI grubu herbisit kullanımının yaygın olduğuna dair bilgi alınmıştır.

2.2.1. Imazamox

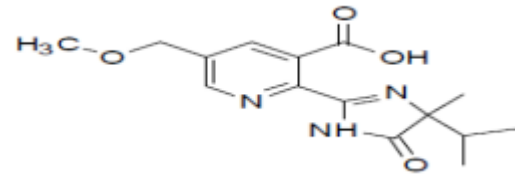
Kırklareli İl Gıda, Tarım ve Hayvancılık Müdürlüğü’nün verilerine göre, 2015 yılında Trakya’da imazamox kullanımı %72’lik bir payla herbisitler içerisinde birinci sıraya yerleşmiştir (Kanburoğlu vd., 2017). Kırklareli İli 2023 yılı kullanım verilerine göre imazamox etken maddeli herbisitler 178 tonluk satışla yine herbisitler içerisinde ilk sıradadır (Anonim, 2023).

Aslan, Kekillioğlu, Şen ve Kızılırmak (2021) çalışmalarında IMI grubu herbisitler için “imidazolinon herbisitler arasında imazapir, imazamet, benzmetil, imazapik, imazetapir, imazamoks ve imazakuin bulunur” şeklinde belirtmişlerdir. Imazamox, IMI grubu içerisinde ayçiçeği tarımı için en fazla tercih edilen herbisittir. Ancak imazamox çevrede bulunan hedefte olmayan organizmaları ve su kirliliğini riske atan uzun süre etkili bir kimyasal bileşiktir (Sanchez-Yepes, Santoz, Romero ve Lorenzo, 2024).

Kanburoğlu vd. (2017) çalışmalarında Imazamoxu “C₁₅H₁₉N₃O, sıvı formda, sarımtırak renkte, 1.08 g cm⁻³ yoğunluğa sahip ve 27 ile 65 gün arasında yarılanma ömrüne sahip bir bileşiktir” şeklinde tanımlamaktadır. EPA ise (2021) imazamoxu sistematik adı 3-Piridinkarboksilik asit, 2-[4,5-dihidro-4-metil-4-(1-metiletil)-5-okso-1H-imidazol-2-il]-5-(metoksimetil)-, molekül kütlesi 305.33 ve CAS Nosu 114311-32-9 olan bir kimyasal madde olarak tanımlar. Imazamox ile ilgili genel bilgiler Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Imazamox ile ilgili genel bilgiler (Akgeyik, 2014).

Yaygın İsmi	Imazamox
Kimyasal ismi (IUPAC)	(RS)-2-(4-isopropyl-4-methyl-5-oxo-2-imidazolin-2-yl)-5- methoxymethylnicotinic acid
Kimyasal ismi (CA)	2-[4,5-dihydro-4-methyl-4-(1-methylethyl)-5-oxo-1Himidazol-2-yl]-5-(methoxymethyl)- 3-pyridinecarboxylic acid
Katalog No	114311-32-9
Molekül formülü	C ₁₅ H ₁₉ N ₃ O ₄
Molekül kütlesi	305,3
Erime noktası	165,5-167,2°C
Sudaki çözünürlüğü	4160 ppm (saf suda 20 °C’ de)
Farklı organik çözücülerde çözünürlüğü (g/100 ml)	heksan 0,0007, metanol 6,75, asetonitril 1,90, toluen 0,22, aseton 3,09, diklormetan 21,8, etil asetat 1,05
Kimyasal Tipi	Herbisit
Kimyasal ailesi	Imidazolinon
Yapısal formülü	



Imazamox formülasyonunun ticari markalarından biri olan Korzamox Ultra (40 g/L)’nın ürün güvenlik bilgi formu Ek 3’te bulunmaktadır. Bu formdan alınan bazı veriler ise Şekil 2.3’te yer almaktadır (Koruma Klor Alkali San. Tic. A.Ş. , 2022).

Zararlılık ifadeleri	H411 Sucul ortamda uzun süre kalıcı, toksik etki.
Ölüm ifadeleri	P273 Çevreye verilmesinden kaçının. P391 Döküntüleri toplayın. P501 İçeriği/ kabı ulusal yönetmeliklere göre bertaraf edin.
İlave etiket bilgileri	EUH401 İnsan sağlığına ve çevreye yönelik riskleri önlemek için, kullanma talimatlarına uyun.
2.3. Diğer zararlar	
Ürün, PBT veya vPvB olarak sınıflandırılan herhangi bir madde içermez.	
BÖLÜM 3: Bileşim/içindekiler hakkında bilgi	
3.2. Karışımlar	
(RS)-2-(4-Isopropyl-4-methyl-5-oxo-2-imidazolin-2-yl)-5-methoxymethylnicotinic acid 1-5%	
CAS numarası: 114311-32-9	
M faktörü (akut) = 1	M faktörü (kronik) = 1
Sınıflandırma T.C. 28848 Sucul Akut 1- H400 Sucul Kronik 1- H410	

Şekil 2.3. Korzamox ultra güvenlik bilgi formu zararlılık ve bileşim özeti (Koruma Klor Alkali San. Tic. A.Ş. , 2022).

Imazamox, imidazolinon grubu bir herbisittir ve asetohidroksiasit sentaz (AHAS) enzimini inhibe eden asetolaktat sentaz (ALS) olarak ta ifade edilmektedir. Bir gün boyunca güneş ışığına maruz kaldıktan sonra, Imazamoxun yarılanma ömrü 8,34 saat olarak belirlenmiştir (Harir, Frommberger, Gaspar, Martens, Kettrup, El Azzouzi ve Schmitt-Kopplin, 2007). Imazamoxun tavsiye edilen MRL değeri 0,05 mg/kg iken, diğer ülkelerdeki MRL değerleri 0,03-0,05 mg/kg aralığında bulunmaktadır (Kınacı, 2019). Bu herbisitinin özelliklerinin bir açıklaması da Pestisit Özellikleri Veri Bankası'nda bulunmaktadır (Herdforshire Üniversitesi, 2023). Imazamox ilk olarak 1997 yılında USEPA tarafından soya fasulyesinde kullanılmak üzere tescil edilmiştir (Massachusetts Çevre Koruma Departmanı, 2014). Bitki tarafından emilen bir sistemik herbisittir. Imazamox, bitki yüzeyine uygulandıktan sonra sistemik özelliği sayesinde temas ettiği dokular aracılığıyla bitkinin diğer kısımlarına taşınır. Püskürtülürken bir kısmı buharlaşır ve dağılırken, diğer kısmı bitkinin yüzeyinde ve toprakta kalır. Bitki, hem herbisite doğrudan maruz kalır hem de toprağa karışan miktarlardan etkilenir. Çoğu pestisitte olduğu gibi toprağın kil içeriği, pH değeri, organik madde oranı ve nem seviyesi, imazamoxun da toprakta kalıcılığını ve/veya yarılanma süresini etkiler. Toprağın pH değerinin yükselmesi, imazamoxun toprağa adsorpsiyonunu artırır ve yarılanma süresini uzatır. Benzer şekilde topraktaki kil miktarının ve organik madde yüzdesinin artması da imazamoxun kalıcılığını arttırmaktadır (Kanburoğlu vd., 2017).

Imazamox'un kullanımı öncelikle fasulye bitkisiyle başlamış olup dünya çapında 15 farklı tohumda kullanıldığı belirlenmiştir. IMI grubu herbisitler dünyada ayçiçeğinin yanı sıra yer fıstığı, şeker kamışı, soya fasulyesi ve patates yetiştirilmesi esnasında yabancı ot kontrolü amacıyla yaygın şekilde kullanılmaktadır (Hu, Liu, Hou, Li, Zeng ve Tan, 2021). İnsan sağlığı ve çevre üzerindeki etkileri 2004 yılında araştırılmaya başlanmış ve 2008'de kullanımına kısıtlamalar getirilmiştir (Hamel, 2012). Imazamox hidrolize edilebilir fonksiyonel grupları barındırmaz ve bu onu su kaynaklarında kalıcı hale getirmektedir. Amerika Birleşik Devletleri, Kanada ve Kuzey İtalya'da yeraltı ve yerüstü su kaynaklarında tespit edilmiştir (Kaur, Kaur ve Kaur 2020; Kaur vd., 2020). Sürekli kullanımı, kalıcılığı ve su kaynaklarında tespit edilmesi gibi durumlar yaygınlaştığından son yıllarda en pratik ve ucuz şekilde sudan uzaklaştırılmasına yönelik araştırmalar yapılmaya başlanmıştır. Örneğin Cabrera, Celis ve Hermosin (2016) araştırmalarında kitosan ve Fe (III) ile modifiye edilmiş smektit kullanarak Imazamoxu sulu çözeltiden uzaklaştırmayı başardıklarını ifade etmişlerdir. Ancak yaygın şekilde kullanılan bu herbisitinin giderimine yönelik daha kolay üretilen ve döngüsel ekonomiye katkı sunan adsorbanların tespiti için daha fazla araştırma yapılmasına ihtiyaç vardır.

2.3. Imazamox'un İçme Sularına Girişi ve Olası Sağlık Etkileri

Su kirliliği, çevresel kirliliğin bir türü olup, alıcı su ortamlarının doğal niteliğinin ve görünümünün çeşitli fiziksel, kimyasal ve biyolojik etkilerle istenmeyen derecede bozulması olarak tanımlanmaktadır.

Su kirliliği, bileşenlerine bağlı olarak genellikle şu şekilde sınıflandırılabilir;

- Mikrobiyolojik Kirlenme: Bu tür kirlilik, atıkların içinde patojenik mikroorganizmaların bulunmasından kaynaklanır.
- Organik Kirlenme: Su içindeki organik bileşiklerin yoğunluğunun artmasından meydana gelir. Bitki ve hayvan artıklarının doğal yolla bozunması, endüstriyel, kentsel, tarımsal kirlilik ve atık su arıtımından kaynaklanır.
- İnorganik Kirlenme: Su ortamına demir, mangan, klorür, ağır metaller, azot, fosfor ve diğer birçok madde eklenmesiyle oluşur.
- Termal Kirlenme: Bu tür kirlilik, alıcı ortamdaki anormal sıcaklık değişikliklerinden kaynaklanır.

Pestisitler suda çözünerek, erozyonla taşınarak ve toprağın parçalarına yapışarak hareket ederler. Sızma, suyun ve içindeki çözünmüş kimyasalların toprak yüzeyine değil, toprağın içine doğru hareketidir. Bir miktar sızma, pestisit hedefine ulaşması için gereklidir. Ancak aşırı sızma, zararlıların kontrolünde azalmaya, istenmeyen türlere zarar verilmesi ile yerüstü ve yeraltı sularının kirlenmesine neden olabilir (Çeşmeli, 2011).

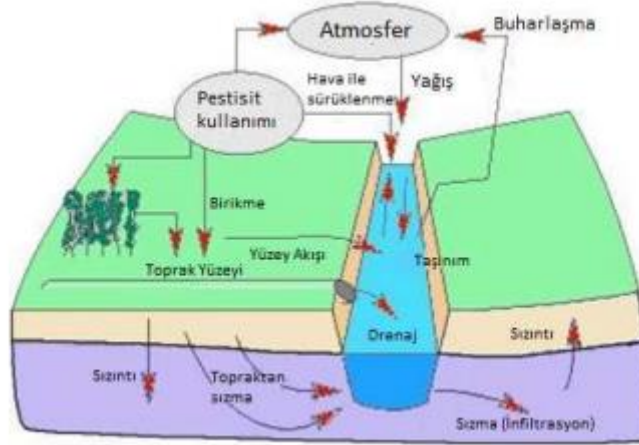
Pestisitlerin çevre ve insan sağlığına en az zarar vermesi için; biyobozunur özellikte olanların seçilmesi, uygulama dozu ve zamanına özenle riayet edilmesi, karışımların uygulama yerinde hazırlanması, ambalaj atıklarının uygun şekilde bertaraf edilmesi ile bitki deseninin en az pestisit gerektirecek şekilde planlanması gibi konular önem arz etmektedir.

2.3.1. Imazamox'un İçme Sularına Giriş Yolları

Güneşten gelen radyoaktif ışımanın enerjisiyle gezegenimizdeki su katı, sıvı ve gaz formlarda hidrolojik çevrimde hareket eder. Tüm organizmalar yaşamsal faaliyetlerini devam ettirebilmek için ihtiyaç duydukları suyu hidrolojik döngüden alır, kendi yaşam çevrimlerinde kullanır ve yeniden bu döngüye verirler. Kara parçaları ve sucul ortamlar hidrolojik döngü ve meteorolojik olaylar nedeniyle etkileşim içindedirler. Bu döngü, suyun dengede bulunmasını sağlar. Dünya ekosistemindeki yaşamın sürdürülmesinde hayati bir rol oynayan su, doğal kaynaklar arasında yaşam için en elzem olandır.

Toprağa uygulanan pestisitler, uygulandıktan sonra toprakta yüzey akışına geçerek çözünür hale gelirler. Bu pestisitler, topraktaki katı maddelere bağlanarak rüzgâr erozyonuyla uzak mesafelere taşınabilirler. Ayrıca buharlaşarak toprak içinde veya dışında hareket edebilirler. Pestisitler, toprak yapısı içinde suyun etkisiyle aşağı doğru hareket ettiğinde organik maddeler tarafından tutulurlar ve mikroorganizmalar tarafından parçalanırlar. Pestisitlerin su kaynaklarına ulaşmasında toprak yoğunluğu, karbon içeriği, sulama ve yağış koşulları ile topraktaki adsorpsiyon kapasitesi etkilidir (Atasoy, 2019). Buharlaşmanın yoğun olduğu dönemlerde, pestisitler toprak yüzeyine geri dönebilirler. Bu nedenle, çevresel döngüler aracılığıyla pestisitler hava, yağmur suları, yüzey suları ve yeraltı sularına karışabilirler. Pestisitlerin uygulandıktan sonra çevreye olan etkileri son derece kritiktir. Tiryaki (2017) çalışmasında zararlı organizmalara, hastalıklara ve yabancı otlara karşı yapılan ilaçlamada kimyasalların sadece %0,015 ila %6'sı hedeflenen canlılara ulaştığını, geri kalan %94 ila %99,9'unun ise hedeflenmeyen organizmalara ve toprağa yayıldığını belirtmiştir. Bu yayılma nedeniyle pestisitler kimyasal kirleticiler olarak

etraflarındaki doğal ekosistemlere karışırlar. Pestisitlerin doğal ortamdaki döngüsü Şekil 2.4'te yer almaktadır.



Şekil 2.4. Pestisit doğal ortam döngüsü (Aksangür ve Nalbur, 2018).

Herbisitler, yağış ve sulama ile toprağa nüfuz eder, derin toprak tabakalarında kalarak uzun süre etkisini sürdürebilir ve toprak ile su içinde kalabilirler (Dan, Ji, Tao, Luo, Shen, Zhang ve Sang, 2021). Herbisitlerin hedef dışı alanlara taşınması çeşitli şekillerde gerçekleşebilir. Bunlardan birincisi, pülverize edilen herbisit karışımlarının veya buharlaşan herbisit rüzgârla hedef alanı dışına taşınmasıdır. İkincisi, toprak yüzeyinde çözünmemiş halde bulunan herbisit moleküllerinin yoğun yağmur veya sulama gibi faktörlerle suda çözünerek yüzeyde taşınmasıdır. Karadan akan su, herbisitleri kanallara, akarsulara, nehirler ve göllere taşıyabilir. Yüzey sürüklenmesi olarak adlandırılan topraktan yayılma yollarından biri, ani yağışlar gibi etkenlerin etkisiyle oluşur. Üçüncüsü, sızıntı şeklinde sürüklenme olarak bilinir ve uygulanan herbisit su geçirgen topraklar aracılığıyla aşağıya doğru taşınması anlamına gelir. Topraktaki katı parçacık çapı büyüdükçe daha fazla sızıntı görülürken, toprak parçacık çapı küçüldükçe yüzeyden taşınma durumu artabilir.

Terrón-Sánchez vd. (2023) yayınladığı araştırmada sızıntı riski “sınırlı bozunması ve sudaki yüksek çözünürlüğü (626 g L^{-1} , pH 7, 20°C) nedeniyle, imazamoxun yüksek bir sızıntı potansiyeli vardır” şeklinde belirtilmiştir. Seçici herbisitlerin, örneğin imazamoxun, sürüklenme sonucunda hedef dışı kültür bitkilerinde ciddi zarara yol açabileceği unutulmamalıdır (Usta ve Karaca, 2021).

2.3.2. Imazamox'un Olası Sağlık Etkileri

Pestisitlerin yeraltı sularına taşınması ve karışması kimyasal ve fiziksel özelliklerine bağlı olarak gerçekleşir. Kalıcılık başta olmak üzere sahip oldukları özellikler zarar verme kapasitelerini belirler. Yağda çözünürlük dereceleri ve toprağa tutunma yetenekleri canlı organizmalarda birikimlerini belirleyen faktörler arasındadır. Yüksek su çözünürlüğüne ve buharlaşma yeteneğine sahip pestisitler kolaylıkla su döngüsüne katılabilirken, çözünürlüğü düşük ve yarı ömürleri uzun olan pestisitler toprak parçacıklarına tutunarak uzun süre kalabilir ve zamanla çevrede birikebilirler. Pestisitlerin, sadece hedeflenen zararlıları etkilemesi bunların dışındaki hayatı ise hiç etkilememesi arzu edilir. Fakat üretim, depolama ve taşıma süreçlerinde pestisitlerin hava, su ve toprağa karışmasıyla istenmeyen etkiler görülebilir. Bu duruma bilinçsiz, dikkatsiz ve aşırı kullanım da eklenirse, suda, toprakta, bitkilerde, hayvanlarda ve hatta insan vücudunda pestisit birikimi olacaktır.

Pestisitlerin hedef dışı organizmalar üzerindeki istenmeyen etkilerini azaltmak için kimyasal formülasyonlarda iyileştirme çalışmaları yapılmaktadır. DDT gibi ilk sentezlenen yapılardan daha güvenli formlar olan ikinci ve üçüncü nesil pestisitler geliştirilmiştir. Ancak geliştirme çalışmalarına rağmen her pestisit belirli bir tehlikeliği ve zehirliliği bulunmaktadır. Sağlık açısından tam anlamıyla güvenli bir kimyasal pestisit yoktur. Uçkun (2013) çalışmasında pestisitlerin amaçsızca, kontrolsüzce çevreye salınan ve canlıları öldürmek için kullanılan biyosidal ve toksik kimyasal maddeler olduğunu belirtmiştir. Doğal yaşam alanlarına bu biyosidal ve toksik kimyasalları hassas şekilde risk değerlendirmesi yapılması önemlidir. Bazı ülkelerde ucuz zehirler olarak dahi tanımlanan pestisitler, üretim tesislerinden veya kullanım alanlarından farklı yollarla çevresel ortamlara yayılarak, bu alanlarda sorunlara neden olabilirler. Yayılma özelliklerinden dolayı pestisitlerin organizmalar üzerindeki etkilerinin bilinmesi büyük önem taşımaktadır. Pestisitler dağılabildikleri için hava, su, toprak, yağmur, kar, buz ve sis gibi neredeyse tüm çevresel unsurlarda bulunabilirler. Bu nedenle dünya üzerindeki tüm organizmalar pestisitlerden etkilenebilir.

Pestisitler, hem taban akışlarında hem de yağmur suyunun neden olduğu taşkın olaylarında, nehir sistemleri aracılığıyla kentsel ve tarımsal alanlardan su kütlesine ulaşarak, önce hayvan varlığı ve flora sonra da insan sağlığı için akut/kronik seviyelerde potansiyel bir risk oluşturabilirler. Pestisitlerin sucul sistemlere yönelik potansiyel toksisitesi, bireysel

ekotoksikolojik özelliklerine ve karışım bileşimlerine bağlı olarak, çok düşük konsantrasyonlarda bile mevcuttur. Coşkun, Avan, Karabulut, Saldamlı ve Yılmazoğlu (2023) çalışmalarında tarımsal alanlarla çevrili kentsel bölgeler, pestisitlerin toplu birikmesinden potansiyel olarak etkilenebileceğini belirterek buna örnek olarak Kanada Prairies'deki Manitoba Eyaleti'nde bulunan Winnipeg şehrinde test edilen toprak örneklerinin %98,5'i herbisitler, insektisitler, fungisitler ve bunların metabolitlerini içerdiğinin tespit edildiğini belirtmiştir.

Pestisitlerin kısa vadede vücuda zarar vermeyeceği düşünülse de kalıcılığı yüksek olan pestisitler halk sağlığını tehdit etmektedir (Demli, Orhan, Durak ve İlter, 2018). Uzun dönemde; deri, cilt, akciğer kanseri, hormonal bozukluklar, beyin ve sinir sistemi hastalıkları, bazı kan hastalıkları gibi ölümlle sonuçlanabilecek hastalıklara yakalanma riskleri taşıdıkları, özellikle gelişme çağındaki çocuklarda hiperaktivite ve dikkat dağınıklığı gibi davranış problemlerine yol açtıkları belirtilmektedir (Atabey, 2020). Tarım ilaçlarının canlılar üzerindeki etkileri doğumdan itibaren başlar. Bu ilaçlar plasentadan fetüse geçebilir ve bunun sonucunda düşükler, hiperpigmente ve hiperaktif çocuk doğumları gözlemlenebilir. Hayvan deneylerinde, radyoaktif işaretli ilaçların verilmesinden 5 saat sonra ilacın plasentaya geçtiği ve fetüsün göz, sinir sistemi ve karaciğerinde birikim gözlemlendiği tespit edilmiştir. Pestisitlerin bir kısmı (organofosfat ve karbamat insektisitleri gibi) doğrudan periferik ve merkezi sinir sistemi üzerinde etkili olarak organizmanın yaşamını tehdit edebilir. Tarım ilaçlarının kan elementlerine, yani eritrositlere ve lökositlere zararlı etkileri de hayvan deneylerinde gözlemlenmiştir (Tiryaki, 2017).

1948 ve 1951'deki araştırmalar, ilk kez insan vücudunda organik klorlu pestisit kalıntılarının rastlanmasına yol açmıştır. Bu kalıntı analizleri, bazı ilaçların kanserojen olduğunu, bazılarının sinir sistemini etkilediğini ve bazılarının ise mutasyonlara neden olduğunu göstermiştir. İnsanlara geçen pestisit kalıntılarının başlıca kaynağı, tükettiğimiz gıdalardır. Bu nedenle, FAO ve WHO, pestisit kalıntılarıyla ilgili bir komite kurmuştur. Bu komite, bilimsel araştırmalara dayanarak pestisit tanımını ve gıdalardaki pestisit kalıntıları için maksimum kalıntı limitlerini belirlemiştir (Kınacı, 2019). Kalıntıların bir diğer yan etkisi ise organizmaların o kimyasallara direnç geliştirmesidir. Dayanıklılık bir gen mutasyonudur ve etki kalktığında eski hale dönmez. Bu durum daha fazla biyosidal ürün tüketilmesine ve bu nedenle maliyetin artmasına, bitkilerde ise daha fazla fitotoksisiteye

neden olurken ürün verimini de düşürür. En tehlikeli dolaylı etkisi ise ürünlerde ve çevrede kalıntı miktarının ve kirliliğin artmasına neden olmasıdır.

Bir pestisit türü olan herbisitlerin insan dışındaki organizmalar üzerindeki akut ve kronik toksisite açısından sağlık etkilerini; balık ve deniz canlıları, böcekler ve arılar, toprak mikroorganizmaları ve omurgasızları, bitkiler ve üzerlerindeki parazitler açısından değerlendirmek yerinde olacaktır. Ayrıca bu etkilerin direk ve dolaylı olacağını da gözardı etmemek gerekmektedir. Örneğin, sucul yabancı otlarına karşı uygulanan herbisitlerin balıklara zarar vermesi ve öldürmesi, uygulamanın amacı yabancı otları yok etmek olduğundan, dolaylı bir etkidir. Herbisit toksisitesi bitkilerin yapraklarında, gövdelerinde, çiçeklerinde ve meyvelerinde görülebilir ve bitkilerde damarlar arası kloroz, benekli kloroz, sarı lekelenme, yaprakların morarması, nekroz ve gövde ölümleri gibi belirtilere neden olabilir. Herbisitlerden kaynaklanan bu tür nedenlerle bitkiler zayıflar ve bu da hastalık etmenlerine, zararlılara ve olumsuz çevre koşullarına karşı kültür bitkilerini savunmasız hale getirir, böylece verim kayıpları artar. Herbisitlerin yeraltı sularına sızma potansiyeli bulunabilir veya yağış veya sulama sırasında derin toprak tabakalarında kalabilir ve uzun süreli etkiler gösterebilir. Bu maddelerin toprak ve su ortamında uzun süre kalması, kalıntıların birikmesine neden olabilir. Doğal olarak toprağın kendi kendini temizleme yeteneğinin aşılması, topraklardaki biyolojik çeşitliliği azaltabilir ve ciddi toprak kirliliğine yol açabilir. Sonuç olarak, herbisitlerin yüzey toprağında birikmesi ve taşınması risk oluşturabilir, toprak ekosistemlerine, özellikle toprak solucanlarının genetiğine zarar verebilir ve topraktaki mikrobiyal fonksiyonları etkileyebilir (Dan vd., 2021).

Herbisitlerin insanlar üzerindeki yan etkileri de oldukça önemlidir. Dünya çapında yaygın olarak kullanılan fenoksit grubu herbisitlere maruz kalan kişilerde Non-Hodgkin Lenfoması (NHL) gibi kanser türlerinin riskinin arttığı ve ayrıca soft-doku sarkom gibi kanser türlerinin görülebileceği gözlemlenmiştir. Bazı herbisitlerin kadınlarda kısırlıkla ilişkilendirildiği, insanların bağışıklık ve sinir sistemlerinin zarar gördüğü belirlenmiştir. Ülkemizde uzun süredir ve yoğun bir şekilde kullanılan 2,4-D'nin uzun süre maruz kalındığında insan somatik hücrelerinde hasara neden olduğu rapor edilmiştir (Mengüç, 2018).

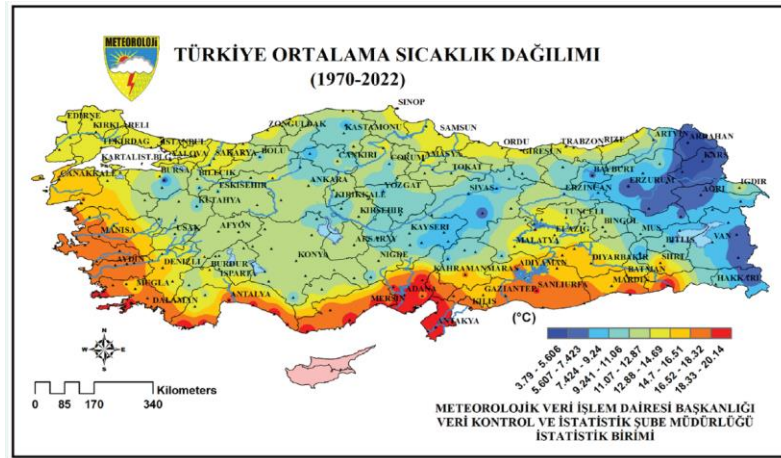
Tekirdağ'da yaygın şekilde kullanılan herbisitlerin etken maddesi olan imazamox, Sanchez vd. (2024)'ne göre yaygın kullanımının ilgili ekosistemlerde hedef dışı

organizmaları tehdit etme potansiyeli nedeniyle güçlü bir su kirliliği kaynağıdır. Imazamox, yutulması halinde sağlığa zararlıdır ve cilt yanıklıklarına neden olabilir (Kınacı, 2019). Imazamoxun öldürücülük sınırı olan LC₅₀ değerinin 199,23 mg/L olduğu belirlenmiştir (Lorenzo vd., 2014). Gosetti, Robotti, Bolfi, Mazzucco, Quasso, Manfredi, Silvestri, Facchi ve Marengo (2019)'nin bildirdiğine göre: Su ortamında yüksek çözünürlüğü ve sınırlı bozunması nedeniyle (626 g L⁻¹, pH 7, 20°C) bu herbisit topraktan yüksek bir süzülme potansiyeline sahiptir. Yakın geçmişte suda 16 µg L⁻¹ konsantrasyonuna kadar belirlenmiştir ve bu sudaki organizmaları ve ekosistemleri olumsuz etkileyebilir. Imazamox vücutta lōsin, izolōsin, valin miktarını azaltmasının yanı sıra asetolaktat enzimini bozarak protein ve DNA sentezini inhibe eder (Kaur vd., 2020; Kaur vd., 2020).

Yeni nesil biyopestisitler genellikle kimyasal pestisitlere göre daha az toksik özellik gösterir ve kimyasal pestisit kullanımına olan bağımlılığı azaltırken yüksek ürün verimini korur. Şu anda, biyopestisitler küresel bitki koruma pazarının %5'ini oluşturmakta olup, yıllık %15'in üzerinde bir büyüme oranıyla kimyasal pestisitlerin büyüme oranını geride bırakacağı öngörülmektedir (Coşkun, 2023).

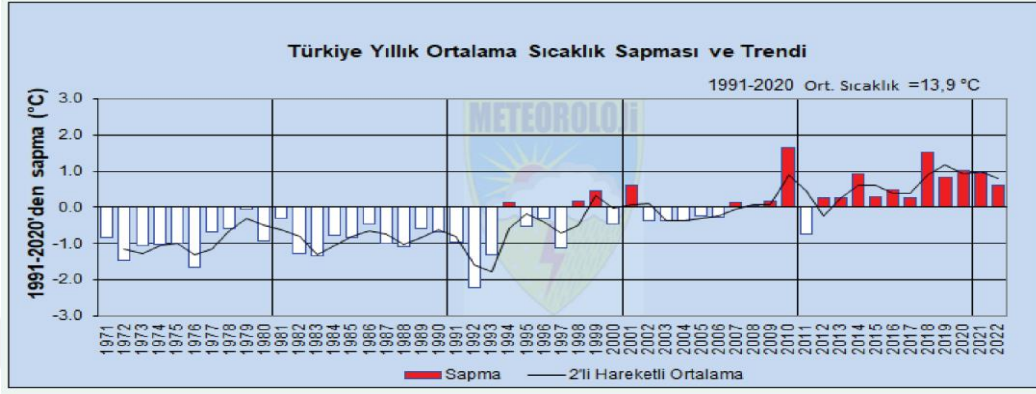
2.4. İçme Sularının Arıtımı

İklim değişikliğinin yarattığı baskılar altında su kaynaklarını yönetmenin zorlukları artan su talepleriyle sınırlı değildir. Aynı zamanda mekânsal ve zamansal olarak değişen su arzı uyumsuzluklarının da yönetilmesi gerekmektedir (Dünya Bankası, 2016).



Şekil 2.5. Türkiye ortalama sıcaklık dağılımı (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2023).

Türkiye'nin ortalama sıcaklık dağılımı Şekil 2.5'te görüldüğü gibidir (REC, Kaynak, Çevre ve İklim Derneği, 2023). Trakya Bölgesinin 12,88-14,69°C bandında yer alması buharlaşmanın ortalamanın üzerinde seyrettiğini, su kaynakları rejenerasyon hızının doğu illerine oranla düşük olduğunu göstermektedir.

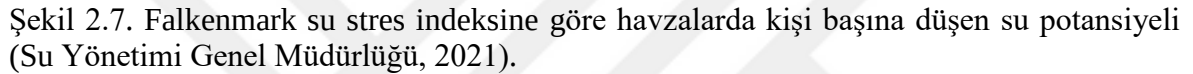


Şekil 2.6. Türkiye yıllık ortalama sıcaklık sapması ve trendi (REC, Çevre ve İklim Derneği, 2023).

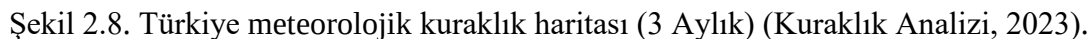
Türkiye yıllık ortalama sıcaklık sapması ve eğilimleri Şekil 2.6'da görülmektedir (REC, Kaynak, Çevre ve İklim Derneği, 2023). Bu grafik özellikle 2010 yılından sonra ülkemizdeki sıcaklıkların ortalamanın üzerinde seyrettiğinin altını çizmektedir. Bu eğilimin sürmesi halinde buharlaşma oranlarında da artış görülecektir.

Su Yönetimi Genel Müdürlüğü (2023) verilerine göre dünya çapında insani tüketime uygun olan tatlı suyun %68,7'si kutuplarda ve %30,1'i ise yeraltında bulunmaktadır. Tüm yerüstü içilebilir tatlı su kaynakları toplam su varlığının sadece %1,2'sinden azdır ve bu kaynaklar pek çok tehditle karşı karşıyadır. İçilebilir su kaynaklarına yönelik risklerin en önemlileri kirlilik, kuraklık, iklim değişikliği, nüfus artışı, su kayıpları ve sürdürülemez aşırı kullanımlardır. İklim değişikliğinin su kaynakları üzerinde yarattığı en önemli etkilere bakacak olursak bunların kaynakların kapasitesinin, kullanıma uygunluğunun ve su kalitesinin azalması ile ilgili olduğunu görürüz. Su kalitesi ve miktarının ihtiyacı karşılayacak derecede yeterli olması gıda güvenliği, enerji temini, çevresel ihtiyaçlar ve sürdürülebilir kalkınma gibi birçok alanda kritik öneme sahiptir. Türkiye'de kişi başına düşen kullanılabilir yıllık su miktarı 2021'de 1.323 m³ iken, artan nüfusla birlikte bu miktarın 2030'da 1.200 metreküpe, 2040'ta 1.116 metreküpe ve 2050'de 1.069 metreküpe kadar düşmesi beklenmektedir. Bu kestirim ülkemizin su kıtlığı riski yüksek ülkeler sıralamasında

Şekil 2.7. Falkenmark su stres indeksine göre havzalarda kişi başına düşen su miktarı (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Bakanlığı, 2021).



raklık” yaşandığı anlaşılmaktadır.





Şekil 2.9. Tekirdağ su stresi haritası (Aqueduct, 2024).

Su Riski Atlası'na (Aqueduct, 2024) göre Tekirdağ'da kıyı şeridinde en yüksek seviyede, iç kısımlarda ise orta-yüksek seviyede su stresi mevcuttur (Şekil 2.9). Bu öncelik nedeniyle mevcut su kaynaklarının korunması ile verimli kullanım, geri kazanım/yeniden kullanım ve kaynak kapasitelerinin artırılmasına yönelik çalışmalar olarak kategorize edilebilecek kontrol tedbirleriyle etkin ve sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi zorunludur.

AB, yerüstü ve yeraltı sularının daha fazla kirlenmesini önlemek ve su ortamını korumak amacıyla 2000/60/EC Yönergesini yayımlamıştır. Bu yönergeyle AB'ne üye olan her ülkenin 2015 yılına kadar yüzey sularında “iyi çevresel durum” oluşturması zorunlu kılınmıştır. Avrupa Konseyi ise 2008/105/EC sayılı Direktif ve 2013/39/EU sayılı Direktifi yayınlamıştır. Bu direktiflerle Çevresel Kalite Standartları (EQS) belirlenmiştir. Söz konusu standartlar 21 adet pestisit ve öncelikli kirleticiye yönelik olarak yerüstü sularında uygulanması gereken sınırları içermektedir (Papadakis, Tsaboula, Vryzas, Kotopoulou, Kintzikoglou ve Papadopoulou-Mourkidou, 2018).

Küresel olarak artan talebi karşılamak için tarımsal faaliyetlerin 2050 yılına kadar %60 artması ve gelişmekte olan ülkelerde %100 daha fazla gıda üretilmesi gerekmektedir.

Ancak bu tarımsal kapasite artışının sağlanması sulama için gereken suyun mevcudiyeti ile direk olarak ilişkilidir. Tarımsal kapasite kadar su kullanımındaki artış içilebilir tatlı su kaynaklarının sürdürülebilirliğini ortadan kaldıracaktır. Bu nedenle tarım sektörünün su kullanım verimliliğini artırmak için su kayıplarının azaltılması ve özellikle suyla ilişkili olarak ürün veriminin de ivedilikle artırılması gerekmektedir (Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, 2021). Sulamanın ihtiyacı karşılayacak biçimde kontrollü yapılması ve tarımsal sızıntıların su kaynaklarına karışmasının önüne geçilmesi başta olmak üzere tarım uygulamalarının sulama açısından süreç iyileştirmesine tabi tutulması uzun dönemdeki talebi karşılamak için elzem olacaktır. Tarımsal sulama verimliliğini artırmak amacıyla yapılan ve yaygınlaştırılması gereken uygulamalar vardır. Bunlar arasında kapalı sistem uygulaması, modern sulama teknikleri ve birim suyun daha fazla alanı sulaması için etkin kullanılması gibi tarım metotlarının uygulanması bulunmaktadır. Tarımsal drenajın ve sulamadan dönen suların geri kazanılması da bu çalışmalar arasında yer alır. Sulamadan dönen suların yeniden kullanılması, mevcut su kaynaklarının talebini azaltacak ve önemli ölçüde su tasarrufuna katkı sağlayacaktır. Sulama Sistemlerinde Su Kullanımının Kontrolü ve Su Kayıplarının Azaltılmasına İlişkin Yönetmelik 16.02.2017 tarih ve 29981 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe girmiştir. Tarımsal sulama sistemlerinde uygulanacak kısıt ve önlemler burada detaylarıyla belirtilmiştir (Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, 2023).

Kaynak kapasitesinin korunması çalışmaları son derece önemlidir. Ancak içme sularının arıtılarak kullanımı da mevcut kaynakların kullanımda tutulması için kritik önem taşımaktadır. Arıtmaların sürdürülebilir yatırım statüsünde olması için titizlikle hesaplanan projeksiyonlara göre yapılmış projelerin hayata geçirilmesi gerekmektedir. Seçilen metotların işletme maliyetlerinin düşük olması da seçim kriterleri arasında mutlaka yer almalıdır. Bu kriter zorlu ekonomik koşulların yaşandığı dönemlerde daha da önem kazanmaktadır. Düşük maliyetli ve yurtiçinde üretilebilir arıtma metotlarının yaygınlaşması içme ve kullanma suları kullanım fiyat ölçeklerinin sosyal adalete uygun sınırlar içerisinde kalmasına katkı sunacaktır.

2.4.1. Mevcut İçme Suyu Arıtım Yöntemleri

Ulusal Havza Yönetim Stratejisi (UHYS)’ne göre ülkemizdeki su kaynakları planlama ve ölçekleme açısından 25 ana su havzası, 1.848 alt havza, 14.608 mikro havzaya bölünmüştür (Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, 2021). İçilebilir tatlı su temin edilen

kaynakların korunması ve izlenmesine yönelik mevcut temel mevzuat aşağıdaki gibidir (Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, 2024).

- Havza Yönetim Planlarının Hazırlanması, Uygulanması ve Takibi Yönetmeliği (18.01.2019 tarih ve 30659 sayılı Resmi Gazete)
- İçme Suyu Temin Edilen Suların Kalitesi ve Arıtılması Hakkında Yönetmelik (6/7/2019 Tarih ve 30823 Sayılı Resmi Gazete)
- İçme Suyu Temin ve Dağıtım Sistemlerindeki Su Kayıplarının Kontrolü Yönetmeliği Teknik Usuller Tebliği (16/7/2015 Tarih ve 29418 Sayılı Resmi Gazete)
- Hassas Su Kütleleri İle Bu Kütleleri Etkileyen Alanların Belirlenmesi ve Su Kalitesinin İyileştirilmesi Hakkında Yönetmelik (23/12/2016 Tarih ve 29927 Mükerrer Sayılı Resmi Gazete)
- İçme-Kullanma Suyu Havzalarının Korunmasına Dair Yönetmelik (28/10/2017 Tarih ve 30224 Sayılı Resmi Gazete)
- Yeraltı Sularının Kirlenmeye ve Bozulmaya Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik (07.04.2012 Tarih ve 28257 Sayılı Resmi Gazete)
- Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği (30.11.2012 Tarih ve 28483 Sayılı Resmi Gazete)
- Yüzeysel Sular ve Yeraltı Sularının İzlenmesine Dair Yönetmelik (11.02.2014 tarih ve 28910 sayılı Resmi Gazete)

Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği, yerüstü sular ile kıyı ve geçiş sularının biyolojik, kimyasal, fiziko-kimyasal ve hidromorfolojik özelliklerinin belirlenmesini, sınıflandırılmasını, su kalitesinin ve miktarının izlenmesini, bu suların kullanım maksatlarının sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu bir şekilde korunması, kullanılması ve iyi su durumuna ulaşılması için alınacak tedbirlerin belirlenmesini amaçlamaktadır. 30.11.2012 tarih ve 28483 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe giren bu yönetmelik, eklerinde bazı pestisitler için sınır değerler içermektedir. Bu yönetmeliğin son değişikliğinde Imazamox için ise herhangi bir sınır değeri belirlenmemiştir (Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği, 2021).

İçme Suyu Temin Edilen Yüzeysel Suların Kalitesine ve Arıtılmasına Dair Yönetmeliğin amacı, içme suyu sağlanan veya sağlanması planlanan yerüstü sularını (akarsular, dereler, göller, barajlar, denizler vb.) ve yeraltı sularını (kuyular, kaynaklar, su toplama galerileri vb.) kapsayan prensipleri, kalite standartlarını belirlemektir. Ayrıca, bu suların içme ve kullanma suyu olarak kullanılabilmesi için gerekli arıtma seviyelerini ve arıtma tesislerinin planlanması ve işletilmesine dair yönergeleri içermektedir. Yönetmeliğin son değişikliğinin ekindeki tabloda Imazamox ile ilgili özellikli bir sınır değeri olmayıp Toplam Pestisit ile ilgili A₁ sınıfındaki sulara yönelik bir değer bulunmaktadır. Çizelge 2.2’de söz konusu sınır değeri yer almaktadır.

Çizelge 2.2. Kategorilere göre su kalitesi standartları (İçme Suyu Temin Edilen Yüzeysel Suların Kalitesine ve Arıtılmasına Dair Yönetmelik, 2021).

No	Parametre	CAS No	Birim	Kılavuz Değerler		
				A ₁	A ₂	A ₃
83	Toplam Pestisit		mg/L	0,0005	-	-

Not 1: Tablodaki A₁ sınır değerine kadar olan sular A₁ sınıfında, A₁ sınır değerinden A₂ sınır değerine kadar olan sular A₂ sınıfında, A₂ sınır değerinden A₃ sınır değerine kadar olan sular A₃ sınıfındadır. Bir parametre için herhangi bir sınıf sınır değeri verilmemiş olması, o parametrenin o sınıftaki arıtma süreçleri ile giderilemediğini göstermektedir.

$$\text{Not 2: Arıtma Verimi (\%)} = \frac{\text{Giriş Konsantrasyonu} - \text{Çıkış Konsantrasyonu}}{\text{Giriş Konsantrasyonu}} \times 100$$

İçme ve kullanma sularının kalite kategorilerinden;

1. A₁: Basit fiziksel arıtma ve dezenfeksiyon ardından içilebilir hale gelen suları,
2. A₂: Fiziksel arıtma, kimyasal arıtma ve dezenfeksiyon ardından içilebilir hale gelen suları,

3. A₃: Fiziksel arıtma, kimyasal arıtma, ileri arıtma ve dezenfeksiyon ardından içilebilir hale gelen suları ifade eder (İçme Suyu Temin Edilen Yüzeysel Suların Kalitesine ve Arıtılmasına Dair Yönetmelik, 2021).

İçme ve kullanma sularının sağlanması gereken kıstaslara yönelik mevzuat ise Sağlık Bakanlığı tarafından yayımlanmıştır. İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik (ilk yayın 17.02.2005 tarih ve 25730 sayılı Resmi Gazete) bu kıstasları güncel olarak barındırmaktadır. İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik'in amacı, insanların tüketimi için üretilen suların teknik ve sağlığa uygun gerekliliklere uyumunu sağlamak, suyun kalite standartlarını belirlemek, kaynak sularının ve içme sularının üretimi, paketlenmesi, etiketlenmesi, satışı ve denetimi ile ilgili izlekleri ve kuralları düzenlemektir (İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik, 2021). Su kaynakları parametre bazında değerlendirilerek sınır değerleri sağlamayan parametreler için ilgili otorite tarafından içme suyu arıtma tesisleri planlanarak hayata geçirilmektedir. Yönetmelik ekinde parametreler ile sınır değerlerinin kimyasal parametreler kısmında Çizelge 2.3'deki pestisitler ve toplam pestisitlere yönelik kısıtlar bulunmaktadır.

Çizelge 2.3. Parametreler ve sınır değerleri (İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik, 2021)

Parametre	Parametrik Değer	Birim	Notlar
Pestisitler	0,10	µg/L	Not 2, 6 ve 7
Toplam pestisitler	0,50	µg/L	Not 2, 6 ve 8

Not 2: İzinli kaynak ve içme suyu tesislerinde bu parametrelerin yılda bir kez izlenmesi yeterlidir.

Not 6: Pestisitler; Organik insektisitler (böcek öldürücüler), Organik herbisitler (bitki öldürücüler), Organik fungusitler (mantar öldürücüler), Organik nematositler (solucan, kurt öldürücüler), Organik akarisitler, Organik algisitler (yosun öldürücüler), Organik rodentisitler (kemirici öldürücüler), Organik slimisitler (balçık, salgı öldürücüler) ile, bunlarla bağlantılı ürünleri (diğerlerinin yanı sıra, büyüme kontrol edicileri) ve bunların ilgili metabolitlerini, parçalanma ya da reaksiyon ürünlerini ifade eder.

Söz konusu pestisitlerden suda bulunması muhtemel pestisitler izlenir.

Not 7: Parametrik değer her bir pestisit için uygulanır. Aldrin, dieldrin, heptaklor ve heptaklor epoksit için parametrik değer 0,030 µg/L'dir.

Not 8: "Toplam Pestisitler" izleme süreci içinde tespit edilen ve sayılan her bir pestisitinin toplamını ifade eder.

Avrupa içme suyu direktifleri incelendiğinde ise içme suyundaki her bir pestisitinin maksimum konsantrasyonu 0.1 µ L⁻¹'in altında olması gerektiği ve pestisit türlerinin toplam konsantrasyonu 0.5 µ L⁻¹'i aşmaması gerektiği görülmektedir. Bu sınırlar AB üye ülkeler açısından değerlendirildiğinde genellikle içme suyundaki potansiyel zararlı maddelerin aktif karbonla adsorbe edilmesi yoluyla sağlanır (Morlay, Quivet, Pilshfer, Faure ve Joly, 2012).

Ulaşılması gereken su kalitesi standartları için su kaynağının karakteri doğrultusunda çeşitli metotlar kullanılmaktadır. Kullanılan metotlar parametreye göre Çizelge 2.4'te belirtilmiştir (Türkiye Belediyeler Birliği, 2015).

Çizelge 2.4. İçme suyu arıtma prosesleri (Türkiye Belediyeler Birliği, 2015).

Su Kalite Parametresi	Proses Bileşenleri
Bulanıklık/Parçacık (Partikül Madde) Giderimi	Koagülasyon, Flokülasyon, Durultma (Basit ya da Lamelli Çökelme, Katı Madde Temas Birimleri, Çözünmüş Hava Flotasyonu), Katı Madde Temas Birimleri, Çözünmüş Hava Flotasyonu, Filtrasyon (Hızlı -konvansiyonel ya da direkt- Kum Filtreleri, Yavaş Kum Filtrasyonu, Diatome Toprağı Filtrasyonu), Mikrofiltrasyon, Ultrafiltrasyon, Nanofiltrasyon, Ters Osmos
Bakteri, Virüs, Kist Giderimi veya İnaktivasyonu	Giderim-Filtrasyon (yukarıdaki metotlar), İnaktivasyon-Dezenfeksiyon (Klor, Kloramin, Klordioksit, Ozon, UV)
Renk (Gerçek; Çözünmüş Renk)	Koagülasyon (Hızlı Kum Filtrasyonu/Mikrofiltrasyon), Ultrafiltrasyon veya Nanofiltrasyon, Adsorpsiyon (Granüler Aktif Karbon/Toz Aktif Karbon/Sentetik Reçineler-İyon Değişimi), Oksidasyon (Ozon, Klor, Potasyumpermanganat, Klordioksit)

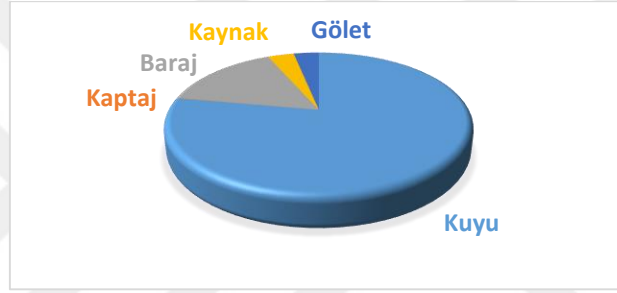
Çizelge 2.4. İçme suyu arıtma prosesleri (devamı)

Tat ve Koku Kontrolü	Oksidasyon (Ozon, Klor, Klordioksit, Potasyumpermanganat), Adsorpsiyon (GAC/PAC)
Uçucu Organik Maddelerin Giderimi	Hava ile Sıyırma, GAC Adsorpsiyonu, Bu metotların birlikte kullanımı
Dezenfeksiyon Yan Ürünleri Kontrolü	Öncü Madde (Perküör) Giderimi (Arttırılmış Koagülasyon veya Yumuşatma, GAC Adsorpsiyonu, Biyolojik Aktif Karbon (BAC)/Ön Ozonlama ile Birlikte GAC, Nanofiltrasyon), Dezenfeksiyon Yan Ürünleri Giderimi, GAC Adsorpsiyonu, Hava ile Sıyırma (kısmi giderim)
Demir ve Mangane Giderimi	Ön oksidasyon ile oluşan çökeltilerin filtrasyonu; Adsorpsiyon/Oksidasyon (Kum ve/ya Antrasit Filtre Malzemesi, Yeşil Kum Malzeme), Polifosfat İlavesi
Sertlik Giderimi	Kireç ile Yumuşatma, İyon Değişimi, Nanofiltrasyon, Ters Osmos
İnorganik ve Organik Kimyasal Giderimi	İyon Değişimi, Biyolojik Arıtma, GAC veya PAC ile Adsorpsiyon, Kimyasal Oksidasyon, Ters Osmos
Korozyon veya Tortu Kontrolü	Son Arıtma (pH Ayarı, İnhibitör İlavesi)

Su içerisindeki tat, koku ve rengin giderilmesi, klor ve klor bileşikleri, trihalometanlar (THM) ve organik maddelerin, arsenik, selenyum, fenol, yüzey aktif maddeler, doymuş hidrokarbonlar, pestisitler gibi bileşenlerin giderilmesi, adsorpsiyon işlemiyle sağlanabilir. Bu işlem, genellikle aktif karbon veya diğer adsorban malzemeler kullanılarak gerçekleştirilir. Ham suyun kalitesine bağlı olarak, ozonlama, havalandırma, koagülasyon, çöktürme ve filtreleme gibi ön arıtma adımları uygulanabilir. Tüm proje kısıtları ön arıtma seçenekleri ve yer seçimi dâhil olacak şekilde muhakkak pilot arıtılabilirlik çalışmalarıyla belirlenmelidir. Filtre tanklarında kullanılacak adsorban malzemenin istenen fiziksel ve kimyasal özellikleri önceden belirlenmelidir. Tasarım hesaplarında suyun pH seviyesi, boş yatak temas süresi, filtrasyon hızı, özellikli yüzey alanı, adsorbanın tutma kapasitesi, tanecik boyutu, adsorbanın performansını etkileyen faktörler ve adsorbanın değiştirme süresi göz önünde bulundurulur. Sürekli çalışma için paralel döşenmiş hattı olan ve değişim vana düzeneği pratik şekilde tasarlanmış en az iki

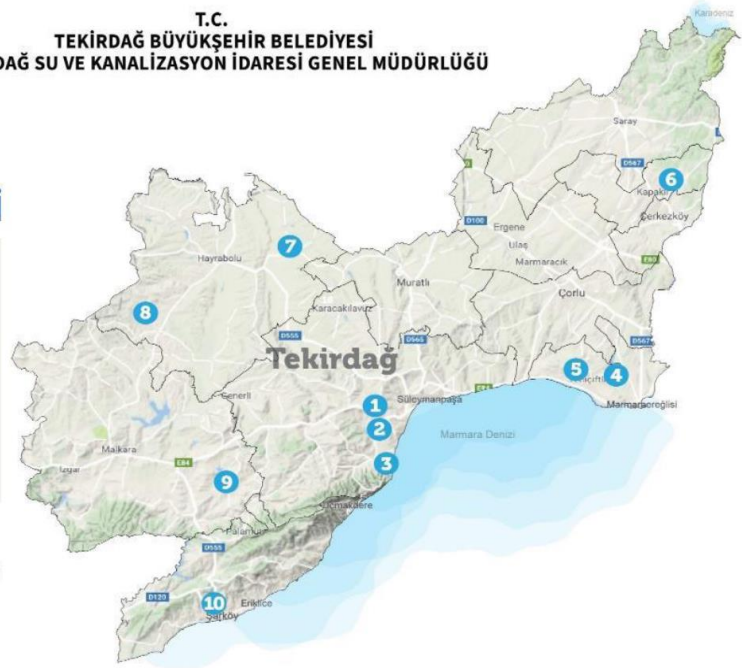
adsorpsiyon ünitesi düşünülmelidir. Adsorbanın kapasitesi dolduğunda adsorban yenilenir. Filtre yatağının temizlenmesi için geri yıkama yapılabilir. Geri yıkama aralığı ve süresi, adsorbanın kapasitesini azaltmayacak şekilde belirlenir. Kullanılacak adsorban malzemesi, Gıda Maddeleri Tüzüğü veya benzer uluslararası standartlara uygun olmalıdır (İlbank, 2013).

Tekirdağ İli'nde içme ve kullanma suyu temin edilen kaynakların dağılımı Şekil 2.10'da görülmektedir (Çevre Durum Raporu 2019, 2022). Şehrin su ihtiyacının hali hazırda ağırlıklı olarak yeraltı su kaynaklarından temin edildiği anlaşılmaktadır. Tekirdağ'da toplamda 10 adet içme ve kullanma suyu arıtma tesisi hizmet vermektedir (Çevre Durum Raporu 2019, 2022).



Şekil 2.10. Tekirdağ'da 2019 yılında içme ve kullanma suyu temin edilen kaynaklar (Çevre Durum Raporu 2019, 2022).

Su temin edilen kaynaklarından alınan su miktarları ve arıtılma durumları ile İçme Suyu Arıtma Tesisleri Şekil 2.11'de (TESKİ, 2023) ve Çizelge 2.5'te yer almaktadır (Çevre Durum Raporu 2019, 2022).



İ.A.T. : İçme Suyu Arıtma Tesisi
S.PAŞA : Süleymanpaşa
M.EREĞLİSİ : Marmaraereğlisi
H.BOLU : Hayrabolu

Şekil 2.11. Tekirdağ İli içme suyu arıtma tesisleri (TESKİ, 2023).

Şebeke sularının arıtılma durumlarına yönelik olarak hazırlanan Çizelge 2.5 incelendiğinde yerüstü su kaynaklarının arıtılmadığı görülmektedir. Mer'i çevre mevzuatında IMI grubu herbisitlere yönelik izleme parametrelerinin yer almaması ve yerüstü su kaynaklarının genelde arıtılmadan kullanıma uygun olması, bu kaynaklarda tarımsal üretim nedeniyle kimyasal sızıntı yaşanması riskinin titizlikle yönetilmesini zorunlu kılmaktadır.

Arıtılan su hacmi toplam şebekeye verilen suyun yalnızca %20'sidir. Regülasyon değişikliği, su kalitesi değişikliği ya da kirlilik riskinin yönetilememesi gibi sebeplerle daha fazla oranda suyun arıtılması halinde su fiyatlandırma mekanizmasını sosyal adalete ağırlık verecek şekilde yönlendirmek daha da zor olacaktır. Artan arıtma maliyetleri halkın ödediği su ücretinde artışlara neden olacaktır.

Çizelge 2.5. Tekirdağ’da içme ve kullanma suyu kaynaklarının arıtılma durumları (TESKİ, 2023)

Kaynak Adı	Kaynak Türü	Alınan Su Miktarı (m ³ /yıl)	Arıtma Durumu
Hasköy, Dambaslar ve Pınarça Yeraltı Su Kuyuları	Yeraltı	58.312.761	Arıtılmıyor
Muhtelif Kuyular	Yeraltı	352.843	Arıtılıyor
Müstecep-Deliler Göleti	Yerüstü	260.520	Arıtılıyor
Şarköy Göleti	Yerüstü	253.244	Arıtılıyor
Türkmenli Göleti	Yerüstü	1.914.953	Arıtılıyor
Naip Barajı	Yerüstü	8.919.488	Arıtılıyor
Kaptaj	Yerüstü	65.000	Arıtılmıyor
Çokal Barajı	Yerüstü	2.790.969	Arıtılıyor
Kaynak	Yeraltı	2.529.241	Arıtılmıyor

2.4.2. Yenilikçi İçme Suyu Arıtım Yöntemleri ve Araştırmaları

İçme suyunun yerel mevzuat kapsamında istenen kıstasları sağlanması için geleneksel çok aşamalı arıtma süreçleri yaygın şekilde uygulanmaktadır. Bu arıtma sistemleri suya çeşitli kimyasalların eklenmesini içerir ve bu yöntemlerin kimyasal kalıntıları içme suyu kaynağında kalmaya devam edebilir. Hedeflenen kirleticinin azaltılması söz konusu olsa da klor kullanımı gibi halen yaygın şekilde uygulanan dezenfeksiyon yöntemleri, yüzey suyundaki çeşitli doğal organik maddelerle reaksiyona girerek çeşitli kanserojen ve mutajenik trihalometanların oluşumuna neden olabilir. Tarımda rastgele pestisit kullanımı sızıntı ve taşınımlarla yüzey sularının tarımsal faaliyetlerin dolaylı etkisiyle kirlenmesine sebep olabilir. Araştırmalar, geleneksel içme suyu arıtma süreçlerinin metolaklor ve terbutilazin gibi pestisitlerin yüzey suyundan uzaklaştırılmasında etkili olmadığını göstermiştir (Sarkar, Venkateswralu, Bhattacharjee ve Kale, 2007). Kaur ve Kaur (2024) araştırmalarında yoğun tarımsal ve antropojenik faaliyetler nedeniyle temiz içme ve sulama suyu temininin her geçen gün güçleştiğini, geleneksel yöntemlerin karmaşık işletme süreçleri ve yüksek maliyetleri nedeniyle artık ihtiyaçlara yanıt veremediğini belirtmişlerdir.

Küresel iklim değişikliği sorununun artık kabul edildiği ve bu sorunu çözmeye yönelik çalışacak yine küresel bir iradenin oluştuğunun en büyük kanıtı Paris Anlaşması'nın katılımcı tüm ülkeler tarafından tek bir günde kabul edilmesi ve günümüzde yaklaşık 140

ülkenin net sıfır emisyon hedefini açıklamasıdır. Ülkemiz Paris Anlaşması'na taraf olması, Avrupa Yeşil Mutabakatı'na uyma planı ve 2053 Net Sıfır Emisyon Hedefi'ni açıklamasıyla temelde Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizmasına uyum için Yeşil Dönüşüm sürecine girmiştir. Ekonomik faaliyetlerin artarak devam edebilmesi için sürdürülebilir büyüme ivmesi ve 2038 yılında emisyonların maksimuma ulaştıktan sonra düşüşe geçmesi planlanmaktadır. Yeşil dönüşümü gerçekleştirebilmek amacıyla teknoloji geliştirmeye yönelik finansman sağlanmasıyla politika ve mevzuat oluşturma gibi birçok alanda aynı anda koordineli çalışmalar yapmak önemlidir. Temiz teknolojilere olan ilgiye yanıt verme, yeşil kalkınmayı sağlama, karbon yoğun üretim yapılarını dönüştürme ve çevresel kirliliği azaltma çabaları bu konudaki farkındalığın artmasının yanı sıra AB başta olmak üzere birçok ülke ile ticari faaliyetlere devam edebilme gibi nedenlerle özellikle tedarikçi ülkeler tarafından ilgi duyulan hususlardır. Ülkemizde iklim değişikliğiyle mücadele ve uyum için "İklim Değişikliği, Çevre ve Biyoçeşitlilik", "Temiz ve Döngüsel Ekonomi", "Temiz, Erişilebilir ve Güvenli Enerji Arzı", "Yeşil ve Sürdürülebilir Tarım" ve "Sürdürülebilir Akıllı Ulaşım" olmak üzere beş ana tema üzerinde yoğunlaşılması öngörülmektedir (Birpınar ve Dinçbaşı, 2022).

Çevresel sürdürülebilirlik için su ayak izinin azaltılması ve daha kolay uygulanabilir arıtım tekniklerine geçişin hızlandırılması için alternatif seçeneklerin artırılması gerekmektedir (Terrón-Sánchez vd., 2023). Yenilikçi arıtma yöntemleri kullanılarak atık sularındaki eser miktarda bulunan kirleticilerin giderildiği araştırmalar mevcuttur. Örneğin elektrodializ, elektrokimyasal reaksiyon, iyon değişimi, membran filtrasyonu ve ters osmoz gibi teknikler bunlar arasında bulunmaktadır. Bu teknikler genellikle fazla çamur oluşumuna neden olduğu gibi yükseklik yatırım veya işletme maliyetleri ve düşük verimlilik gibi çeşitli sınırlamalara sahiptir. Ayrıca küçük ölçekli işletmeler tarafından kullanılmaları genellikle uygun değildir. Ahmad, Tanweer, Mir, Alam, Ikram ve Sheikh (2023) araştırmalarında adsorpsiyonun verimli, hızlı ve toksik kirleticilere karşı duyarlı olduğu için alternatif bir yöntem olarak tercih edildiğini, ilk yatırım maliyetinin düşüklüğü, toksik olmayan yan ürünler üretmesi, verimliliği ve etkinliği ile proje tasarımının görece kolay olmasının da tercih edilmesinde rol oynadığını belirtmişlerdir. Adsorpsiyon süreçleri bu özelliklerinden dolayı son yıllarda büyük ilgi görmektedir (Gök ve Mesutoğlu, 2018).

2.5. İçme Suyu Arıtımında Adsorpsiyon Yöntemlerinin Kullanılması

Adsorpsiyon aslında doğal çevrimlerle dünya var olduğundan beri işleyen bir süreçtir. Konvansiyonel kimyasal arıtma yöntemlerinde zorlukla tutulan zehirli, renkli, kokulu ve eser miktarda olan kirleticilerin, adsorban adı verilen bir katı madde yüzeyinde kimyasal ve fiziksel bağlarla bağlanarak sudan ayrılma işlemidir. Çözeltilerde adsorpsiyon, ilk olarak 1785 yılında Lowitz tarafından incelenmiş ve kısa bir süre sonra, şekerden renk giderimi için rafinasyon işlemlerinde kullanılmıştır. 19. yüzyılın ikinci yarısından itibaren, Amerika'da su arıtma tesislerinde aktive edilmemiş odun kömürü filtreleri yaygın olarak kullanılmıştır. I. Dünya Savaşı sırasında, gaz maskeleri için küçük miktarlarda granüler aktif karbon üretilmiştir. 1920'lerde toz halindeki aktif karbon (PAC), klorofenol gibi maddelerle kirlenmiş su kaynaklarında tat ve koku kontrolü için kullanılmıştır. Su kaynaklarının arıtımında kullanılan ilk granüler aktif karbon birimleri 1929'da Almanya'nın Hamm şehrinde ve 1930'da Michigan'ın Bay City şehrinde inşa edilmiştir. 1900'lerin ortalarında, endüstriyel atıklar, tarımsal kimyasal maddeler ve kanalizasyon deşarjları nedeniyle kirlenen su kaynaklarına insanların artan ilgisiyle, çeşme sularından organik maddelerin uzaklaştırılmasında kullanılan adsorpsiyon sürecine ilgi artmıştır (Ercan, 2012). Su kaynaklarından pestisitlerin geleneksel metotlarla giderilmesi fizibil olmadığından biyolojik adsorpsiyon gibi arıtım yaklaşımlarının kullanılması önemli bir ihtiyaç haline gelmiştir (Tahmasebi, Beni, Azhdarpoor ve Moeini, 2023). Adsorpsiyonda fazlar sıvı-sıvı, sıvı-katı, gaz-sıvı veya gaz-katı olabilir. Adsorban olarak bilinen adsorplayıcı faz ve adsorbat olarak adlandırılan adsorplanan faz bulunmaktadır. Bütün katı maddeler, üzerlerine temas eden gaz veya sıvı moleküllerini çekme yeteneğine sahiptir (Rouquerol, Rouquerol, Llewellyn, Maurin ve Sing, 2013). Adsorpsiyonu etkileyen faktörler arasında çözünürlük en önemlilerindendir. Fazlar arasındaki geçişin denge durumuna gelmesinin incelenmesiyle adsorpsiyon mekanizması anlaşılır. Denge durumundaki madde derişimleri adsorpsiyonun verimliliği açısından önemlidir.

Adsorban seçimi optimum adsorpsiyon verimi elde etmek için oldukça önemlidir. Çünkü sulu çözeltiden giderilmek istenen adsorbat karakterine yönelik adsorban seçimi sayesinde en hızlı, kolay ve verimli giderim sağlanır. Adsorban seçimi yapılırken bulunabilirlik, düşük maliyet, toksik olmama, aşındırıcılık, yüksek kapasite ve kolay rejenerasyon adımlarıyla minimum kayıp gibi faktörlerin de dikkate alınması gerekmektedir. Adsorbanın gözenekliliği ve yüzey alanı gibi özellikleri, adsorpsiyon kapasitesini önemli

ölçüde etkiler. Bu nedenle farklı adsorbanların özelliklerini incelemek sonrasında da adsorplama kapasitesini belirlemek yerinde olacaktır. Yapılan araştırma çalışmalarında genellikle iyi bir adsorbanın daha yüksek gözenekliliğe ve daha geniş bir yüzey alanına sahip olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni daha fazla adsorbat için daha fazla alan sunmasındandır. Adsorbanlar gözenekli bir yapıya sahiptir, bu gözenekler yüzey alanını artırır ve adsorpsiyonun kinetiğini hızlandırır, bu da adsorpsiyon dengesi için daha az zaman gerektirir (Bhandari, 2017).

Doğaya uyumlu sistemlerle bilimsel gelişmenin sağlanması önceki yüzyılda denense de istenen etkili sonuçlara ulaşamadığı zamanlar da olmuştur. Su arıtımında adsorpsiyon sistemleri mekanizmanın tam anlaşılabilmesi ya da kirleticiye özel üretilmiş adsorbanlar kullanılmaması gibi sebeplerden özelleşememiştir. Bilimsel gelişmeler ilerledikçe daha detay hesaplamalar yapılması mümkün olmuş, özellikle suda eser miktarda bulunan kirleticilerin giderim mekanizmalarının incelenmesi mümkün kılınmıştır. Akademik araştırmalarda farklı kirleticilere yönelik çoklu, sentezlenmiş ya da aktiveleştirilmiş adsorbanların kullanılması da bu amaca yöneliktir. Metot çok eski olsa da uygulama adımları ve adsorban seçimleri oldukça yenilikçidir.

Pestisitler genellikle kimyasal oksidasyon, koagülasyon, biyolojik ve fotokimyasal bozunma gibi çeşitli geleneksel arıtma yöntemleri kullanılarak farklı derecelerde limitleri sağlayacak şekilde sulu çözeltilerden uzaklaştırılabilir. Birçok tehlikeli pestisit etkili bir şekilde uzaklaştırılması için karmaşık, zaman alan ve maliyetli konvansiyonel yöntemler geliştirilmiştir. Oksidasyon, katalitik bozunma, membran filtrasyonu, biyolojik ve kimyasal arıtma bunlardan bazılarıdır. Ancak kolay uygulanabilirliği ve düşük maliyeti nedeniyle adsorpsiyon pestisit gideriminde de son yıllarda en çok tercih edilen tekniktir (Hassaan, Eldeeb ve Nemr, 2022). Su kirliliğinin giderilmesinde ticari olarak en yaygın adsorban aktif karbondur. Aktif karbonun ithal bir ürün olması, nispeten hidrofilik mikrokirleticilerin yetersiz giderimi, görece yüksek temas süresi ihtiyacı, yüksek işletme maliyeti gibi dezavantajları mevcuttur. Bu dezavantajlar kolaylıkla temin edilen hatta belki de kullanım alanında üretilen, daha düşük maliyetli, döngüsel ekonomi ilkelerine uygun şekilde bertarafı esnasında da bir hammadde olabilen adsorban arayışının sürmesine neden olmaktadır (Kaur ve Kaur, 2024).

2.5.1. Adsorpsiyon Mekanizması

Adsorpsiyon, fazların ara yüzeyindeki moleküller arasındaki dengesiz kuvvetlerden kaynaklanan bir olaydır ve fazlardan birinin yüzeyinde bir birikme meydana getirir. Derişim arttığında pozitif, azaldığında negatif adsorpsiyon meydana gelir. Sıvılar, yüzeydeki mikro çatlaklarda ve gözeneklerde yoğunlaşırsa buna kılcal adsorpsiyon denir. Adsorpsiyonun taneciklerin tüm yüzeylerinde ve kenar çizgileri boyunca gerçekleştiği durumda yüzeyin doyduğu anlaşılr. Adsorpsiyon işleminde oluşan denge çeşitli matematik modellerle kestirimsel olarak açıklanır. Bu modeller adsorbanın birim kütlesine adsorbe edilmiş kimyasal miktar ile denge halindeki çözelti konsantrasyonu arasındaki ilişkiyi tanımlar. Sabit sıcaklıkta ve pH'ta adsorban yüzeyinde biriken madde miktarı ile çözeltide kalan madde konsantrasyonu arasında bir denge oluşana kadar adsorpsiyon işlemi devam eder. Adsorpsiyon sırasında adsorplanan madde miktarı, çözeltinin derişimine, pH'ına ve sıcaklığına bağlıdır. Sabit sıcaklık altında, adsorplanan madde miktarı derişimin bir fonksiyonu olarak kabul edilir. Denge noktasında, çözeltide adsorplanmamış çözünmüş madde derişimi, birim adsorban kütlesinde adsorplanan madde miktarına karşılık gelir ve bu durum adsorpsiyon izotermi ya da matematik modeli olarak adlandırılan bir sonuç fonksiyonunu oluşturur. Bir adsorpsiyonun bir izoterm ya da bir matematik modele uygun olması durumunda, şartlar değiştiğinde bu modele uyum hali de değişebilir. Bu nedenle, tek bir uygulanabilir model bulunmamaktadır. Langmuir ve Freundlich izotermi en yaygın olarak kullanılan izoterm matematik modelleridir.

Fiziksel adsorpsiyonun gerçekleşmesi için adsorbanla adsorbatın yüzeylerindeki gerilimler ve elektriksel kuvvatler etkilidir. Adsorbatın adsorbanın yüzeyine bağlanması için Van der Waals gibi kuvvetlerin etkileşime girmesi gerekmektedir. Ancak bu kuvvetler zayıf FT-IR ve bu nedenle adsorpsiyon geri dönüşümlüdür. Adsorbe edilen çözücünün moleküler çekim kuvvetine kapılır ve adsorbandan kolaylıkla ayrılır. Bu işlem doğal bir süreçtir. Çeşmeli (2011) araştırmasında bu tür adsorpsiyon için düşük sıcaklıkların yeterli olabileceğini, sıcaklık arttıkça adsorpsiyon derecesinin azalacağını, adsorpsiyonun çok katmanlı olacağını, aktivasyon enerjisinin 2-5 MJ/mol gibi düşük bir değerde olduğunu ve adsorbanın geri kazanımının çok kolay olduğunu belirtmiştir.

Kimyasal adsorpsiyon sürecinde ise adsorban ve adsorbat arasında zayıf ya da kuvvetli olacak şekilde çeşitli kimyasal bağlar oluşur. Bazı durumlarda aradaki bağlar

bilinen kimyasal bileşenlerden oluşmayabilir ve bağların uzunluğu değişkenlik gösterebilir. Kimyasal adsorpsiyonda adsorbanlar adsorbent yüzeyine kovalent bağlarla bağlanır. Bu nedenle, yüksek sıcaklıklarda kimyasal adsorpsiyon daha hızlı gerçekleşir. Kimyasal adsorpsiyon işlemi, geri dönüşü olmayan bir yapıya sahip olduğundan tek yönlü bir reaksiyon olarak kabul edilir. Kimyasal adsorpsiyon sürecinde, adsorbana yapışma kuvveti genellikle fiziksel adsorpsiyondan daha büyüktür. Adsorplanan maddenin desorpsiyonu sırasında adsorbanda ya da adsorbatta değişiklik meydana gelebilir. Kimyasal adsorpsiyon, sıcaklık arttıkça önce artar ve daha sonra azalır (Almezgagi, 2019).

Kimyasal ve Fiziksel Adsorpsiyonun karakteristik özelliklerine dair karşılaştırma Çizelge 2.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 2.6. Kimyasal ve fiziksel adsorpsiyonun özellikleri (Ercan, 2012).

Parametre	Kimyasal Adsorpsiyon	Fiziksel Adsopsiyon
Bağ Kuvvetleri	Moleküller içinde	Moleküller arasında
Adsorplayıcı	Bazı katı maddeler	Tüm katı maddeler
Adsorplanan	Kimyasal maddeler	Kritik sıcaklığın altındaki tüm gazlar, sıvılar ve çözünmüş katılar
Tersinirlik	Tersinir veya tersinmez olabilir	Tersinir
Hız	Sıcaklığa bağlı olarak hızlı veya yavaş olabilir	Hızlı ve difüzyon denetimli
Entalpi Etkisi	Çoğunlukla egzotermik reaksiyon ısıları mertebesinde	Daima ekzotermik yoğunlaşma mertebesinde

İyon değişimi de bir adsorpsiyon türüdür ve moleküler boyutta iyonik güçlerin çekim güçleriyle gerçekleşmektedir. Bu tür adsorpsiyonda genellikle bir iyon bir katının yüzeyine iyonik olarak tutunur.

Adsorpsiyonun değerlendirilmesi esnasında incelenecek kıstaslar yüzey etkileşimleri, adsorbat ve çözücünün özellikleri, mekanizmanın matematik modeli ve adsorbanın özellikleridir. Yüzey etkileşimleri tanımıyla adsorbat ve adsorbanın yüzey yapıları, adsorbatın çözünürlüğü ile adsorbanın yüzey gerilimi kastedilmektedir. Adsorbat ve çözücünün özelliklerinin incelenmesinde bakılması gereken hususlar derişim, moleköl kütle ve boyutları, polarite, yüzey yapısı ve kimyasal özellikler bu kategoride

değerlendirilebilir. Adsorbanın gözenek yapısı ve boyutu adsorpsiyonu etkileyen en temel hususlardandır. Adsorpsiyonun matematik modelinin tespiti sistemin anlaşılması ve kestirim yapılması için kritik bir parametredir. Ayrıca adsorpsiyonun termodinamik unsurları da önemlidir. Endotermik ya da ekzotermik reaksiyon olması adsorpsiyon hakkında bilgi verir. Adsorbanın özellikleri en ayrıntılı olarak anlaşılması gereken husustur. Katı maddeler kristal yapıya sahip olsun veya olmasınlar bir adsorpsiyon yeteneğine sahiptir.

Adsorpsiyon gücü yüksek olan doğal katılar arasında kömür, zeolit ve metal filizleri bulunurken, yapay katı örnekleri arasında aktif kömür, yapay zeolit, silika jel ve metal oksitler yer alır. Adsorbanların performans özellikleri, iç parçacıkların özellikleriyle büyük ölçüde ilişkilidir. Adsorpsiyon kapasitesi yüksek olan katılar genellikle gözenekli bir yapıya sahiptir. Adsorbent miktarı, parçacık boyutu, gözenek yapısı ve adsorbatın çözünürlüğü ile iyonlaşması da adsorpsiyon üzerinde etkilidir. Çözeltinin pH'ı, sıcaklığı ve derişimi da önemli etmenlerdir. Adsorbent yapısında, adsorbat moleküllerini adsorplayacak aktif fonksiyonel grupların veya artı/eksi yüklerin bulunması önemlidir. Negatif yüklü bir adsorbent yüzeyinde pozitif moleküller adsorplanırken, pozitif yüzeye sahip bir adsorbent yüzeyinde negatif yüklü moleküller kolayca adsorplanır. Partikül boyutu küçüldükçe genellikle adsorpsiyon artar, büyüdüğü azalır. Gözenek genişliği büyük olduğunda, adsorbat molekülleri gözeneklere kolayca nüfuz eder ve adsorpsiyon daha kolay gerçekleşir. Ancak, çok sık gözenekli yüzeylerde adsorpsiyon daha az olabilir. Adsorbent çözünürlüğü yüksek olduğunda adsorpsiyon zorlaşır. Adsorbent miktarı arttıkça, adsorbat molekülleriyle temas eden aktif merkezlerin sayısı artar ve dolayısıyla adsorpsiyon miktarı ve yüzdesi artar. Ancak, adsorbent gramı başına adsorplanan madde miktarı azalır. Adsorpsiyon sırasında aktif yüzeylerle etkileşecek negatif ve pozitif yüklü adsorbat molekülleri olmalıdır. Çözeltinin pH'ı, adsorbent ve adsorbatın kimyasını etkileyen önemli bir parametredir. Yüksek pH'lar, yüzeyin negatif yükleme eğiliminin artmasıyla pozitif yüklü iyonların adsorpsiyonu için yüzeyin daha elverişli hale gelmesine neden olabilir. Sıcaklığın adsorpsiyona etkisi sürecin ekzotermik veya endotermik olmasına bağlı olarak değişir. Adsorpsiyon düşük derişimlerde kısa sürede, yüksek derişimlerde daha uzun sürede maksimum seviyeye ulaşabilir. Adsorpsiyon hızı, sistemin karıştırılma hızına bağlı olarak film difüzyonu veya por difüzyonu ile kontrol edilebilir. Düşük karıştırma hızlarında, tanecik etrafındaki sıvı film kalınlığı artar ve film difüzyonu adsorpsiyonu sınırlar. Yeterli karıştırma

sağlandığında, film difüzyonu hızı por difüzyonu noktasına doğru artar. Genellikle por difüzyonu, yüksek hızda karıştırılan kesikli sistemlerde adsorpsiyon hızını sınırlayabilir.

2.5.2. Adsorban Çeşitleri ve Kullanım Alanları

Aktif karbon (AC), biyo-adsorbanlar, polimerik adsorbanlar, tarımsal atıklar, endüstriyel atıklar ve inorganik adsorbanlar gibi farklı tiplerde adsorbanlar mevcuttur (Hassaan vd., 2022). Aktif karbon farklı yapıdaki kimyasal maddeleri çözeltilerden uzaklaştırabilen karbon oranı çok yüksek olan ve yaygın şekilde uzun yıllardır kullanılan bir adsorbandır. Giderim verimliliği ve suda ikincil kirletici özellikte kalıntı bırakmaması sebebiyle küçük ya da büyük kapasiteli içme suyu arıtma sistemlerinde kullanılmaktadır. Aktifleştirme işlemleri, hammaddesinin çıkarılma maliyetleri ve ısı değeri nedeniyle aktif karbon maliyeti yüksek bir adsorbandır. Rejenerasyonu için çeşitli metotlar denense de düşük maliyetle istenen verim elde edilememiştir. Ayrıca bu esnada ek atıklar oluşmaktadır. Temiz su temini zorlaştıkça araştırmacıların su kirliliğini yönetmek için düşük maliyetli ve pratik kullanımlı adsorban tespiti için araştırmalar da artmaktadır. Sarkar vd. (2007) pestisitlerin uzaklaştırılması için diatomlu toprak, kaolin, montmorillonit, bentonit killeri, demir oksitler, gümüş kompleksli kitosan mikropartikülleri gibi alternatif adsorbanlar araştırılmakta olduğunu belirtmişlerdir. Alternatif adsorban hammaddesi olarak son yıllarda daha çok tarımsal atıklar, doğal malzemeler ya da endüstriyel atıklar hammadde olarak seçilmektedir. Bir sürecin atığından adsorban üretimi hammadde maliyetinin olmaması ya da düşük olması ve döğüsel ekonomi ilkeleri gereği tercih edilmektedir.

İyi bir adsorbanın ticari olarak tercih edilebilmesi için şu özelliklere sahip olması gerekir;

- Farklı adsorbatlar için yüksek adsorpsiyon yeteneği,
- Minimum adsorban kullanımı gerektirmesi,
- Hızlı tutunma için uygun kinetik ve taşıma özellikleri,
- Adsorban miktarı ve özelliklerinin korunması için temas edilen akışkan içinde düşük çözünürlük, kimyasal ve ısıl dayanıklılık,
- Kırılma ve aşınmanın önlenmesi için sağlamlık ve mekanik dayanıklılık,
- Tankların kolayca doldurulması ve boşaltılması için serbest akış özelliği,

- Uzun  m r için yüksek adsorpsiyon kapasitesi,
- İstenmeyen yan kimyasal reaksiyonlara karşı direnç,
- Düşük maliyet.

Bu  zelliklerin en kolay sağlanabileceği hammaddeler olan tarımsal atıklardan biyokömür üretmek alternatif bir adsorban arayışına katkı sunacaktır. Kaur ve Kaur (2024) araştırmalarında kolayca temin edilebilen hammaddeden, uygun maliyetli, çevreye zarar vermeyen, toksik olmayan, kolayca geri kazanılabilen ve biyolojik olarak parçalanabilen alternatif veya tamamlayıcı adsorbanların araştırılması su krizlerinin önüne geçilmesi için ciddi bir ihtiyaç olduğunu belirtmişlerdir.

2.6. Biyokömür

Yaklaşık 600 milyon insanın güvenli içme suyuna eri iminden yoksun olması nedeniyle tanımlanan Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi 6'nın (2030 yılına kadar herkes için su ve sanitasyonun mevcudiyeti ile sürdürülebilir yönetiminin sağlanması) hayata geçirilebilmesi için hızlı, sahada kullanımı uzmanlık gerektirmeyen ve ekonomik su arıtım alternatiflerinin oluşturulması gerekmektedir. Bu amaca hizmet edecek çözüm olarak biyokömürler, çeşitli kirleticileri su çözeltilerinden uzaklaştırma konusunda büyük bir kapasiteye sahiptir ve içme suyu arıtımında henüz kullanılmamış bir teknoloji olarak dikkat çekmektedir.

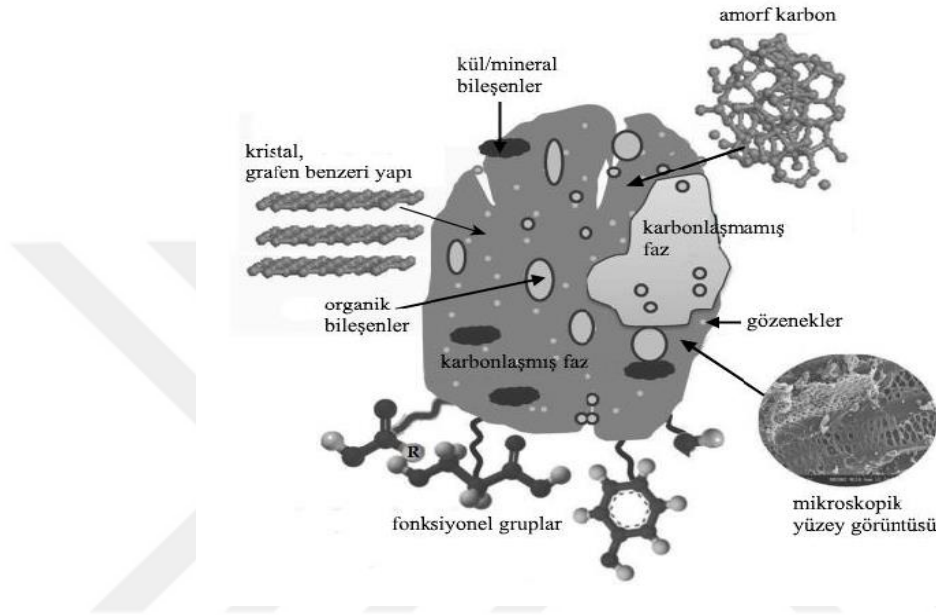
Uluslararası Biyokömür Girişimi (IBI) ise biyokömürü, biyokütlenin oksijenin sınırlı olduğu bir ortamda termokimyasal d n  m yle elde edilen katı bir materyal olarak tanımlar. Biyokütle, kuru karbonizasyon yöntemi ( rneėin, piroliz) kullanılarak işlenir ve bu işlem sonucunda biyokömür dâhil olmak üzere çeşitli ürünler elde edilir. Sun ve Tsang (2023)  alı malarında biyokömürü biyokütlenin termokimyasal parçalanması sonucu elde edilen bir ürün olarak tanımlamışlardır. Biyokömürün bu kadar ilgi çekici olmasının nedenlerini iki ana başlık altında tanımlamışlardır. İlk olarak, biyokömür üretimi karbonu nispeten istikrarlı bir şekilde depolayarak iklim değişikliğini hafifletebilir ve böylece sera gazlarının atmosfere salınımını azaltabilir. İkinci olarak ise gözenekli yapısı sayesinde biyokömür, geniş bir yüzey alanına ve bol miktarda yüzey fonksiyonel gruplarına (YFG) sahiptir, bu da onu  evre dostu, düşük maliyetli ve etkili bir adsorban/katalizör haline getirir.

Biyokömürle su arıtımı, mevcut düşük maliyetli yöntemlerle (kum filtrasyonu, kaynatma, güneş dezenfeksiyonu, klorlama vb.) karşılaştırıldığında çeşitli avantajlar sunmaktadır. Bunlar arasında düşük maliyeti ve hazır biyomateryaller kullanılarak basit becerilerle üretimi sayesinde düşük gelirli toplulukların kullanımına uygun olması ilk sırada yer almaktadır. Eskiden ana kirletici kaynağı olarak patojenler bilinir ve arıtma metotları temelde bu kirleticiye göre geliştirilmiştir. Ancak hızlı sanayileşme kimyasal kirliliği arttırdıkça bu kirliliğin giderimi için çözüm üretilmesi öncelik kazanmıştır. Biyokömür kimyasal ve fiziksel kirleticileri giderebilmesi nedeniyle modern dünyanın gözde adsorbantı olmaya adaydır. Biyokömürle arıtma konvansiyonel kimyasal metotlar gibi suda kalıntı bırakıp ikincil kirletici olmamaktadır. Gwenzi, Chaukura, Naubactep ve Mukome (2017)'ye göre biyokömürün su ve sanitasyon sistemlerine entegre edilmesi, doğrusal malzeme akışlarını terra preta sanitasyonu ile tutarlı bir şekilde döngüsel malzeme döngülerine dönüştürür. Amazon yağmur ormanlarının içinde bulunan, "Terra Preta" adı verilen verimli kara topraklar, biyokömür bakımından oldukça zengindir. Bu topraklar, "Çernozem" olarak bilinen ve içinde bulunan biyokömür yapısıyla tanınır ve bu karbon içeriği binlerce yıl boyunca toprakta kalabilir (Lehmann ve Joseph, 2009). Tarımsal atıkların (örneğin, mahsul artıkları) piroliz yoluyla biyokömüre dönüştürülmesi ve ardından su arıtımında kullanılması gibi, henüz potansiyeline büyük ölçüde ulaşamamış bir fırsat bulunmaktadır.

En yaygın olarak üretilen biyokömür odun kömürüdür. Ağaç talaşları ve atıkları, ekin artıkları, kabuk, kahve, yer fıstığı, fındık, ceviz, mısır, pirinç, çam, kil (Lehmann & Joseph, 2015), çim, tohum öğütmesi, meyve çekirdekleri, yosunlar, hayvan gübresi ve arıtma çamurları biyokömür üretiminde kullanılmaktadır (Hamit, 2019). Ayçiçeği sapından biyokömür üretimi konusunda bir araştırmaya rastlanmamıştır.

Biyokömür, saf karbon değildir, ancak içinde organik molekül karışımlarını oluşturan hidrojen ve oksijen gibi yan fonksiyonel grupları içerir (Ekmekyapar ve Şahinci, 2022). Hammaddesine ve üretim koşullarına bağlı olarak değişse de genellikle yüksek bir oksijen içeriğine sahip değildir. Bu nedenle, yüzeyindeki asit-baz fonksiyonel gruplarının aktivitesi düşük olması beklenir. Ancak biyokömür, organik bileşiklerin adsorpsiyonu, ağır metallerin uzaklaştırılması ve toprak iyileştirmesi gibi çevresel uygulamalarda potansiyel bir malzemedir (Beesley ve Marmiroli, 2011; Hamit, 2019). Bütün biyokömürler özgün karakterde, birbirinden farklı ve yapıları karmaşık olduğundan kimyasal olarak aydınlatılması oldukça güçtür. Biyokömürün organik kısmının büyük çoğunluğunu karbon

oluştururken (Şekil 2.12), inorganik kısmını kaynak biyokütleyle bağlı olarak Ca, Mg, K ve inorganik karbonatlar gibi mineraller oluşturur. Biyokömürlerin karbonik yapıları, yüksek oranda karbon içerse de O ve H gibi organik bileşenler de içerebilir. Genellikle biyokömürler tamamen karbonize olmazlar ve karbonlaşmamış kısımları da içerebilirler (Ok, Uchimiya, Chang ve Bolan, 2016).



Şekil 2.12. Biyokömürün şematik gösterimi ve bileşenleri (Ok vd., 2016).

Biyokömürle ilgili olarak Avrupa’da iki önemli organizasyon vardır. Bunlar; Avrupa Biyokömür Sertifikası (EBC) ve Uluslararası Biyokömür Girişimi (IBI)’dir. Mohan, Sarswat, Ok ve Pittman, (2014) çalışmalarında; Uluslararası Biyokömür Girişiminin (IBI), biyokömürü karbon içeriğine göre üç kategoriye ayırdığını ve 1.nci sınıf biyokömürün %60 veya daha fazla karbon içerdiğini, 2.ci sınıf biyokömürün %30 ila %60 karbon içerdiğini ve 3.üncü sınıf biyokömürün ise %10 ila %30 karbon barındırdığını belirtmişlerdir. Dünya’da biyokömür konusunda en fazla araştırma Amerika, Avrupa ve Çin’de gerçekleştirilmektedir. Şekil 2.13’te dünyada bu konuda en fazla araştırma gerçekleştirilen ülkeler gösterilmektedir (International Biochar Initiative, 2022).



Şekil 2.13. Biyokömür araştırmaların en yoğun olarak gerçekleştirildiği ülkeler (International Biochar Initiative, 2022).

Biyokütlenin bileşimi ve piroliz sıcaklığı, gözenekli yapının oluşumunu önemli ölçüde etkileyen faktörlerdir. Özellikle odun ve odunsu biyokütle, bu gözenekli yapının daha fazla geliştiği bir seçenek olarak belirlenmiştir. Yüksek gözenekli biyokömür elde etmek için uygun piroliz sıcaklıkları genellikle orta seviyededir (400-700°C). Bu tür biyokömürün kalitesini artırmak için çeşitli ek işlemler uygulanabilir. Bu ek işlemler arasında en yaygın ve etkili olan aktivasyon yöntemi bulunmaktadır (Leng, Xiong, Yang, Li, Zhou, Zhang, Jiang, Li ve Huang, 2021).

Sun ve Tsang (2023) çalışmalarında biyokömürün işlevsel fonksiyonlarını etkileyen faktörler arasında element dağılımı, gözenek yapısı, yük yoğunluğu ve yüzey alanı gibi özellikleri vurgulamaktadırlar. Reaksiyon kabı basıncı, reaksiyon süresi, basınç ve yardımcı girdinin akış hızı gibi işletim parametrelerinin biyokömürün fiziksel özelliklerini belirlediğini belirtmişlerdir. Lignoselüloz biyokömürünün OH- gruplarına sahip olduğunu ve bu grupların piroliz sırasında kaybolmadığını ve daha yüksek sabit karbon içeriğine sahip olduğunu da ifade etmişlerdir. O/C ve H/C oranlarının biyokömürlerin aromatiklik ve polaritesini yansıttığını ve karbonizasyonun değerlendirilmesinde kullanıldığını da tespit etmişlerdir. Biyokömürün pH değeri hammaddenin türü ve piroliz sıcaklığının etkilediği bir değişkendir. Çoğu biyokömür alkali pH'a sahip olmasına rağmen 400°C'nin altındaki sıcaklıkta pirolize tabi tutularak üretilen biyokömürlerden bazıları asidik pH değerine sahiptir. Biyokömür yüzeyinin yükü ve adsorpsiyon mekanizmaları ile ilişkilendirilen göstergeleri tartışır. Biyokömür yüzeyinin pozitif veya negatif yüklü olmasının adsorpsiyon mekanizması üzerinde etkilidir. Bir partikülün yüzey yükü, sıfır yük noktası (pH_{pzc}) ve zeta

potansiyeli gibi göstergelerle ilişkilendirilir. Aynı araştırmada; çözeltinin pH değeri biyokömürün pH_{pzc} değerinden daha düşükse, biyokömür yüzeyi pozitif yüklü olacağını, çözeltinin pH değeri biyokömürün pH_{pzc} değerinden daha yüksekse, biyokömür yüzeyi negatif yüklü olacağı da belirtilmiştir. Biyokömür yüzeyindeki bu yük farkı, hangi adsorpsiyon mekanizmasının (elektrostatik çekim veya yüzey kompleksleşmesi) önemli olduğunu belirlemede etkindir. Biyokömür yüzey morfolojisini anlamak için ışık altında optik mikroskop kullanılarak gözlemlenir ve mikroyapıyı tanımlamak için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmaktadır.

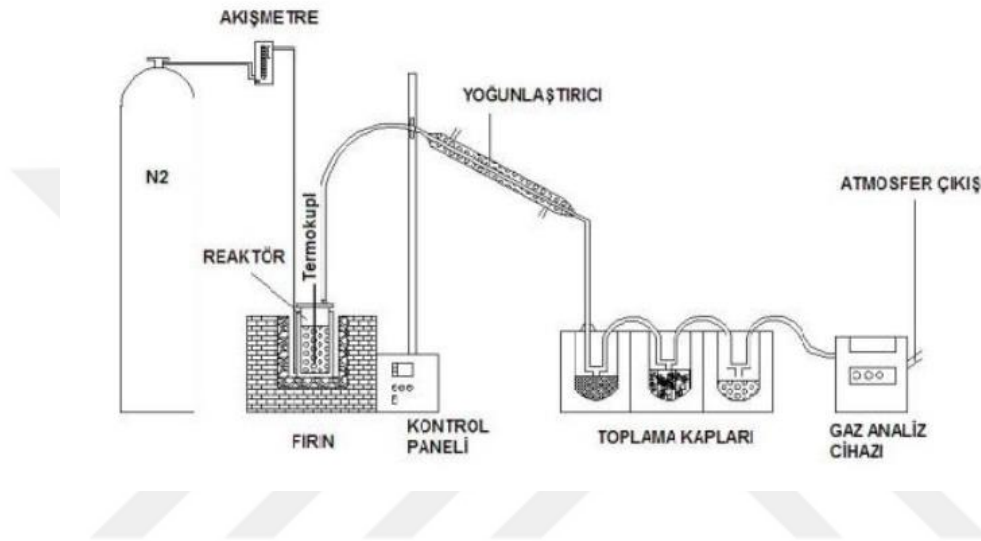
2.6.1. Piroliz

Termal ayrışma olarak ta bilinen piroliz, malzemelerin tam yanma için gerekli olan oksijenin bulunmadığı veya son derece az olduğu koşullarda gerçekleştirilmektedir. Gazlaştırmadan farklı olarak, piroliz biyokütle veya organik materyalin buharla veya havayla reaksiyona girdiği bir süreçtir. Piroliz teknikleri yıllar içinde sürekli iyileştirilmektedir ve genellikle kok ve kömür üretiminde kullanılmaktadır (Almezgagi, 2019). Piroliz işlemleri, piroliz ünitesinde katının işlem görme süresine bağlı olarak hızlı, orta, yavaş ve gazlaştırma olmak üzere farklı şekillerde sınıflandırılır. Genellikle işlem sırasında oluşan tipik ürünlerin oranları şunlardır: %60 biyoyakıt, %20 biyokömür ve %20 gaz. Yavaş pirolizde katı malzeme, piroliz ünitesinde yaklaşık 400°C'de işlem görür. Bu işlem genellikle karbonlaştırma olarak adlandırılır, çünkü yavaş pirolizde karbon içeriği oldukça yüksektir. Yavaş pirolizde elde edilen biyokömür miktarı genellikle hammaddenin %50'si civarındadır.

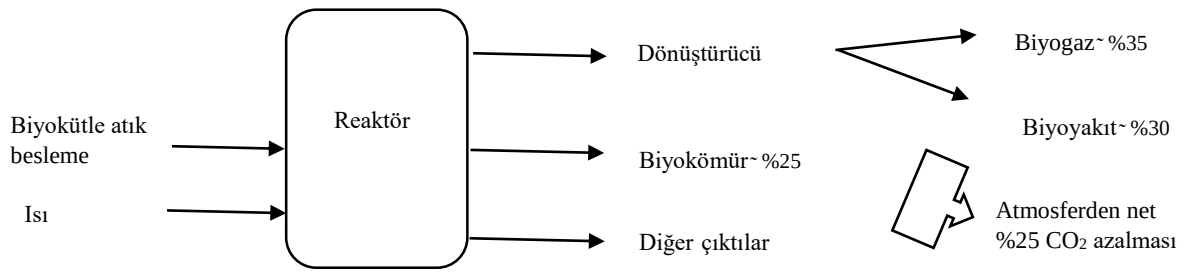
Piroliz sıcaklığı, ısıtma süresi ve azot akış hızı yüzey alanı ve gözenekliliği üzerinde etkili faktörlerdir. Piroliz sıcaklığı 400 °C'nin üzerine çıktığında, biyokömürün hidrofilikliği (temas açısı $\geq 90^\circ$) artar, bu da daha yüksek bir su emme kapasitesine yol açabilir. Ayrıca, piroliz sıcaklığı arttıkça, biyokömürün düzlemsel arası mesafeleri azalır ve moleküler düzen ve organizasyon artar, bu da birim hacim başına daha büyük bir yüzey alanına neden olabilir. Bu durum, biyokömürün daha yüksek bir spesifik yüzey alanına ve daha fazla mikrogözenek miktarına sahip olmasını sağlar ve dolayısıyla suyun daha etkin bir şekilde tutulmasına katkıda bulunabilir (Sun ve Tsang, 2023). Piroliz sıcaklığı 400 °C'nin altına düştüğünde ise, yüzey alanı ve toplam gözenek hacmi neredeyse değişmez. Ayrıca, piroliz sürecinde dikkate alınması gereken bir diğer faktör de bekletme süresidir. Genellikle, bekletme süresi 30 ila

120 dakika arasında seçilir. Pirolizde genellikle taşıyıcı gaz olarak azot kullanılır. Piroliz reaktörlerinin sınıflandırılması, gaz-katı temas moduna göre üç kategoriye ayrılır: sürüklenen yataklar, sabit yataklar ve akışkan yataklar (Leng vd., 2021).

Tipik bir piroliz düzeneği örneği Şekil 2.14'te (Şakalar, 2009), ünitesinin girdi ve çıktılarının oransal olarak değerlendirilmesi ise Şekil 2.15'te gösterilmektedir (Yıldız ve Solmaz, 2016).



Şekil 2.14. Piroliz düzeneği örneği (Şakalar, 2009).



Şekil 2.15. Tipik bir biyokömür karbon yakalama döngüsü (Yıldız ve Solmaz, 2016).

Farklı biyokütle türleri biyokömür üretimi için kaynak olarak kullanılabilir. Bu biyokütlelerin farklı yapıları, onların fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkiler ve piroliz işlemi sonucunda çeşitli yapısal özelliklere sahip biyokömürler oluşur. Piroliz sırasında biyokütlenin kütleinde ve hacminde azalma gözlemlenir (Sayın, 2020). Lehmann ve Joseph (2009) çalışmalarında biyokütlenin kimyasal bileşiminin üretilen biyokömürün fiziksel ve kimyasal yapısını önemli ölçüde etkilediğini belirtmişlerdir. Ayrıca 120°C'nin üzerindeki

piroliz sıcaklıklarında, yapı içeriğindeki nem buharlaşırken, bazı organik bileşenler termal parçalanmaya uğradığını ve hemiselülozların 200-260 °C arasında, selüloz 240-350°C arasında, lignin ise 280-500°C arasında parçalandığını da ifade etmişlerdir.

İşlem sırasında biyokütle yüksek bir sıcaklıkta ve inert bir gaz içerisinde parçalanmaktadır. Ham maddede bulunan organik bileşenler termokimyasal olarak ayrışarak gaz fazına geçerlerken karbon yapı katı fazda yani biyokömür olarak kalmaktadır. Gaz fazındaki yüksek moleküler ağırlıklı ve polar bileşikler soğutulularak biyoyakıt olabilecek bir sıvı faz oluştururken, daha düşük ağırlıklı ve genellikle H₂, CH₄, CH₂₂, CO ve CO₂ gibi yoğunlaşmayan gazlar gaz fazında kalmaktadır. Sun ve Tsang (2023) ilk seviye sıcaklıkta (200-300°C) organik hammaddenin parçalanmaya başladığını ve ikinci seviye sıcaklıkta (300-600 °C) ise birçok alifatik hemiselüloz ve selülozdan kaynaklanan fonksiyonel grupların parçalandığını belirtmişlerdir.

2.6.2. Tarımsal Atıklardan Biyokömür Üretimi

Ülkemizde, tarımsal üretimin önemli atıklarının önemli bir kısmı yakılarak veya doğal yolla parçalanarak çevreye zarar verecek şekilde imha edilmektedir. Bu atıklar, akaryakıt ve yem endüstrisi için önemli bir kaynak oluşturmalarına rağmen en çok seçilen imha yöntemleri çevre üzerinde olumsuz etkilere neden olanlardır (Akkurt, 2019). Tarım arazilerine organik madde seviyelerini artırmak için çeşitli uygulamalar yapılmaya başlanmıştır. Bunlar arasında tarımsal atıkların kıyılarak toprağa karıştırılması da yer almaktadır. Ancak bu atıkları parçalamak için mikroorganizmaların faaliyetleri sonucu önemli miktarda CO₂ atmosfere salınır. Bu salınımın ana kaynağı, tarımsal kökenli organik bileşiklerin hızlı ayrışması sonucunda oluşan mineralizasyon sürecidir. Biyokömür, biyokütle pirolizi veya "kömürleştirme" işlemi adı verilen, az veya hiç oksijen bulunmayan bir ortamda biyokütlenin ısıtılmasıyla elde edilen karbon açısından zengin bir katıdır (Sohi, 2012). Ayrıca biyokömür toprağa karıştırılarak gübre ve tarım ilacı kullanımını azaltabileceği gibi bu sayede hasat verimi de önemli ölçüde artabilir. Biyokömür, diamonyum fosfatlı gübre (DAP) ile birlikte kullanıldığında, buğday bitkisinin boyu ve tane sayısı açısından en yüksek verimi sağlamaktadır. Biyokömürün toprağa uygulanması, kimyasal gübre ile birlikte kullanıldığında, tahıl içeriği ve tahıldaki P, K, Ca ve Mg gibi elementlerin içeriğini artırır (Namlı, Akça ve Akça, 2017). Biyokömür karıştırılması yoluyla toprağın organik madde miktarının artırılması tercih edilirse atmosfere çok daha az CO₂

karışması hatta iklim değişikliğine sebep olan karbonun depolanması sağlanabilmektedir. Son IPCC raporuna göre, dünyaki karbon depolama kapasitesi tutulması gereken karbon miktarından çok daha azdır (Birpınar ve Dinçbaş, 2022).

Ayçiçeği tarımından kaynaklanan atıkların bertarafı için, ayrıca hasat edilen ürün tarafından kaldırılan, yıkanma veya buharlaşma yoluyla kaybolan besin maddelerinin sürdürülebilir tarım ilkelerine uygun şekilde toprağa geri kazandırılmasına katkı sunulması amacıyla ayçiçeği sapları bazı çiftçiler tarafından kıyılarak toprağa karıştırılmaya başlanmıştır. Ancak tarımsal biyokütle dünyadaki en yaygın bulunan yenilenebilir hammaddedir ve biyokömür üretiminde rahatlıkla kullanılabilir (Almezgagi, 2019; Tan vd., 2015). Ülkemizde 6.851.737 da ayçiçeği tarımının yapıldığı alandan hasat edilen ayçiçeğinden oluşan tarımsal atıktan yaklaşık 2158 ton/yıl'lık biyokömür üretimi potansiyeli bulunmaktadır (Sümer, Kavdır ve Çiçek, 2016). Tarımsal kalıntıların adsorban üretiminde kullanılması, bu atıkların "sıfır atık" prensiplerine ve döngüsel ekonomiye katkı sağlayarak değerli ürünlere dönüştürülmesini sağlar (Rambabu, Bharath, Avornyo, Thanigaivelan, Hai ve Banat, 2023).

2.6.3. İçme Sularının Arıtımında Biyokömür Kullanımının Avantaj ve Dezavantajları

Biyokömür, aktif karbondan daha az maliyetli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Tipik biyokömür aktif karbondan daha az karbonize edilir, biyokütledeki artıklar nedeniyle daha fazla hidrojen ve oksijen içerir. Biyokömürler, hidrokarbonları, diğer organik maddeleri ve bazı inorganik metal iyonlarını adsorplayabilir (Hale, Lehmann, Rutherford, Zimmerman, Bachmann, Shitumbanuma, O'Toole, Sundqvist, Arp ve Cornelissen, 2012; Mohan, Sharma, Singh, Steele and Pittman, 2012). Doğal malzemelerden elde edilen biyokömür, biyokütle veya tarımsal atık gibi, çevre dostu bir adsorban olarak işlev görmektedir. Biyokütle suyun arıtılması gereken alanlarda da bol miktarda bulunduğundan, üretim koşulları doğru planlandığı takdirde diğer adsorbanlara kıyasla biyokömür neredeyse on kat daha düşük maliyetli olabilmektedir. Ham biyokömür CO₂'i adsorplama açısından düşük bir kapasiteye sahiptir. Ancak son yıllarda gerçekleştirilen araştırmalar farklı aktivasyon yöntemlerini ve değişik uygulama koşullarını test etmektedir ve bunlardan bazıları CO₂ adsorpsiyonunda iyi bir verim yakaladıklarını ifade etmişlerdir (Dissanayake, You, Igalavithana, Xia, Bhatnagar, Gupta, Kua, Kim, Kwon, Tsang ve Ok, 2020). Biyokömürün çevresel uygulamaları, üretim aşamasında daha az enerji gerektirmesi ve

azalmış karbon emisyonları nedeniyle açıkça avantajlıdır (Zubair, Ihsanullah, Aziz, Ahmad ve Al-Harhi, 2021).

Gwenzi vd. (2017) çalışmalarında biyokömürün beş farklı pestisit (sulfosulfuron, isoproturon, imidacloprid, propyzamid ve pyraclostrobin) giderilmesindeki etkinliğini inceleyen kolon süzülme deneylerinde özellikle pyraclostrobin ve sulfosulfuron için sırasıyla toplam uygulanan kütlenin %0,0035 ile %5,9'u arasında değişen giderimin sağlandığını belirtmişlerdir. Ayrıca benzer sonuçların herbisitler (örneğin, Imazamox) ve metabolitleri (örneğin, metildesfenil-kloridazon, metazaklor oksalik asit, metazaklor sülfonik asit) için de gözlemlendiğini ifade etmişlerdir.

İçme sularında biyokömür kullanımı ile ilgili olarak özellikle Gıda Maddeleri Tüzüğü ve İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkındaki Yönetmelik açısından değerlendirme yapan çalışmaların artması bu adsorbanın kullanım alanını genişletecektir.

2.6.4. Biyokömürün Adsorpsiyon Kapasitesini Arttırmak Amacıyla Aktive Edilmesi

Biyokömürlerde -COOH, -OH gibi çeşitli fonksiyonel gruplar bulunmaktadır. Bu fonksiyonel grupların davranışı, çözeltinin pH değeri değiştikçe etkilenir. Düşük pH ortamlarında, biyokömürlerdeki bu fonksiyonel grupların çoğu protonlanır ve pozitif yüklü hale gelir. Bu düşük pH değerlerinde, biyokömür yüzeyi pozitif yüklü olduğu için anyonların adsorpsiyonunu kolaylaştırır. pH değeri arttıkça, biyokömür yüzeyi negatif yüklü hale gelir. Dolayısıyla daha yüksek pH aralıklarında katyonlar biyokömür yüzeyine kolayca adsorbe olabilir (Tan, Liu, Zeng, Wang, Hu, Gu ve Yang, 2015).

Biyokömürün fiziksel, kimyasal ve biyolojik olarak iyileştirilmesiyle daha fazla fonksiyonel grup ve yüzey alanı elde edilebilmektedir. Aktifleştirme biyokömürün kirleticilerin uzaklaştırılmasında ticari olarak aktifleştirilmiş karbonun alternatifi olmasını destekleyici bir işlemdir (Dan vd., 2021). Aktivasyon, gözenekliliği, adsorpsiyon kapasitesini ve yüzey alanını artırmayı hedeflemektedir (Gwenzi vd., 2017). Esasen, aktivasyon reaksiyonları, iç tabaka katyonlarının (Na^+ , K^+ , Ca^{2+}) belirli türlerle yer değiştirmesiyle gerçekleştirilir. Asit hidrolizi, adsorpsiyon performansı artırılmış biyokütle bazlı adsorbentler hazırlamak için bir yöntem olarak kullanılabilir. Lignoselülozik materyaller, asit çözeltisiyle reaksiyona girdiğinde hidroliz gerçekleşir ve selülozun hidroksil bağları su salımıyla ayrılır. Sonuç olarak, malzemenin yüzeyinde yeni gözenekler

ve çeşitli aktif bölgeler oluşur, bu da adsorpsiyon performansını artırır. Sülfürik asit (H_2SO_4), diğer asitlere göre lignoselüloz moleküllerini daha etkili bir şekilde parçalayabilmesi nedeniyle asit hidrolizinde en yaygın olarak kullanılan asittir (Rambabu vd., 2023).

Adsorbentin özelliklerine göre aktifleştirme yöntemi belirlenmesi eser madde gideriminde en doğru tercihtir. Asitle aktifleştirmeye istenen düzeyde yanıt vermeyen adsorbentlerin giderilmesi için adsorbanın baz ile aktifleştirilmesi yöntemi seçilebilmektedir. Bazik aktifleştirmede en fazla tercih edilen kimyasal madde ise NaOH'tır. NaOH çözeltileri biyokömürün yüzeyindeki yağlı yüzey aktif maddeleri temizleyerek tutunmayı arttırmaktadır.

2.7. Adsorpsiyon Sonrası Atık Bertarafı

Adsorbanlar genellikle etkili bir şekilde yeniden kullanılabilmek için tükenmiş adsorbanların verimli bir şekilde rejenere edilmesi ve yeni adsorpsiyon döngüleri için hazırlanması için bir desorpsiyon protokolü oluşturulduktan sonra başarılı bir şekilde kullanılabilir hale gelir (Ghosh, Falyouna, Onyeaka, Malloum, Bornman, Al Kafaas, Al-Sharify, Ahmadi, Dehghani, Mahvi, Nasser, Tyagi, Mousazadeh, Koduru, Khan ve Suhas, 2023). Ancak tehlikeli kimyasallar adsorbe eden adsorbanlar için desorpsiyon işlemi yeni çevre ve sağlık riskleri oluşturur.

Atık haline gelmiş adsorban atığı kirlidir, tehlikelidir ve atılmadan önce yakılmalı veya arıtılmalıdır (Hassaan vd., 2022). Kullanım ömrü dolmuş, Imazamox ya da başka herhangi bir tehlikeli maddenin adsorbe edilmesi aşamalarında yer alan biyokömür de Türk Çevre Mevzuatı gereği bünyesindeki tehlikeli madde nedeniyle tehlikeli atık kategorisine dâhil olur ve buna uygun şekilde bertarafı gerekir. Tehlikeli atık haline gelen biyokömürün bertarafı için atık yönetimi prensipleri doğrultusunda çeşitli bertaraf metotları seçilebilir. Bunlardan biri de tehlikeli atık düzenli depolama tesislerinde depolanmasıdır. Ancak bu metodun seçilmesi, günün koşullarına göre ciddi bir bertaraf maliyetini gerektirebileceği gibi düzenli depolama saha kapasitesinin de beklenenden hızlı dolmasına neden olur. Ayrıca tarımsal katı atıkların azaltılması hedefine de uyumlu bir uygulama değildir.

Gani, Erdiwansyah, Munawar, Mahidin, Mamat ve Rosdi (2023) araştırmalarında biyokömür enerjisinin konvansiyonel kömür hammaddelerinin tükenmesinin azaltılabilmesi için gelecekte rekabetçi ve gelecek vaat eden enerji alternatiflerinden biri olacağını ve

biyokömür üretiminde tarımsal atıkların verimli şekilde kullanılabileceği belirtmişlerdir. Keivani (2018)'nin de çalışmasında tespit ettiği üzere biyokömürün yakma tesislerinde yakıt katkısı olarak kullanımı bazı olumsuz etkileri olan emisyonların azalmasına yardımcı olmaktadır. Dolaşımli akışkan yataklı yakma sistemi (DAY) kullanılarak yapılan denemelerde, hava ve oksijenle zenginleştirilmiş ortamda 300 °C'de ve 30 dakikada elde edilen kızılçam talaşı biyokömürlerinin iki farklı kömürle birlikte yanmasına yönelik testler gerçekleştirilmiştir. Bu denemelerde, modifiye edilmiş 30 kWth bir DAY sistemi kullanılmıştır ki bu sistem bir besleme ünitesi, bir yakma reaktörü, bir siklon, bir geri dönüş bacağı, bir torbalı filtre, bir çekme fanı ve bir hava üfleyici fanından oluşmaktadır. Oksijenle zenginleştirilmiş yanma testleri, çeşitli oranlarda linyit ve biyokömür karışımlarıyla gerçekleştirilmiştir ve biyokömürün katkı oranı %50'ye kadar artırılmıştır. Deneyler sırasında oksijen konsantrasyonu %21 ile %27 arasında sabitlenmiştir. Biyokömürün kömürle birlikte oksijenle zenginleştirilmiş ortamda yakılması, emisyonların önemli ölçüde azalmasına neden olmuştur. Özellikle yüksek oksijen konsantrasyonlarında CO emisyonları azalırken, yüksek miktarda biyokömür katkısı SO₂ emisyonlarını önemli ölçüde azaltıldığı yine bu çalışmada belirtilmiştir.

Ayçiçeği sapının ısı değeri belirlenerek bu şekilde yakıt katkısı olmasının değerlendirilmesi yerinde olacaktır. Ayrıca çalışmada kullanılan adsorbanlardaki elementlerin oranları da adsorpsiyon veriminin yanı sıra yanma veriminin değerlendirilebilmesi için de belirlenecektir. Adsorbanın yakıt katkısı olarak kullanılarak bertaraf edilebilmesi için saha koşullarındaki uygulamalarda içerdiği tehlikelilik özellikleri ve nemliliği ayrıca değerlendirilmelidir. Bu açıdan değerlendirmeler yapıldıktan sonra biyokömürden üretilmiş kullanılmış adsorban bir yakma tesisinde bertarafı için rahatlıkla yakıt katkısı olarak kullanılabilecektir. Bu da ayçiçeği sapının diğer adsorban hammaddelerinden avantajlı olduğu hususlardan biridir. Tarımsal atık önce suyun arıtımında kullanılacak bir materyale sonra da bir enerji kaynağına dönüşecektir.

2.8. Biyokömür ile Yapılan Benzer Akademik Çalışmalar

Biyokömür, farklı kirleticilerin giderilmesi için çeşitli çalışmalara konu olmuştur. Kirletici türlerine göre yapılan çalışmalar kısaca Çizelge 2.7'de sunulmuştur (Ekmekyapar ve Şahinci, 2022).

Çizelge 2.7. Farklı kirleticilerin uzaklaştırılması için biyokömür çalışmalarının özeti (Ekmekyapar ve Şahinci, 2022).

Kirletici Tipi	Çevre Türü	Referans
Ağır Metal	Sulu Çözelti	Singh, Kumar, Mishra, You, Singh, Kumar ve Kumar (2021); Zubair ve ark.(2021); Xu, Cao ve Zhao (2013); Zhang, Zhu, Shen ve Liu (2019)
2-Klorofenol	Sentetik Çözelti	Machado, Lütke, Perondi, Godinho, Oliveira, Collazzo ve Dotto (2020)
Selenyum	Sulu Çözelti	Satyro, Li, Dehkoda, McMillan, Ellis ve Baldwin (2021)
Bisfenol A Sülfametoksazol	Sulu Çözelti	Zhao, Zhou, Zhang, Li, Chu, Wu, Pan ve Steinberg (2021)
VOC_s	Hava	Khan, Khan, Lei, Alam, Khan ve Khan (2019); Zhang, Miao, Xiang, Zhang, Cao, Wang, Hu ve Gao (2021)
Antibiyotikler	Kompozit Materyaller Sulu Çözelti	Krasucka, Pan, Ok, Mohan, Sarkar ve Oleszczuk (2021); Xu, Xiang, Zhou, Yang, He, Zhu ve Zhou (2021)
Nutrient	Sulu Çözelti	Zhang, Song, Gelardi, Huang, Khan, Masek, Parikh ve Ok (2020); Zubair vd.(2021)
PTE	Toprak	Khan vd. (2020)
Organik Kirleticiler Ağır Metaller	Sediment	Yang, Ye, Zhang, Zeng, Tan, Song, Zhang, Yang, Li ve Chen (2021)
Uranyum	Sulu Çözeltiler	Guilhen, Rovani, de Araujo, Tenorio ve Masek (2021)

Çiçek, Özer, Özer ve Özer (2007), buğday kabuğu kullanılarak üretilen biyokömürle reaktif boyaların -reaktif mavi (RB29), reaktif kırmızı (RB195) ve reaktif sarı (RB145)- uzaklaştırılmasını araştırmışlardır. Deneylerde pH, sıcaklık, başlangıç boya konsantrasyonu, adsorban konsantrasyonu ve adsorbanın boyutu gibi çeşitli parametrelerin etkisi gözlemlenmiştir. Langmuir ve Freundlich izoterm modellerinin deneysel verilere uygunluğu incelenmiştir. Maksimum tek tabaka adsorpsiyon kapasitesi, 60°C'de RB 19, RB 195 ve RB 145 için sırasıyla 117,6; 119,1 ve 196,1 mg/g olarak bulunmuştur. Reaksiyonlar endotermiktir ve ΔG değerleri 60°C'de RB 19, RB 195 ve RB 145 için sırasıyla -34,4; -31,0

ve 31,7 kJ/mol'dür. Yapılan deneyler 20, 40 ve 60°C'de sıcaklığın artmasının sistemi olumlu yönde etkilediğini göstermiştir.

Aral (2019), fıstık, portakal, ceviz ve kestane kabuklarından elde edilen ham ve aktifleştirilmiş biyokömür materyallerde ibuprofen adsorpsiyonunu incelemiştir. Çalışmada 1, 5 ve 10 mg/L ibuprofen çözeltileri kullanılarak konsantrasyonun adsorpsiyon üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Portakal kabuğundan elde edilen biyokömür ve fıstık, portakal, ceviz kabuğundan elde edilen ham materyallerin Langmuir İzotermine uyduğu belirtilmiştir. Fıstık, ceviz ve kestane kabuklarından elde edilen biyokömür ve kestane kabuğunun ham materyalindeki adsorpsiyonun ise Freundlich İzotermine uyduğu tespit edilmiştir.

Sayın (2020) tarafından yapılan araştırmada, vişne sapından üretilen biyokömür H_3PO_4 ile aktifleştirildikten sonra CIP, SDZ ve TC'nin uzaklaştırılması için kullanılmıştır. Tüm antibiyotik türleri için iyonik formda en iyi adsorpsiyon performansı sergilenmiştir. CIP, TC ve SDZ için maksimum adsorpsiyon verimleri sırasıyla %99,95; %99,89 ve %97,81 olarak bulunmuş, maksimum deneysel adsorpsiyon kapasiteleri ise sırasıyla 410,06; 310,08 ve 189,68 mg/g olarak belirlenmiştir.

Morlay vd. (2012) tarafından yapılan araştırmada, imidazolinon grubu olan Imazamox'un doğal olarak sulu ortamdaki katyonik veya anyonik formlarının, genellikle içme ve kullanma sularından arıtılmasında önerilen ticari aktif karbon türlerinden biri olan Filtrasorb 400 (F400) ile adsorbe edilip edilmediği incelenmiştir. Elde edilen bulgulara göre, bu herbisitinin doğal formunun adsorpsiyona tepki verdiği belirlenmiştir. Hesaplanan Imazamox'un adsorpsiyon izotermi sonucunda model Langmuir-Freundlich denklemiyle tatmin edici bir şekilde örtüşmüştür.

2.9. Kolon Sistemleri ile Yapılan Benzer Çalışmalar

Haydari, Aziz, Kaya, Daştan Quazzani, Mandi ve Aziz (2023) yeşil sentez yöntemi ile elde ettikleri indirgenmiş grafen oksiti kullanarak, yüksek konsantrasyonlarda toksik olan fenolik bileşiklerinin zeytinyağı endüstrisi kara sularından giderimini araştırmıştır. Araştırmacılar bu amaçla kesikli ve sabit yataklı kolon adsorpsiyon yöntemlerini test etmiştir. Kinetik, izoterm modelleri ve adsorpsiyon termodinamiği, yalancı ikinci dereceden ve Freundlich fenol adsorpsiyonunu ve endotermik reaksiyonu en iyi şekilde belirlemiştir. 4000 mg L⁻¹ başlangıç konsantrasyonu için fenol adsorpsiyon kapasitesini 994 mg g⁻¹ olarak saptamışlardır.

Dan vd. (2021) pirinç samanı biyokömürü kullanarak dolgulu kolon sisteminde herbisitlerin sulu çözeltiden giderimini çalışmışlardır. 60 mg biyokömür dozunda, herbisitleri pH= 3'de ve 0,1 M iyonik kuvvette Monuron, Diuron ve Linuron herbisitlerinin maksimum giderim oranlarını sırasıyla % 41,9; % 25 ve % 56,8 olarak saptamışlardır.

Terrón-Sánchez vd. (2023) çalışmalarında pirinç üretiminde yaygın olarak kullanılan ve çevresel olarak hedef dışı organizmalar ile su kirliliği riski taşıyan kalıcı bir herbisit olan imazamoxun, toprak özelliklerinde ciddi değişikliklere neden olabileceğini göz önüne alarak biyokömür ile toprakta adsorpsiyonunu araştırmışlardır. Araştırmada taze ve olgun meşe talaşı biyokömürünün adsorban olduğu toprak dolgulu plastik kolonda Imazamoxun taşınım mekanizmasını farklı sulama koşullarında inceleyen sistem kullanılmıştır. Yağmurlama sulamanın tek başına sızıntıyı azalttığı ve kalıcılığı düşürdüğü belirlenmiştir. Ayrıca, biyokömürün toprağa karıştırılmasıyla Imazamox sızıntısının yılda %80'den %34'e düştüğü bulunmuştur. Taze meşe talaşından biyokömür kullanımıyla imazamox sızıntısının % 80 den %34'e, olgunlaşmış meşe talaşından biyokömürle ise %74'den %50'ye düştüğü ifade edilmiştir.

Gök ve Mesutoğlu (2018) adsorpsiyon kolon sisteminde prina kullanarak akü geri dönüşüm tesisi atık suyundaki ağır metallerin giderimini araştırmıştır. Akü geri dönüşüm atıksuyundaki PB^{+2} , Zn^{+2} , Ni^{+2} ve Cu^{+2} için ortalama %98'lik giderim verimi sağlanmıştır.

Tahmasebi vd. (2023) çeşitli pestisitlerin biyolojik olarak aktive edilmiş granül aktif karbon sabit yataklı kolonda giderimini araştırmıştır. Etil paraokson, metil paration ve atrazin pestisitleri için bu araştırma kapsamındaki deneylerde sırasıyla %88,4; %67,38 ve %64,67'lik giderim sağlanmıştır.

Larasati, Fowler ve Graham (2022), granüler aktif karbon ile iç rejenerasyonla yenilenen sabit yataklı kolonda sudan pestisit giderimini araştırmışlardır. Kimyasal rejenerant olarak metaldehid ve izoproturon kullanılmıştır. Bu şekilde elde edilen adsorban ile termal yolla rejenere edilen adsorbanın performansı değerlendirilmiştir. Kimyasal rejenerasyonla göreceli olarak daha iyi sonuç elde edilmiştir.

Hu vd. (2021) imazamox, imazapic ve imazetaphirin sediman üzerindeki adsorpsiyonunu incelemek üzere farklı koşullarda bir dizi kolon deneyi gerçekleştirmiştir.

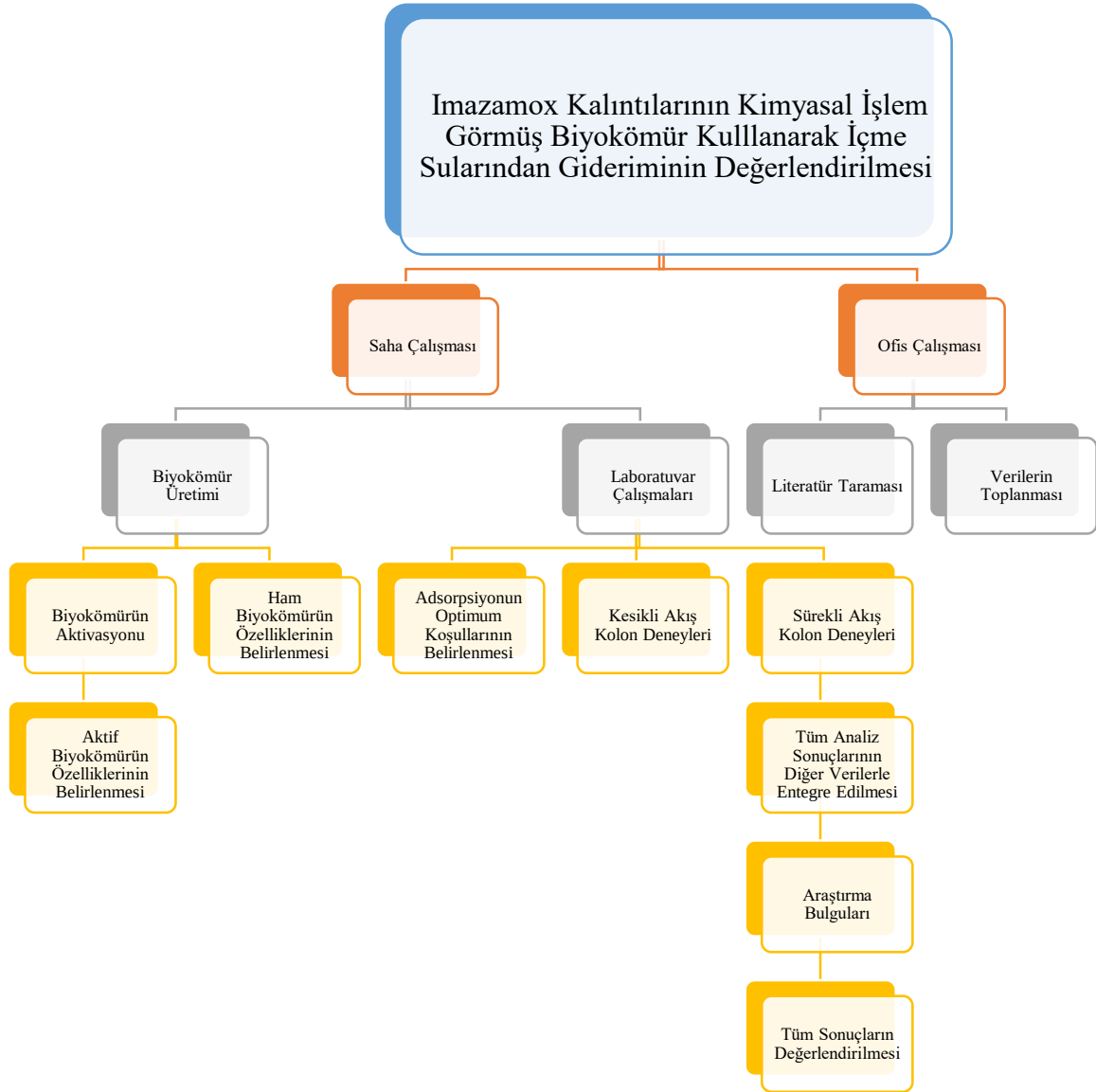
Bu araştırma sonucunda adsorpsiyonun kinetiğinin yalancı ikinci dereceden kinetik modele uyduğu ($R^2 > 0,9$), adsorpsiyonun 24 saatte dengeye ulaştığı ve Freundlich modeline uyduğu, herbisitler için sedimanda adsorpsiyonun büyük oranda pH'a bağlı olduğu ve ayrıca adsorpsiyon davranışlarında elektrostatik yüklerin etkin olduğu belirlenmiştir.

Quispe, Campos, Masek ve Bogush (2022) çalışmalarında biyokömürün adsorban olduğu kolonda gri atıksuyun arıtılması ile ilgili uluslararası yayınları değerlendirmişlerdir. İncelenen yayınlar 2010 ile 2021 arasında yayınlanan 16 ülkeden 28 adet araştırmadır. Kirletici giderimi %50-99 aralığında gerçekleşen araştırmalarda kullanılan atıksu içeriği tuvalet, giysi ve temizliği için kullanılmış sulardan oluşmaktadır.

Araujo, Ghislandi, Rios, Costa, Nascimento, Ferreira Sobrinho ve Rodrigues (2022) çalışmalarında sabit yataklı adsorpsiyon kolonunda geri dönüşümlü agar-grafen oksit biyokompozit hidrojeli adsorban olarak kullanarak su arıtımını araştırmışlardır. Giderimini değerlendirdikleri katyonik boyalar Nil Mavisi A, Metilen Mavisi B, Malaçit Yeşili ve Temel Fuçsin'dir. Bu boyaların gideriminin yanı sıra renk ve TOC giderimi de incelenmiştir. Araştırma sonucunda adsorbanın çevre dostu bir alternatif oluşturduğu değerlendirilmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışmasında çalışma süreci ve tez kapsamında yapılan işleri gösteren akış diyagramı Şekil 3.1’ de gösterilmiştir. Aşağıdaki bölümlerde ise tezde araştırma için materyal olarak kullanılan biyokömürün üretimi ve özellikleri, aktivasyon yöntemleri ile Imazamox giderim mekanizmaları detaylıca açıklanarak verilmektedir.



Şekil 3.1. Çalışma süreci ve içeriğini gösteren akış diyagramı

3.1. Biyokömür Üretimi, Aktif Edilmesi ve Karakterizasyonu

Ticari aktif karbon genellikle üç temel kaynaktan elde edilir: odun, kömür ve hindistan cevizi kabuğu. Ancak, aktif karbonun üretimi için lignoselülozik esaslı tarımsal atıklar, meyve kabukları, çeşitli organik atıklar ve petrol türevi polimerik malzemeler de kullanılabilir. Bu hammaddelerden üretildiğinde biyokömür adını almaktadır. Üretilen biyokömürün ekonomik olması için hammaddesinin bol miktarda bulunması ve kolayca temin edilmesi gerekir. Ayrıca giderimde yüksek verimlilik ve düşük inorganik madde içeriği de önemli faktörlerdir.

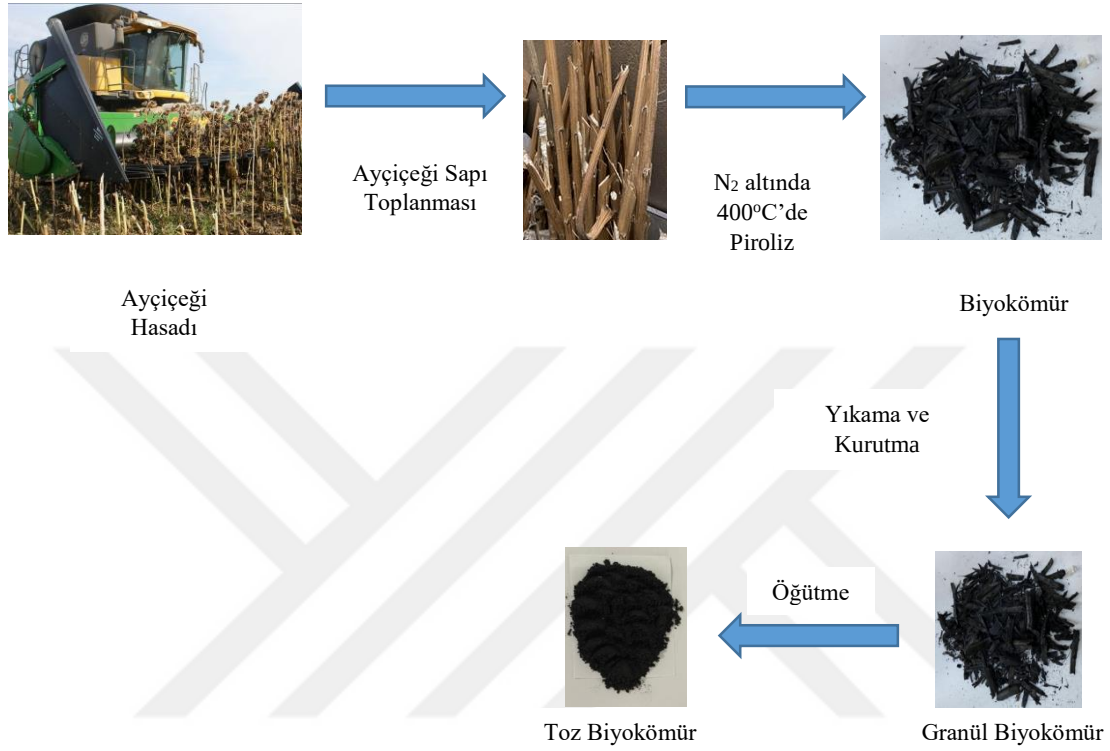
Biyokömür hammaddesinin bileşimi ve piroliz sıcaklığı, performansı etkileyen ana unsurlardır. Özellikle odun ve odunsu biyokütle ile lignoselülozik biyokütle önemli bir seçenek olarak kabul edilmektedir. Bu biyokütlelerin kullanılması halinde orta seviye sıcaklıklar (400-700°C) gözenek yapısının gelişimi için daha elverişlidir. Ek aktifleştirme süreçleriyle daha iyileştirilmiş sonuçlar elde edilebilir. Leng vd. (2021)' ne göre biyokömür yüzey alanını ve gözenekliliğini artırmak için aktivasyon, özellikle kimyasal aktivasyon, etkili ve yaygın kullanılan yöntemdir.

3.1.1. Ayçiçeği Sapından Pirolizle Biyokömür Üretimi

Biyokömür üretiminde yüksek sıcaklıkta ve inert bir ortamda, hammadde içindeki nem ve uçucu maddeler karbonizasyon (piroliz) işlemiyle uzaklaştırılır. Karbonizasyon sırasında, karbon dışı elementler olan hidrojen ve oksijen gibi gaz ürünler şeklinde atmosfere salınır ve bu süreçte düzensiz aromatik tabakalar arasında boşluklar oluşur. Bu boşluklar, karbonun temel gözenek yapısını oluşturur. Pirolitik bozunma sonucu açığa çıkan bozunma ürünlerinin bir kısmı, tabakalar arasındaki boşluklara hapsolür, bu da karbonizasyon sonucu elde edilen karbonize ürünün düşük yüzey alanı ve gözenek hacmine sahip olmasına neden olur. Yüksel (2017) karbonizasyonun iki önemli adımı bulunduğunu belirtmiştir. İlk adım yumuşama evresi olduğundan bu süreçte sıcaklık kontrolü, elde edilen kömürün özelliklerini etkiler ve char adı verilen malzemenin sertleştiğini ifade etmiştir. Gözenekliliğin gelişiminde sertleşmiş char önemli bir rol oynadığını da eklemiştir.

Bu araştırma çalışmasında piroliz/karbonizasyon süreci ile üretimi yapılan ve Imazamox kullanılmamış ayçiçeği bitkisinin sapından elde edilen biyokömürün üretim

şeması Şekil 3.2’de gösterilmektedir. Biyokömür üretiminden görüntüler ise Şekil 3.3’te yer almaktadır.



Şekil 3.2.Tarımsal atıktan biyokömür üretimi özet şeması

Imazamox kullanılmamış bir tarımsal üretim sonrasındaki hasattan ayçiçeği sapı numunesi alınmıştır. Kontaminasyona kapalı bir ortamda depolama ve fiziksel işlemle 2-3cm’lik parçalar olacak şekilde parçalama yapılmıştır. Parçalar oda sıcaklığında (20 ± 5 °C) bir hafta süreyle kurutulmuştur. Daha sonra da söz konusu ayçiçeği sapı parçaları İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Çevre ve Yer Bilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Laboratuvarı’nda seramik plakalı reaktörde (reaktörün hacminin tamamı sıkıca doldurularak), 400 °C’de 2 saat piroliz işlemine tabi tutulmuştur. Bu esnada safsızlıklardan arındırma, karbonizasyon veriminin artırılması ve oksijenin uzaklaştırılması için ortama 1L/dk debiyle saf N₂ basılmıştır.



Şekil 3.3. Biyokömür üretiminden görüntüler

Reaktör, oluşan sıvıların yoğunlaştırılarak dibe geri devrettirileceği şekilde ayarlanmıştır. Gaz tahliye hattı reaksiyon boyunca oluşacak gazların karakterinin takibi amacıyla ABB Marka Gaz Analizörüne bağlanmıştır. Gaz analizörünün girişinin öncesinde gaz; içindeki sıvıların yoğunlaştırılarak tutulması için üç aşamalı yoğunlaştırıcıya sokulmuş, silindir kartuş filtreden geçirilmiş ve kâğıt filtreden süzölmüştür.

Gaz analizörü; CO, CO₂, CH₄, H₂:MG ve O₂:N₂ ölçecek özelliklere sahiptir. Bu analizörün ekranından da ortamdaki oksijenin azalması, termal bozunma işlemi esnasında numune içindeki bağlı oksijenin açığa çıkarak CO ve CO₂ oluşturması gözlemlenmiştir.

Granül Biyokömür, elde edilen biyokömürün distile su ile yıkanarak 120 °C’de 4 saat kurutulması ile elde edilmiştir. Toz biyokömür ise granül biyokömürün öğütülmesiyle hazırlanmıştır. Toz biyokömür adsorpsiyonun optimum koşullarının belirlendiği çalkalama deneylerinde, granül biyokömür ise girişim ihtimalinin önüne geçilmesi amacıyla kolon deneylerinde kullanılmıştır.

3.1.2. Biyokömürün Aktifleştirilmesi

Ham biyokömürün kirleticileri giderme kabiliyeti, özellikle yüksek konsantrasyonlarda genellikle sınırlıdır. Bunun ana nedenleri olarak pirolizden sonra öncüllerin işlevselliğinin düşüklüğü ve görece düşük sıcaklıkta oluşturulan biyokömürlerin küçük yüzey alanı ve sınırlı gözenek hacmine sahip olması gösterilebilir. Karbonizasyon esnasında oluşan ve gözeneklerin içini dolduran bozunma ürünleri, gözenek yapısının geliştirilmesi için aktivasyon işlemiyle temizlenmektedir. Aktivasyon uygulanması seçilen yönteme bağlı olarak biyokömürün elektriksel, hidrofilik ve katalitik özelliklerini artırmaktadır. Aktivasyon yöntemlerinden biri kimyasal aktivasyon işlemidir. Bu yöntemin

avantajları arasında yüksek ürün verimi, geniş gözenek yapısı elde edilmesi ve kullanılan kimyasal maddenin yeniden kullanılabilirliği bulunmaktadır. Yüksel (2017) kimyasal aktivasyon işlemlerinde borik asit, kalsiyum hidroksit, kalsiyum fosfat, mangan dioksit, nitrik asit, kükürt, demir klorür, potasyum permanganat, potasyum hidroksit, potasyum tiyosiyaniür, sodyum klorür, sodyum fosfat, sodyum sülfat, mangan sülfat, klor, siyanitler, fosforik asit, kükürt dioksit, sülfürik asit ve çinko klorür gibi kimyasalların kullanılabileceğini belirtmiştir. Sülfürik asit ve nitrik asit kullanılarak yapılan kimyasal aktivasyon iyon değiştirme özelliğine sahip aktif karbonun elde edilmesini sağlamaktadır.

Biyokömür piroliz işlemi öncesinde, sırasında ve/veya sonrasında aktifleştirilebilir. Karbon bazlı biyokömür için, emprenye yöntemi, kimyasal aktivasyon ve fiziksel aktivasyon gibi yüzey aktivasyon yöntemlerinde elde edilen sonuçlara dair araştırmalar yapılmaktadır. Öğütme, mikrodalgada ek karbonizasyon, gaz aktivasyonu ve buhar aktivasyonu gibi fiziksel aktivasyonlar, biyokömürün fizikokimyasal özelliklerini önemli ölçüde değiştirebilir. Ayrıca, fiziksel aktivasyon çevre dostu, düşük maliyetli ve basittir, çünkü kimyasal maddeler kullanılmaz. Öte yandan, birçok çalışma, fiziksel aktivasyonun çoğu durumda kimyasal aktivasyondan daha az etkili olabileceğini öne sürmüştür. Sun ve Tsang (2023)'a göre kimyasal aktivasyon oksidan aktivasyonu, alkali aktivasyonu ve asit aktivasyonu gibi başlıca yöntemlerle, fiziksel aktivasyondan daha fazla kullanılmaktadır. Güçlü asitler olan HCl, HNO₃, H₂SO₄ ve H₃PO₄ gibi maddelerle asit aktivasyonu, sulu oksidasyon yoluyla biyokömürün yüzey asitliğini artırabilir ve gözenekli yapısını değiştirebilir. Tipik olarak, biyokömürlerin asit aktivasyonu, %10 oranında seyreltilmiş bir asit çözeltisinde, oda sıcaklığı ile 120°C arasında değişen sıcaklıkta ve saatlerden günlere kadar değişen sürelerle gerçekleştirilmektedir. H₂SO₄ aktivasyonunun gözenekliliği %10 ila %40 arasında artırabileceği belirtilmiştir. Ancak bu esnada oluşacak dehidrasyon su buharının yüzeye doğru hareketi nedeniyle yüzey alanı gelişimine zarar verebilmektedir. Asidik fonksiyonel gruplar olan amil ve karboksil gruplarının güçlü asitlerle işlenerek karbonize yüzeylere entegre edilebileceği kabul edilmektedir. Asit aktivasyonunun temel amacının biyokömürün yüzeyine asit grupları ekleyerek pH'ını düşürmek ve alkali malzemeleri daha az kararlı ve daha çözünür hale getirmek olduğu da belirtilmiştir. Alkali aktivasyonu ise biyokömürün yüzey bazikliğini artırmak ile lignin ve selüloz gibi organik maddeleri yoğunlaştırmak için NaOH veya KOH kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

Atık ayçiçeği sapı kullanılarak piroliz işlemi sonrasında elde edilen biyokömürün bir kısmı önce optimum koşulları belirlemek üzere gerçekleştirilen deneyler için distile suda yıkanıp 120°C’de 4 saat kurutulduktan sonra öğütülerek toz hale getirilmiştir. Toz biyokömürün yarısı toz HBK olarak ayrılmıştır. Biyokömürün diğer yarısı ise %95-98 saflıktaki derişik H₂SO₄’ten hazırlanan 1 N çözeltide 1 saat yatırılmış, ardından distile suyla iyice yıkanarak 120°C’de 4 saat kurutularak toz H₂SO₄ ABK elde edilmiştir.

Kesikli akışta gerçekleştirilen ön kolon deneyleri için karbonizasyon sonrası distile suyla yıkanıp 120°C’de 4 saat kurutularak granül HBK hazırlanmıştır. Sonrasında %65 saflıktaki derişik asitten hazırlanan 1N’lik HNO₃ çözeltisinde 3 saat süreyle bekletilmek suretiyle aktifleştirilmiş biyokömür distile suyla yıkandıktan sonra 120°C’de 4 saat kurutularak granül HNO₃ ABK elde edilmiştir. Kesikli akıştaki karbon giderimi ile imazamox giderimi korelasyon deneyleri için bunlara ek olarak; %95-98 saflıktaki derişik H₂SO₄’ten hazırlanan 1 N çözeltide 1 saat yatırılarak aktifleştirilmiş, ardından distile suyla iyice yıkanarak 120°C’de 4 saat kurutularak elde edilmiş granül H₂SO₄ ABK da kullanılmıştır.

Bu iki aşamalı ön deney grubundan elde edilen veriler analiz edilerek sürekli akış koşulları için en iyi aktifleştirme metodu ve koşulları seçilmeye çalışılmıştır. Sürekli akış koşulları için de bir ön deney seti hazırlanması ve kestirimlerin denemesi yapılmıştır. Yağlı yüzey aktif maddelerin zayıf asitle yeterli ölçüde giderilemediği yorumlandığından sürekli akış ön deneyinde güçlü asit aktivasyonu denenmiştir. Bunun için %95-98 saflıktaki derişik H₂SO₄’ten hazırlanan 1 N çözeltide 1 saat yatırılarak aktifleştirilmiş, ardından distile suyla iyice yıkanarak 120°C’de 4 saat kurutularak granül H₂SO₄ ABK elde edilmiştir.

Tüm hazırlık deneylerinin sonuçları incelenerek asit aktivasyonunun veriminin temas süresiyle direk olarak ilgili olmadığı değerlendirildiğinden deney planına NaOH ile aktivasyon da eklenmiştir.

Sürekli akış koşullarındaki adsorbanlar:

1. Karbonizasyon işleminden sonra saf suyla yıkanıp 120°C’de 4 saat kurutularak hazırlanan granül HBK,

2. %95-98 saflıktaki derişik H_2SO_4 'ten hazırlanan 0.1 N çözeltide 1 saat yatırılarak aktifleştirilmiş ve sonrasında saf suyla yıkanarak $120^\circ C$ 'de 4 saat kurutularak elde edilen granül H_2SO_4 ABK,
3. Derişik $NaOH$ 'ten hazırlanan 0.1 N çözeltide 1 saat yatırılarak aktifleştirilmiş ve sonrasında saf suyla yıkanarak $120^\circ C$ 'de 4 saat kurutularak elde edilen granül $NaOH$ ABK'dır.



(a)

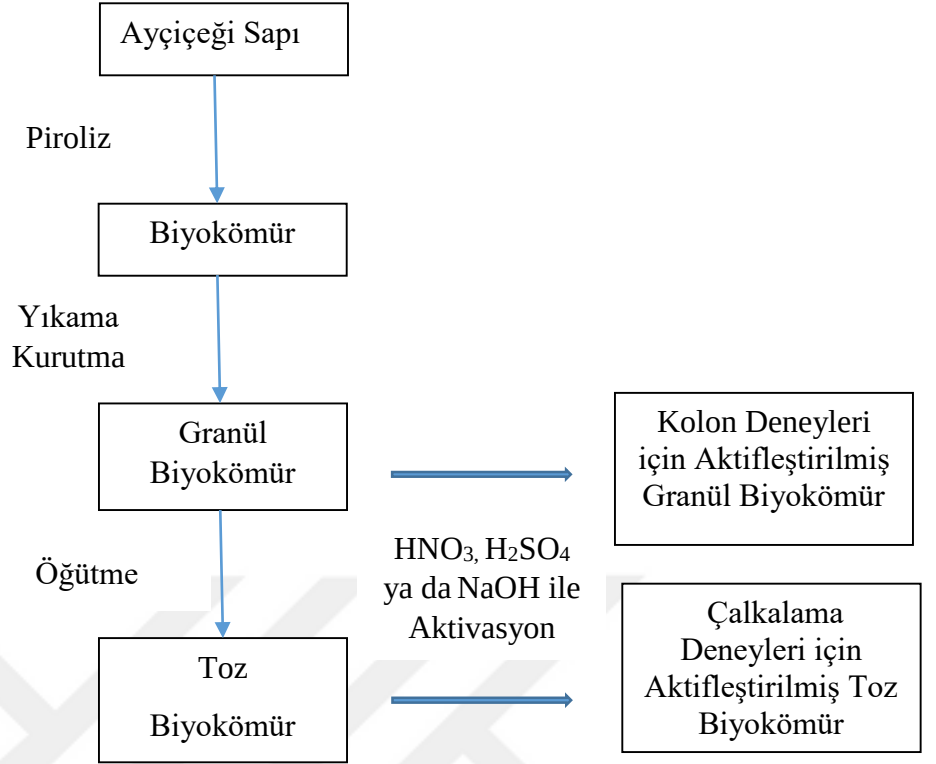


(b)

Şekil 3.4. Adsorbanların yıkanma ve kurutulma görüntüleri

a) Saf Su ile Yıkama b) Etüvde Kurutma

HBK ve ABK hazırlanmasına genel işlem adımları özet olarak Şekil 3.5'te, saf suyla yıkama ve etüvde kurutma işlemlerine dair görüntüler ise 3.4'te yer almaktadır. Kolonda, granül formda olacak şekilde 1 cm yüksekliğinde kuru adsorban yerleştirilerek ağırlıkları ölçülmüştür. Granül formun büyüklüğü ve sıkıştırma oranı birim yükseklik ağırlığını etkileyeceğinden hem tartımda hem de tüm kolon deneylerinde, ortalama 2 cm uzunluğunda kesilmiş ayçiçeği sapı piroliz reaktörüne konulmuş ve biyokömür yıkanıp kurutulma ve aktifleştirme işlemlerine tabi tutulup kolona konulurken birbirine yakın büyüklükte biyokömür parçaları kullanılmıştır. Ufalanmış ya da toz haline gelmiş biyokömür kullanılmamıştır. Kolonda 1 cm yüksekliğinde yıkanıp kurutulmuş granül biyokömürün ağırlık ölçüm sonuçları; HBK için 1,8g, HNO_3 ABK için 1,4g, 1 N H_2SO_4 ABK için 1,1 g, 0.1 N H_2SO_4 için 1,2g, $NaOH$ ABK için ise 1,4 g'dır.



Şekil 3.5. Aktivasyon akış şeması

3.1.3. Adsorban Özelliklerinin Belirlenmesi

Biyokömürün önemli fiziksel özellikleri arasında yüzey alanı ve gözeneklilik bulunmaktadır. Leng vd. (2021) arıtım mühendisliği açısından yüksek gözenekli yapıya ve geniş yüzey alanına sahip biyokömür üretimi oldukça önemli olduğundan bahsetmiştir. Bu nedenle biyokömür üretimi ve gerçekleştirilen çeşitli aktivasyonlar esnasında oluşan koşullar ile elde edilen sonuçlar detaylı olarak incelenmiştir.

Üretilen biyokömür ile elde edilen adsorpsiyon sonuçlarının karşılaştırılabilmesi için ise ticari amaçla kullanılan aktif karbonun da bazı kritik özellikleri irdelenmiştir.

3.1.3.1. Isıl Değer

İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Çevre ve Yer Bilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Laboratuvarı'nda bulunan Kalorimetre Cihazı ile ısı değer ölçümü yapılmıştır. Ayçiçeği sapı max 0,5 cm uzunluk ve 0,1 cm enindeki parçalara ayrılmış ve alınan 0,2746 g numune ile ölçüm gerçekleştirilmiştir. Isıl değer analizi atık adsorbanın yakıt katkısı olarak

kullanılması ihtimalinin değerlendirilebilmesi için yapılmıştır. Analizin yapıldığı cihaz Şekil 3.6’da görülmektedir.



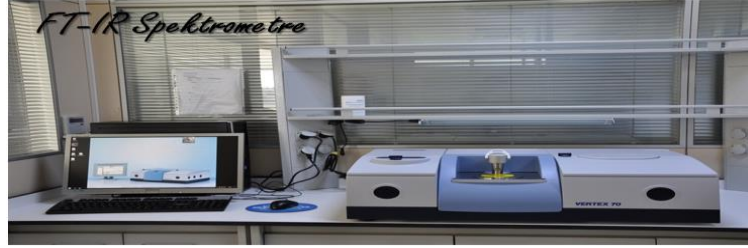
Şekil 3.6. Isıl ölçer (Bomba Kalorimetri)

3.1.3.2. Kimyasal Fonksiyonel Gruplar

FT-IR tekniği, elementlerin yapılarını veya organik ve inorganik maddelerin kimyasal fonksiyonel gruplarını tanımlamak için kullanılan önemli bir analiz metodudur. Bu teknik, zayıflatılmış toplam yansıtma yöntemiyle elde edilen spektrumlar üzerinden yapılan analizle gerçekleştirilmektedir. Biyokömür örnekleri, kızılötesi radyasyona maruz bırakılır ve bu süreçte matristeki bağlar $400-4000\text{ cm}^{-1}$ aralığındaki orta kızılötesi dalga boylarında enerji emer. Bu emilim, moleküllerin titreşmesini sağlar ve moleküller daha yüksek bir enerji durumuna geçer. Bağlar, bağlı atomların kütesine ve bağ türlerine bağlı olarak çeşitli titreşim modlarında hareket ederler. Biyokömür örneklerinin analizi genellikle $550-4000\text{ cm}^{-1}$ aralığındaki spektral dalga boyları kullanılarak yapılır. Işık emilim dalga boyları, mineral veya safsızlıklara, belirli fonksiyonel gruplara ve moleküler yapıya bağlı olarak belirlenir. Örneğin, C=O ($1580-1700\text{ cm}^{-1}$), C=C ($1380-1450\text{ cm}^{-1}$), C-C ve C-H gerilmeleri ($750-900\text{ cm}^{-1}$) karakteristik piklerin artması veya ortaya çıkmasıyla aromatik yapılar tanımlanabilir. Biyokütle pirolizi sırasında ($400-600^{\circ}\text{C}$), yoğunlaşma ve dehidrasyon işlemleri aromatik yapıların artmasına ve alifatik yapıların azalmasına neden olur (Sun ve Tsang, 2023).

Biyokömür kimyasal ve fiziksel fonksiyonel grupların tanımlanması Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Nabiltem Enstrümental Analiz 2 Laboratuvarında bulunan BRUKER marka VERTEX 70 ATR model cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.7). Kızılötesi Spektroskopisi, akademik alanda ve endüstri laboratuvarlarında geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu analiz bir molekül veya bileşik yapısında bulunan bağlar hakkında tanımlayıcı bilgiler sağlar. Temelde, kızılötesi ışığın incelenen madde tarafından soğurulmasına dayanan bu teknik, FT-IR-ATR ünitesi ile absorpsiyon bantlarının dalga

sayısında azalmasını sağlayarak farklı maddelerin spektrum analizlerini, örnek kalınlığından bağımsız olarak ve daha az emekle gerçekleştirebilir. Bu cihaz sayesinde, her türlü katı, sıvı ve gaz numunelerin kalitatif ve kantitatif analizleri yapılabilir (Nabiltem, 2024).



Şekil 3.7. FT-IR spektrometre cihazı (Nabiltem, 2024)

Araştırma kapsamında kullanılan tüm adsorbanlar için FT-IR Analizleri yapılmış ve diğer sonuçlarla korelasyonu açısından değerlendirilmiştir.

3.1.3.3. Yüzey Yapısı

Ham biyokömür (HBK) ve aktif biyokömürlerin (ABK) yüzey yapıları taramalı elektron mikroskobu olan SEM ile analiz edilmiştir. Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Nabiltem Görüntüleme Laboratuvarında bulunan FEİ marka 5kV'lık QUANTA FEG 250 model cihaz ile analizler gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.8).

Taramalı elektron mikroskobu, elektronların mikroskoplarda görüntü elde edilmesinde kullanılabileceği düşüncesiyle keşfedilmiştir, çünkü yüksek voltajlarla hızlandırılan elektronlar, ışığa göre daha yüksek bir çözünürlüğe sahip olabilir. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), genellikle optik kolon, numune hücresi ve görüntüleme sistemi olmak üzere üç temel bölümden oluşur. Görüntüler, yüksek voltajla hızlandırılan elektron demetinin numune üzerinde odaklanmasıyla elde edilir. Bu demet, numune yüzeyini tararken elektron ve numune atomları arasında çeşitli etkileşimler meydana getirir ve bu etkiler uygun dedektörlerde toplanır. Toplanan sinyaller daha sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılır. Yüzey mikroyapı analizi, kesit mikroyapı analizi, toz karakterizasyonu, noktasal, alan ve çizgisel elemental analiz, ayrıca yüzey ve kesit mikroyapı analizleri, hem ikincil elektron dedektörü (SE) hem de geri saçılan elektron dedektörü (BSE) ile gerçekleştirilebilir (Nabiltem, 2024).



Şekil 3.8. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazı (Nabiltem, 2024).

Tez kapsamında kullanılan tüm adsorbanların yüzey yapısı Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) aracılığıyla 20-400 μm arasındaki ölçeklerde 5,6 kV ile 90 Pa basınç altında ve (250x, 500x, 1000x, 2000x, 4000x ve 8000x) çeşitli zoomlarda incelenmiştir.

3.1.3.4. Elemental Yapı

Taramalı elektron mikroskobunda numunenin elemental analizlerinin de gerçekleştirilmesi ve buna dair bir raporlama yapılması şeklinde gerçekleştirilen tanımlama çalışmasıdır. Kısaca EDX analizi olarak bilinen bu yöntem tez kapsamında kullanılan tüm adsorbanlara uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar diğer sonuçlarla korelasyonun anlaşılmasına yönelik olarak değerlendirilmiştir.

3.2.Imazamox'un Biyokömürle Giderim Performansının Değerlendirilmesi

Imazamox analitik standardı (>%95 saf) Dr Ehrenstorfer, GmbH'den (Almanya) satın alınmıştır. Imazamox stok çözeltisi (1000 mg/L) gerekli miktarda Korzamox Ultra'nın (40 g/L) distile suda çözülmesiyle hazırlanmıştır. Adsorbanlar piroliz sonrasında ve aktive edildikten sonra distile su ile yıkanarak $120\pm 1^\circ\text{C}$ 'de 4 saat kurutulmuştur. Çalkalama deneylerinde toz, kolon deneylerinde granül biyokömür kullanılmıştır.

Hesaplamalarda kinetik modellerin istatistiksel korelasyon kestirimi için lineer regresyon analizi, anlamlılık için ise ANOVA testi kullanılmıştır. Diğer tüm analizler sürekli akış koşullarındaki adsorpsiyonun irdelenmesi ve giderimin değerlendirilmesi için deney koşullarının belirlenebilmesi amacıyla yapılmış ön deneylerdir.

3.2.1. Biyokömürün Adsorpsiyon Kapasitesinin Belirlenmesi

Sıfır yük noktasının pH'ı olan pH_{PZC} , yani biyokömür parçacıklarının toplam yüzeyinin negatif yüklü olduğu pH, sürüklenme yöntemi ile ölçülmüştür (Kaykıoğlu, Yıldız ve Bayramol, 2023). Bu amaçla 50 cm³ 0,01 mol/L NaCl çözeltisi ve N₂CO'nun çözünmesini önleyerek pH'ı sabitleştirilmiştir. pH daha sonra 0,1 N HCl veya 0,1 N NaOH eklenerek 2 ile 12 arasında (4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 ve 11) ardışık başlangıç değerlerine ayarlanmış ve çözeltiye granül halde ham ya da aktifleştirilmiş biyokömürler (0,01g) eklenmiştir. 48 saat sonra ulaşılan son pH'lar ölçülmüş ve grafikleştirilmiştir. Eğrinin $pH_{son}=pH_{ilk}$ çizgisini kestiği pH, pH_{pzc} (the point of zero charge) olarak kabul edilmiştir. pH_{pzc} değeri tüm adsorbanlar için ayrı ayrı bulunmuştur.

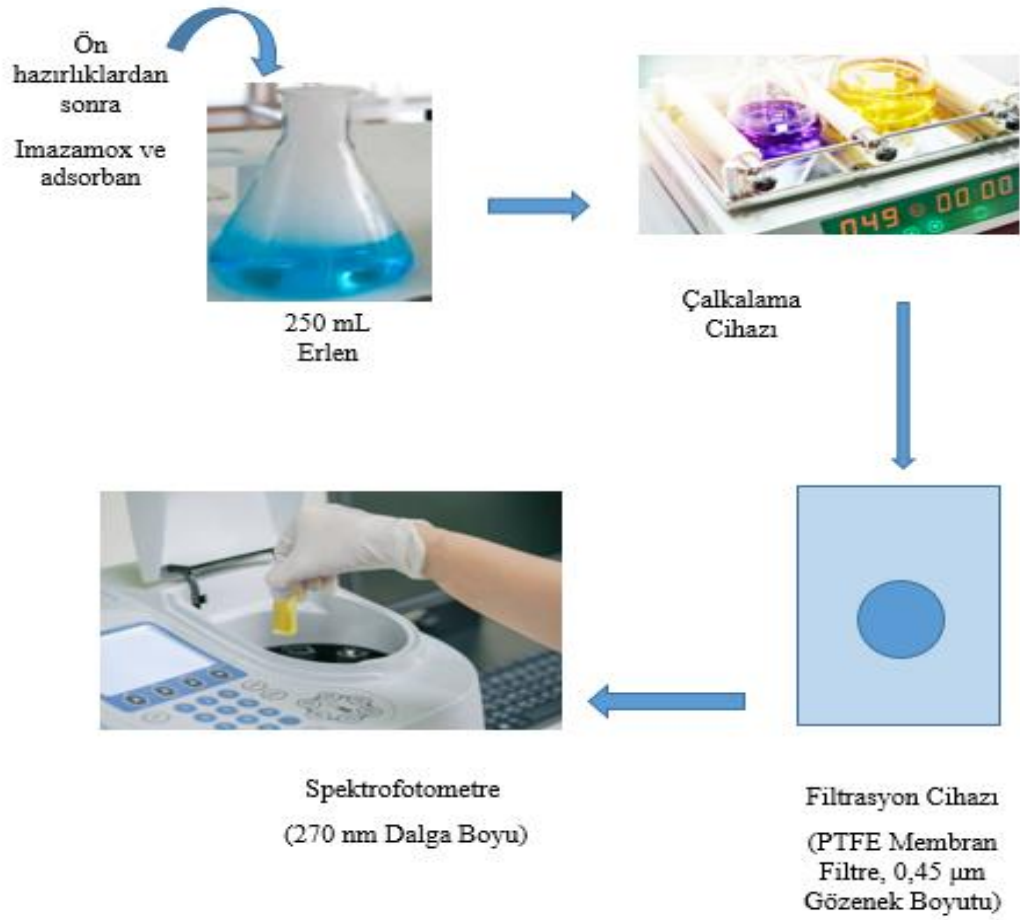
3.2.2. Adsorpsiyon Optimum Koşullarının Belirlenmesi

Tarımsal atıktan üretilen toz HBK ve toz H₂SO₄ ABK kolon deneylerinin detaylı olarak planlanmasına yönelik optimum koşulların belirlenmesi amacıyla bir dizi çalkalama deneyine tabi tutulmuştur.

3.2.2.1. Adsorpsiyon Deneyleri

Üretilen biyokömürün ham ve H₂SO₄ ile aktifleştirilmiş hallerinin adsorban olduğu laboratuvar ortamında en uygun adsorpsiyon koşullarının belirlenmesi için bir dizi çalkalama deneyi gerçekleştirilmiştir. Kesikli ve kontrollü şartlar altında gerçekleştirilen testler için toz adsorban seçilmiştir. TÜRKAK Akreditasyonu bulunan Haliç Çevre Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen adsorpsiyon deneylerinde Çalkalama Cihazı ve 19-1885-01-0182 Kodlu UV-Vis Spektrofotometre Cihazı kullanılmıştır.

Ham ve H₂SO₄ ile aktifleştirilmiş biyokömür için ayrı ayrı olarak pH'ın, çalkalama hızının, temas süresinin ve adsorban dozunun etkileri elde edilen 90 adet numune sonucu doğrultusunda değerlendirilmiştir. 250 mL'lik erlenler içerisinde 100 mL son hacim olacak şekilde çözeltiler hazırlanmıştır. Gerçekleştirilen optimum koşullar belirleme çalışmasına ait deney düzeneği Şekil 3.9'da gösterilmektedir.



Şekil 3.9. Çalkalama deney düzeneği

3.2.2.1.1. Optimum pH

Ortamin pH'ı birkaç nedenden dolayı adsorpsiyonun büyüklüğünü etkileyebilir. Adsorbat negatif yüklü olduğu için adsorban pozitif yüklü olmalıdır. Hidronyum ve hidroksil iyonları kuvvetle adsorbe olduklarından, diğer iyonların adsorpsiyonu çözelti pH'ından etkilenir. Ayrıca asidik ve bazik bileşiklerin iyonlaşma derecesi, adsorpsiyonu etkiler. Genellikle sulu çözeltilerden organik elektrolitlerin adsorpsiyonunun pH azaldıkça arttığı bilinmektedir (Çeşmeli, 2011). Herbisitlerin adsorpsiyonunda pH'ın büyük etkisinin olduğu bilinmektedir (Hu vd., 2021).

pH'ın etkisini değerlendirerek adsorpsiyon için optimum pH değerinin belirlenmesi amacıyla HBK ve H₂SO₄ ABK için ayrı ayrı olarak 2, 4, 6, 8 ve 10 pH değerlerinde çalkalama deneyleri gerçekleştirilmiştir.

3.2.2.1.2. Çalkalama Hızı

Çalkalama hızının etkisini değerlendirerek adsorpsiyon için optimum hız değerinin belirlenmesi amacıyla HBK ve H₂SO₄ ABK için ayrı ayrı olarak 100, 150, 200, 250 ve 300 rpm değerlerinde çalkalama deneyleri gerçekleştirilmiştir.

3.2.2.1.3 Başlangıç Konsantrasyonu

Optimum başlangıç Imazamox konsantrasyonunun belirlendiği çalışmada 8,6; 12,4; 16,3; 20,8; 24,5 mg/L Imazamox çözeltisi 250 mL lik erlene konulmuş üzerlerine optimum adsorban dozu olan 0,05 g HBK ve H₂SO₄ ABK ilave edilmiştir. pH ayarının ardından numuneler 250 rpm hızda, oda sıcaklığında ve 120 dk süreyle çalkalanmıştır.

3.2.2.1.4. Temas Süresi

Temas Süresinin etkisini değerlendirerek adsorpsiyon için optimum sürenin belirlenmesi amacıyla HBK ve H₂SO₄ ABK için ayrı ayrı olarak 20, 40, 60, 80 ve 120 dak boyunca çalkalama deneyleri gerçekleştirilmiştir.

3.2.2.1.5. Adsorban Dozu

Adsorban dozunun etkisini değerlendirerek adsorpsiyon için optimum adsorban miktarının belirlenmesi amacıyla HBK ve H₂SO₄ ABK için ayrı ayrı olarak 0,05; 0,08; 0,10; 0,13 ve 0,15 g adsorban ile çalkalama deneyleri gerçekleştirilmiştir.

3.2.3. Giderim Hesaplamaları

Adsorpsiyon, bir denge sürecidir ve adsorplanan maddenin çözeltideki konsantrasyonu ile katı yüzeye bağlanan konsantrasyonu arasında dinamik bir denge oluşturulana kadar devam eder. Bu denge durumunda, adsorplanan madde katı ve sıvı fazlar arasında belirli bir dağılıma sahiptir. Adsorbanın gramı başına adsorbe edilen herbisit q_e olarak ifade edilmektedir.

$$q_e = (C_0 - C_e) \cdot (V/m) \quad (3.1)$$

Burada q_e adsorban üzerinde adsorbe edilen herbisit miktarını ($\mu\text{g/g}$), C_0 çözeltinin başlangıç konsantrasyonunu ($\mu\text{g/mL}$), C_e adsorpsiyonun dengeye ulaştığı andaki çözelti konsantrasyonunu, V (mL) herbisit çözeltisinin hacmini ve m (g) ise adsorbanın kütlesini temsil etmektedir.

Imazamoxun adsorpsiyon yüzdesi yani giderim verimi ise

$$\text{Adsorpsiyon (\%)} = (C_0 - C_e) / C_0 \cdot 100 \quad (3.2)$$

denklemleri ile hesaplanmıştır (Kaur ve Kaur, 2024).

3.2.4. Adsorpsiyon İzotermi

Adsorpsiyon süreci dengede olduğunda, adsorbe edilen moleküllerin katı ve sıvı fazlardaki dağılımı adsorpsiyon izotermi ile açıklanır. Sabit sıcaklıkta, denge adsorpsiyon kapasitesi ve denge konsantrasyonları hesaplanarak adsorpsiyon izotermi tahmin edilir. Genellikle, Langmuir ve Freundlich izoterm modelleri gibi yöntemler kullanılarak adsorpsiyon süreci incelenir ve yönetim modeline karar vermek için R^2 (Doğrusal Regresyon Katsayısı) değerleri dikkate alınır (Ahmad vd., 2023).

Langmuir izoterminde, adsorpsiyon doğrusal olarak başlangıç derişimiyle artar ve doyma noktasına ulaştığında yüzey tek tabaka ile kaplanır. Bu durumda, yüzeyde adsorbe edilmiş adsorbat miktarı sabit kalır. Tek tabaka adsorpsiyonu için matematiksel model Langmuir modelidir ve adsorpsiyon hızı, adsorbat derişimi ile yüzeydeki boş adsorpsiyon alanlarıyla orantılıdır. Langmuir izoterminde, katı yüzeyindeki her nokta aynı adsorpsiyon aktivitesini gösterir ve yüzey homojen bir enerjiye sahiptir. Adsorplanmış moleküller arasında karşılıklı etkileşim olmadığı için birim yüzeyde adsorplanmış madde miktarının adsorpsiyon hızına herhangi bir etkisi yoktur. Adsorpsiyon maksimuma ulaştığında, adsorplayıcı yüzeyine bağlanan moleküller doymun bir tabaka oluşturur ve adsorpsiyon tek tabaka halinde gerçekleşir. Langmuir adsorpsiyon izotermi doğrusal ifadesi Şekil 3.10'da gösterilmektedir.

$$q_e = \frac{Q_{max} a_L C_e}{1 + a_L C_e} \quad (3.3)$$

$$q_e = \frac{K_L C_e}{1 + a_L C_e} \quad (3.4)$$

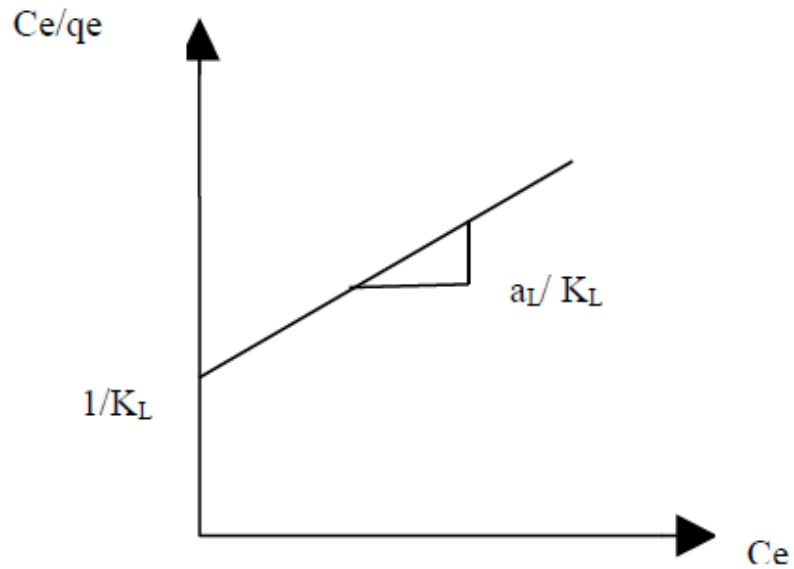
C_e : Adsorpsiyon sonrası çözültide kalan maddenin konsantrasyonu (mg/L)

q_e : Birim adsorban üzerinde adsorplanan madde miktarı (mg/g)

K_L : Adsorbatın adsorplanma kapasitesine bağlı olan sabit (L/g)

a_L : Adsorpsiyon enerjisine bağlı olan sabit (L/mg)

$q_{\max}$: Adsorbanın maksimum adsorplama kapasitesi (mg/g)



Şekil 3.10. Langmuir adsorpsiyon izoterminin doğrusal ifadesi (Çeşmeli, 2011).

Eşitlikte C_e/q_e değerinin, C_e değerine göre değişiminin grafiği çizilerek elde edilen doğrunun eğimi a_L/K_L değerinden, kesim noktası ise $1/K_L$ değerinden hesaplanır. Adsorbanın maksimum adsorplama kapasitesi değeri ise $q_{\max}(K_L/a_L)$ ile hesaplanır. $q_{\max}(K_L/a_L)$ ifadesi tek tabakalı adsorban kapasitesini gösterir. Her molekülün aktivasyon enerjisinin aynı olduğu varsayımı altında, düşük konsantrasyonlarda Henry yasası geçerli olur, bu durumda C_e çok küçüktür ve ifade şu şekilde olur.

$$q_s = K_L C_s \quad (3.5)$$

Adsorpsiyonun etkinliğini belirlemek için boyutsuz R_L (dağılıma) sabiti kullanılır. Bu sabit, 0 ile 1 arasında değerler alırsa, adsorpsiyonun uygun olduğunu gösterir (Aksu ve Yener, 2001; Bayat, 2002; Başbüyük ve Forster, 2003; Ho ve Wang, 2004).

Freundlich izotermi deneysel olarak heterojen sistemleri tanımlamak için kullanılan bir matematiksel modeldir. Freundlich'e göre, bir adsorbanın yüzeyindeki adsorpsiyon alanları heterojendir. Freundlich izotermi, Langmuir izoterminden farklı olarak, bazı önermeler ve ilerlemelerle geliştirilmiştir. Bu izoterm eşitliğinde, düşük konsantrasyonlarda Henry Kanunu uygulanmaz, dolayısıyla dengeden sonra kesin bir sabit adsorbat değeri elde edilmez. Bu model, heterojen yüzey enerjileri için özel bir durumu ifade eder, çünkü Langmuir modelindeki gibi aL 'nin q_e 'ye bir fonksiyonu olarak değişir.

$$q_s = K_f C_s^{\frac{1}{n}} \quad (3.6)$$

C_e : Adsorpsiyon sonrası çözeltide kalan maddenin konsantrasyonu (mg/l)

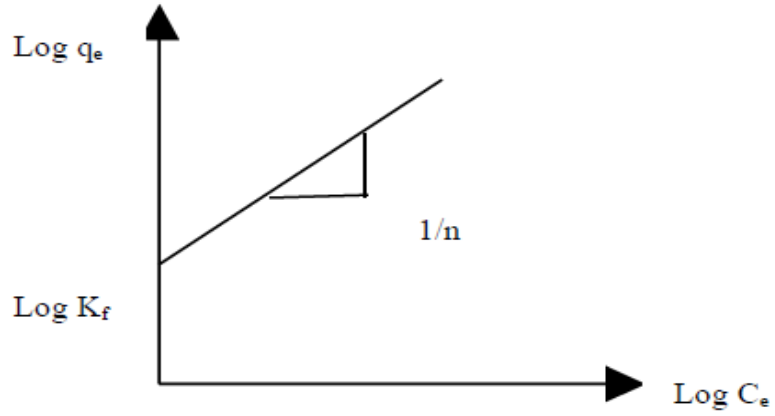
q_e : Birim adsorban üzerine adsorplanan madde miktarı (mg/g)

K_f : Deneysel olarak hesaplanan adsorpsiyon kapasitesi (L/g)

n : Adsorpsiyon yoğunluğu (birimsiz)

Freundlich izoterminde eşitliğin her iki tarafının logaritması alınarak doğrusal hale getirilir. Freundlich İzotermine doğrusal grfağı Şekil 3.11'de gösterilmektedir.

$$\log q_s = K_f + \frac{1}{n} \log C_s \quad (3.7)$$



Şekil 3.11. Freundlich izoterminin doğrusal grafiği (Çeşmeli, 2011).

$\text{Log } q_e$ 'nin $\text{Log } C_e$ 'ye göre değişiminin grafiğinin oluşturulmasıyla K_f ve n sabitleri tespit edilir. Elde edilen doğrunun y eksenini kestiği nokta $\text{log } K_f$ 'yi verirken, eğimi ise $1/n$ 'i ifade eder. n değeri 1'den büyük olduğunda, adsorpsiyon işleminin verimli olduğunu gösterir (Chiou, 2002). Eğer $n=1$, adsorpsiyon doğrusal bir şekilde gerçekleşir. Bu durum, adsorpsiyon bölgelerinin homojen bir enerji seviyesinde olduğunu (Langmuir modelinde olduğu gibi) ve adsorplanan maddeler arasında etkileşim olmadığını gösterir. Eğer $1/n < 1$ ise, adsorpsiyon elverişlidir, adsorpsiyon kapasitesi artar ve yeni adsorpsiyon bölgeleri oluşur. Eğer $1/n \gg 1$ ise, adsorpsiyon bağları zayıflar, istenmeyen adsorpsiyon meydana gelir ve sonuç olarak adsorpsiyon kapasitesi azalır (Hameed, Ahmed ve Aziz, 2007; Özcan ve Özcan, 2004).

Deneysel çalışmalarda toplanan veriler ışığında Freundlich ve Langmuir İzotermi açılarından değerlendirme yapılmıştır. Çeşitli izotermelere ait bilgiler Çizelge 3.1'de yer almaktadır.

Çizelge 3.1. İki parametrelili adsorpsiyon izotermi modelleri ve eşitlikleri (Sarigül, 2018).

İzoterm	Genel Eşitlik	Doğrusal Biçim	Grafik
Langmuir ¹	$q_e = \frac{q_0 b C_e}{1 + b C_e}$	$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{b Q_0} + \frac{C_e}{Q_0}$ $\frac{1}{q_e} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{b Q_0 C_e}$ $q_e = Q_0 - \frac{q_e}{b C_e}$ $\frac{q_e}{C_e} = b Q_0 - b q_e$	$\frac{C_e}{q_e}$ 'ye karşı C_e $\frac{1}{q_e}$ 'ye karşı $\frac{1}{C_e}$ q_e 'ye karşı $\frac{q_e}{b C_e}$ $\frac{q_e}{C_e}$ 'ye karşı q_e
Freundlich ¹	$q_e = K_F C_e^{1/n}$	$\log q_e = \log K_F - \frac{1}{n} \log C_e$	$\log q_e$ 'ye karşı $\log C_e$
Dubinin-Radushkevich ¹	$q_e = (q_s)^{(-k_{ad} \epsilon^2)}$	$\ln q_e = \ln(q_s) - k_{ad} \epsilon^2$	$\log q_e$ 'ye karşı ϵ^2
Temkin ¹	$q_e = \frac{RT}{b_T} \ln A_T C_e$	$q_e = \frac{RT}{b_T} \ln A_T + \left(\frac{RT}{b_T}\right) \ln C_e$	q_e 'ye karşı $\ln C_e$
Flory-Huggins ¹	$\frac{\theta}{C_0} = K_{FH}(1 - \theta)^{n_{FH}}$	$\log \frac{\theta}{C_0} = \log(K_{FH}) + n_{FH} \log(1 - \theta)$	$\log \frac{\theta}{C_0}$ 'a karşı $\log(1 - \theta)$
Hill ¹	$\frac{q_{sH} C_e^{n_H}}{q_e = K_D + C_e^{n_H}}$	$\log \frac{q_e}{q_{sH} - q_e} = n_H \log(C_e) - \log(K_D)$	$\log \frac{q_e}{q_{sH} - q_e}$ 'ye karşı $\log(C_e)$
Genelleştirilmiş izoterm ²	$\ln \left[\left(\frac{q_{max}}{q_e} \right) - 1 \right] = \ln K_C - N \ln C_e$	-	-

3.2.5. Adsorpsiyon Kinetikleri

Rambabu vd. (2023) adsorpsiyon kinetiğinin mekanizmalar, adsorbent ve adsorbat moleküllerinin davranışı ile denge temas süresi hakkında bilgi veren bir çalışma olduğunu belirtmiştir. Bu nitelikler, işlemin ölçeklendirilmesi ve adsorpsiyon sisteminin uygulanması için hayati öneme sahiptir. Adsorpsiyon sürecini tanımlayan ve adsorbatın adsorbent yüzeyine tutunması sırasında hangi mekanizmanın etkili olduğunu belirlemeye yönelik çeşitli kinetik modeller bulunmaktadır. Bu modeller arasında yalancı birinci dereceden kinetik model ve yalancı ikinci dereceden kinetik model bulunmaktadır.

Yalancı Birinci Derecen Kinetik Model; Lagergren tarafından geliştirilmiştir ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\log (q_e - q_t) = \log (q_e) - k_1 / (2.303) t \quad (3.8)$$

Burada;

q_e : Denge anında adsorbentin gramı başına adsorplanan madde miktarı (mg/g),

q_t : Herhangi bir anda adsorbentin gramı başına adsorplanan madde miktarı (mg/g),

k_1 : Hız sabiti (dak^{-1}),

t : Temas süresidir.

Hız sabiti k_1 , $\log (q_e - q_t)$ 'nin t 'ye karşı çizilen grafiğinin eğiminden, teorik q_e değeri ise grafiğin kesişim noktasından hesaplanır.

Yalancı İkinci Derecen Kinetik Model; Ho tarafından geliştirilmiştir ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

Bu model,

$$t/q_t = (1 / (k_2 q_e^2)) + (1/q_e) t \quad (3.9.)$$

bağıntısıyla verilir. Burada;

q_e ; Denge anında adsorbentin gramı başına adsorplanan madde miktarı (mg/g),

q_t ; Herhangi bir anda adsorbentin gramı başına adsorplanan madde miktarı (mg/g),

k_2 ; Hız sabitidir. (g/mg. min).

İlk adsorpsiyon hızı, $h = k_2 . q_e^2$ formülüyle ifade edilir. Burada, hız sabiti k_2 ve teorik q_e değeri, sırasıyla t/q_t 'nin t 'ye karşı çizilen grafiğinin kesişim noktası ve eğiminden hesaplanmaktadır.

3.2.6. Kolon Adsorpsiyon Deneyleri

Tekirdağ Valiliği, TESKİ ve TÜBİTAK'tan doktora tezi için Türkmenli, Çokal ve Naip yerüstü su kaynaklarından numune alınması hususunda gereken izinler alınmıştır. Ardından (her bir su kaynağından 250 mL) su numuneleri toplanmıştır. Toplanan numuneler tek bir temsili numune oluşturulması amacıyla bir arınık kapta birleştirilmiştir. Temsil edici

numunede Uv-Vis Spektrofotometre kullanılarak 270 nm dalga boyunda yapılan ölçümde imazamox tespit edilememiştir. Ölçüm metodu Bölüm 3.2.7’de anlatılmıştır.

Bu nedenle deneyler için stok çözeltisinden (1000 mg/L imazamox) seyrelterek deney planları doğrultusunda sentetik numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler çalkalama deneylerine ek olarak bu doktora tezinin oluşturulması için Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi BAP Birimi tarafından onaylanan NKUBAP.06.DR.21.316 nolu proje kapsamında özel olarak temin edilen cam kolon deney düzeneğinde kesikli ve sürekli akış koşullarında adsorpsiyon işlemlerine tabi tutulmuştur. Kolon deney düzeneği Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Kolonda adsorpsiyonda kolondan kaçağı önleyen ve sabit akımı sağlayan cam yünü (Dadebo, Atukunda, İbrahim ve Nasr, 2023) kullanılmıştır.



Şekil 3.12.Deney düzeneği görseli

Imazamoxun bir tarımsal atık olan ayçiçeği sapından üretilen biyokömür ile gideriminin farklı koşullarda istatistiksel olarak değerlendirilebilmesi amacıyla saf su ile önce stok çözeltisi (1000 mg/L) sonra da deney planlarına göre çeşitli konsantrasyonlarda çözeltiler hazırlanmıştır. Seçilen Imazamox sentetik numune konsantrasyonları 40 g/L imazamox içeren ticari bir herbisit olan ve karanlık kuru ortamda saklanan Şekil 3.13’deki

Korzamox Ultra'dan seyreltilerek hazırlanmıştır. Korzamox Ultra'nın ticari olarak halen kullanıldığı, yetkili Ziraat Mühendisleri tarafından ilde reçetelendiği Tekirdağ Tarım ve Orman İl Müdürlüğü Bitkisel Üretim ve Bitki Sağlığı Şube Müdürlüğü'nden teyit edilmiştir.



Şekil 3.13. Ticari olarak kullanılan imazamox herbisiti

Ham ve aktifleştirilmiş biyokömürün imazamox gideriminde ticari aktif karbona ikame alternatifi olasılığı da değerlendirileceğinden, aktif karbonla da bazı deneyler gerçekleştirilmiş ve onun da özelliklerinin belirlenmesine yönelik bazı deneyler (FT-IR, SEM, EDX) yapılmıştır. Üst girişli kolon adsorpsiyon deneyinde çıkışa adsorban kaçışının önlenmesi amacıyla kuvars kumu kullanılmıştır (Li, Liu, Wang, Ying, Huo ve Yang, 2020). Deneylerde Çorlu Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Laboratuvarında bulunan ve Şekil 3.14'te görülen pH metre, her deney pratiğinden önce kalibre edilerek, kullanılmıştır.



Şekil 3.14. pH Metre

3.2.6.1. Kesikli Kolon Deneyleri

Parçacık deney sistemlerinde elde edilen sonuçlar, adsorbanın adsorpsiyon kapasitesi ve sistemin etkinliği hakkında yararlı bilgiler sağlar (Yüksel, 2017). Doğru sürekli akış tasarımının yapılması için önce kesikli akışta denemeler yapmak yararlıdır (Sanchez-Yepe, Santoz, Romero ve Lorenzo, 2024). Bu nedenle çalkalama deneylerinin yanı sıra bir dizi kesikli akış kolon deneyi de gerçekleştirilmiştir.

Seçilen Imazamox sentetik numune konsantrasyonları 40 g/L Imazamox içeren ticari bir herbisit olan ve karanlık kuru ortamda saklanan Şekil 3.12'deki Korzamox Ultra'dan hazırlanan (1000 mg/L) stok çözeltisinden seyreltilerek; 0,2 mg/L, 0,4 mg/L, 0,6 mg/L, 0,8 mg/L ve 1 mg/L olarak kullanımdan hemen önce hazırlanmıştır.

Su numuneleri Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Çorlu Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Laboratuvarı'nda NÜVE ND 12 marka distile su cihazından elde edilmiş, 20 °C'deki saf su kullanılarak hazırlanmıştır. Numunelerin pH ayarlamaları 1N NaOH ve 1N HNO₃ çözeltileri yardımıyla yapılmıştır. Ham biyokömürün (HBK) adsorban olarak kullanıldığı laboratuvar çalışmalarına ait deney planı Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Kesikli akış koşullarında kolonda ham biyokömürle (HBK) adsorpsiyon deney planı

Adsorban Türü	Kolondaki Adsorban Yüksekliği (cm)	pH	Başlangıç Konsantrasyonu (mg/L)
HBK	1	6	0,2
HBK	1	7	0,2
HBK	1	8	0,2
HBK	5	6	0,2
HBK	5	7	0,2
HBK	5	8	0,2
HBK	1	6	0,4
HBK	1	7	0,4
HBK	1	8	0,4
HBK	5	6	0,4
HBK	5	7	0,4
HBK	5	8	0,4
HBK	1	6	0,6

Çizelge 3.2. Kesikli akış koşullarında kolonda ham biyokömürle (HBK) adsorpsiyon deney planı (devamı)

HBK	1	7	0,6
HBK	1	8	0,6
HBK	5	6	0,6
HBK	5	7	0,6
HBK	5	8	0,6
HBK	1	6	0,8
HBK	1	7	0,8
HBK	1	8	0,8
HBK	5	6	0,8
HBK	5	7	0,8
HBK	5	8	0,8
HBK	1	6	1
HBK	1	7	1
HBK	1	8	1
HBK	5	6	1
HBK	5	7	1
HBK	5	8	1

HNO₃ ile Aktifleştirilmiş biyokömürün (HNO₃ ABK) adsorban olarak kullanıldığı laboratuvar çalışmalarına ait deney planı ise Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Kesikli akış koşullarında kolonda HNO₃ ile aktifleştirilmiş biyokömürle (ABK) adsorpsiyon deney planı

Adsorban Türü	Kolondaki Adsorban Yüksekliği (cm)	pH	Başlangıç Konsantrasyonu (mg/L)
HNO ₃ ABK	1	6	0,2
HNO ₃ ABK	1	7	0,2
HNO ₃ ABK	1	8	0,2
HNO ₃ ABK	5	6	0,2
HNO ₃ ABK	5	7	0,2
HNO ₃ ABK	5	8	0,2
HNO ₃ ABK	1	6	0,4
HNO ₃ ABK	1	7	0,4
HNO ₃ ABK	1	8	0,4

Çizelge 3.3. Kesikli akış koşullarında kolonda HNO₃ ile aktifleştirilmiş biyokömürle (ABK) adsorpsiyon deney planı (devamı)

HNO ₃ ABK	5	6	0,4
HNO ₃ ABK	5	7	0,4
HNO ₃ ABK	5	8	0,4
HNO ₃ ABK	1	6	0,6
HNO ₃ ABK	1	7	0,6
HNO ₃ ABK	1	8	0,6
HNO ₃ ABK	5	6	0,6
HNO ₃ ABK	5	7	0,6
HNO ₃ ABK	5	8	0,6
HNO ₃ ABK	1	6	0,8
HNO ₃ ABK	1	7	0,8
HNO ₃ ABK	1	8	0,8
HNO ₃ ABK	5	6	0,8
HNO ₃ ABK	5	7	0,8
HNO ₃ ABK	5	8	0,8
HNO ₃ ABK	1	6	1
HNO ₃ ABK	1	7	1
HNO ₃ ABK	1	8	1
HNO ₃ ABK	5	6	1
HNO ₃ ABK	5	7	1
HNO ₃ ABK	5	8	1

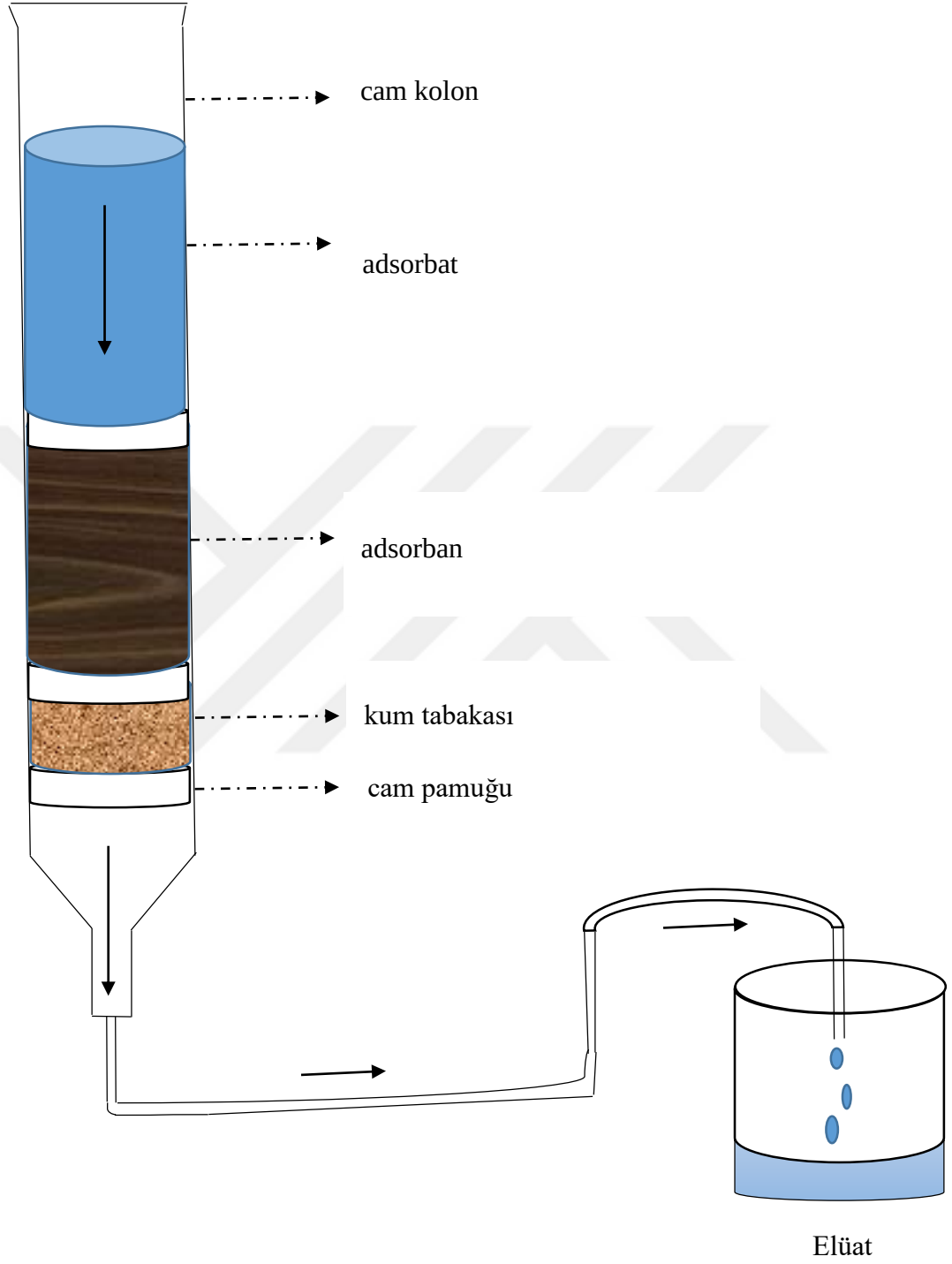


Şekil 3.15. Elde edilen numunelerden bazıları

Elde edilen numuneler Şekil 3.15'te görüldüğü gibi tek kullanımlık numune kaplarına alınarak saklama koşullarına uygun olarak (+4 °C) saklanmıştır. Tüm numunelere UV-Vis Spektrofotometre ile 270 nm dalga boyunda absorbans ölçümü yapılmıştır. Bu ölçüm sonucunda temsil edici sonuç vereceği değerlendirilen numuneler LC-MS/MS ile kalıntı Imazamox Tayini, TOC, TC ve IC analizleri yapılması için Nabiltem'e teslim edilmiştir.

Kolonda kesikli akış koşullarında gerçekleştirilen adsorpsiyon deneylerinin deney düzeneği şematik çizimi Şekil 3.16'da bulunmaktadır.

adsorbat girişı



Şekil 3.16. Kesikli akış deney düzeneği şematik gösterimi

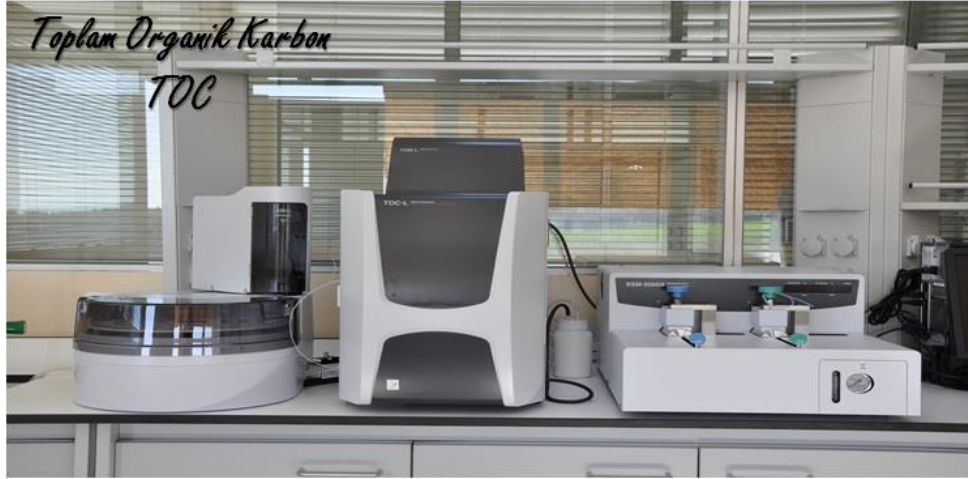
Kesikli akış koşullarında ikinci aşama olarak 1 N H₂SO₄ ABK ve AC'nin kullanıldığı deneyler yapılmıştır. Gerçekleştirilen deneylerden seçilen elüat numuneleri için Nabiltem'de LC-MS/MS ile imazamox analizi gerçekleştirilmiştir. Çizelge 3.4'te bu deneylere ait plan yer almaktadır.

Çizelge 3.4. Kesikli akış koşullarında kolon deney planı

Adsorban Türü	Kolondaki Adsorban Yüksekliği (cm)	pH	Başlangıç Konsantrasyonu (mg/L)
1 N H ₂ SO ₄ ABK	1	6	0,2
1 N H ₂ SO ₄ ABK	1	7	0,2
1 N H ₂ SO ₄ ABK	1	8	0,2
1 N H ₂ SO ₄ ABK	5	6	0,2
1 N H ₂ SO ₄ ABK	5	7	0,2
1 N H ₂ SO ₄ ABK	5	8	0,2
1 N H ₂ SO ₄ ABK	1	6	0,4
1 N H ₂ SO ₄ ABK	1	7	0,4
1 N H ₂ SO ₄ ABK	1	8	0,4
1 N H ₂ SO ₄ ABK	5	6	0,4
1 N H ₂ SO ₄ ABK	5	7	0,4
1 N H ₂ SO ₄ ABK	5	8	0,4
1 N H ₂ SO ₄ ABK	1	6	0,6
1 N H ₂ SO ₄ ABK	1	7	0,6
1 N H ₂ SO ₄ ABK	1	8	0,6
1 N H ₂ SO ₄ ABK	5	6	0,6
1 N H ₂ SO ₄ ABK	5	7	0,6
1 N H ₂ SO ₄ ABK	5	8	0,6
1 N H ₂ SO ₄ ABK	1	6	0,8
1 N H ₂ SO ₄ ABK	1	7	0,8
1 N H ₂ SO ₄ ABK	1	8	0,8
1 N H ₂ SO ₄ ABK	5	6	0,8
1 N H ₂ SO ₄ ABK	5	7	0,8
1 N H ₂ SO ₄ ABK	5	8	0,8
1 N H ₂ SO ₄ ABK	1	6	1
1 N H ₂ SO ₄ ABK	1	7	1
1 N H ₂ SO ₄ ABK	1	8	1
1 N H ₂ SO ₄ ABK	5	6	1
1 N H ₂ SO ₄ ABK	5	7	1
1 N H ₂ SO ₄ ABK	5	8	1

Çizelge 3.4. Kesikli akış koşullarında kolon deney planı (devamı)

AC	1	6	0,2
AC	1	7	0,2
AC	1	8	0,2
AC	5	6	0,2
AC	5	7	0,2
AC	5	8	0,2
AC	1	6	0,4
AC	1	7	0,4
AC	1	8	0,4
AC	5	6	0,4
AC	5	7	0,4
AC	5	8	0,4
AC	1	6	0,6
AC	1	7	0,6
AC	1	8	0,6
AC	5	6	0,6
AC	5	7	0,6
AC	5	8	0,6
AC	1	6	0,8
AC	1	7	0,8
AC	1	8	0,8
AC	5	6	0,8
AC	5	7	0,8
AC	5	8	0,8
AC	1	6	1
AC	1	7	1
AC	1	8	1
AC	5	6	1
AC	5	7	1
AC	5	8	1



Şekil 3.17. Toplam organik karbon (TOC) cihazı görseli (Nabiltem, 2024).

İmazamoks'un gideriminin yanı sıra Toplam Organik Karbon (TOC), Toplam Karbon (TC) ve İnorganik Karbon (IC) giderimi de incelenmiştir. Analizler, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Nabiltem Laboratuvarı'nda TOC-L CPH/CPN marka SSM 5000A model cihazla gerçekleştirilmiştir. Cihazın görüntüsü Şekil 3.17'de sunulmuştur. TOC-L serisi, 680°C'de katalitik oksidasyon yöntemiyle çalışmaktadır. Bu analizörler, 4 µg/L ile 30.000 mg/L arasında geniş bir ölçüm aralığı sunar ve NDIR ile eşgüdümlü olarak 4 µg/L'lik tespit limitlerine kadar inebilmektedir. Bu katalitik oksidasyon yöntemi, en yüksek hassasiyet seviyesini sağlar. Ayrıca, bu yöntem, sadece kolayca bozunabilen düşük molekül ağırlıklı organik bileşiklerin değil, aynı zamanda çözünmeyen ve bozunması zor makromoleküler organik bileşiklerin de etkili bir şekilde oksitlenmesini sağlamaktadır (Nabiltem, 2024).

3.2.6.2. Sürekli Kolon Deneyleri

Adsorbent ile adsorbanın fizikokimyasal uyumu açısından değerlendirilmeleri ve çeşitli koşullarda adsorbentin giderimi hakkında bilgi sahibi olunması amacıyla çalkalama adsorpsiyon deneyleri ve cam kolonda kesikli akış koşullarında deneyler yapılmıştır. Bu deneyler bilimsel bir araştırma için gerekli veri setini sağlamıştır. Ancak bu araştırmanın asıl amacının ülkemize ek döviz yükü oluşturan ithal aktif karbon yerine tarımsal atıklardan yerli üretimle saha koşullarında kullanıma uygun bir ikame adsorban üretmektir. Kesikli akış koşulları deneylerinde daha fazla su hacimlerinde adsorbanın sergileyeceği davranışı kestirmek oldukça zordur. Su kaynaklarına yönelik riskler nedeniyle bilimsel araştırmalardan beklenen sonuçlardan biri de laboratuvar koşullarındaki prototiplerden

sahadaki su arıtma sistemleri tasarımı için kestirimler yapılabilmesidir. Bütün bu nedenlerden yola çıkılarak sürekli akış koşullarında ve farklı aktifleştirme seçeneklerinin eklendiği deneylerin yapılarak elde edilen tüm veri setinin resmin tamamını görmeye yönelik olarak değerlendirilmesine karar verilmiştir.

Su ve adsorbentin özelliklerine bağlı olarak arıtma tesislerinde genellikle sabit yataklı kolonlardaki adsorpsiyon tercih edilmektedir. Sürekli akış koşullarında adsorpsiyon ilk temas noktasından başlar ve kolonun sonraki noktalarında devam eder. Kolon suda ilerledikçe içindeki kirletici konsantrasyonu azalır ve çıkışta minimuma düşer. Kolondaki adsorbanın kapasitesi azaldıkça çıkış suyundaki konsantrasyon da artmaya başlar. Adsorpsiyon bölgesi de kolonda ileriye doğru kayar. Bu durum adsorbanın etkinliğinin azalması anlamına gelmektedir.

Gerçek koşulların öngörülmesi için adsorpsiyon kolon çalışmalarında akış hızı ve yatak yüksekliği gibi değişkenlerin adsorpsiyon sürecine olan etkilerinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Gök ve Mesutoğlu (2018) kolon kırılma noktasının kolondan dışarı çıkan çözeltinin konsantrasyonunun (C_e), kolona girişteki çözeltinin konsantrasyonuna (C_0) oranının yaklaşık %5-10 olduğu nokta olduğunu belirtmişlerdir. Bu oran %95'e ulaştığında, kolonda bulunan doymuş adsorbanın yenisi ile değiştirilmesi gerekmektedir. Belirtilen noktalar Şekil 3.18'de gösterilmiştir.

Kolon kırılma noktasındaki adsorplanan kirletici miktarı (q_B ; mg/g) Eşitlik (3.8.)'den hesaplanır:

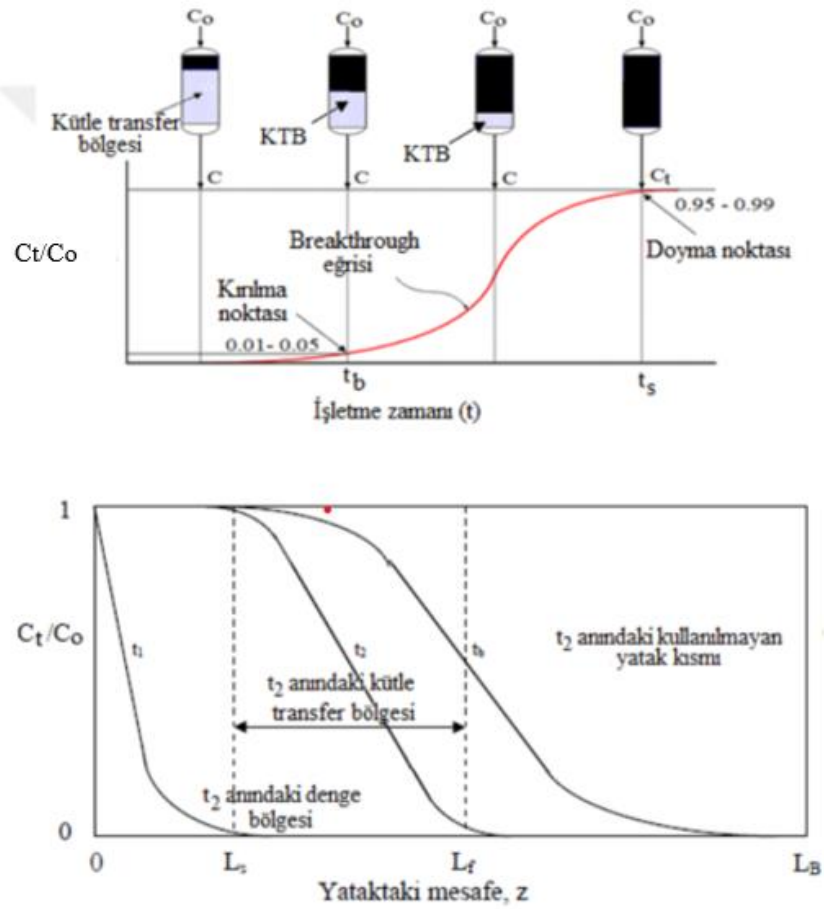
$$q_B = Q_V (C_0 - (C_B / 2)) t_B / m_{adsorban} \quad (3.8.)$$

C_0 , kolona giren kirletici konsantrasyonunu (mg/L) temsil ederken, $m_{adsorban}$ kolon içindeki adsorban miktarını (g), Q_V akış hızını (mL/dk), C_B kırılma noktasındaki konsantrasyonunu (mg/L) ve t_B kırılma noktası zamanını (dk) ifade eder (Gök ve Mesutoğlu, 2018).

Yüksel (2017) çalışmasında ideal bir sabit yataklı kolonlarda adsorpsiyonun Breakthrouh Eğrisi ile açıklandığını ve kolonlar için şu kabullerin yapıldığını belirtmiştir;

- Yatağı oluşturan katı partiküller için dış ve iç kütle transfer etkileri çok düşüktür.

- Piston akışı vardır.
- Eksenel difüzyon ihmal edilir.
- Adsorplanan bileşenin yataktaki başlangıç konsantrasyonu sıfırdır.
- Adsorpsiyon izotermi yatak girişinde başlar.



Şekil 3.18. Sabit yatak kolonunda kütle transfer bölgesi, breakthrough eğrisi ve konsantrasyon konum profilleri (Yüksel, 2017).

Sürekli kolon deneyleri ile ilgili gerçekleştirilen çalışmalar literatür taraması yapılarak incelenmiş ve adsorban, adsorbat, adsorpsiyon sistemi için seçilen yatak yükseklikleri, başlangıç konsantrasyonları ile akış hızları seçimi arasındaki korelasyon değerlendirilmiş ve özet bilgi olarak Çizelge 3.5'te sunulmuştur.

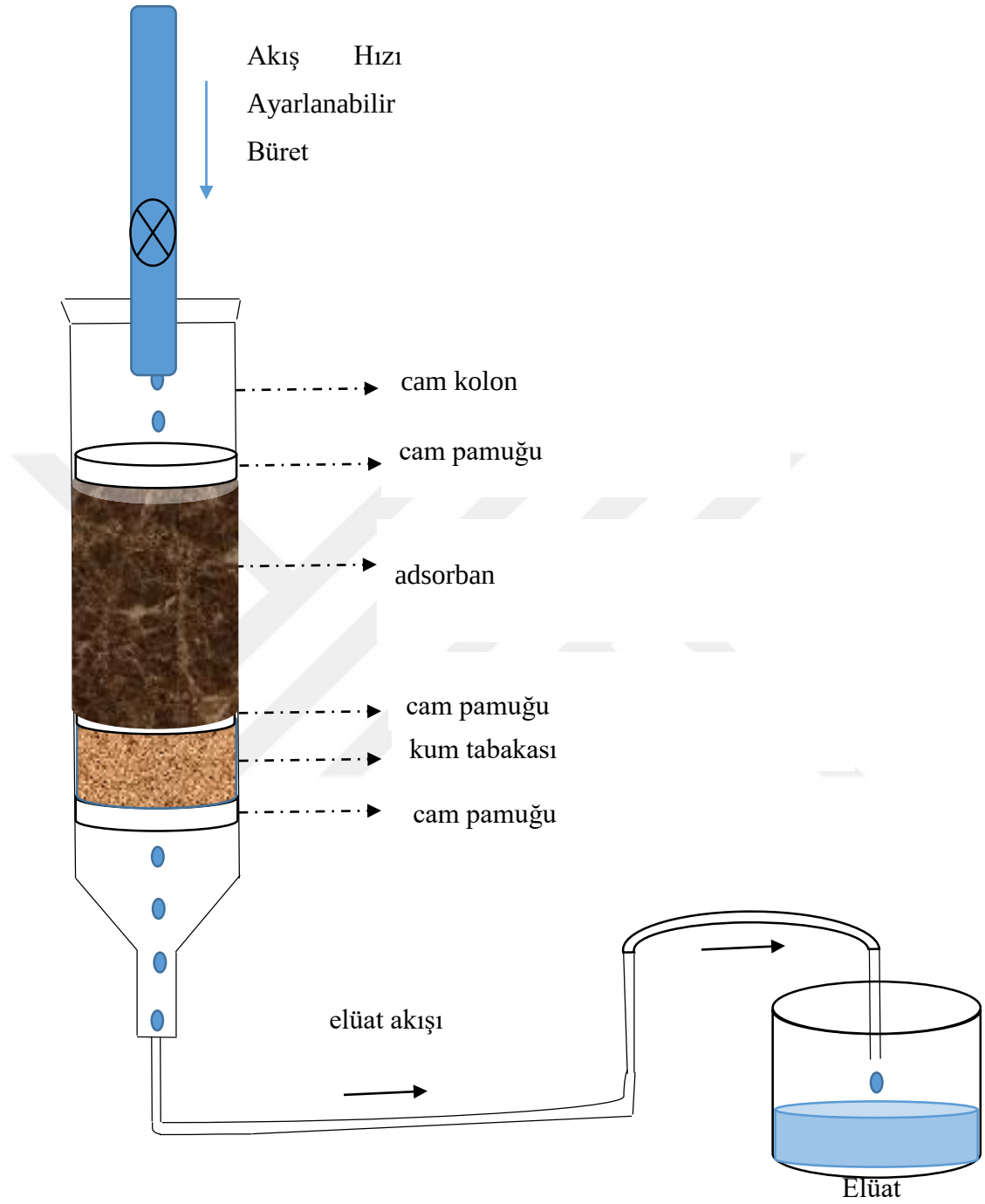
Çizelge 3.5. Sabit yataklı sürekli akıştaki kolon adsorpsiyon çalışmaları literatür özeti

Kaynak	Adsorban	Adsorbat	Adsorpsiyon Sistemi	Yatak Yüksekliği (cm)	C ₀ mg/L	Akış Hızı mL/dak
Tez Çalışması	Ayçiçeği Sapları	Imazamox (Herbisit)	Sabit Yataklı	5 ve 10	Sabit	5 ve 10
Gök vd. (2018)	Prina	Ağır Metaller	Sabit Yataklı	15 ve 25 45 ve 75 g	Sabit	20 ve 30
Yüksel (2017) YL Tezi	Aktif Karbon (Şeftali, Kayısı, Badem kabuğu)	Anyonik ve Katyonik Maddeler	Sabit Yataklı	1.5-2.5 ve 3.5 0,5-0,75-1 g	10-20-40 mg/L	2-3 ve 4
Şakalar (2009) YL Tezi	Yerfıstığı Kabuğu	Boyar Madde	Sabit Yataklı	10 cm	10-20-50-75-100-150	0.35
Haydari Aziz, Kaya, Daştan, Quazzani, Mandi ve Aziz (2023)	Grafen Oksit	Zeytinyağı atıksuyu	Sabit Yataklı	15-25-35 cm	1000-2000-3000-4000	0,5-1,5-3
Argun (2007)	Çam Kabuğu, Çam kozalağı, Meşe Talaşı	Ağır Metaller	Sabit Yataklı	8-10-12 cm	Sabit	10-12,5-15

Sürekli akış deneylerine başlamadan önce ham biyokömürün farklı bir kimyasalla aktivasyonunun giderim verimine etkisini değerlendirmek üzere 1 N H₂SO₄ ABK adsorbanla Çizelge 3.6’da planı, Şekil 3.19 ve Şekil 3.20’de görseli sunulan deneyler gerçekleştirilmiştir. Burada kesikli akış koşullarında zayıf asit aktivasyonunda elde edilen giderim veriminin artırılması hedeflendiğinden, güçlü bir asit olan H₂SO₄’ün 1N gibi yüksek konsantrasyondaki bir çözeltisiyle aktivasyonu, Kaykıoğlu (2016)’nın çalışmasında adsorpsiyon dengesine ulaşılan pH’lardan olduğundan pH=6 olarak seçilmiş ve adsorbat konsantrasyonunun zamana karşı değişimi değerlendirilmiştir. Imazamox hem anyonik hem de katyonik yapıları barındırdığından adsorbatın pH’ı nötre yakın seçilmiştir.

Çizelge 3.6. H₂SO₄ ile ABK ile kolonda Imazamox giderimi ön deney planı

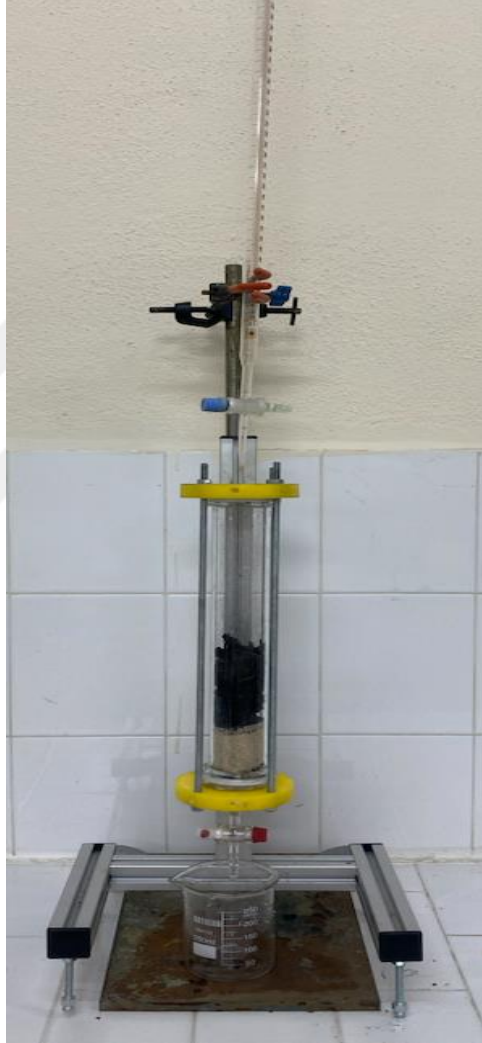
Adsorban Türü	Kolondaki Adsorban Yüksekliği (cm)	Başlangıç Imazamox Konsantrasyonu (mg/L)	pH	Numune Alma Süresi t (dak)			
				15.dak	30.dak	60.dak	90.dak
H ₂ SO ₄ ABK	5	0,8	6	*	*	*	*



Şekil 3.19. Sürekli akış deney düzeneği şematik gösterimi

Kolona biyokömür yerleştirilmeden önce girişim ihtimalinin tamamen engellenmesi gerekmektedir. Laboratuvar malzemelerinde en çok cam tercih edilmektedir. Aydın vd.'nin (2021) çalışmalarında da belirttiği gibi cam üretiminde kuvars kumu kullanılmaktadır. Bu nedenle hem fiziksel hem de kimyasal girişimin engellenmesi için kolona önce saf suyla

yıkanmış ve 24 saat oda sıcaklığında kurutulmuş haldeki kuvars kumu 3 cm yüksekliğinde olacak şekilde doldurulmuştur. Biyokömür çıkış suyuna girişimin önüne geçilmesi amacıyla granül şekilde kullanılmıştır. Üst girişli kolon adsorpsiyon deneyinde çıkışa adsorban kaçışının önlenmesi amacıyla kuvars kumu kullanılmaktadır (Li vd., 2020). Aktifleştirme 0,1N H_2SO_4 ve 0,1N NaOH çözeltilerinde 1 saat süreyle bekletilmek suretiyle gerçekleştirilmiş, H_2SO_4 ABK ve NaOH ABK hazırlanmıştır.



Şekil 3.20. Sürekli akış kolon adsorpsiyonu deney düzeneği görseli

Büret (50 mL) aracılığıyla kolonun üst kısmına Şekil 3.20’de belirtilen düzende yerleştirilerek Çizelge 3.7’de istenen hızda akış sağlanmıştır. Örnekler sabit zaman aralıklarında 50 mL HDPE şişeler kullanılarak alınmış ve LC/MS-MS ile ölçüm öncesi 0,45 μm polipropilen filtre ile süzölmüştür. Örnekler LC/MS-MS analizleri yapılana kadar buzdolabında +4 °C de saklanmıştır.

Çizelge 3.7. Sürekli akışta kolonda Imazamox adsorpsiyonu deney planı

Adsorban Türü	Kolon Adsorban Yüksekliği (cm)	Kolondaki Akış Hızı (mL/dak)	pH	Numune Alma Süresi t (dak)				
				1.dak	5.dak	15.dak	20.dak	30.dak
HBK	5	5	2	*	*	*	*	*
HBK	5	10	2	*	*	*	*	*
HBK	10	5	2	*	*	*	*	*
HBK	10	10	2	*	*	*	*	*
H ₂ SO ₄ ABK	5	5	2	*	*	*	*	*
H ₂ SO ₄ ABK	5	10	2	*	*	*	*	*
H ₂ SO ₄ ABK	10	5	2	*	*	*	*	*
H ₂ SO ₄ ABK	10	10	2	*	*	*	*	*
NaOH ABK	5	5	2	*	*	*	*	*
NaOH ABK	5	10	2	*	*	*	*	*
NaOH ABK	10	5	2	*	*	*	*	*
NaOH ABK	10	10	2	*	*	*	*	*

Deney planı Çizelge 3.7’de belirtildiği şekilde oluşturulmuştur. Kesikli kolon deneylerinin sonuçlarından hareketle asidik aktivasyonun yüzey aktif maddelerin oluşturduğu H⁺ bariyerlerini aşmadığı ya da hızlı rejenerasyonu tetiklediği öngörüldüğünden bazik bir aktivasyon da gerçekleştirilerek (NaOH ABK) adsorpsiyon deneylerinde adsorban olarak kullanılmıştır.

3.2.3.3. Biyokömürle Giderim Veriminin Ticari Adsorbanla Karşılaştırılmasına Yönelik Deneyler

Ham ve aktifleştirme için kimyasal ön işlem görmüş biyokömürün adsorban olduğu adsorpsiyon çalışmalarının verimlerinin karşılaştırılarak ikame olasılığının değerlendirilmesi hedeflendiğinden araştırma kapsamına ticari aktif karbonun adsorban olarak cam kolonda Imazamox adsorpsiyonunda kullanıldığı deneyler dâhil edilmiştir. Total Trade Spain Slu menşei T-Carb VSB-1100 Marka toz aktif karbonun ürün güvenlik bilgi formunda belirtilen önemli özelliklerinden bazıları Çizelge 3.8’de sunulmaktadır.

Aktif karbon suda insan sağığına zarar veren kalıntılar bırakmadığı ve eser kimyasalların gideriminde etkin rol oynadığı için sıklıkla tercih edilen ticari bir üründür. Aynı zamanda yüksek karbon içeriğı ve çözeltideki moleküllerin tutunabilmesine olanak sağlayacak şekilde gözenek yapısı genişletilmiş adsorbanı tarifleyen genel bir terimdir. Organik kirleticileri, makromolekülleri, renklendiricileri, tat ve koku üreten molekülleri uzaklaştırmak için kullanılmaktadır. Ghosh vd. (2023) çalışmalarında aktif karbonun genellikle 1,5 g/cm³ yoğunluğına sahip olduğunu belirtmişlerdir. Organik maddeleri absorbe etme yeteneğı, yüzey özellikleri ve dokusal özelliklerine bağlıdır. Ancak yüksek maliyeti nedeniyle aktif karbonun kullanımı özellikle düşük sosyo ekonomik gelir gruplarının içme suyu temini alanında istenen seviyede değildir. Aktif karbon üretmek için karbon oranı dolayısıyla temin maliyeti oldukça yüksek olan odun ve kömür sıklıkla tercih edilmektedir. Aktifleştirilme işlemi için de genelde su buharı kullanılmaktadır. Bu da enerji kullanımı açısından maliyete ek kalem olarak yansımaktadır. Su kaynaklarının korunması hedeflerine de katkı sunmaz.

Çizelge 3.8. Buharla aktifleştirilmiş aktif karbonun özellikleri*

pH (20 °C)	6,8	
Erime Noktası (°C)	>1000	Yüksek yoğunluklu inert
Kaynama Noktası (°C)	>1000	Yüksek yoğunluklu inert
Parlama Noktası (°C)	-	
Tutuşma Sıcaklığı (°C)	350-450	
Buhar Basıncı	-	
Yoğunluk (g/cm³)	2,31	
Bulk Yoğunluk (kg/m³)	440-520	
Sudaki Çözünürlüğü (20 °C’de g/L)	0	OECD’nin GLP 105 prensibiyle

*EC Number: 931-328-0, CAS No: 7440-44-0, REACH Kayıt No: 01-2119488894-16-0027

Aktif karbonun adsorban olarak kullanıldığı deney koşulları Çizelge 3.9’da sunulmaktadır.

Çizelge 3.9. Imazamox'un kolonda ticari aktif karbonla giderim deneyleri planı

Adsorban Türü	Kolondaki Adsorban Yüksekliği (cm)	Başlangıç Imazamox Konsantrasyonu (mg/L)	pH
AC	5	0,2	6
AC	5	0,8	6
AC	5	1	6

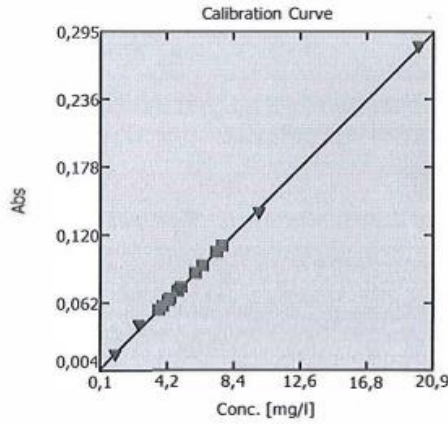
Aktif karbonun adsorban olarak kullanıldığı deneyler kolonda kesikli akışta gerçekleştirilmiştir. Toz formun elüata fiziksel girişimini engellemek üzere kolona önce 3 cm yüksekliğinde saf suyla yıkanıp 24 saat oda sıcaklığında kurutulmuş kuvars kumu konsa da girişimin tam olarak önüne geçilememiştir. 1 cm kolon yüksekliğindeki AC 5,5 g olarak ölçülmüştür. İkame için giderim verimi açısından değerlendirme yapılmıştır. Bu nedenle Imazamoxun gideriminin maksimum olacağı koşullar seçilmiştir. Giderim verimini en fazla etkileyecek parametre olan çözeltinin pH'ı aktif karbonun pH_{pzc} değeri ve özgün pH'ı doğrultusunda belirlenmiştir.

3.2.7. İçme Suyunda Kalıntı Imazamox Tayini

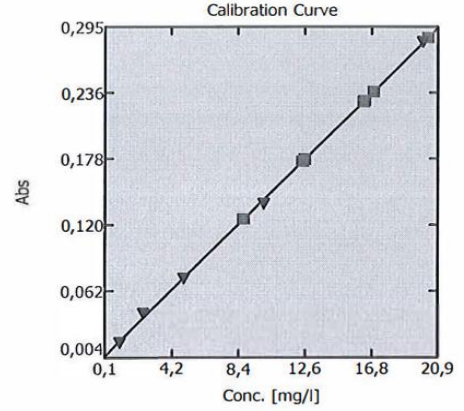
Adsorbanın Imazamox giderimi konusundaki veriminin değerlendirilmesi amacıyla adsorpsiyon sonrasında elüat tabir edilen numunelerdeki kalıntı miktarının belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için aşağıdaki metotlar kullanılmıştır.

3.2.4.1. UV Spektrofotometre ile Imazamox Tayini

Literatür taramalarında Imazamox'un sulu çözeltide 250 nm ve 270 nm dalga boylarında tespit edildiği belirlenmiştir (Morlay vd., 2012). Akgeyik (2014) ise çalışmasında UV-Vis Spektrofotometrede gözlenebilme limiti doğrultusunda imazamox kalıntı ölçümü için boyunun dalga 270,8 nm olduğunu ifade etmiştir. Literatür verileri doğrultusundaki kalibrasyon eğrileri Şekil 3.21'de gösterilmiştir. Bu veriler ve test cihazlarının özellikleri değerlendirilerek araştırma kapsamında imazamoxun spektrofotometre aracılığıyla tespiti için 270 nm dalga boyunda ölçüm yapılmasına karar verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.21. Imazamox spektrofotometre kalibrasyon eğrileri
a) 250 nm b) 270 nm

Optimum adsorpsiyon koşullarının belirlenmesi deneylerinde Haliç Çevre Laboratuvarında bulunan 19-1885-01-0182 kodlu ve 2,00 nm ölçüm bandı bulunan Uv-Vis Spektrofotometre kullanılmıştır. Su numuneleri okumalardan önce 0,45 µm pore çaplı PE filtreden süzölmüştür. Çalkalama yöntemi ile yapılan adsorpsiyon deneyleri; genel eğilimi değerlendirmek, kolon adsorpsiyon deneyleri için temel oluşturmak ve adsorpsiyona etki eden faktörlerin incelenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında adsorpsiyon performansının değerlendirilmesinde kolon adsorpsiyon deneyleri ve bu deneylerdeki elüatlarda LC-MS/MS ile Imazamox tayini analiz sonuçları baz alınmıştır.

Kesikli akış koşullarında gerçekleştirilen kolon deneylerinde elde edilen 60 adet elüat tabir edilen süzöntü numunesi LC-MS/MS analizinden önce Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Çorlu Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan UV-Vis-1800 SCHIMADZU (2012) marka spektrofotometre ile 270 nm dalga boyunda absorbans ölçümüne tabi tutulmuştur. Su numuneleri okumalardan önce 0,45 µm pore çaplı PE filtreden süzölmüştür. Ölçüm sonuçları incelenerek giderim verimi ve adsorpsiyon koşullarını temsil edici numuneler seçilerek Nabiltem'de LC-MS/MS ile Imazamox tayini gerçekleştirilmiştir.

3.2.4.2. LC-MS/MS ile Imazamox Tayini

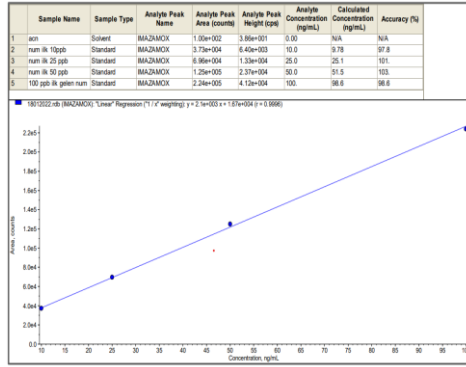
Imazamox'un sudaki miktarını tespit için Amerikan Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından da kullanılan analiz metodu Bağımsız Doğrulama Raporu'nda belirtilmiştir (BASF, 2018). Ayrıca belirlenen metodun yanı sıra LC-MS/MS ile (Lei Sun, 2003) ve UPLC (Tan, 2019) ile de imazamoxun kalıntı tayini mümkündür.

Imazamoxun sürekli akış koşullarında kolonda adsorpsiyonu deneylerinde Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Nabiltem Enstrümental Analiz Laboratuvarı 1'de bulunan AB SCIEX marka ve 3200 QTRAP Model kütle spektrometresi kullanılmıştır (Şekil 3.22). Bu cihazda kullanılan LC-MS/MS yöntemi; UPLC cihazı ile ayrılan örnek moleküllerin fizikokimyasal özelliklerine göre kütle dedektörü ile analiz edilmesini içerir. Moleküller normalde yüklü olmadıklarından, kütle spektrometreleri, iyonizasyon işlemiyle molekülleri uyararak yüklü iyonize moleküller haline getirir.

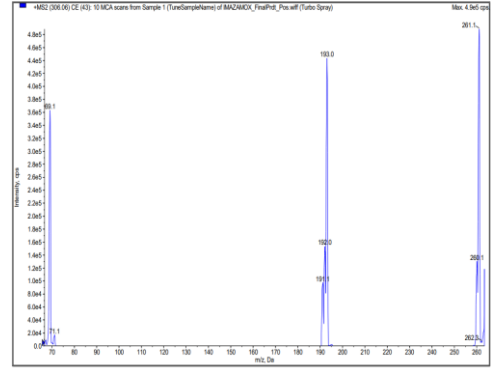


Şekil 3.22. Kütle Spektrometresi (Nabiltem, 2024).

Birinci kuadrupol filtrede m/z (kütle/yük) oranına göre ayrılan moleküller, özel bir gaz olan yüksek saflıkta collision gazı ile parçalanır. İkinci kuadrupol filtresinde parçalanma sonucu oluşan iyonlar (daughter veya ürün iyonları) üzerinden teşhis ve miktar tayini yapılır. Aynı m/z oranına sahip birçok molekül olmasına rağmen, aynı parçalanma iyonlarına sahip molekül sayısı doğada 1/10000 kadardır. Bu nedenle, LC-MS/MS, maddenin çok düşük konsantrasyonlarında miktar tayinini mümkün kılar. Ayrıca, sonuçların doğrulanmasına gerek kalmaz.

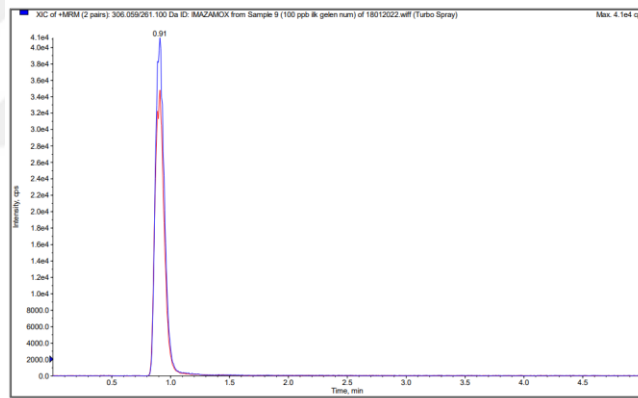


(a)



(b)

Şekil 3.23. Imazamox LC-MS/MS kalibrasyon eğrileri



Şekil 3.24. Imazamox LC-MS/MS alıkonma zamanı eğrisi

Lei ve Sun (2003)'ün çalışmaları doğrultusunda imazamox tayini için %97'den daha yüksek saflıktaki Imazamox-Dr.Ehrenstorfer (Augsburg, Almanya) Marka ve ultra saf su kullanılmıştır. GL Sciences InertSustain AQ C1 8,3 um, 2,1*50 mm kolon ve 10,00 ul LC Sistem Enjeksiyonu uygulanmıştır. 0,500 mL/min akışla ve LC-20AT model yavaş akışlı pompada %0,2 formik asit içeren asetonitril kullanılarak 500°C'de ölçümler yapılmıştır. Imazamoxun sıvı kromatografik tandem kütle spektrometresindeki kalibrasyon ve alıkonma zamanı eğrileri Şekil 3.23 ve Şekil 3.24'te sunulmaktadır.

3.3. Desorpsiyon Çalışması

Sürekli akışta kolonda biyokömürle imazamox adsorpsiyonu deneyleri tamamlandıktan sonra desorpsiyon deneyleri de planlanarak gerçekleştirilmiştir. Desorpsiyon çalışmasının anlamlı veri üretebilmesine yönelik olarak daha yüksek olan kolon yükseklikleri ve daha yavaş akış hızları seçilmiştir. Desorban olarak ise distile su ve distile suyla hazırlanan 0,1 N HCl çözeltisi kullanılmıştır. Seçilen biyokömür numuneleri desorbanların içinde pH 2’de 24 saat süreyle bekletilmiştir. Desorpsiyon deney planı Çizelge 3.10’da belirtilmiştir.

Çizelge 3.10. Desorpsiyon çalışması deney planı

Desorban	Desorbe Edilecek Biyokömürün Adsorban Olarak Kullanıldığı		
	Deney Değişkenleri		
	HBK (5mL/dak akış hızı, 10 cm Yatak Yüksekliği)	H ₂ SO ₄ ABK (5mL/dak akış hızı, 10 cm Yatak Yüksekliği)	NaOH ABK (5mL/dak akış hızı, 10 cm Yatak Yüksekliği)
Distile Su	+	+	+
HCl Çözeltisi	+	+	+

Desorban çözeltilerinden 24 saat sonra alınan numuneler LC-MS/MS ile imazamox tayini testine tabi tutulmuştur.

Tehlikeli ve eser miktarda kirleticilerin adsorbanın yeniden kullanılması için desorbe edilmesi arıtılma ihtiyacı arttırılmış konsantre bir çözelti elde edilmesi anlamına gelmektedir. Bu nedenle özellikle Imazamox gibi öldürücülük sınırı yani LC₅₀ değeri Lorenzo vd. (2014)’e göre 199,23 mg/L olan bir herbisit adsorban bünyesindeyken onunla birlikte bertaraf edilmesi çevresel sürdürülebilirlik açısından tercih edilmektedir. Desorpsiyon işlemi adsorbanın yeniden kullanımının değerlendirilebilmesinden çok adsorban-adosorbat arasındaki bağın kuvvetini ve dolayısıyla reaksiyonunun tersinir olup olmadığını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Imazamoxun adsorbandan desorbe edilmesinin düşük bir yüzdeyle gerçekleşmesi halinde adsorban kullanım ömrünü tamamladığında güvenle bertarafa gönderilebilecektir. Bu da ikame adsorban olarak konumlandırılmasını destekleyen bir unsur olacaktır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Imazamox adsorpsiyonu deneylerinde elde edilen veriler aşağıda sunulmakta olup, sonuçlar incelenerek yorumlanmıştır. Adsorpsiyon koşullarının değerlendirilmesi ve verimin maksimize edilmesi amacıyla çeşitli ön çalışmalar yapılmıştır.

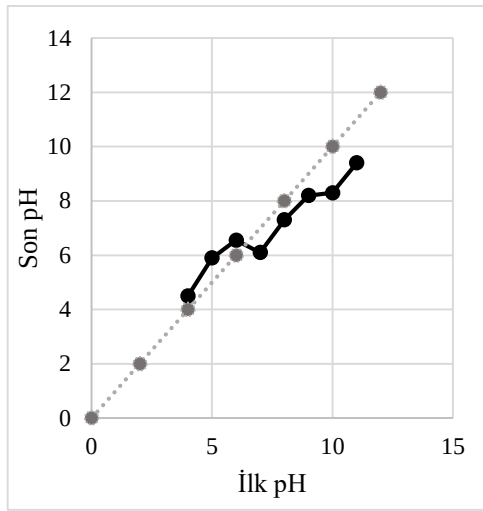
4.1. Ön Çalışmalar

4.1.1. Adsorban Özelliklerinin Belirlenmesi

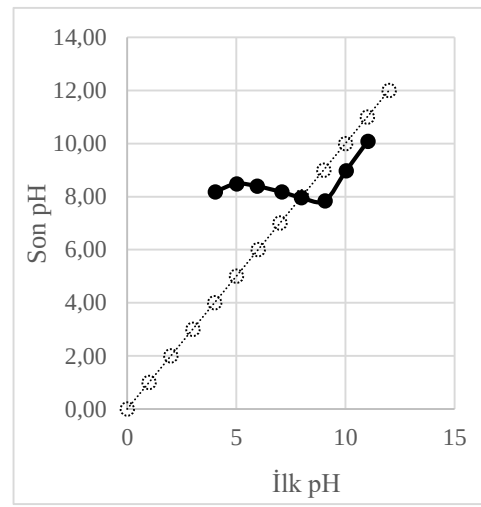
Ham halde biyokömür (HBK) ve aktivasyonlardan sonra (HNO_3 , H_2SO_4 ve NaOH ABK) kolon deneylerinde kullanılan granül adsorbanların özellikleri farklı açılardan incelenerek sunulmuştur. SEM, EDX ve FT-IR analizleri; elektrostatik çekim, hidrojen bağları, gözeneklere tutunma ve hidrofobik faaliyetleri içeren birincil adsorpsiyon mekanizmalarının anlaşılmasına yardımcı olmak amacıyla yapılmaktadır (Dadebo vd., 2023). Ayrıca karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla bazı kritik özellikleri açısından ticari aktif karbon (AC) için de ölçümler yapılmıştır.

4.1.1.1. Adsorpsiyon Kapasitesi

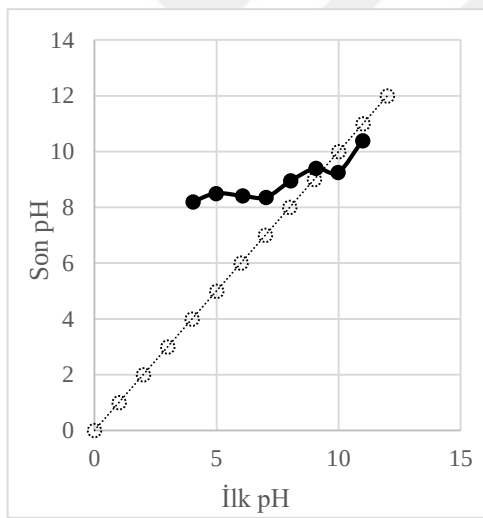
Ayçiçeği sapından elde edilmiş ham ve aktifleştirilmiş biyokömürler için pH_{pzc} değerleri, Şekil 4.1’de de gösterildiği üzere; HBK için $6,4 \pm 0,3$, HNO_3 ABK için $8 \pm 0,3$, 1N H_2SO_4 ABK için $9,2 \pm 0,3$, 0,1N H_2SO_4 ABK için $7,4 \pm 0,3$, NaOH ABK için $9,9 \pm 0,3$ ve AC için ise $8,3 \pm 0,3$ olarak bulunmuştur.



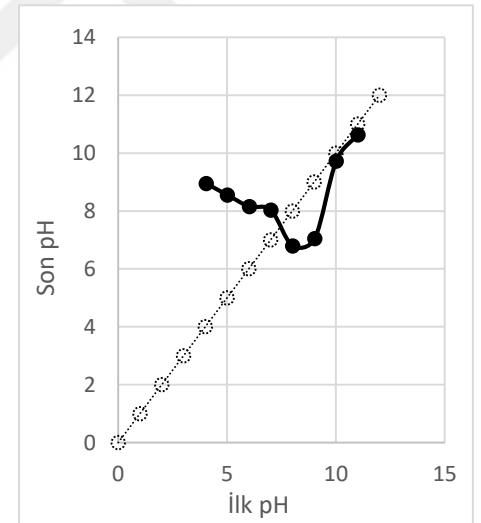
(a)



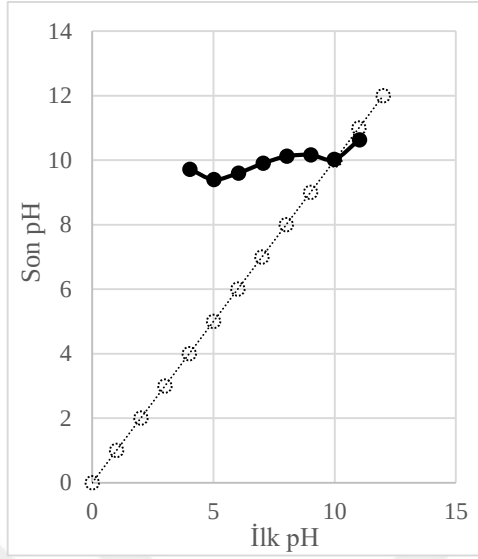
(b)



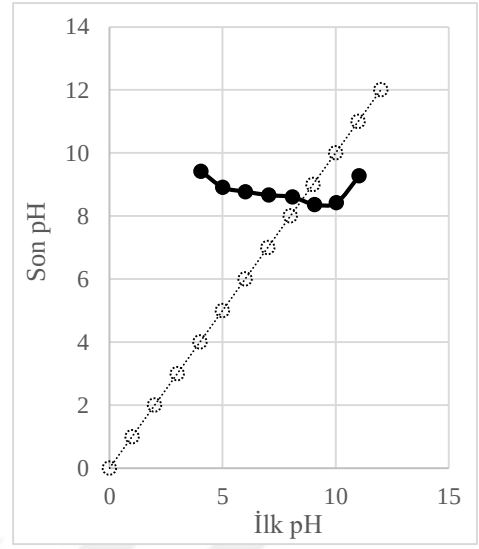
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.1. pH_{pzc} değerleri

a) HBK b) HNO_3 ABK c) $1N H_2SO_4$ ABK d) $0,1N H_2SO_4$ ABK e) NaOH ABK f) AC

4.1.1.2. Isıl Değer

Ham ayçiçeği sapı için ölçülen ısı değeri 3874 cal/g 'dir. Uğuz (2024) çalışmasında taş kömürünün yanma ısısının $4500-7500 \text{ Kcal /kg}$ olduğunu belirtmiştir. Ayçiçeği sapı taş kömürünün yanında yakıt katkısı olarak tercih edilebilecek bir enerji kaynağıdır.

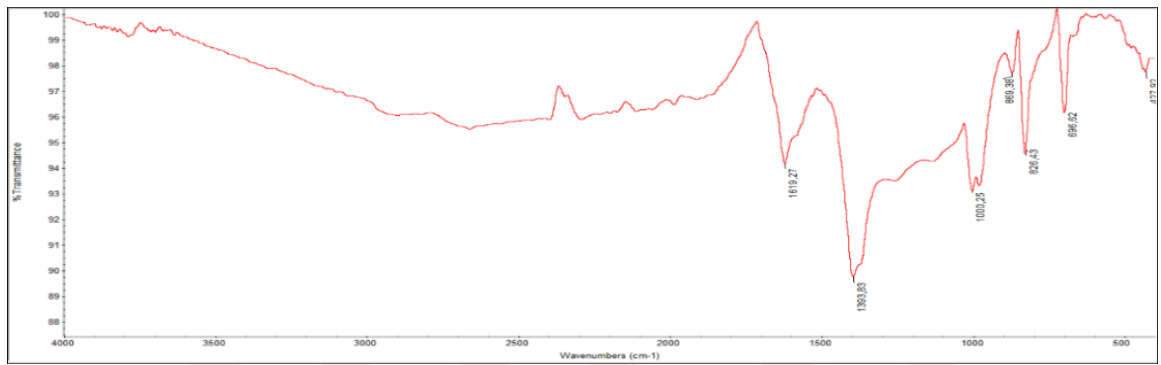
4.1.1.3. Kimyasal Fonksiyonel Gruplar

Adsorpsiyon koşullarını etkileyen kimyasal grupların değerlendirilmesi amacıyla FT-IR analizleri gerçekleştirilmektedir. Ayçiçeği sapından üretilmiş biyokömürün FT-IR analizinde dalga sayıları; 3750 cm^{-1} 'de serbest OH^- iyonları, 3400 cm^{-1} 'de hidrojen bağlı OH iyonları, $2850-3000 \text{ cm}^{-1}$ 'de CH topluluğu, $2800-2900 \text{ cm}^{-1}$ 'de CH_2 grubu, $1700-1750 \text{ cm}^{-1}$ aralığında $C=O$ grubu, $1550-1600 \text{ cm}^{-1}$ aralığında $C-NH_2$ grubu, $1400-1450 \text{ cm}^{-1}$ aralığında $C-O$ inorganik yapısı, $1000-1200 \text{ cm}^{-1}$ arasında $C-H$ grubu, $850-900 \text{ cm}^{-1}$ arası $C=O$ inorganik grubu ve bağları ile $600-650 \text{ cm}^{-1}$ aralığında ise CH_3-O-C ($Me-O-C$) bağının yer aldığını belirtir (Yankovych, Novaseltseva, Kovalenko, Behunova, Kanuchova, Vavilavikova ve Melnyk, 2021) Tez kapsamında kullanılan adsorbanların FT-IR sonuç

grafikleri aşağıdaki gibidir. Bu grafikler organik kimyanın spektroskopik bakış açısıyla değerlendirilip yorumlanmıştır (Erdik, 2015).

4.1.1.3.1. Ham Biyokömür

Ham biyokömürün FT-IR analiz grafiği incelendiğinde $1393,83\text{ cm}^{-1}$ dalga sayısında %90 Transmittans altına pik yaptığı görülmüştür. Bu sayede biyokömürde -C-H grubu olduğu değerlendirilmiştir. Bunun yanı sıra C-NH₂ grubu (eğilme), -C=O inorganik grubu ve CH₃-O-C grubunun da bulunduğu değerlendirilmiştir. Ham biyokömürün FT-IR Analizi Grafiği Şekil 4.2’de görülmektedir.



Şekil 4.2. Ham biyokömür FT-IR analizi grafiği

4.1.1.3.2. HNO₃ ile Aktifleştirilmiş Biyokömür

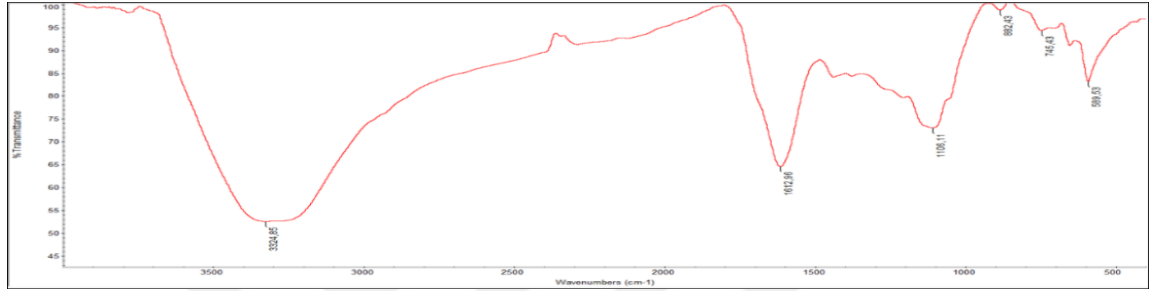
HNO₃ ile Aktifleştirilmiş biyokömürün FT-IR analiz grafiği incelendiğinde $1328,24\text{ cm}^{-1}$ dalga sayısında %70 Transmittans altına pik yaptığı görülmektedir. Bu değerde -CH grubu olduğu değerlendirilmiştir. Ayrıca bağlı -OH grubu, C-NH₂ grubu, -C=O inorganik grubu ve CH₃-O-C grubu barındığı değerlendirilmiştir. HNO₃ ile aktifleştirilmiş biyokömürün FT-IR Analizi Grafiği Şekil 4.3’te görülmektedir.



Şekil 4.3. HNO₃ ile aktifleştirilmiş biyokömür FT-IR analizi grafiği

4.1.1.3.3.H₂SO₄ ile Aktifleştirilmiş Biyokömür

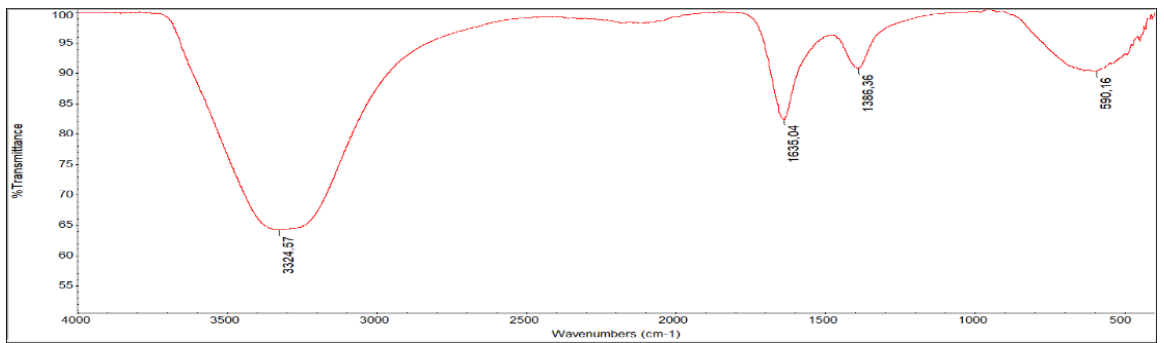
H₂SO₄ ile Aktifleştirilmiş (0,1 N) biyokömürün FT-IR analiz grafiği incelendiğinde 3324,85 cm⁻¹ dalga sayısında %55 Transmittansın altına pik yaptığı görülmüştür. Bu değerle farklı safsızlıklar ve mineraller olduğuna dair veriler oluştuğu ve en çok ta bağlı -OH grubunun ağırlığının olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca C-NH₂ grubu, -C-H grubu, O-C bağı ve -C=O inorganik grubu ve CH₃-O-C grubu ağırlığı olduğu değerlendirilmiştir. H₂SO₄ ile Aktifleştirilmiş biyokömürün FT-IR Analizi Grafiği Şekil 4.4'te görülmektedir.



Şekil 4.4. H₂SO₄ ile aktifleştirilmiş biyokömür FT-IR analizi grafiği

4.1.1.3.4.NaOH ile Aktifleştirilmiş Biyokömür

NaOH ile Aktifleştirilmiş biyokömürün FT-IR analiz grafiği incelendiğinde 3324,57 cm⁻¹ dalga sayısında %65 Transmittansın altına pik yaptığı buradan bağlı -OH grubunun ağırlığının son derece yüksek olduğu anlaşılmaktadır. NaOH ABK'da ayrıca C-NH₂ grubu, -CH grubu ve CH₃-O-C grubu bulunduğu değerlendirilmiştir. NaOH ile aktifleştirilmiş biyokömürün FT-IR Analizi Grafiği Şekil 4.5'te görülmektedir.



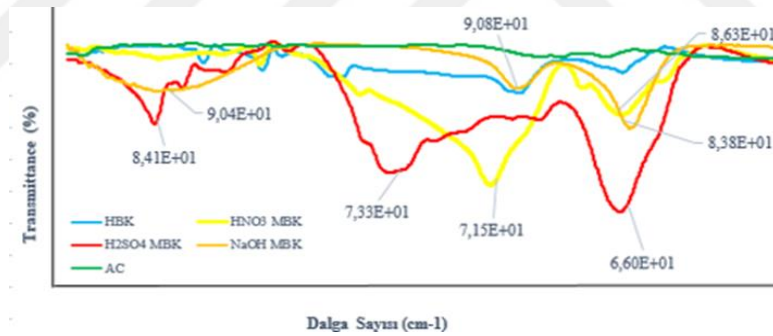
Şekil 4.5. NaOH ile aktifleştirilmiş biyokömür FT-IR analizi grafiği

4.1.1.3.5. Aktif Karbon

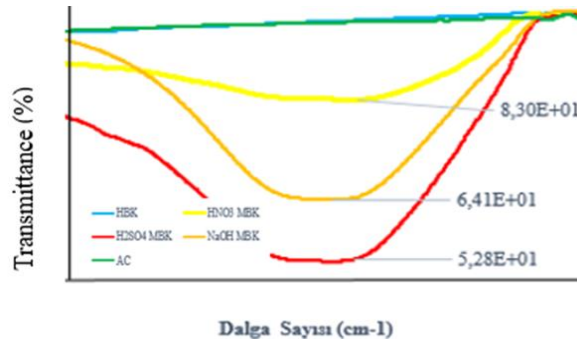
Aktif karbonun FT-IR analiz grafiği incelendiğinde farklı dalga sayılarında %90-100 Transmittans aralığında kaldığı, buradan da safsızlıklar ve çeşitli minerallerin eser miktarda olduğuna dair veriler oluştuğu anlaşılmaktadır. Ayrıca bağlı C-NH₂ grubu ve C-H grubu barındırdığı değerlendirilmiştir. Aktif karbonun FT-IR Analizi Grafiği Şekil 4.6'da görülmektedir.



Şekil 4.6. Aktif karbonun FT-IR analizi grafiği



(a)



(b)

Şekil 4.7. Adsorbanların FT-IR analizleri

a) Dalga Sayısı 2500-4000 cm-1 b) Dalga Sayısı 500-2000 cm-1

FT-IR grafikleri ve adsorbansların imazamox giderim performansları karşılaştırıldığında aktivasyon işleminin bağlı -OH grubu oluşturacak şekilde gerçekleştirilmesi halinde $3000-3500\text{ cm}^{-1}$ dalga sayısındaki atımların arttığı ve bu durumun adsorbanın giderim veriminin artması ile korelasyon gösterdiği değerlendirilmiştir. Aktif karbonda C-NH₂ grubu ve C-H grubu bulunduğu, aktifleştirilen biyokömürlerin yapısının da aktif karbona benzediği anlaşılmıştır. OH⁻ grubunun bulundurmasının bir adsorbanın imazamox adsorpsiyon kapasitesini arttırdığı anlaşılmıştır (Şekil 4.7).

4.1.1.4. Yüzey Yapısı

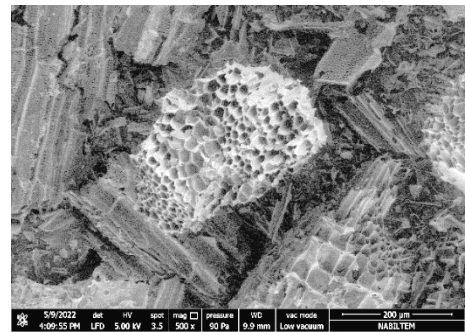
Imazamoxun adsorpsiyonunun adsorbanların yüzey yapılarıyla ilişkisinin tespit edilebilmesi amacıyla tüm adsorbanların yüzey yapısı Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) aracılığıyla incelenmektedir (Du, Jia, Li, Cui, Song ve Liu, 2020). 20-400 μm (20, 40, 50, 200 ve 400 μm) arasındaki çeşitli ölçeklerde, 5,6 kV ve 90 Pa basınç altında 250-4000x (250x, 500x, 1000x, 2000x ve 4000x) zoomlarda incelenmiştir. Elde edilen mikro görüntüler aşağıdaki gibi olup ayçiçeği sapından üretilen ve aktifleştirilen biyokömürün yüzey yapısı literatürde belirtildiği üzere (Yankovych vd., 2021) tüp şeklindedir ve heterojen bir yüzeye sahiptir.

4.1.1.4.1. Ham Biyokömür (HBK)

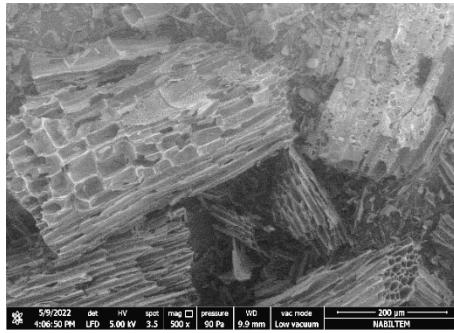
Ham biyokömürün farklı zoomlardaki SEM görüntüleri Şekil 4.8’de yer almaktadır. Görüntülerde yüzeyin gözenekli yapısı net şekilde görülmektedir.



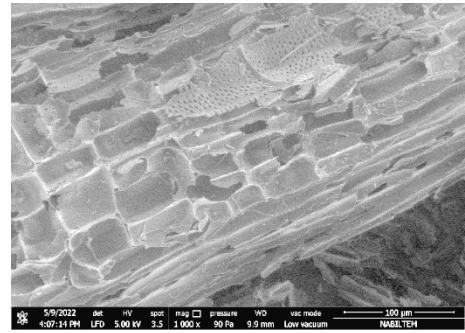
(a)



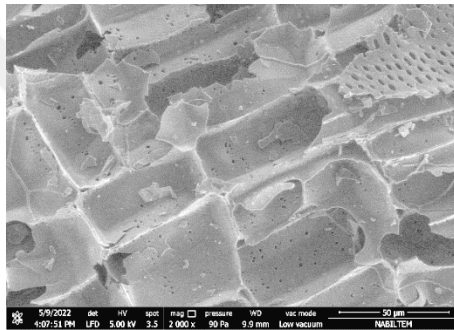
(b)



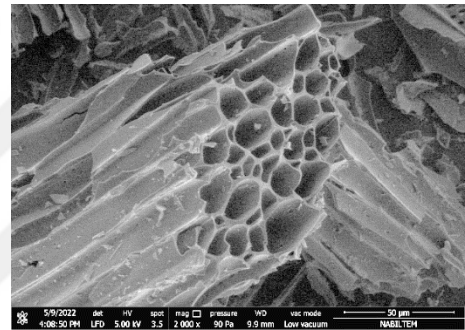
(c)



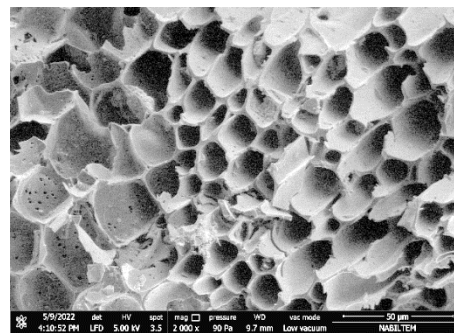
(d)



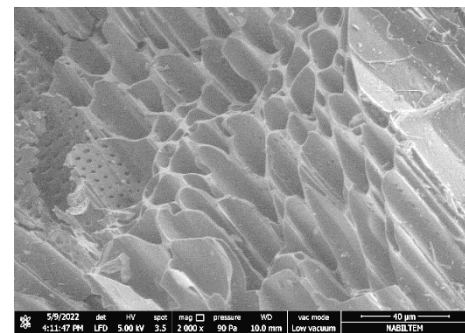
(e)



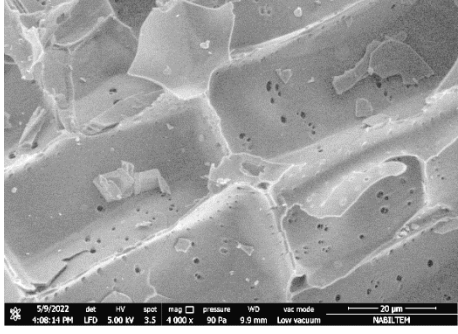
(f)



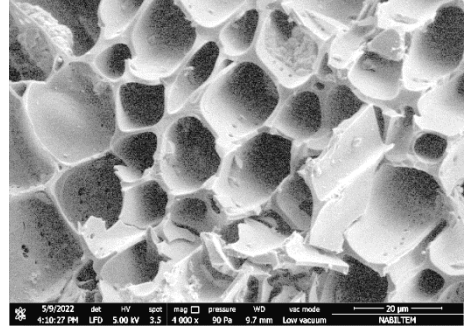
(g)



(h)



(i)



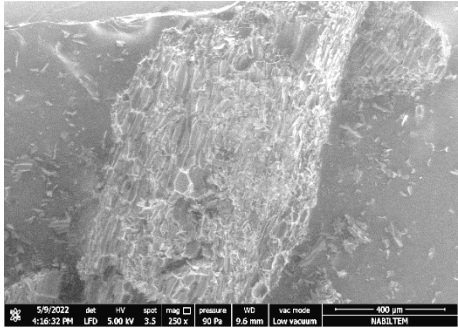
(j)

Şekil 4.8. Ham biyokömürün (HBK) SEM görüntüleri

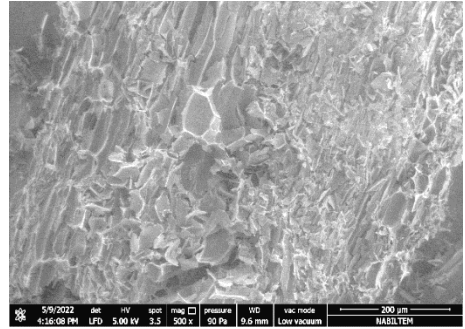
a) 400µm b)200µm c) 200µm d)100µm e)50µm f)50 µm g)50µm h)40µm i)20µm j)20µm

4.1.1.4.2. HNO_3 ile Aktifleştirilmiş Biyokömür (ABK)

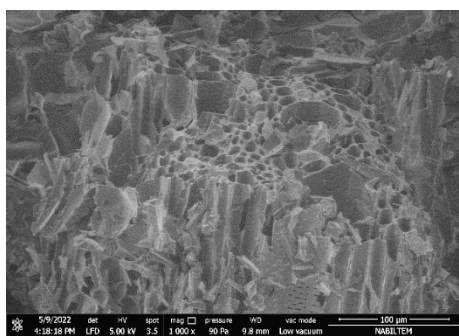
HNO_3 ile aktifleştirilmiş biyokömürün farklı zoomlardaki SEM görüntüleri Şekil 4.9’da yer almaktadır. Görüntülerde yüzeyin gözenekli bir yapısının olduğu ve ham biyokömürün asitle aktivasyon işleminin yüzey alanını bir ölçüde arttırdığı görülmektedir.



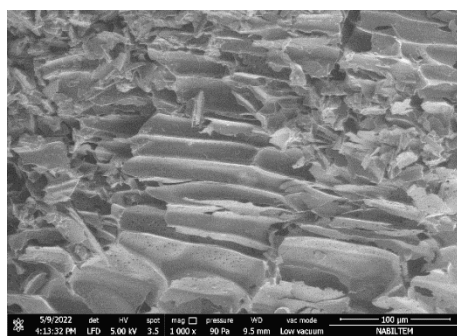
(a)



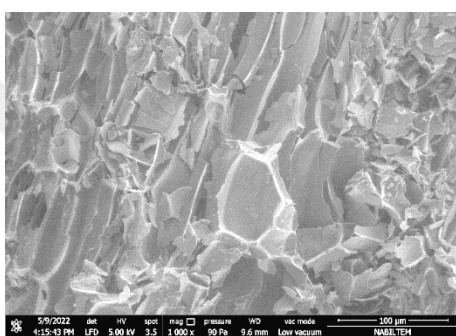
(b)



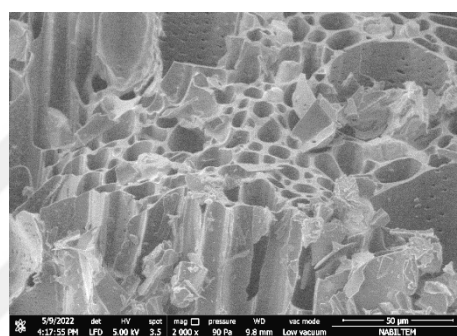
(c)



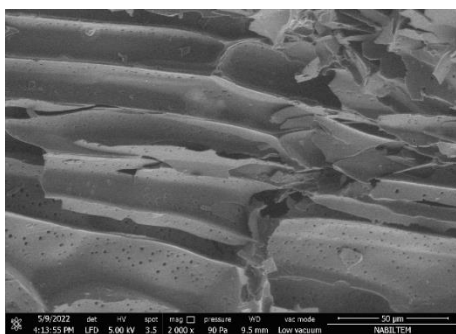
(d)



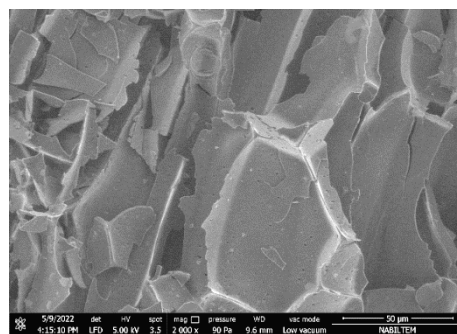
(e)



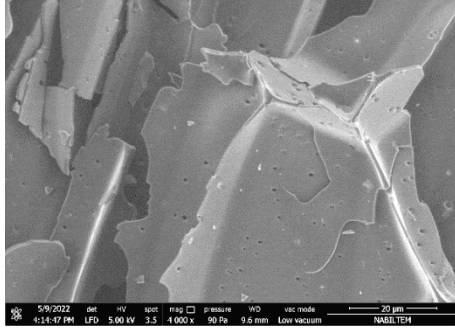
(f)



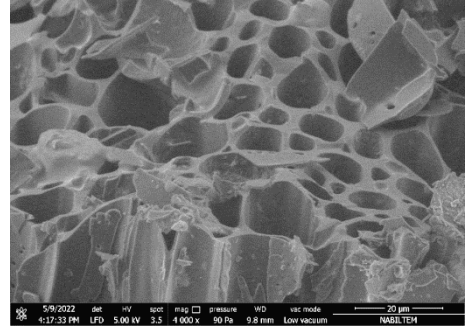
(g)



(h)



(i)



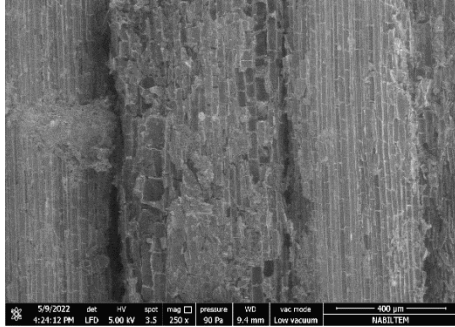
(j)

Şekil 4.9. HNO₃ ile aktifleştirilmiş biyokömürün (ABK) SEM görüntüleri

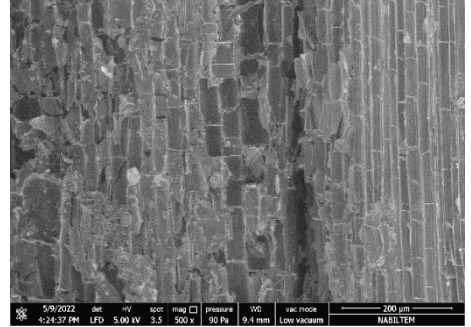
a) 400μm b) 200μm c) 200μm d) 100μm e) 50μm f) 50 μm g) 50μm h) 40μm i) 20μm j) 20μm

4.1.1.4.3. H₂SO₄ ile Aktifleştirilmiş Biyokömür (ABK)

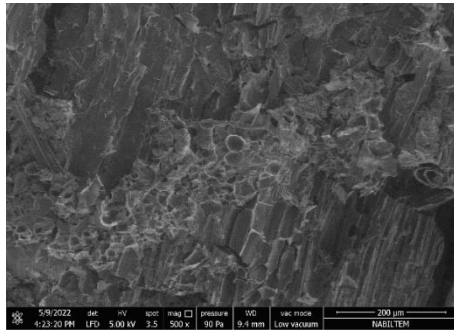
H₂SO₄ ile aktifleştirilmiş (0,1N) biyokömürün farklı zoomlardaki SEM görüntüleri Şekil 4.10’da yer almaktadır. Görüntülerde yüzeyin gözenekli yapısı ve ham biyokömürün güçlü asitle aktivasyon işleminin yüzey alanını ciddi ölçüde arttırdığı görülmektedir.



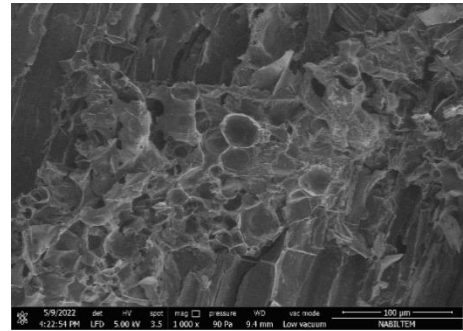
(a)



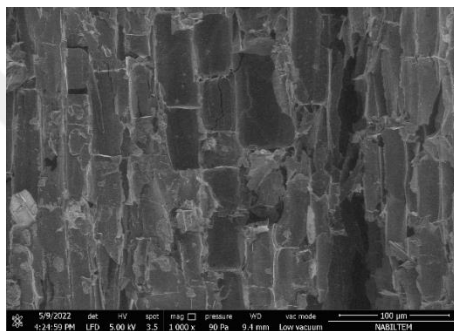
(b)



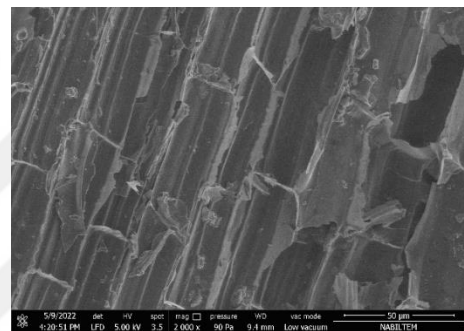
(c)



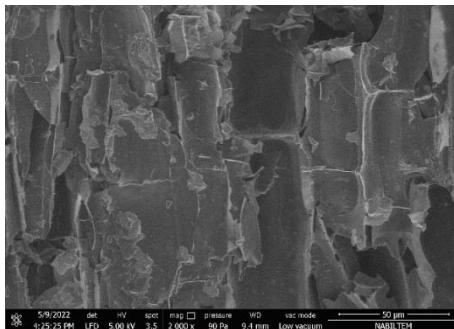
(d)



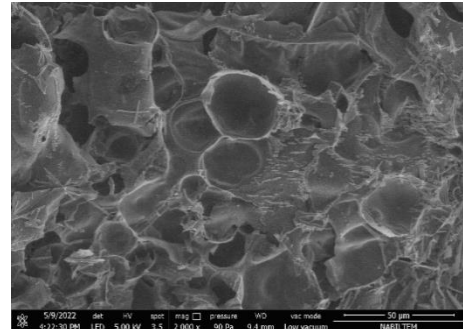
(e)



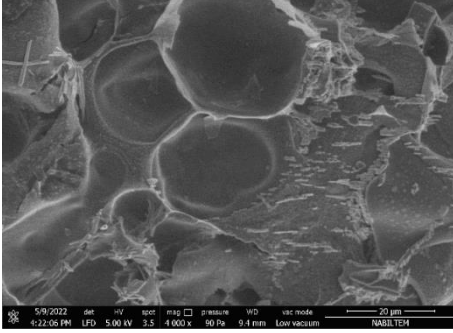
(f)



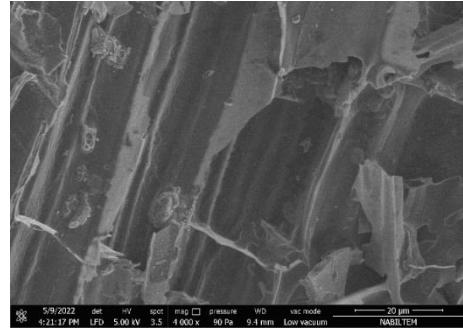
(g)



(h)



(i)



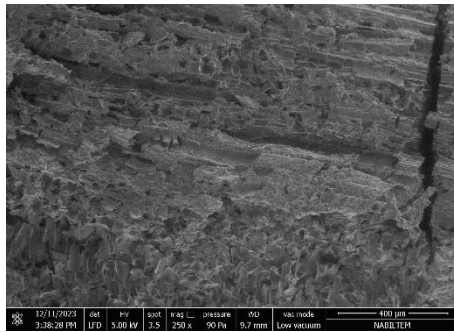
(j)

Şekil 4.10. H_2SO_4 ile aktifleştirilmiş biyokömürün (ABK) SEM görüntüleri

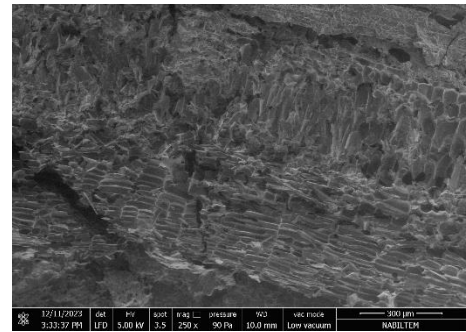
a) 400µm b)200µm c) 200µm d)100µm e)50µm f)50 µm g)50µm h)40µm i)20µm j)20µm

4.1.1.4.4. NaOH ile Aktifleştirilmiş Biyokömür

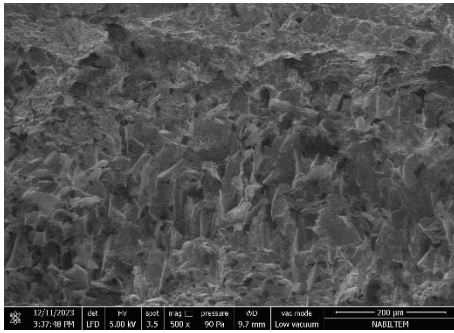
NaOH ile aktifleştirilmiş biyokömürün farklı zoomlardaki SEM görüntüleri Şekil 4.11’de yer almaktadır. Görüntülerde yüzeyin gözenekli yapısı ve ham biyokömürün güçlü bazla aktivasyon işleminin yüzey alanını ciddi oranda arttırdığı görülmektedir.



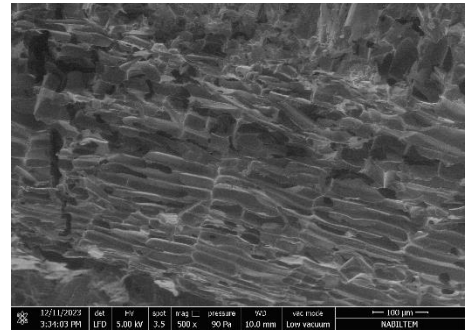
(a)



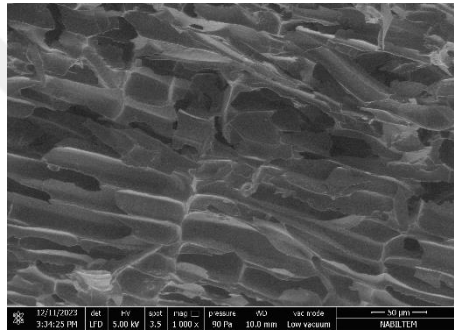
(b)



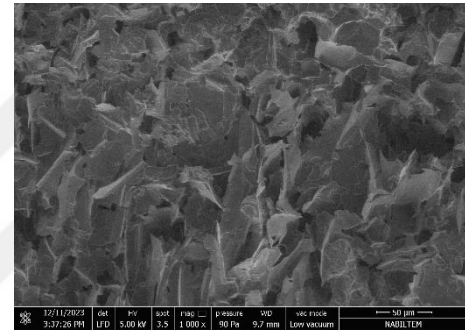
(c)



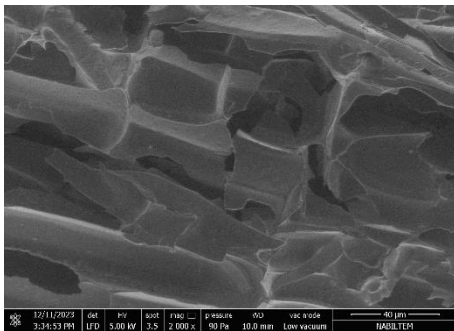
(d)



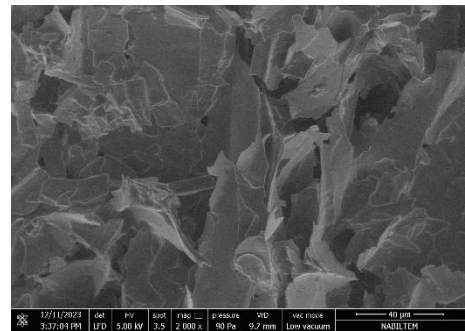
(e)



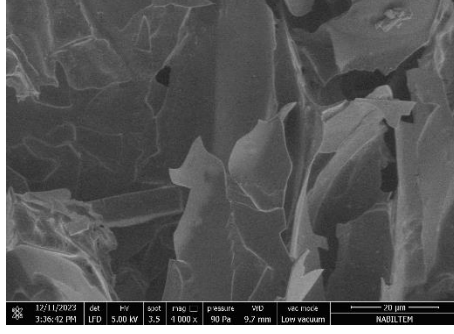
(f)



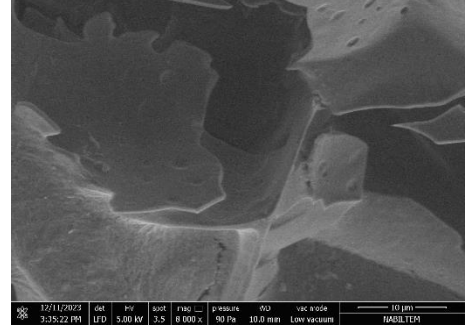
(g)



(h)



(i)



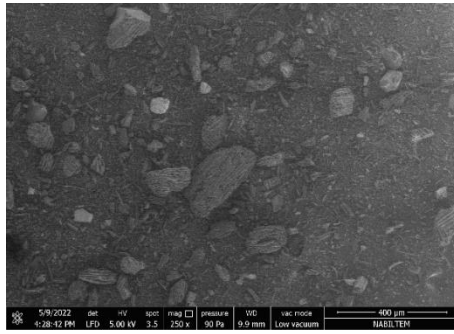
(j)

Şekil 4.11. NaOH ile aktifleştirilmiş biyokömürün SEM görüntüleri

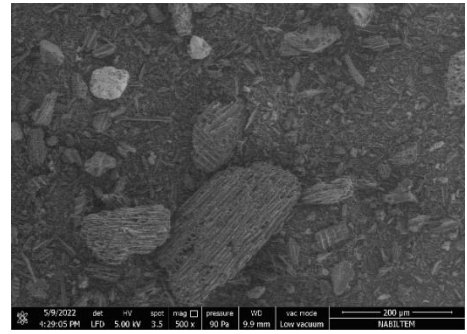
a) 400μm b)300μm c) 200μm d)100μm e)50μm f)50 μm g)40μm h)40μm i)20μm j)10μm

4.1.1.4.5. Aktif Karbon

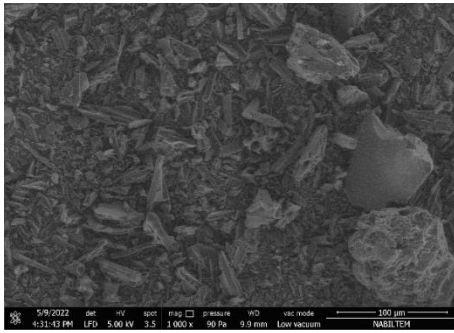
Aktif Karbonun farklı zoomlardaki SEM görüntüleri Şekil 4.12’de yer almaktadır. Görüntülerde yüzeyin gözenekli yapısı ve adsorbatın içindeki safsızlıkların tutunmasına olanak veren yüzey alanının büyüklüğü net şekilde görülmektedir.



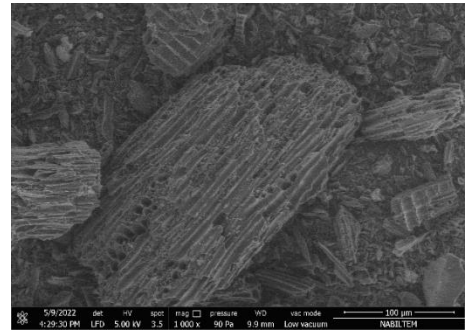
(a)



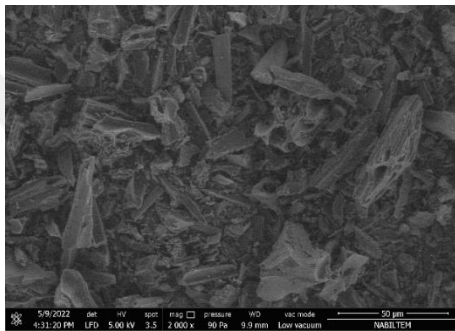
(b)



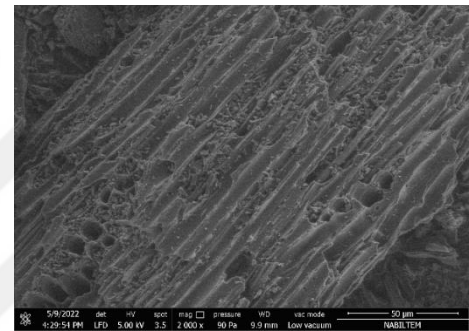
(c)



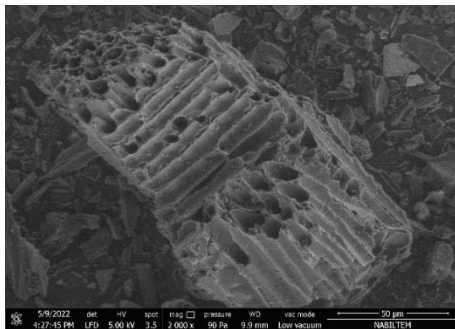
(d)



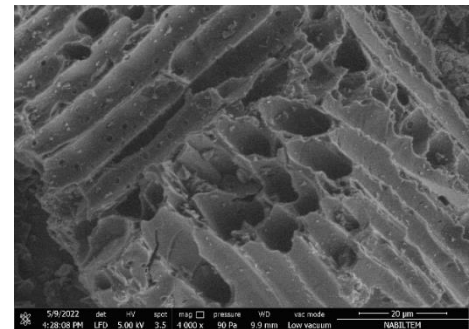
(e)



(f)



(g)



(h)



(i)



(j)

Şekil 4.12. Aktif karbonun SEM görüntüleri

a) 400µm b)200µm c) 100µm d)100µm e)50µm f)50µm g)50µm h)20µm i)20µm j)10µm

Görüntülerin tamamı karşılaştırmalı olarak değerlendirilerek aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

1. Ayçiçeği sapından üretilen ham ve aktive edilmiş biyokömürler ile ticari adsorban olan aktif karbonun yüzeylerinin karakterlerini anlamak amacıyla SEM görüntülemeleri gerçekleştirilmiştir. Bu görüntülemeler sonucu oluşan mikrofotografılardan ham ve aktifleştirilmiş biyokömürlerin granüller halinde bitişik bir dizi tüp yapısında olduğu anlaşılmıştır. Boşluklu heterojen yüzeylerin HBK’da inorganik materyallerle eşit şekilde kaplandığı ve literatürle uyumlu olduğu (Yankovych vd., 2021), aktivasyon işlemleri sonucunda ise bu kaplamaların kırıldığı görülmüştür. Biyokömürlerdeki tüp şeklindeki yapıların yüzeyleri birbirlerine temas halindedir ve özellikle de aktivasyon öncesinde (HBK) kesitleri bal peteğine benzemektedir.
2. Ham biyokömürün gözenekli yapısı aktif karbonun gözeneklerine oldukça benzemektedir.
3. Aktivasyon işlemleri yüzey alanını artırıcı etkiye neden olmaktadır.
4. Özellikle NaOH ile gerçekleştirilen aktivasyondan sonra oluşan yüzey yapısı imazamox giderim performansı en yüksek olan ticari aktif karbonun yüzey yapısına benzerlik göstermektedir.

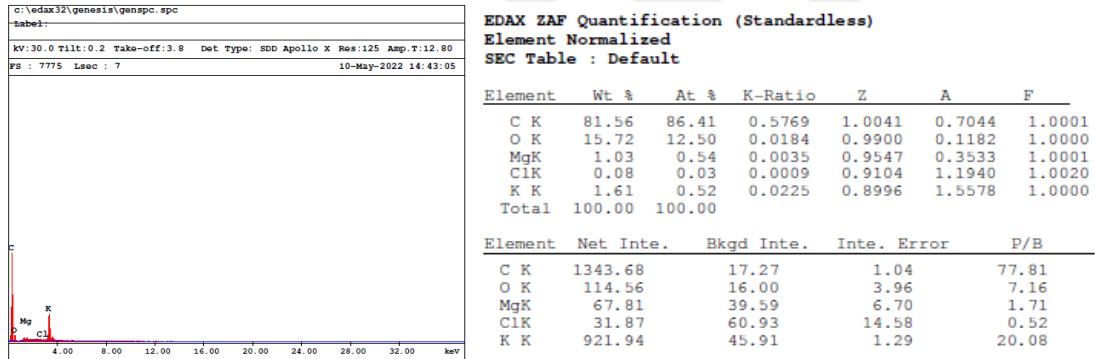
5. SEM mikrografları FT-IR analizleriyle tutarlıdır.

4.1.1.5. Elemental Grup

Kullanılan adsorbanların Imazamox giderimi açısından performanslarını değerlendirirken bünyelerinde yer alan elementlerin rolünün bilinmesi de önemlidir. Şekil 4.13-4.14-4.15-4.16 ve 4.17’de sırasıyla HBK’nın yanı sıra HNO₃, H₂SO₄,NaOH ile aktifleştirilmiş biyokömürler (ABK) ve aktif karbonun elemental analiz sonuçları yer almaktadır.

4.1.1.5.1. Ham Biyokömür

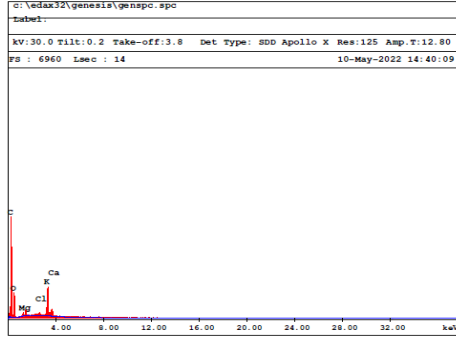
Ham biyokömürün elemental grupları incelendiğinde atomik olarak %86,41 Karbon (C), %12,50 Oksijen (O), % 0,54 Magnezyum (Mg), %0,03 Klor (Cl), %0,52 Potasyum (K) içerdiği görülmektedir. Şekil 4.13’te Ham biyokömürün elemental grupları görülmektedir.



Şekil 4.13. Ham biyokömür elemental grupları

4.1.1.5.2. HNO₃ ile Aktifleştirilmiş Biyokömür

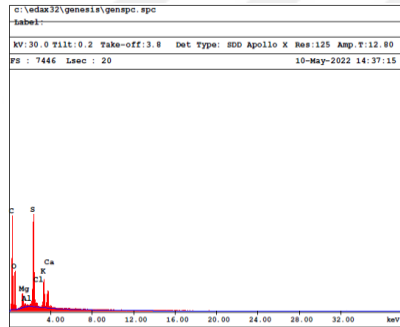
HNO₃ ile aktifleştirilmiş biyokömürün elemental grupları incelendiğinde Atomik olarak %72,16 Karbon (C), %26,98 Oksijen (O), %0,36 Magnezyum (Mg), %0,05 Klor (Cl), %0,37 Potasyum (K) ve %0,08 Kalsiyum (Ca) içerdiği görülmektedir. Şekil 4.14’te HNO₃ ile aktifleştirilmiş biyokömürün elemental grupları görülmektedir.



Şekil 4.14. HNO₃ ile aktifleştirilmiş biyokömür elemental grupları

4.1.1.5.3. H₂SO₄ ile Aktifleştirilmiş Biyokömür

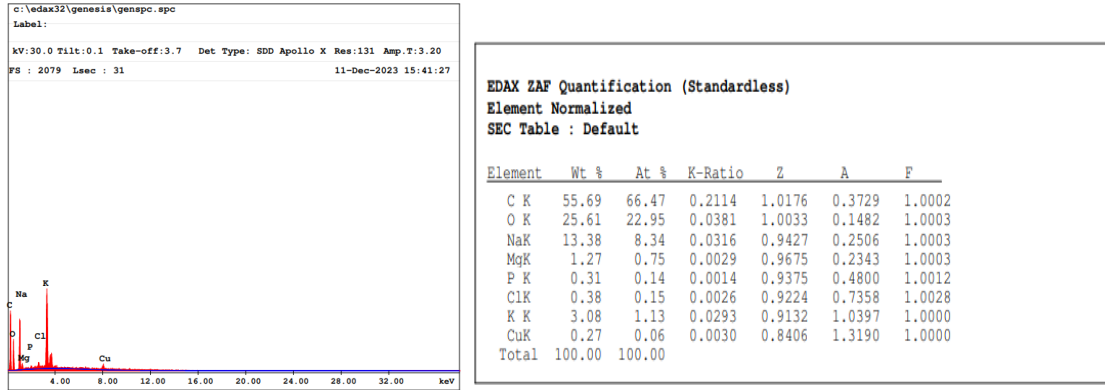
H₂SO₄ ile aktifleştirilmiş (0,1 N) biyokömürün elemental grupları incelendiğinde Atomik olarak %68,46 Karbon (C), %27,71 Oksijen (O), %1,27 Magnezyum (Mg), %0,22 Alüminyum (Al), %1,77 Kükürt (S), %0,08 Klor (Cl), %0,32 Potasyum (K) ve %0,18 Kalsiyum (Ca) içerdiği görülmektedir. Şekil 4.15'te H₂SO₄ ile aktifleştirilmiş biyokömürün elemental grupları görülmektedir.



Şekil 4.15. H₂SO₄ ile aktifleştirilmiş biyokömür elemental grupları

4.1.1.5.4. NaOH ile Aktifleştirilmiş Biyokömür

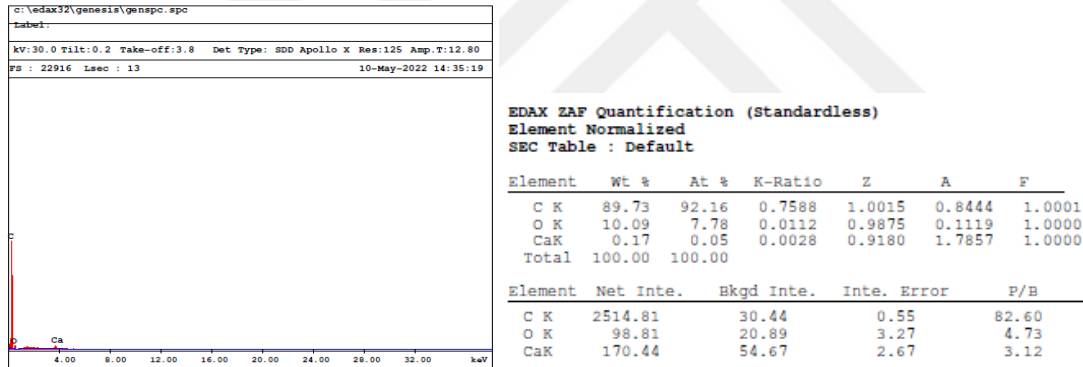
NaOH ile Aktifleştirilmiş biyokömürün elemental grupları incelendiğinde Atomik olarak %66,47 Karbon (C), %22,95 Oksijen (O), %8,34 Sodyum (Na), %0,75 Magnezyum (Mg), %0,14 Potasyum (P), %0,15 Klor (Cl), %1,13 Potasyum (K) ve %0,06 Bakır (Cu) içerdiği görülmektedir. Şekil 4.16'da NaOH ile aktifleştirilmiş biyokömürün elemental grupları görülmektedir.



Şekil 4.16. NaOH ile aktifleştirilmiş biyokömür elemental grupları

4.1.1.5.5. Aktif Karbon

NaOH ile aktifleştirilmiş biyokömürün elemental grupları incelendiğinde Atomik olarak %92,16 Karbon (C), %7,78 Oksijen (O) ve %0,05 Kalsiyum (Ca) içerdiği görülmektedir. Şekil 4.17’de aktif karbon elemental grupları görülmektedir.



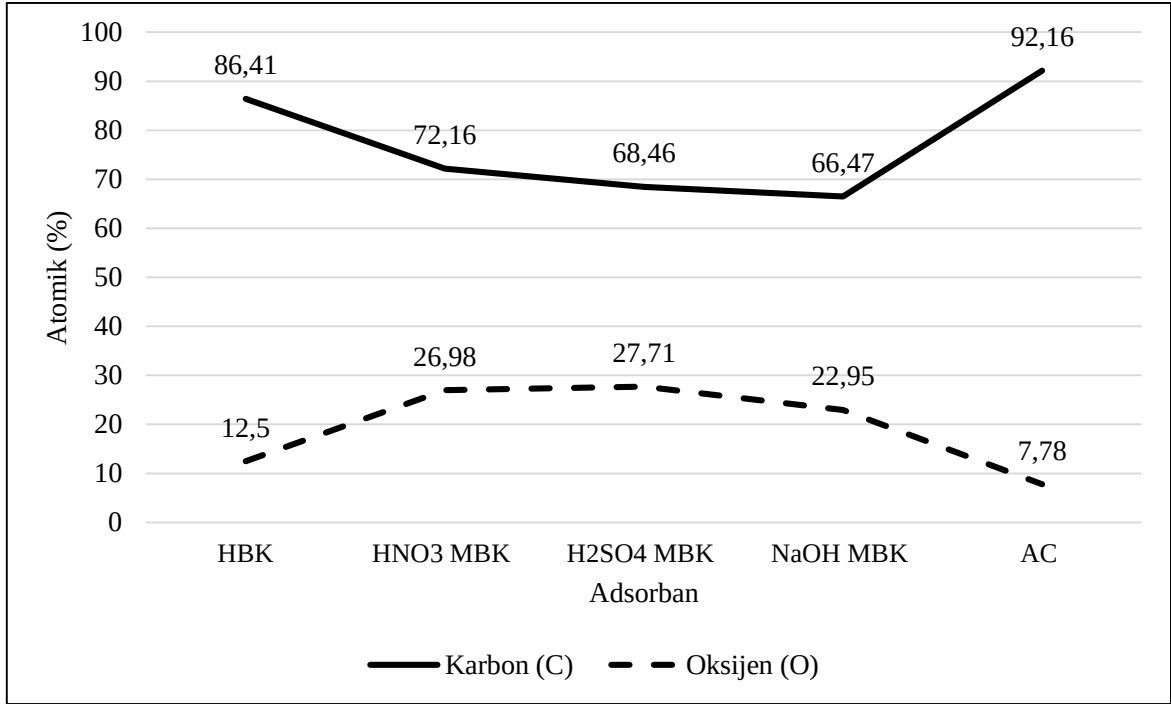
Şekil 4.17. Aktif karbon elemental grupları

Elemental analiz sonuçları Çizelge 4.1’de karşılaştırmalı şekilde görülmektedir. Uluslararası Biyokömür Girişimi (IBI) kriterlerine göre karbon içeriklerinin %60’ın üzerinde olması sebebiyle ayçiçeği sapından üretilen ham ve aktifleştirilmiş biyokömler 1.Sınıf Biyokömür kategorisindedir.

Çizelge 4.1. Tez çalışmasında kullanılan adsorbanların elemental içeriklerinin karşılaştırılması

Element	Ham Biyokömür (Atomik%)	HNO ₃ ile Aktifleştirilmiş Biyokömür (Atomik%)	H ₂ SO ₄ ile Aktifleştirilmiş Biyokömür (Atomik%)	NaOH ile Aktifleştirilmiş Biyokömür (Atomik%)	Aktif Karbon (Atomik%)
Karbon (C)	86,41	72,16	68,46	66,47	92,16
Oksijen (O)	12,5	26,98	27,71	22,95	7,78
Kalsiyum (Ca)	-	0,08	0,18	-	0,05
Sodyum (Na)	-	-	-	8,34	-
Magnezyum (Mg)	0,54	0,36	127	0,75	-
Alüminyum (Al)	-	-	0,22	-	-
Fosfor (P)	-	-	-	0,14	-
Sülfür (S)	-	-	1,77	-	-
Klor (Cl)	0,03	0,05	0,08	0,15	-
Potasyum (K)	0,52	0,37	0,32	1,13	-
Bakır (Cu)	-	-	-	0,06	-
Toplam	100	100	100	100	100

Çizelge 4.1 incelendiğinde hambiyokömürün (HBK) atomik % olarak karbon içeriği yüksek (86,41) ve aktif karbonun karbon yüzdesine (92,16) yakındır. Biyokömürde HNO₃, H₂SO₄, ve NaOH ile yapılan aktivasyonlar hambiyokömürün karbon içeriğini sırasıyla (72,16; 68,46; 66,47) azaltmıştır (Şekil 4.18).



Şekil 4.18. HBK, ABK ve AC'nin karbon ve oksijen içerikleri

Adsorbanların elemental analizleri incelendiğinde aktivasyon işlemlerinin biyokömürün karbon oranını azaltmakla birlikte oksijen ve diğer element oranlarında artışa neden olduğu görülmektedir. Güçlü asidik ya da bazik aktivasyon işlemleri biyokömürün elementel bileşiminin zenginleşmesine neden olmuştur. Bu durum iyon değişimi mekanizmasıyla Imazamox giderim potansiyelini artırmaktadır. Aktivasyon işleminin yüzey oksijenini arttırmasının (SEM EDX'e göre atomik %12,5'ten %26,8, % 27,71 ve %22,96'ya artış) oksijenli fonksiyonel gruplarla ilgili (Yankovych vd., 2021) olduğu değerlendirilmiştir.

4.1.2. Giderim Etkinliğini Etkileyen Faktörler

Giderim verimini etkileyen faktörlerin tespit edilmesi amacıyla çalkalama deneyleri yapılmıştır. pH, adsorban dozu, çalkalama hızı, başlangıç konsantrasyonu ve temas süresinin etkisinin değerlendirilmesi amacıyla ham (HBK) ve 1 N H₂SO₄ ile aktifleştirilmiş biyokömürün (H₂SO₄ ABK) adsorban olarak kullanıldığı deneylerin sonuçları aşağıda belirtilmiştir. Ham biyokömürün yapısından dolayı özgül ağırlığının düşük olması ve çalkalama deneyleri için toz haline getirildiğinde suya renk veren ve yüzen bir materyal olması sebebiyle HBK giderim verimleri yalnızca büyüklük olarak değerlendirilmiştir.

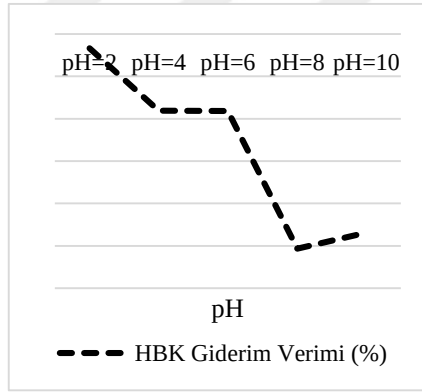
H₂SO₄ ile aktifleştirme biyokömürü (ABK) içindeki görece küçük parçacıklardan arındırdığı için bazı numunelerde UV-Vis Spektrofotometre ile ölçüm yapılabilmektedir.

Karıştırıcı üzerinde (HBK) ham biyokömürün adsorban olarak kullanıldığı çalkalama yöntemi ile yapılan adsorpsiyon deneylerinde dengeye ulaşamamıştır. Bu nedenle sonuçlar büyüklüksel olarak sunulmuştur. Bu sonuçların elde edilmesinin nedenleri:

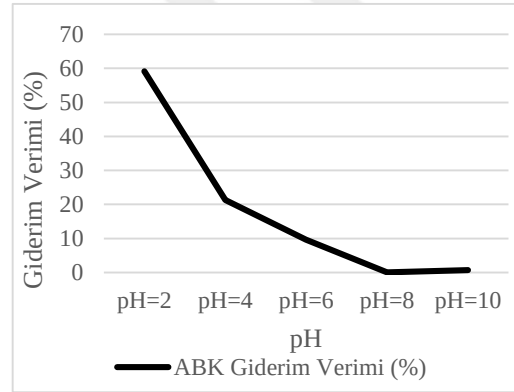
1. Deneylerde öğütülerek toz haline getirilmiş biyokömür kullanılmasının UV-Vis Spektrofotometredeki yapmış olduğu girişim,
2. Imazamoxun suda hızlı çözünmesi ve pH değişikliklerine bağlı olarak hızlı hareket etmesi (Gosetti vd., 2019) gibi kimyasal özellikleri,
3. Imazamoxun kimyasal özelliğine bağlı olarak adsorbe olduğu ortamdan hızlıca desorbe olması (Sanchez vd., 2023) olabileceği değerlendirilmiştir.

4.1.2.1. pH

Giderim verimine pH'ın etkisi Şekil 4.19'da HBK ve ABK için ayrı ayrı olacak biçimde görülmektedir (HBK için sonuçlar büyüklüksel olarak değerlendirilmiştir).



(a)



(b)

Şekil 4.19. pH'ın giderim verimine etkisi

a) HBK b) ABK

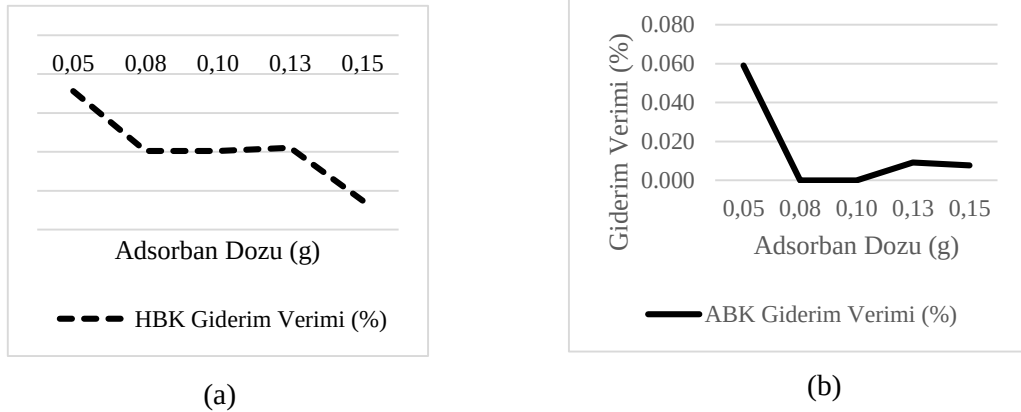
Ham ve Aktifleştirilmiş biyokömürün 2, 4, 6, 8 ve 10 pH'larda, 250 rpm hızda, 25 °C sıcaklıkta ve 0,05 g adsorban dozunda çalkalanarak adsorpsiyonun gerçekleştirilmesiyle imzamax giderim verimi değerlendirilmiştir. Her iki adsorban için de en iyi sonucun

alınması sebebiyle optimum pH değeri pH=2 olarak belirlenmiştir. Bu sonuç Morlay vd. (2012)'nin yapmış olduğu çalışma ile uyumludur. Çalışmada imazamoxun aktif karbon ile adsorpsiyonunun pH=2,8'de en yüksek oranda gerçekleştiği belirtilmiştir.

Sanchez vd. (2023) farklı sulama yöntemleri altında çeltik tarımında uygulanan Imazamoxun toprak tarafından adsorpsiyon/desorpsiyon durumlarını araştırdıkları çalışmalarında imazamoxun hızlıca toprak tarafından adsorbe edildiğini belirtmiştir. Bu durum yağmurlama sulama sistemlerinde daha yüksek bir oranda gerçekleşmiştir. Bu da daha büyük oranda su kirliliği yaratması anlamına gelmektedir. Ayrıca bu araştırmacılara göre yüksek pH'lı ortamda katyonik imazamox formları adsorbe olurken, anyonik imazamox formları adsorbe olmadan sulu çözeltide kalmaktadır. Düşük pH'lı ortamda ise bu durumun tam tersi gerçekleşmektedir. Adsorpsiyonun tersinirliği düşük pH'lı ortamlarda yüksek pH'lı ortamlara göre daha yüksektir.

4.1.2.2. Adsorban Dozu

Giderim verimine büyüklüsel olarak adsorban dozunun etkisi Şekil 4.20'de ham biyokömür (HBK) ve aktif biyokömür (ABK) için ayrı ayrı olacak biçimde görülmektedir (HBK için sonuçlar büyüklüsel olarak değerlendirilmiştir).



Şekil 4.20. Adsorban dozunun giderim verimine etkisi

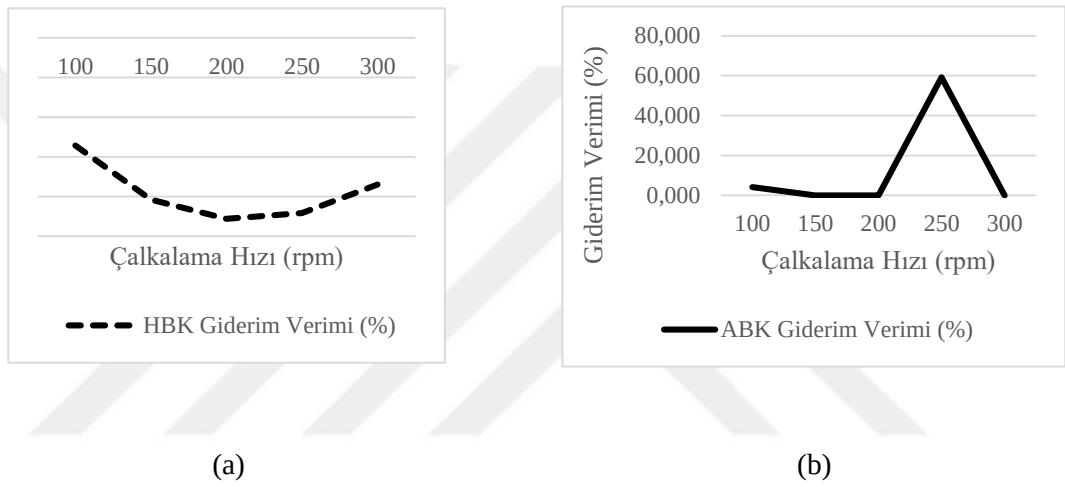
a) HBK b) ABK

HBK ve aktifleştirilmiş biyokömürün 0,05 g, 0,08 g, 0,10g, 0,13g ve 0,15g adsorban dozlarında, 250 rpm hızda, 25 °C sıcaklıkta, optimum pH olan 2'de ve 120 dak temas süresi

boyunca çalkalanarak adsorpsiyonun sağlanması sonucunda imzamox giderim verimi değerlendirilmiştir. Her iki adsorban için de en iyi sonucun alınması sebebiyle optimum adsorban dozu 0,05 g olarak belirlenmiştir.

4.1.2.3. Çalkalama Hızı

Giderim verimine büyüklüsel olarak çalkalama hızının etkisi Şekil 4.21’de HBK ve ABK için ayrı ayrı olacak biçimde görülmektedir (HBK için sonuçlar büyüklüsel olarak değerlendirilmiştir).



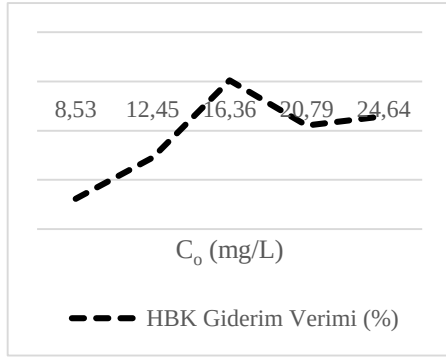
Şekil 4.21. Çalkalama hızının giderim verimine etkisi

a) HBK b) ABK

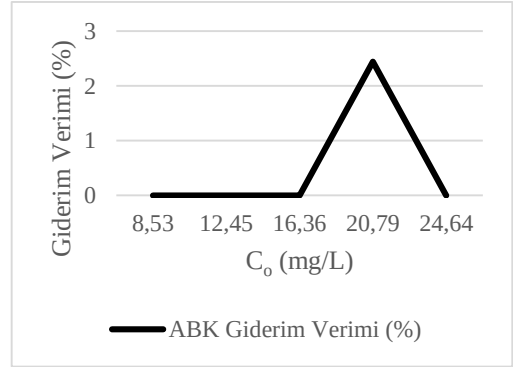
Ham ve aktifleştirilmiş biyokömürün 100 rpm, 150 rpm, 200 rpm, 250 rpm ve 300 rpm çalkalama hızlarında, optimum adsorban dozu olan 0,05 g adsorbanla, 25 °C sıcaklıkta ve 120 dak temas süresi boyunca çalkalanarak adsorpsiyonun sağlanması sonucunda imzamox giderim verimi büyüklüsel olarak değerlendirilmiştir. HBK için optimum çalkalama hızı 100 rpm ve ABK için optimum çalkalama hızı 250 rpm olarak belirlenmiştir.

4.1.2.4. Başlangıç Konsantrasyonu

Giderim verimine büyüklüsel olarak başlangıç konsantrasyonunun etkisi Şekil 4.22’de ham biyokömür ve aktif biyokömür için ayrı ayrı olacak biçimde görülmektedir (HBK için sonuçlar büyüklüsel olarak değerlendirilmiştir).



(a)



(b)

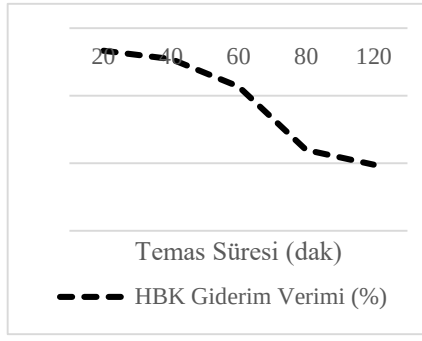
Şekil 4.22. Başlangıç konsantrasyonunun giderim verimine etkisi

a) HBK b) ABK

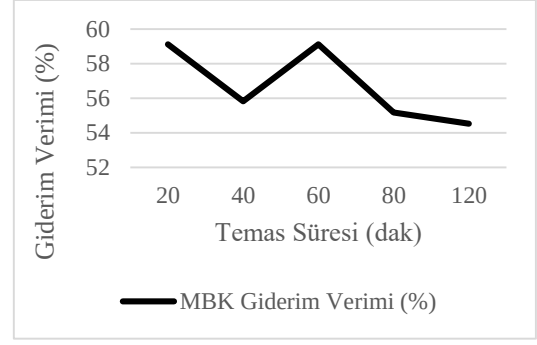
Ham ve Aktifleştirilmiş biyokömürün 8,6 mg/L, 12,4 mg/L, 16,8 mg/L, 20,8 mg/L ve 24,5 mg/L başlangıç konsantrasyonlarında, 0,05 g adsorbanla, 25°C sıcaklıkta, 250 rpm hızda ve 120 dak temas süresi boyunca çalkalanarak adsorpsiyonun sağlanması sonucunda imzamax giderim verimi değerlendirilmiştir. En iyi giderim veriminin sağlandığı dozlar olarak HBK Başlangıç Dozu=16,8 mg/L ve ABK Başlangıç Dozu =20,8 mg/L olarak değerlendirilmiş ancak elde edilen başlangıç dozları birbirine yakın olduğu için sürekli akış koşulları için her iki biyokömür için de başlangıç dozu olarak 20,8 mg/L alınmıştır.

4.1.2.5. Temas Süresi

Giderim verimine büyüklüsel olarak temas süresinin etkisi Şekil 4.23'te ham biyokömür ve aktif biyokömür için ayrı ayrı olacak biçimde görülmektedir (HBK için sonuçlar büyüklüsel olarak değerlendirilmiştir).



(a)



(b)

Şekil 4.23. Temas süresinin giderim verimine etkisi

a) HBK b) ABK

Ham ve aktifleştirilmiş biyokömürün 20 dak, 40 dak, 60 dak, 80 dak ve 120 dak temas sürelerinde, 0,05 g adsorbanla, 25 °C sıcaklıkta, 250 rpm hızda ve 120 dak temas süresi boyunca çalkalanarak adsorpsiyonun sağlanması sonucunda imazamox giderim verimi değerlendirilmiştir. En iyi giderim veriminin sağlandığı temas süresi her iki adsorban için de 20 dak olarak belirlenmiştir.

4.1.2.6 Adsorpsiyonun Optimum Koşulları

Ayçiçeği sapından üretilen biyokömürün ham (HBK) ve aktifleştirilmiş (ABK) hallerinin sentetik sulu çözeltilerden imazamox giderimi amacıyla adsorban olarak kullanılması halinde optimum şartların (pH, adsorban dozu, çalkalama hızı, başlangıç dozu ve temas süresi) belirlenmesi için gerçekleştirilen bir dizi çalkalama deneyi sonucu elde edilen 90 adet numunenin analiz sonuçları değerlendirilmiş ve Çizelge 4.2’de belirtilmiştir. Ayrıca ayçiçeği sapından üretilen biyokömürün fizikokimyasal yapısı nedeniyle özellikle ham haliyle suda çözündüğü, renk verdiği ya da yüzdüğü tespit edilmiştir. Bu nedenle ayçiçeği sapından üretilen biyokömürün toz formda kullanıma uygun olmadığı değerlendirilmiştir. Kolona biyokömür yerleştirilmeden önce girişim ihtimalinin tamamen engellenmesi gerekmektedir.

Çizelge 4.2. Ayçiçeği sapından üretilen ham ve aktif biyokömürün optimum adsorpsiyon koşulları

Adsorban Türü	pH	Optimum Adsorban Dozu (g)	Optimum Çalkalama Hızı (rpm)	Optimum Başlangıç Dozu (mg/L)	Temas Süresi (dak)
Ham Biyokömür (HBK)	2	0,05	100	20,8	20
Aktif Biyokömür (ABK)	2	0,05	250	20,8	20

4.1.2.7. Adsorpsiyon Mekanizması

Çalkalama deneylerinde gerçekleşen ABK ile adsorpsiyonun mekanizmasının tespiti için izoterm ve kinetik hesaplamaları yapılmıştır (HBK'nın adsorban olarak kullanıldığı çalkalama deneyleri 4.1.2'de olası kök nedenleri belirtilen hususlar nedeniyle dengeye ulaşmamıştır). Araştırmanın asıl konusu kolonda adsorpsiyon olduğundan, HBK çalkalama deneyleri yalnızca bir ön deney aşaması olarak kabul edilmiştir. Kolon deneylerinde farklı koşullar ayrıca değerlendirilmiştir.

4.1.2.7.1. Adsorpsiyon İzotermi

Adsorpsiyon izotermi belirlenmesine yönelik olarak normalleştirilmiş veriler üzerinden ABK için yapılan hesaplamalar Çizelge 4.3'te yer almaktadır.

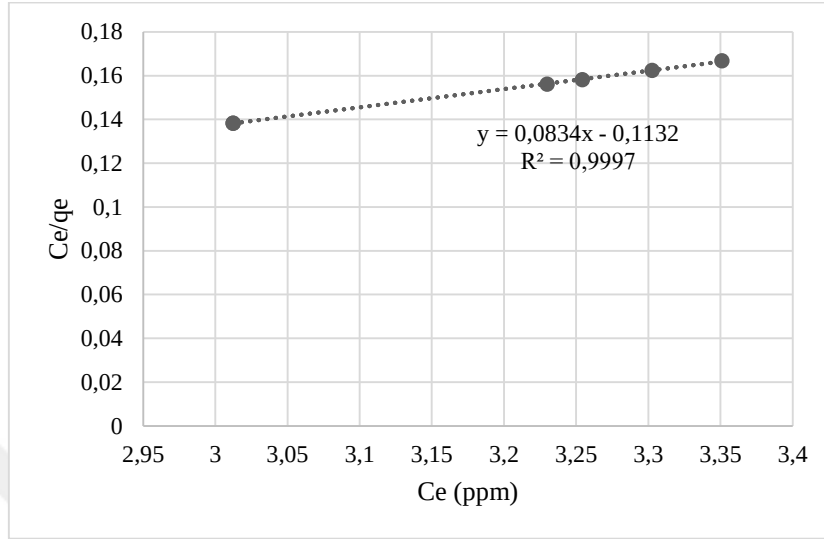
Çizelge 4.3. Çalkalama deneylerinde ABK için izoterm sabitleri

t (dak)	qt (mg/g)	qe (mg/g)	Ce/qe	log Ce	log qe
0	82,78	20,695	0,156076	0,509203	1,315865
20	87,13334	21,78334	0,138286	0,478903	1,338124
40	82,2934	20,57335	0,158182	0,512462	1,313305
60	87,13334	21,78334	0,138286	0,478903	1,338124
80	81,32666	20,33167	0,16244	0,518865	1,308173
120	80,36	20,09	0,166799	0,525174	1,30298

4.1.2.7.1.1. Langmuir İzotermi

HBK için, Bölüm 4.1.2'de nedenlerine dair değerlendirmelerin de belirtildiği üzere, adsorpsiyon dengeye ulaşmadığından sonuçlar büyüklüsel olarak değerlendirilmiş, izoterm ve kinetik model hesaplamaları yapılmamıştır.

ABK için Langmuir izoterminin belirlenmesine yönelik olarak yapılan hesaplama sonucu elde edilen sonuçlarla ilgili grafik Şekil 4.25'te ($C_0=7,369$ mg/L, $t=20$ dak, $pH=2$, $V=250$ mL, $m=0,05$ g) yer almaktadır.



Şekil 4.25. ABK için Langmuir izoterminin

Elde edilen sonuçlar ışığında R^2 değerinin 1'e çok yakın olarak bulunması sebebiyle ABK ile adsorpsiyonun Langmuir İzoterminine uyumlu olduğu belirlenmiştir.

4.1.2.7.1.2. Freundlich İzoterminin

HBK ve ABK ile adsorpsiyonda elde edilen veriler ışığında yapılan hesaplamalar doğrultusunda adsorpsiyonun Freundlich İzoterminine uyumlu olduğuna dair bir sonuca ulaşılamamıştır.

Çizelge 4.5. Adsorpsiyon ortamından elde edilen izoterm sabitleri*

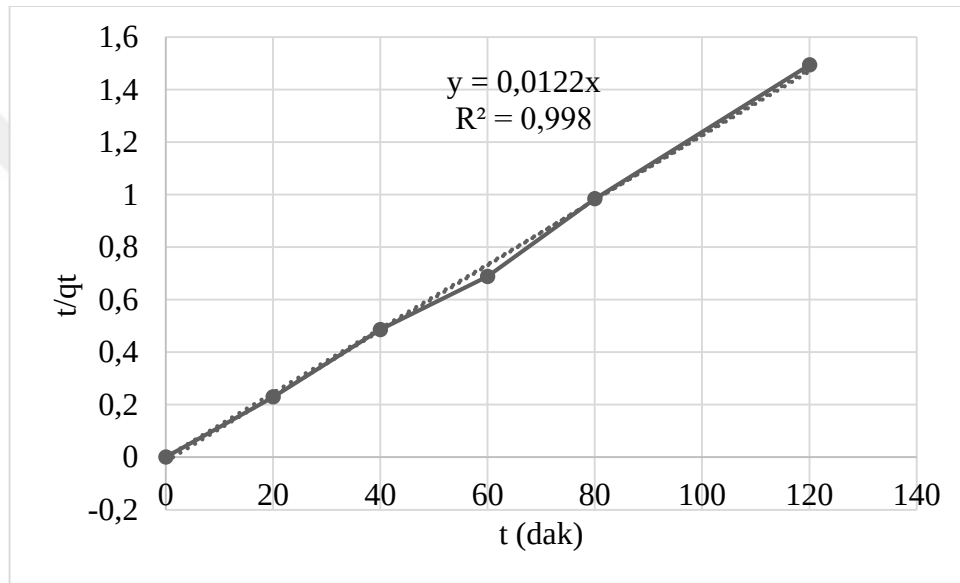
Adsorban Türü	İzoterm Modelleri					
	Freundlich			Langmuir		
	1/n	log K_F	R^2	Q_m	1/ K_L	R^2
ABK	-	-	-	12,09	-0,1132	0,9997

*Çalkalama Deneyleri

4.1.2.7.2. Adsorpsiyonun Kinetik Modeli

HBK ve ABK için Yalancı Birinci Derece Denklem hesaplamaları tutarsız sonuçlar vermiştir. Ayrıca HBK ile adsorpsiyon için Yalancı İkinci Derece Denklem (pseudo second order kinetic model) hesaplamaları tutarsız sonuçlar vermiştir.

H₂SO₄ ABK ile adsorpsiyon için Yalancı İkinci Derece Denklem (pseudo second order kinetic model) hesaplamaları (Co=7,369 mg/L, t=20 dak, pH=2, V=250 mL, m=0,05g) Şekil 4.26'daki gibidir.



Şekil 4.26. ABK için yalancı ikinci derece kinetik model

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda ABK ile adsorpsiyonun kinetik modelinin Yalancı İkinci Derece Denkleme uygun olduğu belirlenmiştir.

Kolon deneylerine temel oluşturmak amacıyla ve optimum şartların elde edilmesi için gerçekleştirilen çalkalama adsorpsiyon deneylerinin izoterm ve kinetiklerine ait özet sonuçlar Çizelge 4.5'te yer almaktadır.

Çizelge 4.5. Adsorpsiyon ortamından elde edilen kinetik sabitleri*

Adsorban Türü	Kinetik Sabitleri					
	Yalancı Birinci Derece (Pseudo-First Order Model)			Yalancı İkinci Derece (Pseudo-Second Order Model)		
	q _e	k ₁	R ²	q _e	k ₂	R ²
ABK	-	-	-	21,78	0,047	0,998

*Çalkalama Deneyleri

4.2. Ticari Adsorbanla Kolonda Imazamox Giderimi

Ticari aktif karbon kullanılarak ve kolon deneyleriyle yapılan Imazamox giderim verimleri Çizelge 4.6’da sunulmaktadır.

Çizelge 4.6. Aktif karbon ile adsorpsiyonda imazamox giderim verimleri

Adsorban Türü	Kolon Adsorban Yüksekliği (cm)	pH	Giderim Verimi (%)
AC	5	6	90
AC	5	6	100
AC	5	6	100

Aktif karbon (AC) ile elde edilen sonuçlar, Morlay vd. (2012)’nin çalışmaları ile uyumludur. Çalışmada imazamoxun aktif karbon üzerinde güçlü bir şekilde adsorbe edildiği saptanmıştır. Imazamoxun nötr formu gözenekli aktif karbon üzerine nüfus etmektedir.

4.3. İçme Suyundaki Imazamox’un Tarımsal Atıktan Üretilen Biyokömürle Gideriminin Laboratuvar Ölçeğinde Değerlendirilmesi

Imazamoxun kolon sisteminde giderimi için adsorpsiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir.

4.3.1. Kolonda Kesikli Akış Koşullarında Imazamox Adsorpsiyonunu Etkileyen Faktörler

Kesikli akışta kolonda adsorpsiyonla imazamoxun giderim verimini değerlendirmek üzere gerçekleştirilen deneylere yönelik tablo Çizelge 4.7’de yer almaktadır. Sentetik numuneler 1000 mL’lik stok çözeltiden seyreltilerek hazırlanmıştır. pH ayarlamaları 0,1 N HCl ve 0,1 N NaOH kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Quispe vd. (2022)’ye benzer şekilde tek çeşit biyokömür kullanılan adsorpsiyon için silindirik cam kolon kullanılmıştır. Kolona biyokömür yerleştirilmeden önce girişim ihtimalinin tamamen engellenmesi gerekmektedir. Laboratuvar malzemelerinde en çok cam tercih edilmektedir. Aydın, Oğuz ve Gül (2021)’ün çalışmalarında da belirttiği gibi cam üretiminde kuvars kumu kullanılmaktadır. Bu nedenle hem fiziksel hem de kimyasal girişimin engellenmesi için kolona önce saf suyla yıkanmış

ve 24 saat oda sıcaklığında kurutulmuş haldeki kuvars kumu 3 cm yüksekliğinde olacak şekilde doldurulmuştur. Üst girişli kolon adsorpsiyon deneyinde çıkışa adsorban kaçışının önlenmesi amacıyla kuvars kumu kullanılmaktadır (Li vd., 2020). Çıkış öncesindeki drenaj tabakası 1,4-5 cm arasında seçilmektedir (Quispe vd., 2022). Biyokömür, çıkış suyuna fiziksel girişimin önüne geçilmesi amacıyla granül şekilde kullanılmıştır.

Çizelge 4.7. Kesikli akış koşullarında kolonda Imazamox giderimi

Adsorban Türü	Kolondaki Adsorban Yüksekliği (cm)	pH	C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e	Giderim Verimi (%)
HBK	1	6	0,2			
HBK	1	7	0,2			
HBK	1	8	0,2			
HBK	1	6	0,4	0,347	0,001472	13,25
HBK	1	7	0,4	0,374	0,000722	6,50
HBK	1	8	0,4			
HBK	1	6	0,6	0,411	0,00525	31,50
HBK	1	7	0,6	0,589	0,000306	1,83
HBK	1	8	0,6	0,51	0,0025	15
HBK	1	6	0,8			
HBK	1	7	0,8			
HBK	1	8	0,8			
HBK	1	6	1			
HBK	1	7	1			
HBK	1	8	1			
HBK	5	6	0,2			
HBK	5	7	0,2			
HBK	5	8	0,2			
HBK	5	6	0,4			
HBK	5	7	0,4			
HBK	5	8	0,4			
HBK	5	6	0,6			
HBK	5	7	0,6			
HBK	5	8	0,6			
HBK	5	6	0,8	0,668	0,000733	16,50
HBK	5	7	0,8	0,732	0,000378	8,50
HBK	5	8	0,8	0,79	5,56E-05	1,25
HBK	5	6	1			
HBK	5	7	1			
HBK	5	8	1			
HNO ₃ ABK	1	6	0,2			
HNO ₃ ABK	1	7	0,2			
HNO ₃ ABK	1	8	0,2			
HNO ₃ ABK	1	6	0,4	0,364	0,001286	9

Çizelge 4.7. Kesikli akış koşullarında kolonda Imazamox giderimi (devamı)

HNO ₃ ABK	1	7	0,4			
HNO ₃ ABK	1	8	0,4			
HNO ₃ ABK	1	6	0,6	0,59	0,000357	1,66
HNO ₃ ABK	1	7	0,6			
HNO ₃ ABK	1	8	0,6			
HNO ₃ ABK	1	6	0,8			
HNO ₃ ABK	1	7	0,8			
HNO ₃ ABK	1	8	0,8			
HNO ₃ ABK	1	6	1			
HNO ₃ ABK	1	7	1			
HNO ₃ ABK	1	8	1			
HNO ₃ ABK	5	6	0,2			
HNO ₃ ABK	5	7	0,2			
HNO ₃ ABK	5	8	0,2			
HNO ₃ ABK	5	6	0,4			
HNO ₃ ABK	5	7	0,4			
HNO ₃ ABK	5	8	0,4			
HNO ₃ ABK	5	6	0,6			
HNO ₃ ABK	5	7	0,6			
HNO ₃ ABK	5	8	0,6			
HNO ₃ ABK	5	6	0,8	0,689	0,000793	13,87
HNO ₃ ABK	5	7	0,8	0,753	0,000336	5,87
HNO ₃ ABK	5	8	0,8	0,791	6,43E-05	1,12
HNO ₃ ABK	5	6	1	0,987	9,29E-05	1,3
HNO ₃ ABK	5	7	1			
HNO ₃ ABK	5	8	1			
1 N H ₂ SO ₄ ABK	1	6	0,2			
1 N H ₂ SO ₄ ABK	1	7	0,2			
1 N H ₂ SO ₄ ABK	1	8	0,2			
1 N H ₂ SO ₄ ABK	1	6	0,4			
1 N H ₂ SO ₄ ABK	1	7	0,4			
1 N H ₂ SO ₄ ABK	1	8	0,4			
1 N H ₂ SO ₄ ABK	1	6	0,6			
1 N H ₂ SO ₄ ABK	1	7	0,6			
1 N H ₂ SO ₄ ABK	1	8	0,6			
1 N H ₂ SO ₄ ABK	1	6	0,8			
1 N H ₂ SO ₄ ABK	1	7	0,8			
1 N H ₂ SO ₄ ABK	1	8	0,8			
1 N H ₂ SO ₄ ABK	1	6	1			
1 N H ₂ SO ₄ ABK	1	7	1			
1 N H ₂ SO ₄ ABK	1	8	1			
1 N H ₂ SO ₄ ABK	5	6	0,2			
1 N H ₂ SO ₄ ABK	5	7	0,2			
1 N H ₂ SO ₄ ABK	5	8	0,2			
1 N H ₂ SO ₄ ABK	5	6	0,4	0,19		52,5
1 N H ₂ SO ₄ ABK	5	7	0,4			
1 N H ₂ SO ₄ ABK	5	8	0,4			
1 N H ₂ SO ₄ ABK	5	6	0,6			

Çizelge 4.7. Kesikli akış koşullarında kolonda Imazamox giderimi (devamı)

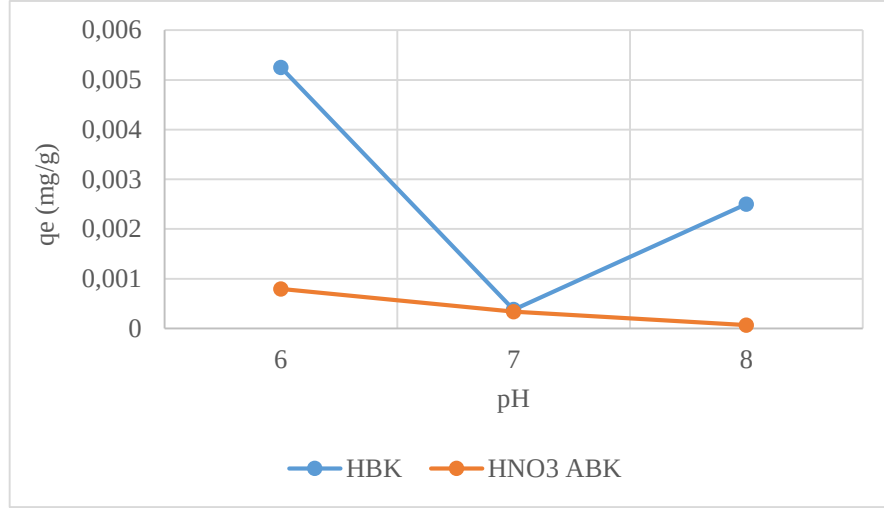
1 N H₂SO₄ ABK	5	7	0,6		
1 N H₂SO₄ ABK	5	8	0,6		
1 N H₂SO₄ ABK	5	6	0,8	0,42	47,5
1 N H₂SO₄ ABK	5	7	0,8		
1 N H₂SO₄ ABK	5	8	0,8		
1 N H₂SO₄ ABK	5	6	1	0,41	59
1 N H₂SO₄ ABK	5	7	1		
AC	5	8	1		
AC	1	6	0,2		
AC	1	7	0,2		
AC	1	8	0,2		
AC	1	6	0,4		
AC	1	7	0,4		
AC	1	8	0,4		
AC	1	6	0,6		
AC	1	7	0,6		
AC	1	8	0,6		
AC	1	6	0,8		
AC	1	7	0,8		
AC	1	8	0,8		
AC	1	6	1		
AC	1	7	1		
AC	1	8	1		
AC	5	6	0,2		
AC	5	7	0,2		
AC	5	8	0,2		
AC	5	6	0,4	0,02	95
AC	5	7	0,4		
AC	5	8	0,4		
AC	5	6	0,6		
AC	5	7	0,6		
AC	5	8	0,6		
AC	5	6	0,8	0	100
AC	5	7	0,8		
AC	5	8	0,8		
AC	5	6	1	0	100
AC	5	7	1		
AC	5	8	1		

Kolonda 1 cm yüksekliğindeki HBK 1,8 g ve kolonda 1cm yüksekliğindeki HNO₃ ABK ise 1,4 g olarak ölçülmüştür. Deneyler Çizelge 4.7'deki plana göre 50 mL'lik sentetik numune olarak belirtilen dozajlardaki imazamox ile hazırlanan adsorbentlerle gerçekleştirilmiştir. Bu adsorbanla yapılan deneylerden elde edilen numuneler Uv-Vis Spektrofotometre'de 270 nm dalga boyunda absorbans ölçümüne tabi tutulmuştur. Grafikler incelenerek temsil edici giderimlerin olacağı şekilde seçilen numuneler için Nabiltem'de LC-MS/MS ile Imazamox Tayini gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.7'de bu sonuçlar yer

almaktadır. HBK'nın adsorban olarak kullanıldığı kolonda kesikli akış koşullarındaki adsorpsiyon deneyinde %1,25 ila %31,50 giderim sağlanırken HNO₃ ABK'nın adsorban olduğu deneyde ise %1,12 ila %13,87'lik imazamox giderimi oluşmuştur. 1g HBK ile kolonda kesikli akış koşullarında 0,016 mg imazamox giderimi sağlanırken 1g HNO₃ ABK ile 0,0057 mg giderim sağlanmıştır. Kesikli akış koşullarındaki deneyler sürekli akış koşulları için temel teşkil edecek ön deneyler olarak tasarlandığından elde edilen sonuçlar incelendiğinde giderimin max %31,5 olduğu görülmüştür. Bu verimi arttırmak için farklı aktiveleştirme metotlarının değerlendirilmesi amacıyla 1 N H₂SO₄ ABK'nın kullanıldığı deneyler yapılmış ve elüatlardan temsil edici olarak seçilenlere Nabiltem'de LC-MS/MS ile Imazamox Tayini yapılmıştır. 1 N H₂SO₄ ABK'nın adsorban olarak kullanıldığı kolonda kesikli akış koşullarındaki adsorpsiyon deneyinde %47,5 ila %59 giderim sağlanırken AC'nin adsorban olduğu deneylerde ise %95 ila %100'lük Imazamox giderimi oluşmuştur. 1g 1 N H₂SO₄ ABK ile kolonda kesikli akış koşullarında 0,0045 mg imazamox giderimi sağlanırken 1g AC ile 0,0018 mg giderim sağlanmıştır. AC ile yüksek giderim verimi elde edilse de birim adsorban başına giderimin kesikli akış koşullarında dahi ham ve aktiveleştirilmiş biyokömürlerin tamamından düşük olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlar temsil edici verileri içerdiğinden karbon giderimi ile korelasyonun değerlendirilmesinde kullanılmış olup, pH, kolon yüksekliği ve başlangıç konsantrasyonunun etkisinin değerlendirilmesi aşamasına dahil edilmemiştir.

4.3.1.1. pH

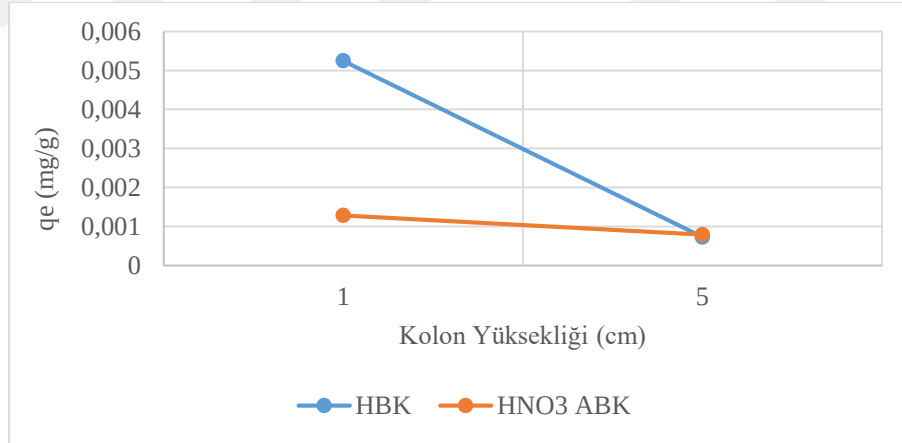
Kolonda kesikli akışa pH etkisini ölçmek için, pH_{pzc} deney sonuçları da göz önüne alınarak, 6,7 ve 8 pH'larda deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.27'de görülmektedir.



Şekil 4.27. Kesikli akış koşullarında kolonda adsorpsiyona pH etkisi

4.3.1.2. Kolon Yüksekliği

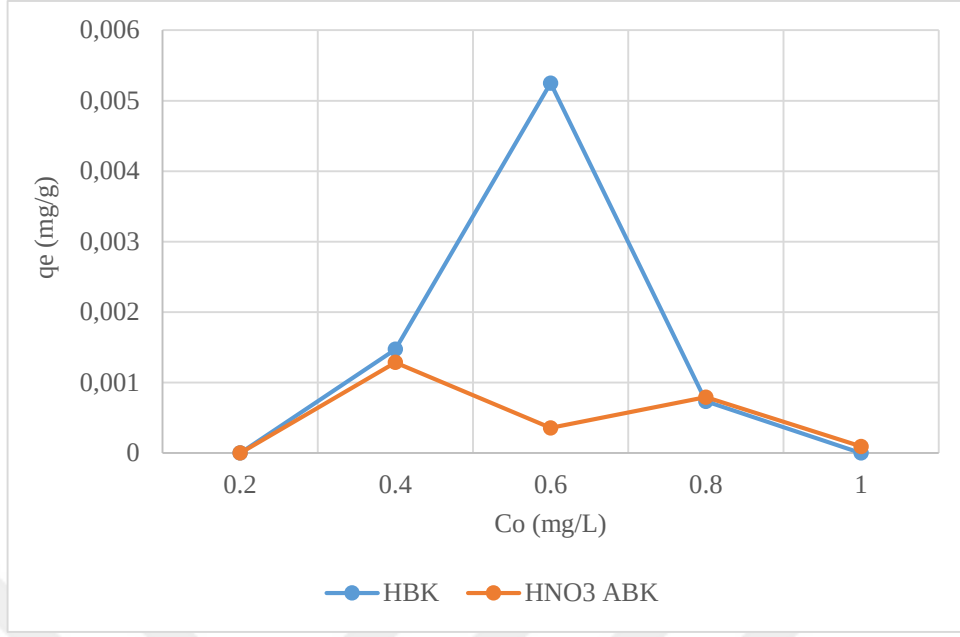
Kolonda kesikli akış koşullarında adsorpsiyonla imazamox giderimi 1 cm ve 5 cm yüksekliğinde adsorbanlarla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.28’de yer almaktadır.



Şekil 4.28. Kesikli akış koşullarında kolonda adsorpsiyona kolon yüksekliğinin etkisi

4.3.1.3. Başlangıç Konsantrasyonu

Kesikli akışta kolonda adsorpsiyonla imazamox giderimine başlangıç konsantrasyonunun etkisini değerlendirmek için 0,2 mg/L, 0,4 mg/L, 0,6 mg/L, 0,8 mg/L ve 1 mg/L başlangıç dozlarındaki çözeltilerle deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.29’da yer almaktadır.



Şekil 4.29. Kesikli akış koşullarında kolonda adsorpsiyona başlangıç konsantrasyonunun etkisi

Kesikli akış koşullarında kolonda imazamox ve karbon giderimi gerçekleşmekte ancak adsorpsiyon mekanizmasının değerlendirilmesine ve parametrelerin ortaya konmasına yetecek düzeyde veri oluşmamaktadır. Ayrıca HNO₃ ile aktifleştirmenin giderime beklenen oranda katkısı olmadığı görülmüştür. Bu nedenlerle sürekli akış koşullarında ve biyokömür için farklı aktifleştirme metodları kullanılarak adsorpsiyon deneyleri planlanmıştır.

4.3.1.5. Karbon Giderimini Etkileyen Faktörler

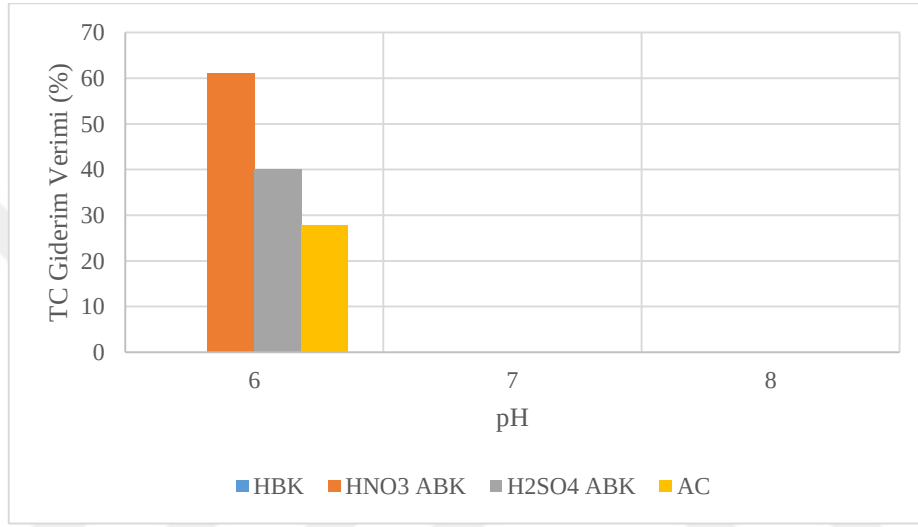
Kesikli akış koşullarında farklı adsorbanlarla karbon giderimi incelenerek imazamox giderimi ile korelasyonu değerlendirilmiştir. Kullanılan adsorbanlar HBK, HNO₃ ABK, 1 N H₂SO₄ ABK ve AC'dir. Deneyler farklı imazamox başlangıç konsantrasyonları (0,2 mg/L, 0,4 mg/L, 0,6 mg/L, 0,8 mg/L ve 1 mg/L), farklı pH'lar (6, 7 ve 8) ve farklı kolon yüksekliklerinde (1 cm ve 5 cm) gerçekleştirilmiştir. İmazamox gideriminin gerçekleştiği görülen numuneler için ön ve son Toplam Karbon (TC), Toplam Organik Karbon (TOC) ve İnorganik Karbon (IC) ölçümleri Nabiltem'de yapılmıştır.

4.3.1.5.1. Toplam Karbon Giderimini Etkileyen Faktörler

Toplam karbon giderimini etkileyebilecek değişkenler olan pH, başlangıç konsantrasyonu ve kolon yüksekliğinin etkisi incelenmiştir. İmazamox giderimi ile korelasyonu değerlendirilmiştir.

4.3.1.5.1.1. pH

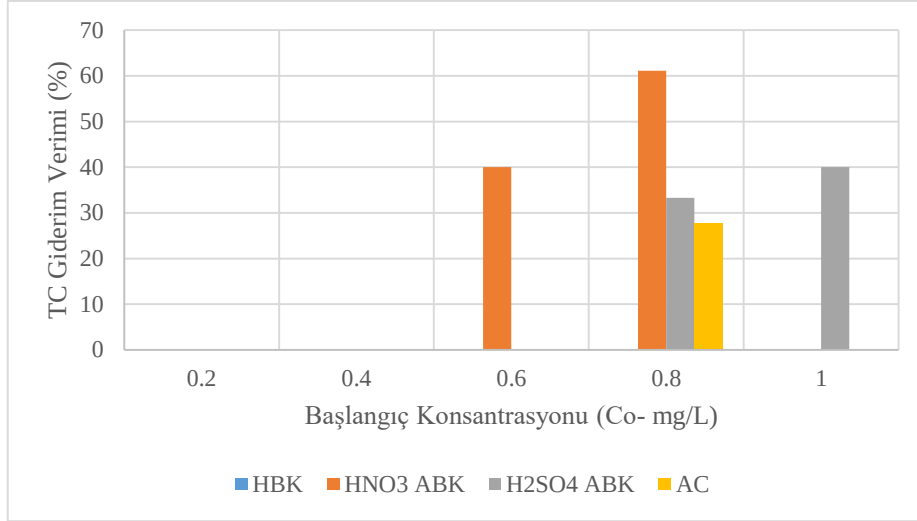
Toplam karbon (TC) giderimi için farklı pH'larda ve farklı adsorbanların kullanıldığı deneylerin sonuçları Şekil 4.30'da yer almaktadır. HBK ile TC giderimi sağlanamamıştır. Diğer adsorbanlar da yalnızca pH 6'da TC giderimi oluşturmuştur. pH 6'da TC gideriminde en başarılı sonuç HNO₃ ABK ile elde edilmiş (%61,11) olup, sırasıyla onu H₂SO₄ ABK ve AC takip etmektedir.



Şekil 4.30. Kesikli akış koşullarında kolonda toplam karbon giderimine pH etkisi

4.3.1.5.1.2. Başlangıç Imazamox Konsantrasyonu

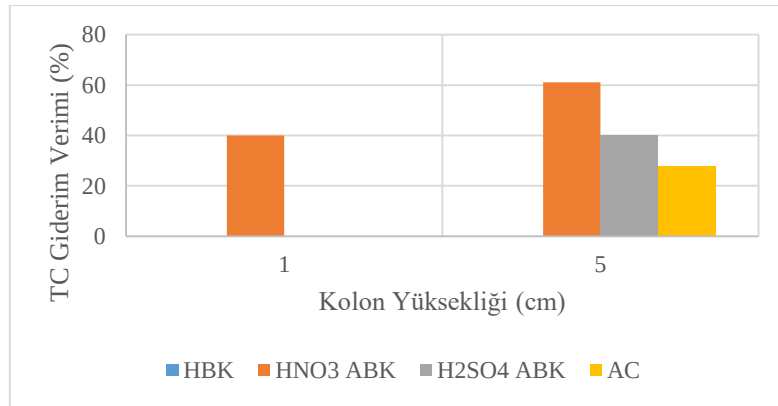
Toplam karbon (TC) giderimi için farklı başlangıç konsantrasyonlarında ve farklı adsorbanların kullanıldığı deneylerin sonuçları Şekil 4.31'de yer almaktadır. HBK ile TC giderimi sağlanamamıştır. Diğer adsorbanlarla 0,6 mg/L, 0,8 mg/L ve 1 mg/L başlangıç imazamox konsantrasyonlarında TC giderimi oluşmuştur. Imazamox'un 0,8 mg/L olduğu deneyde TC gideriminde en başarılı sonuç HNO₃ ABK ile elde edilmiş (%61,11) olup, sırasıyla onu H₂SO₄ ABK ve AC takip etmektedir.



Şekil 4.31. Kesikli akış koşullarında kolonda toplam karbon giderimine başlangıç konsantrasyonu etkisi

4.3.1.5.1.3. Kolon Yüksekliği

Toplam karbon (TC) giderimi için farklı kolon yüksekliklerinde ve farklı adsorbanların kullanıldığı deneylerin sonuçları Şekil 4.32’de yer almaktadır. HBK ile TC giderimi sağlanamamıştır. Diğer adsorbanlarla 1 cm ve 5 cm kolon yüksekliklerinde TC giderimi oluşmuştur. TC gideriminde en başarılı sonuç 5 cm kolon yüksekliğinde HNO₃ ABK ile elde edilmiş (%61,11) olup, sırasıyla onu H₂SO₄ ABK ve AC takip etmektedir.



Şekil 4.32. Kesikli akış koşullarında kolonda toplam karbon giderimine kolon yüksekliği etkisi

4.3.1.5.1.4. İmazamox Giderimi ile Korelasyonu

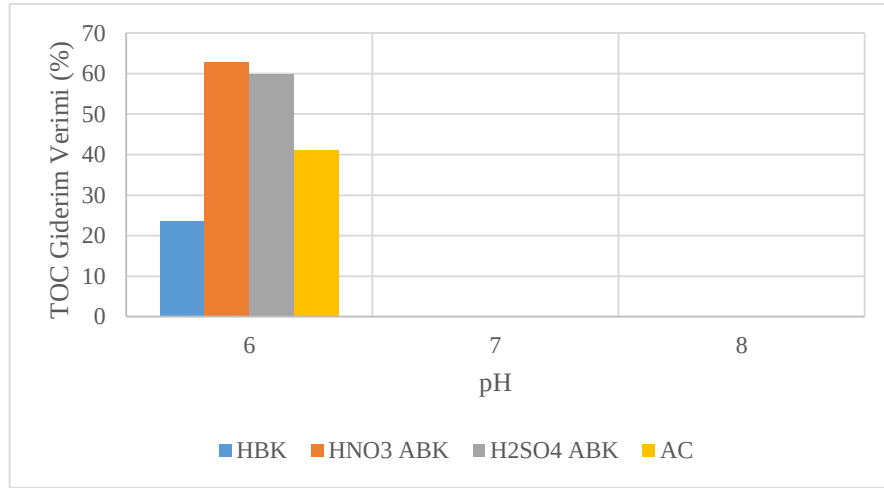
Tüm deney sonuçları değerlendirildiğinde imazamox giderimi ile Toplam Karbon (TC) giderimi arasında korelasyon bulunduğu dair bir kanıt oluşmamıştır. Ancak biyokömürün aktifleştirilmesiyle adsorpsiyonda %61,11 oranında Toplam Karbon giderimi sağlanmıştır. TOC ve TC giderimleri ise doğru orantılıdır.

4.3.1.5.2. Toplam Organik Karbon Giderimini Etkileyen Faktörler

Toplam organik karbon giderimini etkileyebilecek değişkenler olan pH, başlangıç konsantrasyonu ve kolon yüksekliğinin etkisi incelenmiştir. Imazamox giderimi ile korelasyonu değerlendirilmiştir.

4.3.1.5.2.1. pH

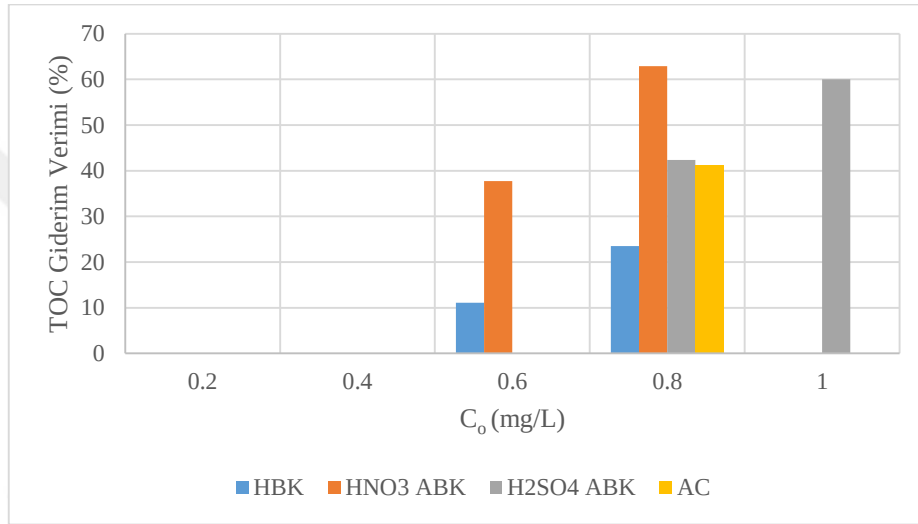
Toplam Organik Karbon (TOC) giderimi için farklı pH'larda ve farklı adsorbanların kullanıldığı deneylerin sonuçları Şekil 4.33'te yer almaktadır. pH 7 ve 8'de TOC giderimi sağlanamamıştır. pH 6'da TOC giderimi tüm adsorbanların kullanıldığı deneylerde oluşmuştur. TOC gideriminde en başarılı sonuç pH 6'da HNO₃ ABK ile elde edilmiş (%62,94) olup, sırasıyla onu H₂SO₄ ABK, AC ve HBK takip etmektedir.



Şekil 4.33. Kesikli akış koşullarında kolonda toplam organik karbon giderimine pH etkisi

4.3.1.5.2.2. Başlangıç İmazamox Konsantrasyonu

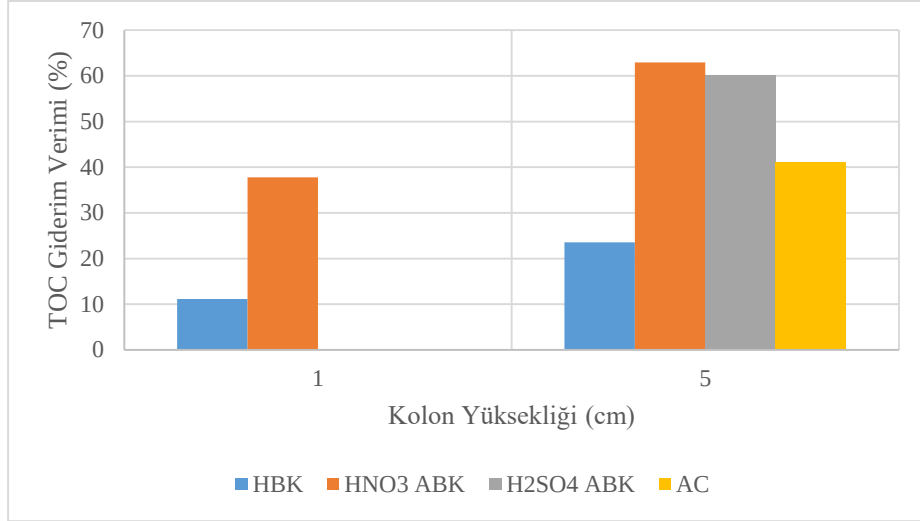
Toplam Organik Karbon (TOC) giderimi için farklı başlangıç konsantrasyonlarında ve farklı adsorbanların kullanıldığı deneylerin sonuçları Şekil 4.34'te yer almaktadır. Imazamox başlangıç konsantrasyonunun 0,2 mg/L ve 0,4 mg/L olduğu deneylerde TOC giderimi sağlanamamıştır. Imazamox başlangıç konsantrasyonunun 0,8 mg/L olduğu deneyde TOC giderimi en yüksek oranda (%62,94) gerçekleşmiştir onu H₂SO₄ ABK, AC ve HBK takip etmektedir.



Şekil 4.34. Kesikli akış koşullarında kolonda toplam organik karbon giderimine başlangıç konsantrasyonu etkisi

4.3.1.5.2.3. Kolon Yüksekliği

Toplam Organik Karbon (TOC) giderimi için farklı kolon yüksekliklerinde ve farklı adsorbanların kullanıldığı deneylerin sonuçları Şekil 4.35'te yer almaktadır. Kolon yüksekliğinin olduğu deneylerde TOC giderimi sağlanamamıştır. Imazamox başlangıç konsantrasyonunun 5 cm olduğu deneyde TOC giderimi en yüksek oranda (%62,94) gerçekleşmiştir onu H₂SO₄ ABK, AC ve HBK takip etmektedir.



Şekil 4.35. Kesikli akış koşullarında kolonda toplam organik karbon giderimine kolon yüksekliği etkisi

4.3.1.5.2.4. Imazamox Giderimi ile Korelasyonu

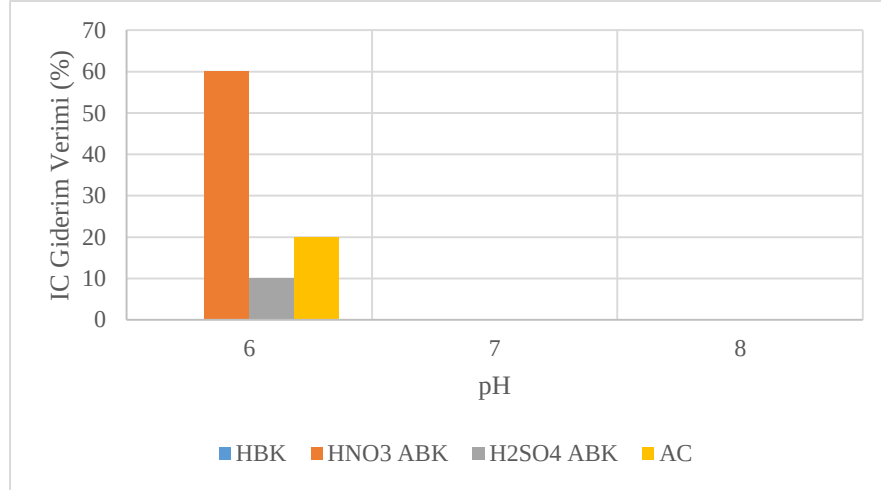
Tüm deney sonuçları değerlendirildiğinde imazamox giderimi ile Toplam Organik Karbon (TOC) giderimi arasında korelasyon bulunduğu dair bir kanıt oluşmamıştır. Ancak biyokömürün aktifleştirilmesiyle adsorpsiyonda %62,94 oranında Toplam Organik Karbon giderimi sağlanmıştır. TOC ve TC giderimleri ise doğru orantılıdır.

4.3.1.5.3. İnorganik Karbon Giderimini Etkileyen Faktörler

İnorganik karbon (IC) giderimini etkileyebilecek değişkenler olan pH, başlangıç konsantrasyonu ve kolon yüksekliğinin etkisi incelenmiştir. Imazamox giderimi ile korelasyonu değerlendirilmiştir.

4.3.1.5.3.1. pH

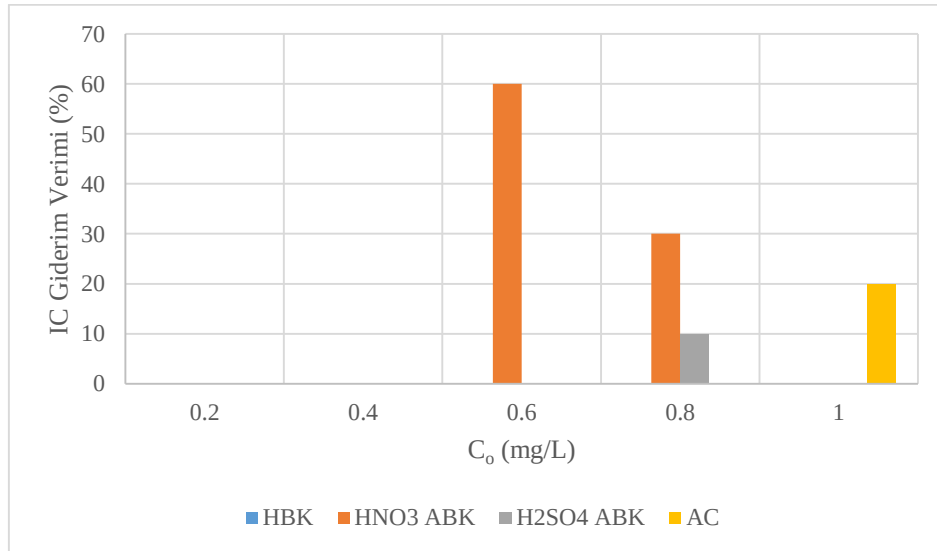
İnorganik Karbon (IC) giderimi için farklı pH'larda ve farklı adsorbanların kullanıldığı deneylerin sonuçları Şekil 4.36'da yer almaktadır. pH 7 ve 8'de IC giderimi sağlanamamıştır. pH 6'da IC giderimi HBK dışında tüm adsorbanların kullanıldığı deneylerde oluşmuştur. IC gideriminde en başarılı sonuç pH 6'da HNO₃ ABK ile elde edilmiş (%60) olup, sırasıyla onu AC ve H₂SO₄ ABK takip etmektedir.



Şekil 4.36. Kesikli akış koşullarında kolonda inorganik karbon giderimine pH etkisi

4.3.1.5.3.2. Başlangıç İmazamox Konsantrasyonu

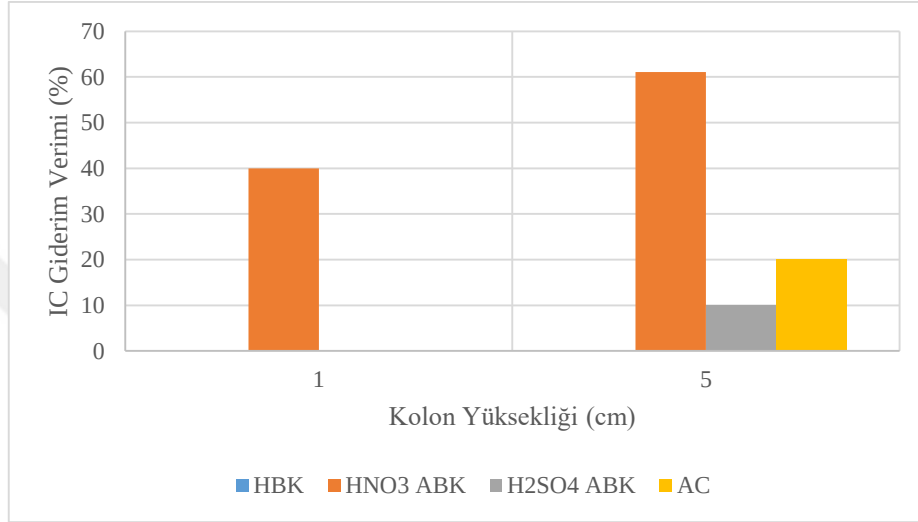
İnorganik Karbon (IC) giderimi için farklı başlangıç konsantrasyonlarında ve farklı adsorbanların kullanıldığı deneylerin sonuçları Şekil 4.37’de yer almaktadır. Imazamox başlangıç konsantrasyonunun 0,2 mg/L ve 0,4 mg/L olduğu deneylerde IC giderimi sağlanamamıştır. Imazamox başlangıç konsantrasyonunun 0,6 mg/L olduğu deneyde IC giderimi en yüksek oranda (%60) gerçekleşmiştir.



Şekil 4.37. Kesikli akış koşullarında kolonda inorganik karbon giderimine başlangıç konsantrasyonu etkisi

4.3.1.5.3.3. Kolon Yüksekliği

İnorganik Karbon (IC) giderimi için farklı kolon yüksekliklerinde ve farklı adsorbanların kullanıldığı deneylerin sonuçları Şekil 4.38’de yer almaktadır. Kolon yüksekliğinin 5 cm olduğu deneyde IC giderimi en yüksek oranda (%60) gerçekleşmiştir. Onu sırasıyla AC ve H₂SO₄ ABK takip etmektedir.



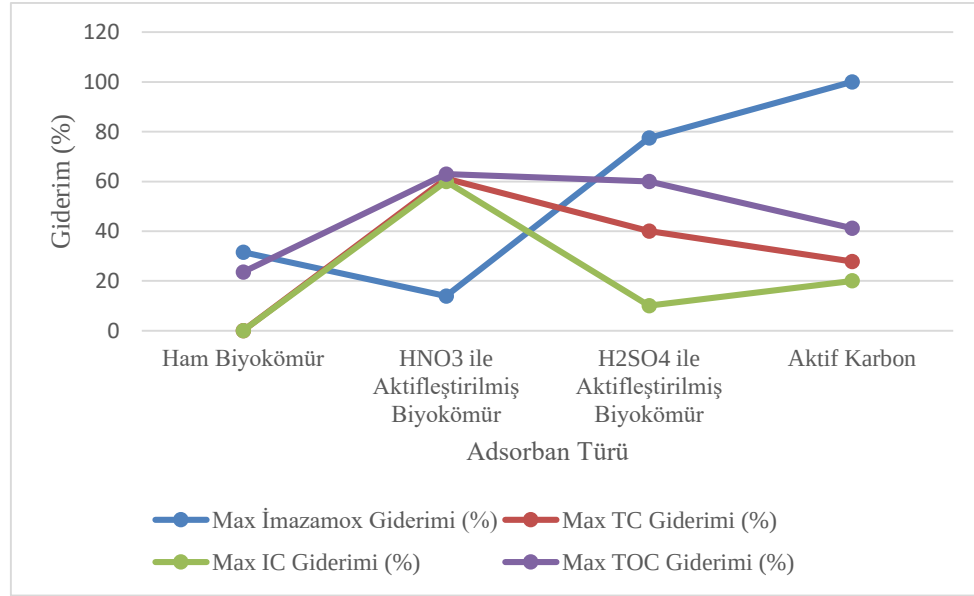
Şekil 4.38. Kesikli akış koşullarında kolonda inorganik karbon giderimine kolon yüksekliği etkisi

4.3.1.5.3.4. Imazamox Giderimi ile Korelasyonu

Tüm deney sonuçları değerlendirildiğinde imazamox giderimi ile İnorganik Karbon (IC) giderimi arasında korelasyon bulunduğu dair bir kanıt oluşmamıştır. Ancak biyokömürün aktifleştirilmesiyle adsorpsiyonda %60 oranında İnorganik Organik Karbon giderimi sağlanmıştır.

4.3.1.5.4. Aktifleştirmenin Karbon Giderimine Etkisi ve İmazamox Giderimi ile Korelasyonu

Tüm deney sonuçları değerlendirildiğinde imazamox giderimi ile karbon giderimi arasında korelasyon bulunduğu dair bir kanıt oluşmamıştır. Ancak biyokömürün aktifleştirilmesiyle kesikli akış koşullarında kolonda adsorpsiyonda %60 İnorganik Karbon (IC), %62,95 Toplam Organik Karbon (TOC) ve %61,11 Toplam Karbon (TC) giderimi sağlanmıştır. Bu da ayçiçeği sapından üretilmiş ve HNO₃ ile aktifleştirilmiş haldeki biyokömürün granül formda sulu çözeltiden karbon giderimi amacıyla kullanılabileceğini göstermiştir. Bu konuda elde edilen sonuçlar Şekil 4.39’da yer almaktadır.



Şekil 4.39. Aktifleştirmenin karbon giderimine etkisi ve imazamox giderimi ile korelasyonu

Kesikli akış koşullarında gerçekleştirilen imazamox ve karbon giderim adsorpsiyon kolon deneylerinden elde edilen sonuçlar üzerinden genel bir değerlendirme yapıldığında;

1. İmazamox ve karbon giderimleri tüm adsorbanların pH_{pzc} değerlerinin hemen altında olan 6'da en yüksek değerini almıştır.
2. Ayçiçeği sapından üretilmiş ham biyokömürün (HBK) kesikli akıştaki adsorpsiyonda imazamox giderimini sağladığı, verimin artırılması için farklı deney metotlarının da değerlendirilmesinin yerinde olacağı görülmüştür.
3. HNO_3 ile aktivasyonun beklenen imazamox giderim verimi sonuçlarını oluşturmaması nedeniyle farklı aktivasyon alternatiflerinin de incelenmesi gerektiği belirlenmiştir. Bu amaçla 1N H_2SO_4 ABK karbon giderimi deneylerine eklenmiş ve kesikli akış koşullarında imazamox giderimi de incelenmiştir. Bu aktifleştirme giderimde artışa neden olmuşsa da daha fazla giderim elde edilip edilemeyeceğini incelemek amacıyla sürekli akış koşullarında daha seyreltik H_2SO_4 ile aktifleştirilmiş biyokömürle farklı değişkenler açısından değerlendirmenin yapılmasına karar verilmiştir.

4. Toplam Karbon (TC) giderimi için adsorban olarak kullanılan HNO_3 ile Aktifleştirilmiş biyokömürle elde edilen sonuçların, aktif karbonla (AC) elde edilenlerden daha yüksek olduğu görülmüştür.
5. Toplam Karbon (TC), Toplam Organik Karbon (TOC) ve İnorganik Karbon (IC) giderimi için gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında en iyi sonuçların HNO_3 ile aktifleştirilmiş biyokömürle (HNO_3 ABK) elde edildiği belirlenmiştir.

4.3.2. Sürekli Akış Koşullarında Imazamox Giderimini Etkileyen Faktörler ve Breakthrough Eğrisi

Ayçiçeği sapından elde edilen biyokömürün fiziksel özelliklerinden dolayı toz haline getirilmesi durumunda suya tamamen karışmakta, renk vermekte ve deney sonuçlarını etkileyecek düzeyde sudan ayrılması için ek işlem gerektirmektedir. Saha koşullarında çalışacak bir sistem tasarımı hedeflendiğinden kolon deneylerinde granül biyokömür kullanılmıştır.

4.3.2.1. Kolonda Sürekli Akış Koşullarında Giderim Verimi

Sürekli akış deneylerine başlamadan önce biyokömürün farklı bir kimyasalla aktivasyonunun giderim verimine etkisini değerlendirmek üzere 1 N H_2SO_4 ABK ile Çizelge 4.8’de planı bulunan ön deney gerçekleştirilmiştir. Kesikli akış koşullarında en iyi giderim verimi sağlayan koşullar olduğundan ve Sanchez vd. (2023)’e göre adsorpsiyonun tersinirliği düşük pH’lı ortamlarda yüksek pH’lı ortamlara göre daha yüksek olduğundan ön deneyde pH 6 ve kolon yüksekliği olarak ise 5 cm seçilmiştir.

Çizelge 4.8. Sürekli akış koşullarında 1 N H_2SO_4 ABK ile ön deney sonuçları

Adsorban Yüksekliği (cm)	pH	C_0 (mg/L)	C_{e-1} (1.dak, mg/L)	C_{e-15} (15.dak, mg/L)	C_{e-30} (30.dak, mg/L)	C_{e-60} (60.dak, mg/L)
5	6	0,8	0,42	0,38	0,33	0,18

Sürekli Akış Koşullarında 1 N H_2SO_4 ABK ile Ön Deney Sonuçları değerlendirildiğinde:

1. Ham biyokömürün 1 N H₂SO₄ ile aktifleştirilmesi esnasında biyokömür kütleinde %36 oranında bir ağırlık azalması olduğundan güçlü bir asit olan H₂SO₄ 'in daha seyreltik bir çözeltisinin (0.1N) aktifleştirme işleminde kullanılmasının yerinde olacağı değerlendirilmiştir.
2. 1 N H₂SO₄ ile aktifleştirilmiş biyokömürle adsorpsiyon performansının, önceki deney sonuçlarında elde edilmiş maksimum giderim verimi ile karşılaştırıldığında, HNO₃ ile aktifleştirilmiş biyokömüre ve kesikli akışa göre iyileştiği, zamanla artış gösterdiği tespit edilmiştir. En iyi sonuç 60.dak'da elde edilmiştir.
3. Morlay ve diğerleri (2012)'nin yapmış olduğu çalışmada imazamoxun aktif karbonla adsorpsiyonunun pH=2,8 de en yüksek oranda gerçekleştiği belirtilmiştir. Kesikli akış koşullarında en yüksek giderim pH 6'da gerçekleşmiş olduğundan ön deneylerde de pH 6 olarak belirlenmiştir. Ancak adsorbanın aktifleştirmeler de dahil olmak üzere farklı deney koşullarında test edilerek giderim veriminin AC'ye yakınsanması hedeflenmektedir. Sürekli akışta kolon deneylerinde çözeltinin pH'nın pH_{pzc} değerlerinden daha fazla düşük olmasının giderim verimini arttıracığı değerlendirilmiştir. Literatürle de uyumu sebebiyle çalkalama deneylerindeki optimum pH yani pH=2'nin kullanılmasına karar verilmiştir.
4. Sanchez vd. (2023) farklı sulama yöntemleri altında çeltik tarımında uygulanan imazamoxun toprak tarafından adsorpsiyon/desorpsiyon durumlarını araştırdıkları çalışmalarında yüksek pH'lı ortamda katyonik imazamox formlarının adsorbe olduğunu, anyonik imazamox formlarının adsorbe olmadan sulu çözeltide kaldığını, düşük pH'lı ortamda ise bu durumun tam tersinin gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Bu nedenle sürekli akış deneylerinin düşük pH'larda gerçekleştirilmesine karar verilmiştir.
5. Belirlenen koşullarda 60.dakikadaki imazamox giderimi %77,5 olarak gerçekleşmiştir. Sürekli akış koşullarındaki deney setinin değişkenlerinin literatür ve önceki tüm sonuçlar değerlendirilerek giderimin daha kısa sürede ve daha yüksek oranda gerçekleşeceği şekilde oluşturulmasına karar verilmiştir.

Sürekli akış koşullarında kolonda imazamox giderimi deney seti için bu aşamaya kadar gerçekleştirilen saha ve laboratuvar çalışmalarında elde edilen sonuçların yanı sıra

güncel literatür de incelenmiştir. Tüm bu inceleme ve değerlendirmelerin sonucunda deney seti koşulları belirlenmiştir. Stok çözeltisi 1000 mg/L imazamox içerecek şekilde hazırlanmıştır. Deneylerin hemen öncesinde stok çözeltisinden saf suyla 350 mL hacimli ve 20,8 mg/L imazamox içeren sentetik numuneler hazırlanmıştır. Numunelerin pH ayarlamaları 0,1N HCl ve 0,1N NaOH kullanılarak pH=2 olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Fiziksel hem de kimyasal girişimin engellenmesi için kolona önce saf suyla yıkanmış ve 24 saat oda sıcaklığında kurutulmuş haldeki kuvars kumu 3 cm yüksekliğinde olacak şekilde doldurulmuştur. Biyokömür, çıkış suyuna fiziksel girişimin önüne geçilmesi amacıyla granül şekilde kullanılmıştır. Adsorbanların kolonda 1 cm yüksekliğindeki ağırlıkları HBK = 1,8 g, 0,1 N H₂SO₄ ABK = 1,2 g ve NaOH ABK = 1,3 g'dır. Deneyler 30 dakika boyunca sürdürülmüştür. Numuneler 1.dak, 5.dak, 15.dak, 20.dak ve 30.dak'larda alınmıştır.

Kolonda sürekli akış koşullarında imazamox konsantrasyonunun farklı adsorbanlar (HBK, 0,1 N H₂SO₄ ABK ve NaOH ABK) kullanılarak farklı kolon yüksekliklerinde (5 cm ve 10 cm) ve farklı akış hızlarında (5 mL/dak ve 10 mL/dak) zamana göre değişimi Çizelge 4.9'da yer almaktadır. Kolon yükseklikleri ve akış hızları literatürle uyumludur (Dadebo vd., 2023).

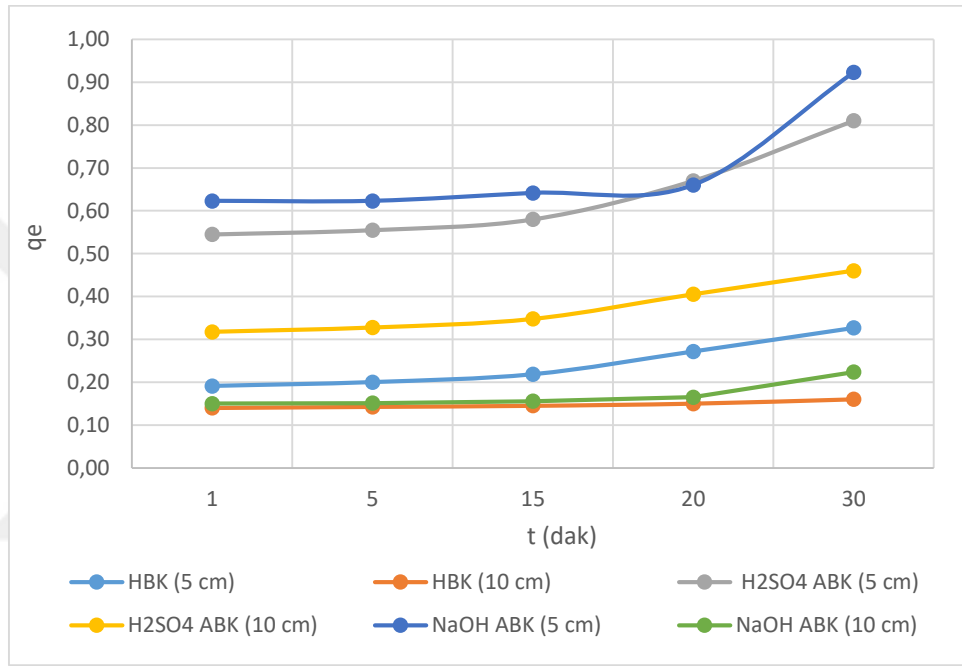
Çizelge 4.9. Sürekli akış koşullarında imazamox konsantrasyonunun zamana göre değişimi

Adsorban Türü	Adsorban Yüksekliği (cm)	Akış Hızı (mL/dak)	C ₁ (mg/L)	C ₅ (mg/L)	C ₁₅ (mg/L)	C ₂₀ (mg/L)	C ₃₀ (mg/L)
HBK	5	5	9,30	8,80	7,70	4,50	1,20
HBK	5	10	5,40	5,40	5,30	4,80	2,20
HBK	10	5	4,00	3,70	3,40	2,80	1,60
HBK	10	10	4,90	4,70	4,60	4,10	3,60
0,1 N H ₂ SO ₄ ABK	5	5	11,10	9,10	8,50	7,80	5,80
0,1 N H ₂ SO ₄ ABK	5	10	9,90	9,70	9,20	7,40	4,60
0,1 N H ₂ SO ₄ ABK	10	5	9,60	7,10	7,00	6,40	4,20
0,1 N H ₂ SO ₄ ABK	10	10	8,10	7,70	6,90	4,60	2,40
NaOH ABK	5	5	7,30	7,30	6,70	6,30	3,90
NaOH ABK	5	10	7,30	7,30	6,90	6,50	0,80
NaOH ABK	10	5	7,80	7,70	7,30	6,90	1,40
NaOH ABK	10	10	7,90	7,60	7,40	7,20	4,90

Giderimler değerlendirildiğinde en fazla imazamox gideriminin (%96,15) NaOH ABK ile sağlandığı görülmüştür.

4.3.2.1.1. Kolon Yüksekliği

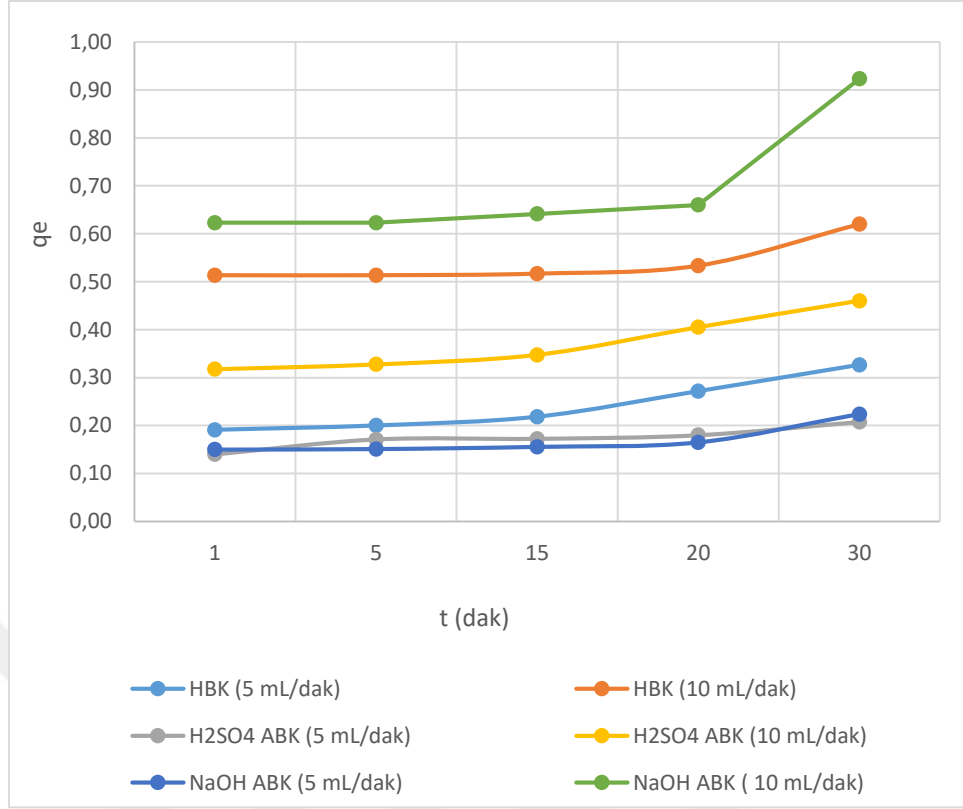
Kolonda sürekli akış koşullarında gerçekleştirilen adsorpsiyon deneylerinde HBK, 0,1 N H₂SO₄ ABK ve NaOH ABK adsorban olarak kullanılmıştır. Tüm adsorbanların 5 cm ve 10 cm kolon yüksekliğinde bulunduğu varyasyonlarda deneyler gerçekleştirilmiştir. Kolon yüksekliğinin adsorpsiyona etkisi bu deneylerle değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.40'ta yer almaktadır.



Şekil 4.40. Sürekli akış koşullarında kolonda adsorpsiyona kolon yüksekliğinin etkisi

4.3.2.1.2. Akış Hızı

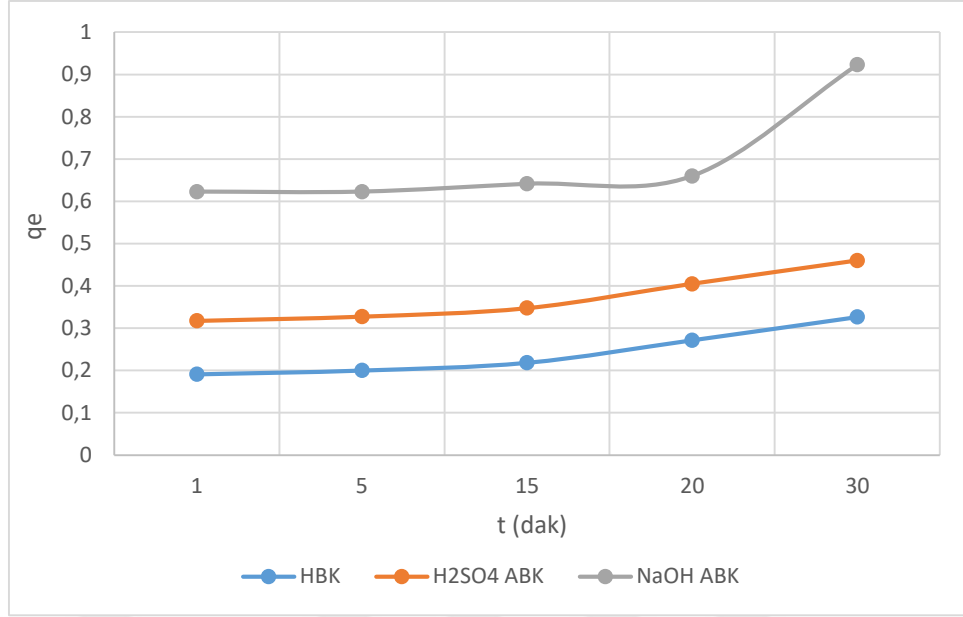
Kolonda sürekli akış koşullarında gerçekleştirilen adsorpsiyon deneylerinde HBK, 0,1 N H₂SO₄ ABK ve NaOH ABK adsorban olarak kullanılmıştır. Kolonda tüm adsorbanların 5 mL/dak ve 10 mL/dak akış hızlarının olduğu varyasyonlarda deneyler gerçekleştirilmiştir. Kolon yüksekliğinin adsorpsiyona etkisi bu deneylerle değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.41'de yer almaktadır.



Şekil 4.41. Sürekli akış koşullarında kolonda adsorpsiyona akış hızının etkisi

4.3.2.1.3. Adsorban Türü

Kolonda sürekli akış koşullarında gerçekleştirilen adsorpsiyon deneylerinde HBK, 0,1 N H₂SO₄ ABK ve NaOH ABK adsorban olarak kullanılmıştır. Adsorbanın aktifleştirilmesinin ve aktifleştirmede asidik ya da bazik kimyasal kullanılmasının adsorpsiyona etkisi bu deneylerle değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.42’de yer almaktadır.



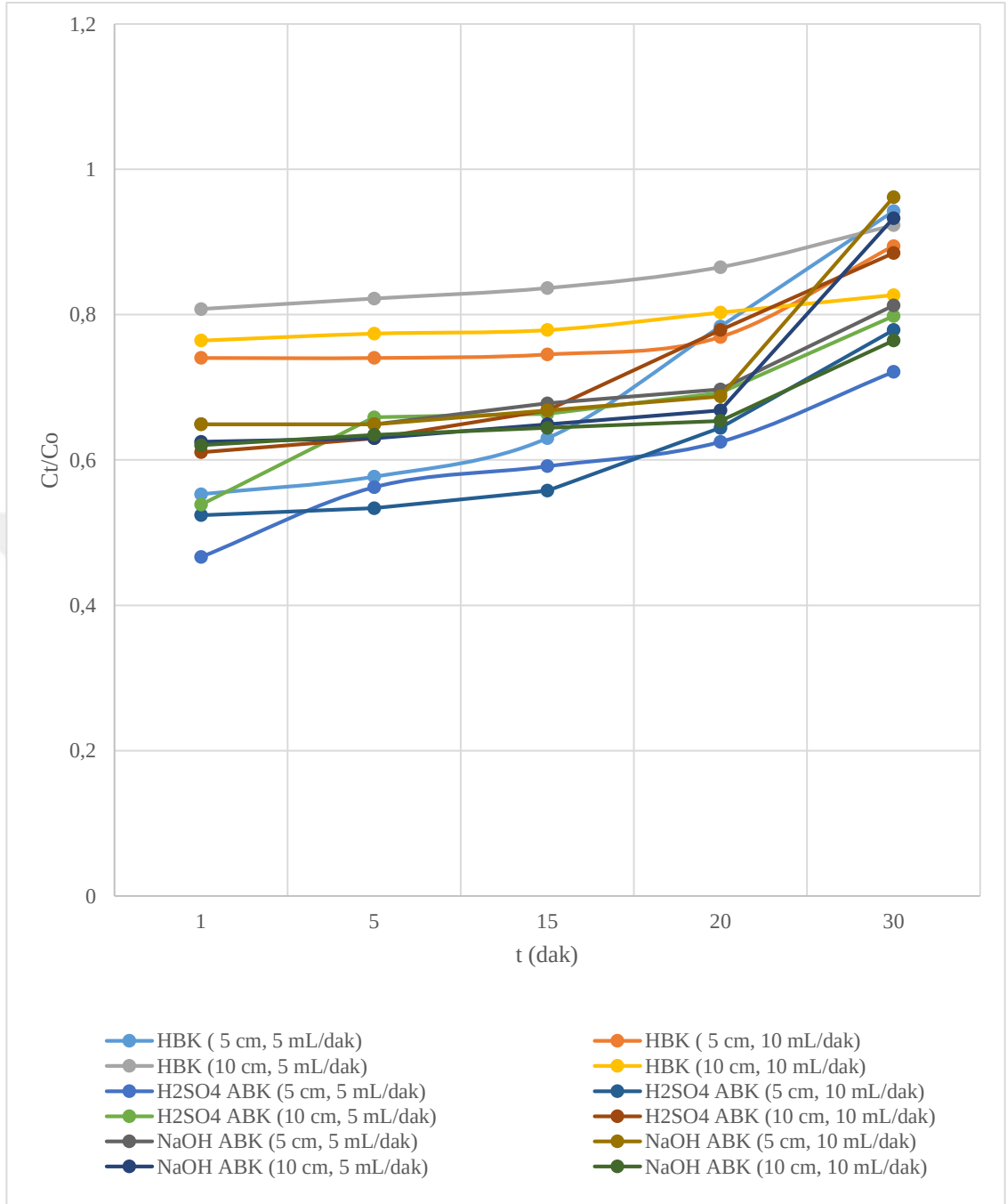
Şekil 4.42. Sürekli akış koşullarında kolonda adsorpsiyona adsorban türünün etkisi

Sonuçların tamamı değerlendirildiğinde:

1. Akış hızı ve adsorban yüksekliği düşük olduğunda en yüksek giderim verimi ham biyokömürle elde edilmiştir.
2. Akış hızı artıp adsorban yüksekliği düşük olduğunda en yüksek giderim verimi NaOH ile aktifleştirilmiş biyokömürle elde edilmiştir.
3. Akış hızı düşük iken adsorban yüksekliği arttırıldığında en yüksek giderim verimi NaOH ile aktifleştirilmiş biyokömürle elde edilmiştir.
4. Akış hızının ve adsorban yüksekliğinin fazla olduğu deney setinde en iyi giderim verimi sonucu H₂SO₄ ile aktifleştirilmiş biyokömürün adsorban olarak kullanılmasıyla sağlanmıştır.
5. Tez kapsamındaki tüm deneylerde aktif karbon ile elde edilen giderim verimine en yakın sonuç olan %96,15'lik giderim verimi, 5 cm kolon yüksekliğinde 10 mL/dak akış hızında NaOH ile aktifleştirilmiş biyokömürün adsorban olduğu deney setinde elde edilmiştir.

4.3.2.2. Breakthrough Eğrisi

HBK, 0,1 N H₂SO₄ ABK ve NaOH ABK'nın adsorban olarak kullanıldığı kolon deney sonuçları doğrultusunda elde edilen Breakthrough Eğrileri Şekil 4.43'te sunulmaktadır.

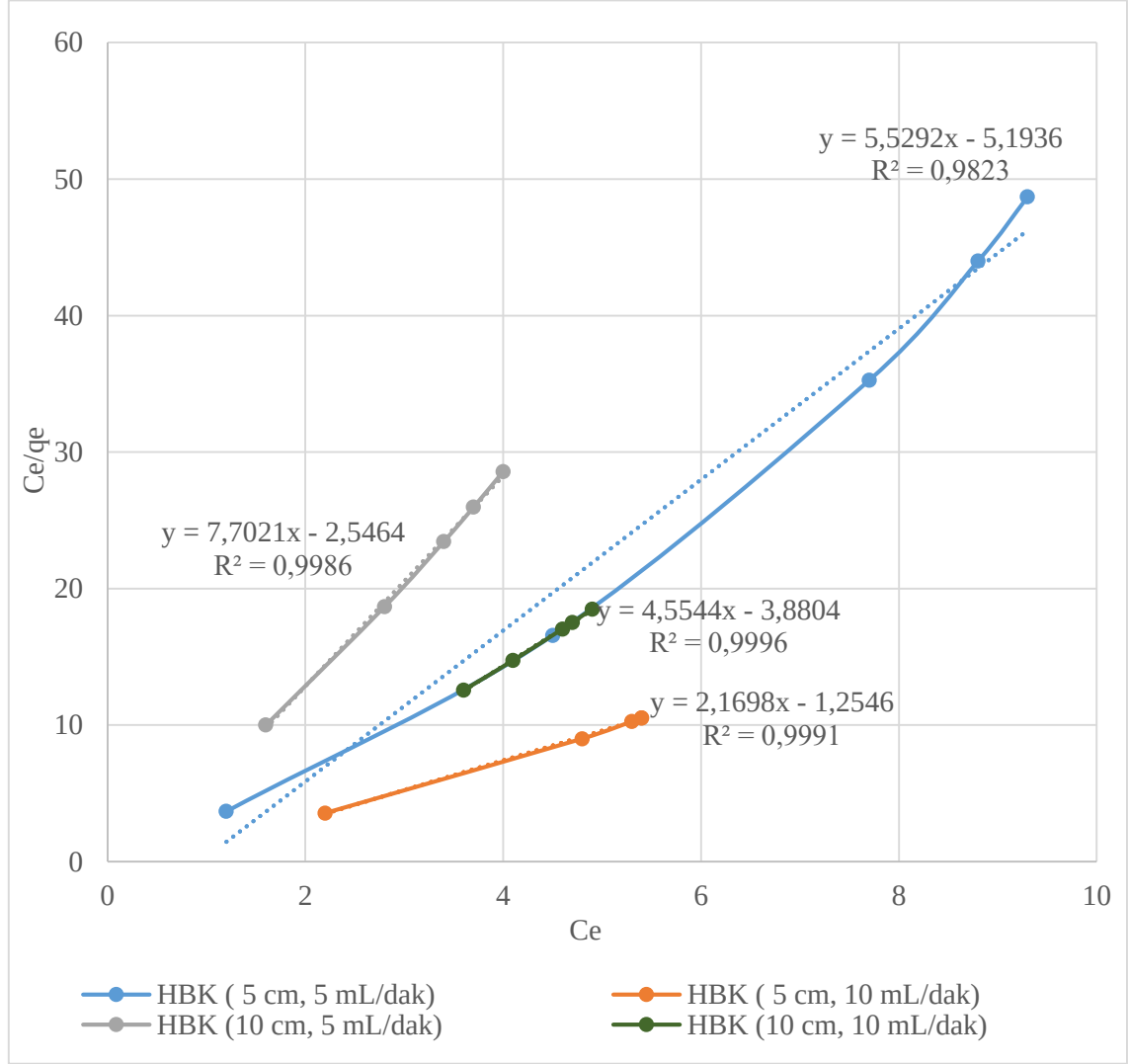


Şekil 4.43. Breakthrough eğrisi

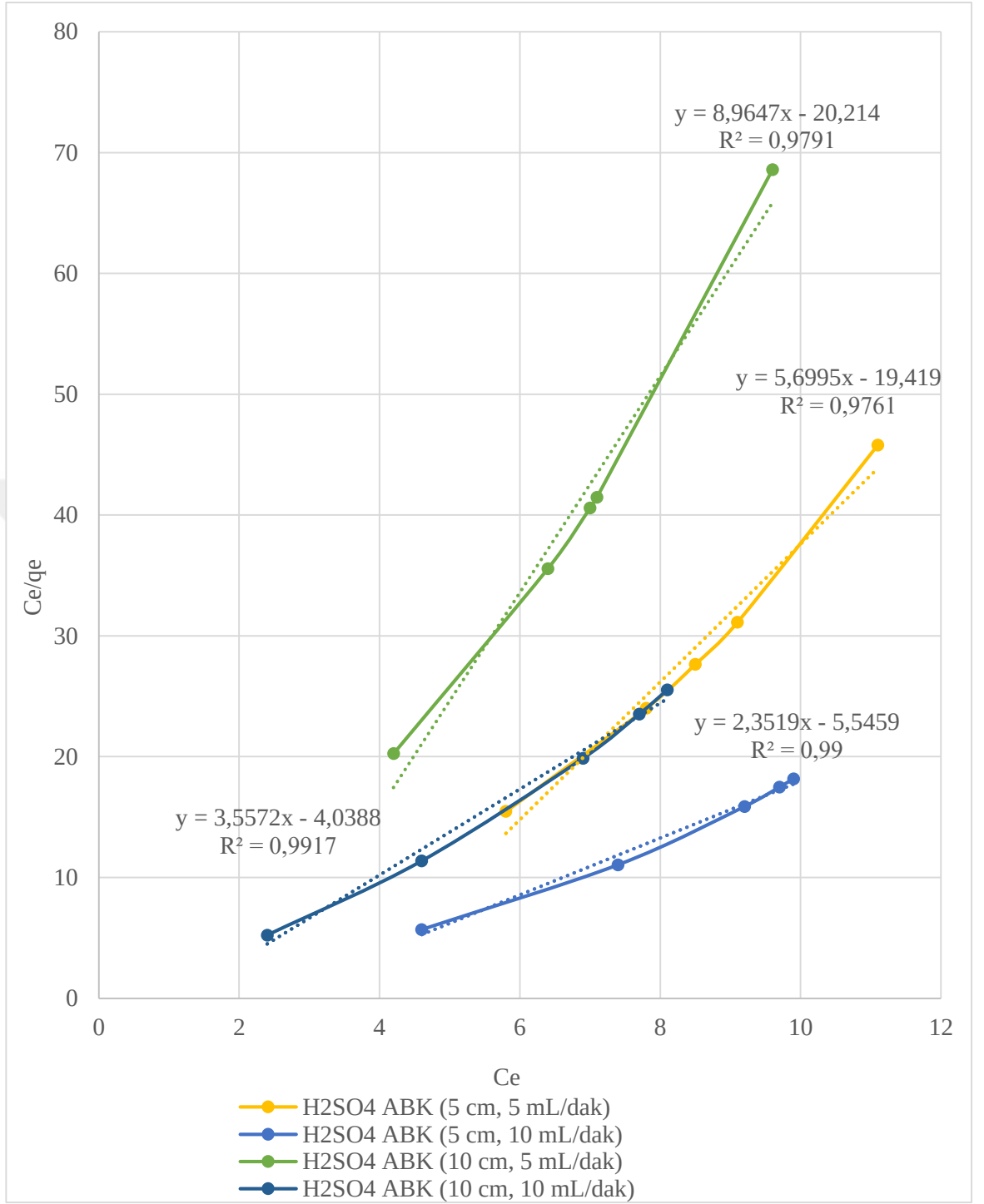
4.3.2.3. Sürekli Akışta Adsorpsiyonun İzotermi

Adsorpsiyon mekanizmasının anlaşılması onu kontrol etmeyi sağlamaktadır. HBK, 0,1 N H₂SO₄ ABK ve NaOH ABK'nın adsorban olarak kullanıldığı sürekli akış koşullarındaki kolon deneylerinden elde edilen sonuçlar Langmuir İzotermi kapsamında

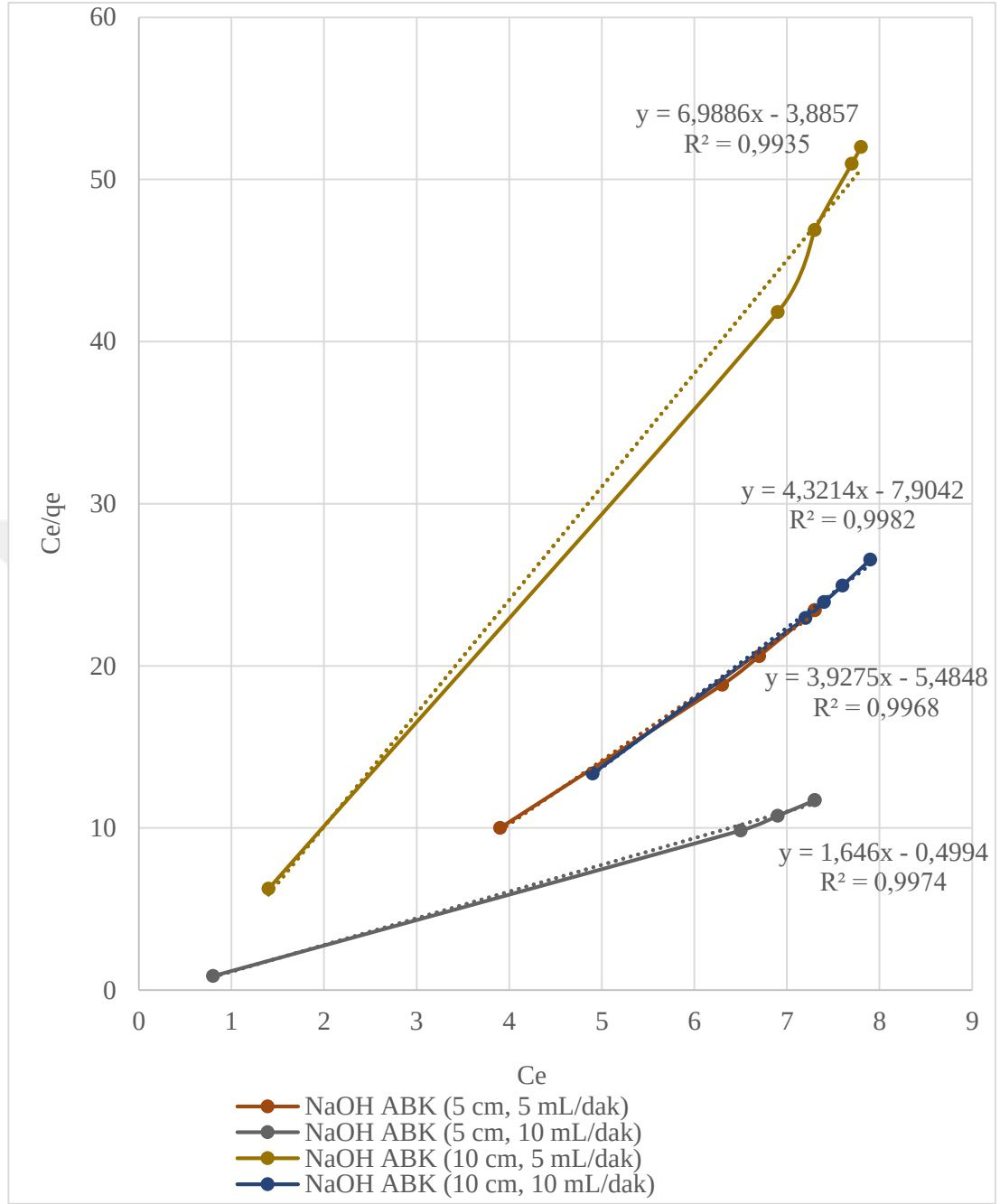
incelenmiştir. Tüm adsorbanlar için Langmuir İzotermi grafikleri Şekil 4.44- 4.45 ve 4.46’da sunulmaktadır.



Şekil 4.44. Sürekli akışta HBK ile adsorpsiyonun Langmuir izotermi



Şekil 4.45. Sürekli akışta H_2SO_4 ABK ile adsorpsiyonun Langmuir izotermi



Şekil 4.46. Sürekli akışta NaOH ABK ile adsorpsiyonun Langmuir izotermi

Freundlich İzotermi açısından yapılan değerlendirmelerde adsorpsiyonların bu izoterme uygun olmadığı sonucu elde edilmiştir.

Çizelge 4.10. Imazamox giderimi için izoterm modelleri sabitleri*

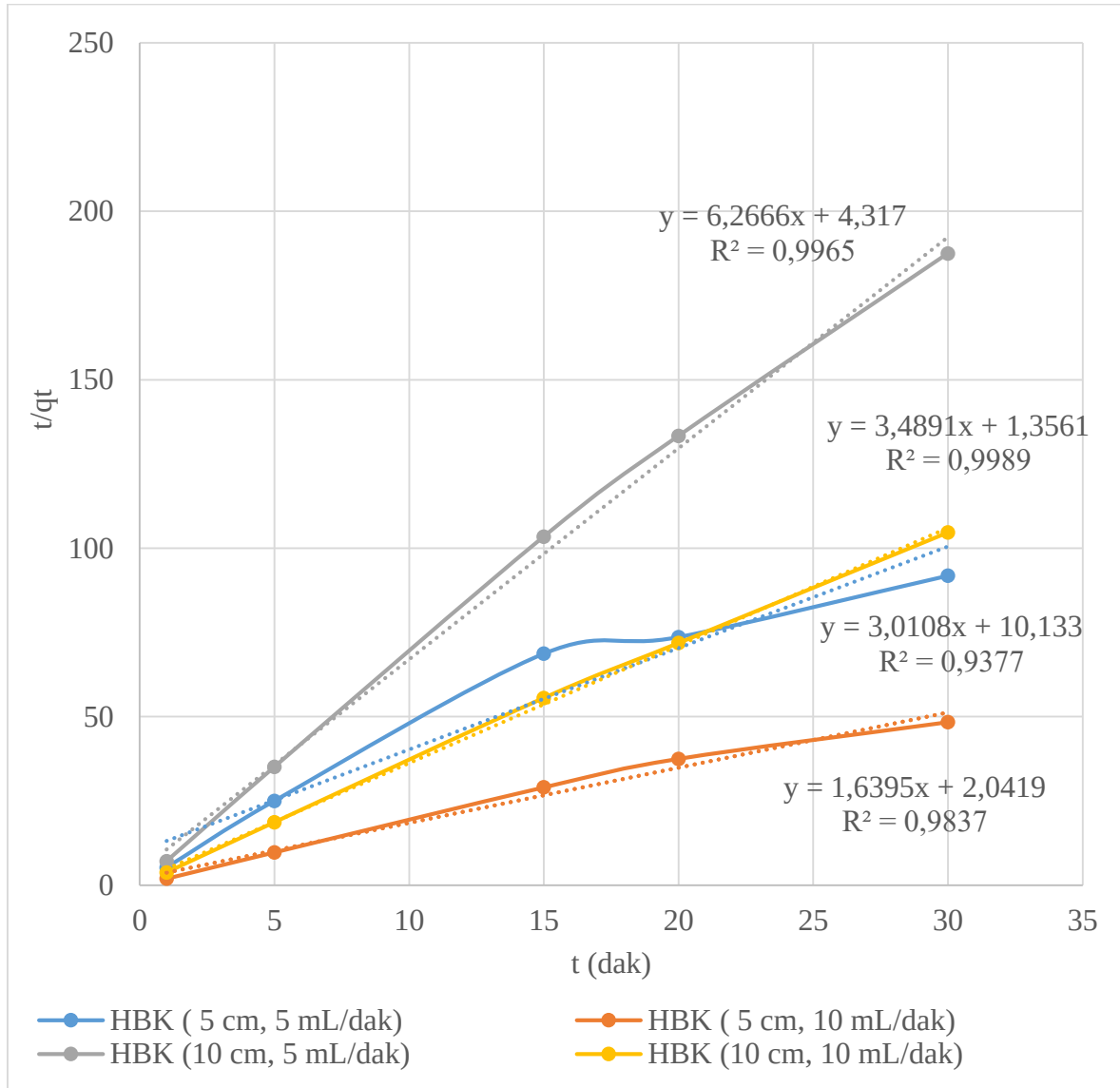
Referans	Adsorban Türü	İzoterm Modelleri					
		Freundlich			Langmuir		
		1/n	log K _F	R ²	q _{max} (mg g ⁻¹)	K _L (Lg ⁻¹)	R ²
Tez Çalışması (Co = 20.8 mg/L, pH = 2, V = 350 mL, t = 30 dak, m _{HBK} =1,8/1 cm kolon yük., m _{H₂SO₄ABK} =1,2g/1cm kolon yük., m _{NaOHABK} =1,4g/1cm kolon yük.)	HBK (5 cm, 5 mL/dak)	-	-	-	0,3266	0,272	0,9923
	HBK (5 cm, 10 mL/dak)	-	-	-	0,6200	0,282	0,9991
	HBK (10 cm, 5 mL/dak)	-	-	-	0,1600	0,100	0,9986
	HBK (10 cm, 10 mL/dak)	-	-	-	0,2866	0,080	0,9996
	H ₂ SO ₄ ABK (5 cm, 5 mL/dak)	-	-	-	0,3750	0,065	0,9761
	H ₂ SO ₄ ABK (5 cm, 10 mL/dak)	-	-	-	0,8100	0,176	0,9900
	H ₂ SO ₄ ABK (10 cm, 5 mL/dak)	-	-	-	0,2075	0,049	0,9791
	H ₂ SO ₄ ABK (10 cm, 10 mL/dak)	-	-	-	0,4600	0,192	0,9917
	NaOH ABK (5 cm, 5 mL/dak)	-	-	-	0,3900	0,100	0,9968
	NaOH ABK (5 cm, 10 mL/dak)	-	-	-	0,9230	1,154	0,9974
Terrón-Sánchez, 2023	Ticari Taze Meşe Biyokömürü-Toprak Karışımı	1,11	-0,603	0,954			
		0,98	-0,8181	0,958			
		1,006	-0,489	0,952			
		1,122	-0,442	0,956			
		1,21	-0,522	0,958			
		1,076	-0,324	0,952			
Morlay vd., 2012	Filtrisorb 400 Ticari Aktif Karbon	0,086	2,32		231	111	
Kaur ve Kaur, 2024			1,15	0,979			

*Tez Çalışması değerleri sürekli akış kolon deneylerinde elde edilen sonuçları içermektedir.

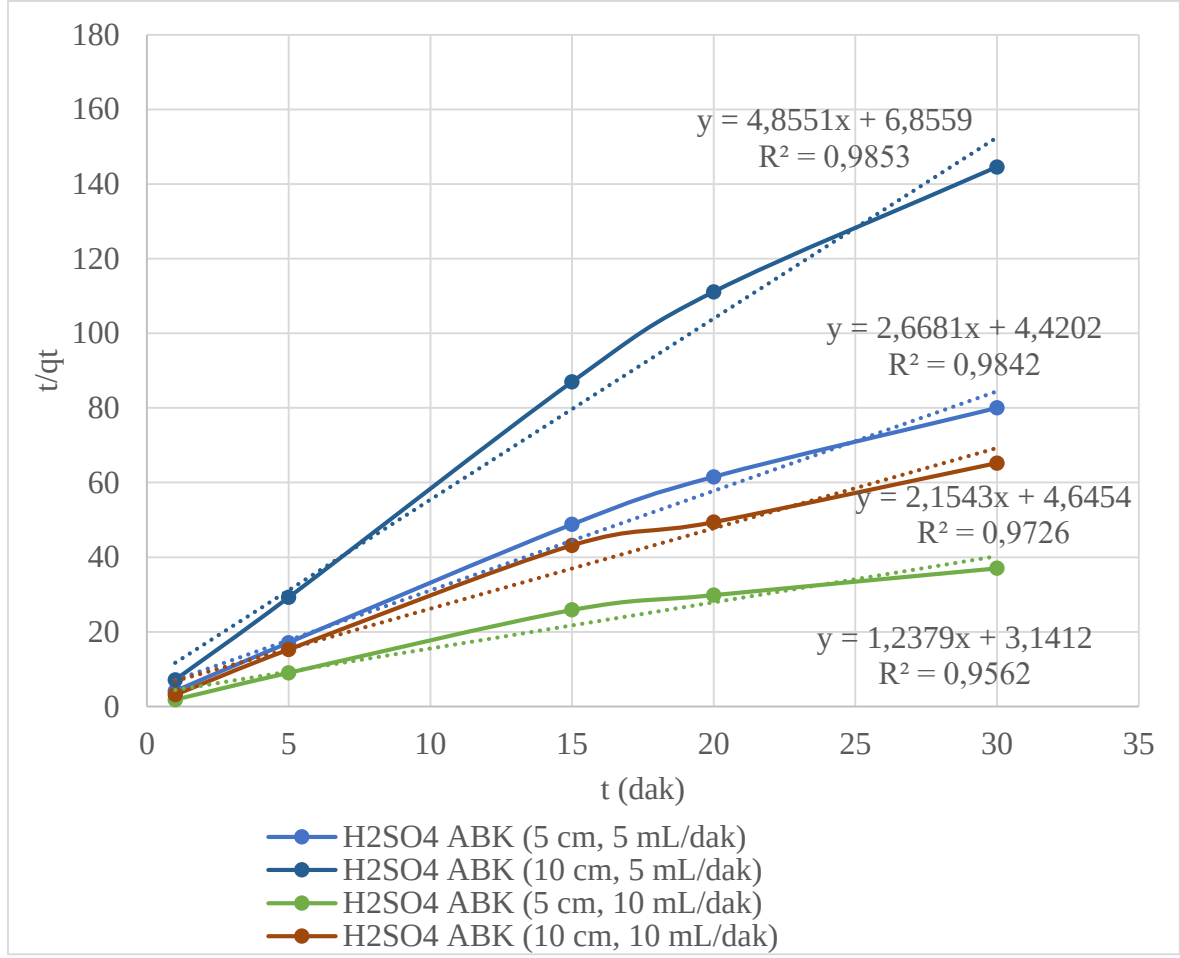
Sürekli akış kolon deneylerinde granül adsorbanlar kullanılmıştır. Sanchez-Yepezd. (2024) nin araştırmalarında olduğu gibi granül adsorbanların kullanıldığı kolon deneyleri Langmuir İzotermine uyumludur.

4.3.2.4. Sürekli Akışta Adsorpsiyon Kinetikleri

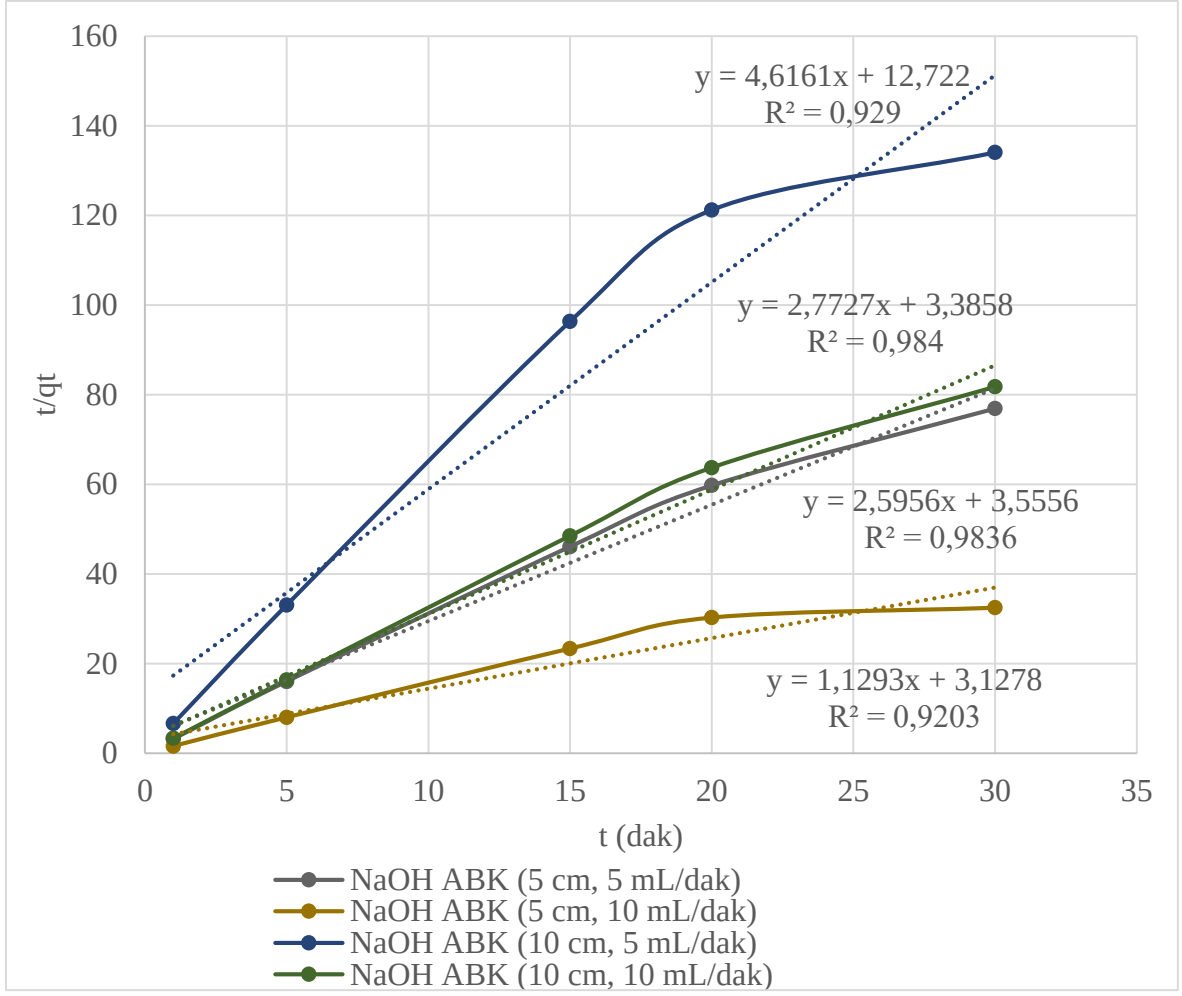
Sürekli akış koşullarında kolonda gerçekleştirilen adsorpsiyon deneylerinin kinetik hesaplamaları yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde adsorpsiyon parametrelerinin yalancı-birinci dereceden modele uygun olmadığı, yalancı-ikinci dereceden modele uyduğu görülmüştür. Şekil 4.47-4.48 ve 4.49’da yalancı-ikinci dereceden model için adsorban türüne göre elde edilmiş sonuçlara dair grafikler yer almaktadır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.11’de yer almaktadır.



Şekil 4.47. Sürekli akışta HBK ile adsorpsiyonun yalancı-ikinci derece kinetiği



Şekil 4.48. Sürekli akışta H_2SO_4 ABK ile adsorpsiyonun yalancı-ikinci derece kinetiği



Şekil 4.49. Sürekli akışta NaOH ABK ile adsorpsiyonun yalancı-ikinci derece kinetiği

Çizelge 4.11. Kolonda sürekli akış koşullarında adsorpsiyonun kinetik parametreleri*

Adsorban	Yalancı-İkinci Derece Kinetik ($C_0 = 20.8 \text{ mg/L}$, $\text{pH} = 2$, $V = 350 \text{ mL}$, $t = 30 \text{ dak}$, $m_{\text{HBK}}=1,8/1 \text{ cm kolon yük.}$, $m_{\text{H}_2\text{SO}_4\text{ABK}}=1,2\text{g/1cm kolon}$ yük. , $m_{\text{NaOHABK}}=1,4\text{g/1cm kolon yük.}$)		
	q_e (mg/g)	k_2	R^2
HBK (5 cm, 5 mL/dak)	3,0108	10,133	0,9377
HBK (5 cm, 10 mL/dak)	1,6395	2,0419	0,9837
HBK (10 cm, 5 mL/dak)	6,2666	4,3170	0,9965
HBK (10 cm, 10 mL/dak)	3,4891	1,3561	0,9989
H ₂ SO ₄ ABK (5 cm, 5 mL/dak)	2,6681	4,4202	0,9842
H ₂ SO ₄ ABK (5 cm, 10 mL/dak)	1,2379	3,1412	0,9853
H ₂ SO ₄ ABK (10 cm, 5 mL/dak)	4,8551	6,8559	0,9562
H ₂ SO ₄ ABK (10 cm, 10 mL/dak)	2,1543	4,6454	0,9726
NaOH ABK (5 cm, 5 mL/dak)	2,5956	3,5556	0,9836
NaOH ABK (5 cm, 10 mL/dak)	1,1293	3,1278	0,9203
NaOH ABK (10 cm, 5 mL/dak)	4,6161	12,7220	0,9290
NaOH ABK (10 cm, 10 mL/dak)	2,7727	3,3852	0,9840

* Sürekli akış kolon deneylerinde elde edilen sonuçları içermektedir.

4.4. Desorpsiyon Çalışmaları Sonuçları

Desorpsiyon adsorpsiyon mekanizmasının anlaşılmasını sağlayan önemli bir çalışmadır. Bir desorpsiyon işleminin başarılı kabul edilebilmesi için adsorbanın tamamen ilk özelliklerine döndürülmesi gerekir. Desorpsiyon çalışmasının sonusunda elde edilen veriler Çizelge 4.12’de belirtilmiştir.

Çizelge 4.12. Desorpsiyon çalışması sonuçları

Desorbe Edilecek Biyokömürün Adsorban Olarak Kullanıldığı Deney Değişkenleri			
Desorban	HBK (5mL/dak akış hızı,10 cm Yatak Yüksekliği) Desorbe Edilen Imazamox (mg/L)	0,1 N H ₂ SO ₄ ABK (5mL/dak akış hızı,10 cm Yatak Yüksekliği) Desorbe Edilen Imazamox (mg/L)	NaOH ABK (5mL/dak akış hızı,10 cm Yatak Yüksekliği) Desorbe Edilen Imazamox (mg/L)
Distile Su	Tespit Edilemedi	Tespit Edilemedi	Tespit Edilemedi
HCl Çözeltisi	0,2	0,5	1,2

Desorpsiyon çalışmasında; 5mL/dak akış hızı,10 cm yatak yüksekliği, pH 2’de ve oda sıcaklığındaki koşullarda NaOH ABK’nın 0,1 N HCl çözeltisiyle desorbe edilmesiyle en iyi sonuç elde edilmiştir. Başlangıç konsantrasyonu 20,8 mg/L olacak şekilde sürekli akıştaki kolonda gerçekleşen adsorpsiyon çalışmasında kullanılan biyokömürden 1,2 mg/L imazamox içerecek şekilde çözelti elde edilmiştir. Desorpsiyon çalışması sonucunda distile su ile desorbe olan imazamoxun LC-MS/MS ile tespit sınırlarının altında kalacak kadar düşük olduğu, 0,1N HCl ile desorpsiyonda ise HBK’da %1,37, 0,1 N H₂SO₄ ABK’da %3, NaOH ABK’da ise %6 desorpsiyon sağlandığı tespit edilmiştir. Adsorpsiyonun tersinir olmadığı kararlı şekilde tutunma gerçekleştiği tespit edilmiştir. Desorbe edilen çözeltinin yeniden aynı adsorpsiyon işlemine tabi tutulması halinde kısa sürede yeniden desorpsiyona ihtiyaç duyulacağı için adsorbanın rejenerasyona uygun olmadığı değerlendirilmiştir. Tehlikeli atık adsorpsiyonunda kullanılan adsorbanların desorbe edilmesi ciddi riskler barındırmaktadır. Desorbe işlemi sonrasında oluşan konsantre halde imazamoxun da desorpsiyon çözeltisinden ayrılarak bertarafı için ayrı bir işlem gerekecektir. Kararlı şekilde adsorpsiyon işleminin tamamlanmasıyla kullanım dışı kalan adsorban kalorifik değeri sayesinde atıktan türetilmiş yakıt katkısı olarak dolaşımli akışkan yataklı bir sistemde bertaraf edilebilecektir.

4.5. Maliyet Analizi

Imazamoxun içme suyundan arıtımının araştırılması çalışmaları kapsamında yaşam döngüsü bakış açısıyla maliyet kalemleri değerlendirilmiş, endüstriyel üretim yapılması halinde irdelenmesi gereken ana kalem maliyetleri de belirtilmiştir.

4.5.1.Biyokömür Üretim Maliyeti

Biyokömür üretiminde hammadde olarak kullanılan ayçiçeği sapı bir tarımsal atık olduğundan hali hazırda bir temin maliyeti bulunmamaktadır. Toprağın organik madde miktarını arttırmak üzere kullanımının yaygınlaşmasında ve/ya bir atık için kalorifik değerinin görece yüksekliği sebebiyle enerji üretiminde kullanılabileceği, döngüsel ekonomi kültürünün gelişmesiyle gelecekte ticari faaliyetlere konu olabileceği değerlendirilmektedir.

Saha uygulamalarında ayçiçeği üretiminin yapıldığı ve hasat sonucu ayçiçeği sapının olduğu tarımsal alandan biyokömür üretiminin gerçekleştirileceği reaktörün bulunduğu alan ile biyokömürün kullanılacağı alana nakli için gereken lojistik maliyetleri değişkenlik göstereceğinden tez kapsamındaki maliyetlere dahil edilmese de endüstriyel üretim yapılması halinde ciddi şekilde gözönüne alınması yerinde olacaktır.

Biyokömür hammaddesi olarak temin edilen ayçiçeği sapı deneysel faaliyetler için insan gücü kullanılarak reaktöre girecek şekilde parçalanmıştır. Ancak endüstriyel boyutta üretim yapılması gerekirse mekanik bir parçalayıcı ve iş sağlığı güvenliği mevzuatlarına uygun şekilde tozumu önleyici sistemlere ihtiyaç duyulacaktır.

Tez kapsamındaki deneysel çalışmalarda laboratuvar ölçekli reaktör 400 °C'ye ısıtılmış ve 2 saat boyunca sabit sıcaklıkta kalması sağlanmıştır. Ortama verilen N₂ gazı, gaz analizör cihazının çalışması ve tüm ekipmanların temin maliyetleri laboratuvar ölçeğinde çalışılması sebebiyle gözardı edilmiştir.

Tez kapsamındaki çalışmalarda yukarıda açıklanan sebeplerle biyokömür üretimindeki elektrik enerjisi maliyeti ana kalem olarak değerlendirilmiştir.

Reaktör Enerji Sarfıyatı : 20 kWh/tek dolum (2000Watt'lık bir ısıtıcıyla 2 saatte ortalama tüketim)

Elektrik Enerjisi Ücreti : 1,34 ₺ /kWh (Elektrik Faturalarına Esas Tarife Tabloları, 2024)

Elektrik Enerjisi Maliyeti : 26,8 ₺ / tek dolum

Tez çalışması kapsamında 4 dolumda biyokömür üretimi gerçekleştiğinden

Toplam Elektrik Enerjisi Maliyeti : 107,2 ₺ / 4 dolum

Toplamda tez için üretilen biyokömür 890 gr'dır.

Buradan hareketle kg üretim maliyeti 120,44 ₺'dir. Bu da yaklaşık olarak 4,014 \$/kg'lık bir maliyet oluşturmaktadır (Gösterge Niteliğindeki Merkez Bankası Kurları, 2024).

Hali hazırda aktif karbon ticari piyasada ortalama 6,75 \$/kg maliyetle alıcı bulunmaktadır (Sanayi Deposu, 2024).

Laboratuvar koşullarındaki üretim ile biyokömür kullanımının aktif karbon kullanımı ile karşılaştırıldığında kg başına yaklaşık 2,75 \$'lık bir avantaj sağladığı tespit edilmiştir.

Endüstriyel ölçekte üretim yapılması durumunda reaktörün elektrik yerine doğalgazdan elde edilen enerji ile çalıştırılacağına göre fizibilite yapılmalı, çalışan ve diğer işletme maliyetleri de ayrıca değerlendirilmelidir.

4.5.2.Aktivasyon Maliyeti

Ham biyokömürün aktivasyonunun imazamox giderim verimini arttırdığı tespit edilmiştir. Aktivasyon işlemleri saf suyla seyreltilerek 1 N ya da 0,1 N olacak şekilde hazırlanan HNO_3 , H_2SO_4 ve NaOH çözeltileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında yapılan çalışmalarda Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Çorlu Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Laboratuvarında bulunan kimyasal malzemeler kullanılmış olup, laboratuvar kullanım miktarlarındaki ölçeğin küçük olması sebebiye maliyetleri gözardı edilmiştir.

Endüstriyel ölçekte üretim yapılması planlandığında aktivasyon maliyetleri planlanan hacim için ayrıca değerlendirilmelidir.

4.5.3.Sürekli Akış Maliyeti

Teze konu olan araştırma çalışması için Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi BAP Birimi tarafından desteklenen proje kapsamında cam kolon başta olmak üzere ihtiyaç duyulan ana malzemeler temin edilmiştir.

Endüstriyel ölçekli saha çalışması için temas tankı ile sürekli akışı sağlayacak pompa ve debimetre temini ile bunların enerji başta olmak üzere işletme maliyetlerinin gözönünde bulundurulması yerinde olacaktır.

4.5.4. Kalıntı Tayini Maliyeti

Imazamox gideriminin verimli şekilde gerçekleştiğinin teyidi olarak farklı koşullarda gerçekleştirilen adsorpsiyon işlemlerinden sonra alınan 120'nin üzerindeki sayıdaki numuneye Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Nabiltem Laboratuvarında LC-MS/MS metodu kullanılarak imazamox tayini yaptırılmıştır.

Endüstriyel koşullarda kullanım halinde de verimli giderimin teyidi olarak elüattan belirlenecek sıklıklarda periyodik olarak numune alınarak imazamox tayini yaptırılması yerinde olacaktır. Bu nedenle bu kalemin de maliyet analizinde yer alması gerekmektedir.

4.5.5.Desorpsiyon Maliyeti

Sürekli akışta kolon deneylerinde farklı koşullarda elde edilen en iyi 6 numuneye saf su ve saf suyla hazırlanan 0,1 N HCl çözeltisi kullanılarak 24 saat temas süresi boyunca desorpsiyon işlemi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde ayçiçeği sapından üretilmiş biyokömürden ve aktivasyonlarından oluşan adsorbanın desorbe edilerek yeniden kullanılmasının fayda maliyet oranı açısından fizibil olmadığı değerlendirilmiştir. Bu nedenle endüstriyel kullanım halinde adsorbanın tek kullanımlık kabul edilmesi yerinde olacaktır.

4.5.6.Bertaraf Maliyeti

Adsorpsiyon sonrası oluşan atıklar laboratuvar koşullarında bertaraf edilmiştir. Ancak endüstriyel koşullarda kullanım halinde ilgili mevzuat kapsamında değerlendirilmeli ve atıktan türetilmiş yakıt katkısı kapsamında olup olmayacağı da irdelenerek bertaraf maliyetleri detaylı şekilde analiz edilmelidir.

4.6. Tez Sonuçlarının Önceki Çalışmalar Işığında Analizi

Elemental analiz sonuçları doğrultusunda Uluslararası Biyokömür Girişimi (IBI) kriterlerine göre karbon içeriklerinin %60'ın üzerinde olması sebebiyle, ayçiçeği sapından üretilen ham ve aktifleştirilmiş biyokömürler 1.Sınıf Biyokömür kategorisindedir.

Yankovych vd. (2021) tarafından yayımlanan çalışmada kullanılan ayçiçeği sapından elde edilmiş biyokömür için yapılan FT-IR analizleri ve SEM görüntülerinin bu çalışma kapsamında elde edilen veriler ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Literatür incelendiğinde imazamoxun adsorpsiyonuna dair kolon çalışmalarının kısıtlı olduğu görülmüştür. Morlay vd. (2012)'nin yayınladıkları çalışmada; Filtrasorb 400 ticari markasını taşıyan aktif karbon ile gerçekleştirilen adsorpsiyon çalışmasında imazamoxun yüksek verimlilik ile giderildiği belirtilmiştir. Tez kapsamındaki çalışmaların sonuçları bu bulgu ile tutarlıdır.

Yayınlanmış az sayıdaki çalışmadan biri olan; imazamox'un topraktaki kalıntılarının meşe odunundan imal biyokömürün toprağa karıştırılmasıyla yeraltı suyuna sızıntısındaki değişimin bir kolon adsorpsiyon çalışmasıyla değerlendirildiği, Terrón-Sánchez tarafından 2023 yılında yayınlanan makalede, sprinkler sulama sisteminde biyokömür katkısının sızıntıyı azalttığına tespit edildiği belirtilmiştir. Söz konusu çalışmadaki bulgular doğrultusunda biyokömür adsorpsiyonunun gerçekleştiği ifade edilmiştir. Tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel araştırmaların sonuçlarının bu çalışma ile uyumlu olduğu değerlendirilmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, tarımsal bir atık olan ayçiçeği sapından üretilen biyokömür ve onun asit ile baz kullanılarak aktifleştirilmesinden elde edilen adsorbanları kullanarak, kolonda içme suyundan imazamox gideriminin araştırılması amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmada aşağıda özetlenen sonuçlar elde edilmiştir.

1. Imazamoxun kimyasal yapısı hem anyonik hem de katyonik grupları içermektedir. Bu da onun adsorpsiyonla sudan ayrılmasına uygun bir herbisit olmasını sağlamaktadır.
2. Elemental analiz sonuçları doğrultusunda ayçiçeği sapından üretilen ham ve aktifleştirilmiş biyokömürlerin tamamı, Uluslararası Biyokömür Girişimi (IBI) kriterlerine göre karbon içeriklerinin %60'ın üzerinde olması sebebiyle, 1.Sınıf Biyokömür kategorisindedir.
3. Toz formda biyokömür kullanımı halinde yerçekimiyle sudan ayırıştırmanın istenen düzeyde sağlanamadığı, adsorbanın elüata karıştığı ve suda ikincil kirletici oluşturduğu gözlenmiştir. Bu nedenle su arıtımında ayçiçeği sapından üretilen biyokömürün granül formu kullanılmalıdır.
4. Adsorbanların FT-IR grafikleri ile imazamox giderim performansları karşılaştırıldığında; kimyasal aktivasyon işleminin adsorbanda -OH grubu oluşturacak şekilde gerçekleştirilmesi halinde giderim veriminin arttığı, aktifleştirilen biyokömürlerin aktif karbona benzer şekilde C-NH₂ grubu ve C-H grubu içerdiği, aktifleştirmenin imazamoxun kompleksleşme ve iyon değişimi yoluyla adsorbe edebilmesini sağladığı anlaşılmıştır.
5. Adsorbanların SEM EDX analizleri incelendiğinde aktivasyon işlemlerinin biyokömürün karbon oranını azaltmakla birlikte oksijen miktarında %12,5'ten %22,96'a kadar artışa neden olduğu tespit edilmiştir. Bu artışın oksijenli fonksiyonel gruplarla ilgili olduğu değerlendirilmiştir. Güçlü asidik ya da bazik çözeltilerle aktivasyon işlemleri biyokömürün elementel bileşiminin zenginleşmesine neden olmuştur. Bu artış iyon değişimi ve imazamox giderimiyle doğru orantılıdır.
6. Ayçiçeği sapından üretilen ham ile aktifleştirilmiş biyokömürlerin SEM mikrofotografları incelendiğinde bu adsorbanların; mikro-granüller halinde, bitişik ve birbirleriyle temas halinde bir dizi bal peteği kesitli tüp yapısında oldukları, boşluklu heterojen yüzeylerin HBK'da inorganik materyallerle eşit şekilde kaplandığı ve aktivasyon işlemleriyle bu kaplamaların kırıldığı tespit edilmiştir.
7. H₂SO₄ ABK açısından elde edilen sonuçlar incelendiğinde pH 2'de elde edilen giderim verimi pH 6'dakinden daha yüksektir. Optimum koşullar için yapılan adsorpsiyon çalkalama deneylerinde elde edilen sonuçlar bu açıdan da doğrulanmıştır. Çözeltinin pH'ının, adsorbanların pH_{pzc} değerlerinden asidite

yönünde uzaklaşmasının giderimdeki olumlu katkısında elektrostatik kuvvetlerin yoğun etkisi olduğu değerlendirilmiştir.

8. NaOH ile aktivasyon ham biyokömüre oranla giderim verimini 1,22 kat arttırmıştır. Bu da imazamox gideriminde elektrostatik etkileşimin önemli bir rol oynadığını göstermektedir.
9. Tez kapsamında aktif karbon ile elde edilen %100 giderim verimine en yakın sonuç; cam kolonda NaOH ABK'nın adsorban olduğu deney setinde, sürekli akış koşullarında, pH 2'de, oda sıcaklığında, 5 cm kolon yüksekliğinde 10 mL/dak akış hızında, %96,15'lik giderim verimi olacak şekilde elde edilmiştir.
10. Sürekli akış koşullarında kolonda adsorpsiyon kuvvetli şekilde Langmuir İzotermine ve Yalancı-İkinci Derece Kinetik Modele uyum göstermiştir.
11. Adsorplanan kirletici miktarı kolonda sürekli akış koşullarında birim adsorban başına olacak şekilde değerlendirildiğinde; 1g HBK ile maksimum 0,293 mg imazamox giderildiği, 1 g 0,1 N H₂SO₄ ABK ile maksimum 0,19 mg imazamox giderildiği ve 1 g NaOH ABK ile maksimum 0,4246 mg imazamox giderildiği görülmüştür. AC ile (1 g) 0,018mg imazamox giderildiği gözönüne alındığında NaOH ile aktifleştirme işlemi birim adsorban başına giderim açısından 200 kat daha verimlidir.
12. Sudan imazamox arıtımında kullanılan biyokömür tehlikeli atık haline geldiğinden rejenerasyonu uygun değildir. Kalorifik değeri sayesinde (3874 cal/g) atıktan türetilmiş yakıt katkısı olarak uygun baca arıtım tertibatına sahip dolaşımli akışkan yataklı sistemlerde yakılarak bertaraf edilebilir ya da piroliz/gazlaştırmayla enerji üretiminde kullanılabilir. Ayçiçeği sapından üretilmiş adsorban yaşam çevrimi açısından değerlendirildiğinde döngüsel ekonomi ilkelerine tamamen uyumludur.
13. Birim adsorban başına giderim verimi ve adsorpsiyon kararlılığı açısından değerlendirildiğinde NaOH ABK'nın toprağa karıştırılması halinde; toprağın organik madde miktarının ve sera gazı tutma kapasitesinin yanı sıra adsorpsiyon kapasitesinin de artacağı, bu sayede imazamox kullanım ihtiyacının azalacağı ve kullanılan imazamoxun su kaynaklarına olası sızıntılarının önüne geçilmesine katkı sunulacağı değerlendirilmiştir.
14. Ayçiçeği sapının biyokömür üretiminde kullanılması sayesinde bu atık sapların yakılarak sera gazı üretmesinin önüne geçilecek ve döngüsel ekonomi ilkelerine uygun şekilde bir hammaddeye dönüşmesi sağlanacaktır.
15. NaOH ABK'nın adsorban olarak kullanıldığı deneylerde %96,15 imazamox giderim verimi elde edilmiştir. Bu nedenle İyi Ekolojik Durum oluşturmaya katkı sunma potansiyeli bulunmaktadır. NaOH ABK'nın içme suyu arıtımında toz AC'nin ikame ürünü olabilmesi için endüstriyel üretiminin Gıda Maddeleri Tüzüğü'ne uygunluğunun araştırması literatüre katkı sunacaktır.
16. Laboratuvar koşullarındaki üretim maliyetleri temel alınarak biyokömür kullanımıyla aktif karbon kullanımı karşılaştırıldığında kg başına yaklaşık 2,75

\$'lık bir avantaj sağlandığı tespit edilmiştir. Bu da araştırmanın içme suyundan imazamoxun verimli şekilde gideriminde kullanılmak üzere; ticari adsorbana ikame, tarımsal atıktan üretilmiş ve uygun maliyetli bir adsorban üretme hedefine uygun bir sonuçtur. AC ithal bir ürün olduğundan yerli ve milli bir adsorban olarak NaOH ABK kullanımı ithalatın ve ülkemizin döviz ihtiyacının azaltılmasına katkı sunacaktır.



KAYNAKLAR

- Ahmad, S., Tanweer, M., Mir, T., Alam, M., Ikram, S. and Sheikh, J. (2023). Antimicrobial gum based hydrogels as adsorbents for the removal of organic and inorganic pollutants. *Journal of Water Process Engineering*, 103377.
- Akgeyik, E. (2014). *İmidazolinon pestisit grubu "Imazamox'un" s katkılanmış nano-tio2 ile fotokatalitik parçalanması ve yıkım ara ürünlerinin belirlenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), İnönü Üniversitesi Fen-Bilimleri Enstitüsü Kimya Ana Bilim Dalı.
- Akkurt, B. (2019). *Effects of Pyrolysis Temperature on Some Physical and Chemical Properties of Biochars* (Yüksek Lisans Tezi), Gaziosmanpaşa Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Enstitüsü, Tokat.
- Almezgagi, M. Y. (2019). *Kompozit biochar kullanılarak ağır metal giderimi* (Yüksek Lisans Tezi) Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Anonim. (2023). *Imazamox Bayi Satış Miktarı*
- Aqueduct. (2024). *Water Risk Atlas*. Erişim adresi: [Aqueduct Water Risk Atlas \(wri.org\)](https://wri.org/aqueduct)
- Aral, B. (2019). *Sularda bulunan İbuprofenin biyoteknolojik yöntemlerle gideriminin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi), Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Araujo, C.M.B., Ghislandi, M.G., Rios, A.G., Costa, G.R.B., Nascimento, B.F., Ferreira A.F.P., Sobrinho, M.A.M. and Rodrigues, A.E. (2022). Wastewater treatment using recyclable agar-graphene oxide biocomposite hydrogel in batch and fixed-bed adsorption column: Bench experiments and modeling for the selective removal of organics. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 639-128357.
- Argun, M.E. (2007). *Kimyasal Olarak Aktifleştirilmiş Adsorbanlar Kullanarak Ağır Metal İyonlarının Adsorpsiyonu* (Doktora Tezi), Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Bilimleri Ana Bilim Dalı, Konya.
- Aksangür, İ. ve Nalbur, B. (2018). Alıcı ortamı göl olan farklı arıtım proseslerinin pestisit giderim verimliliğinin incelenmesi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 7, Sayı 2, (2018), 581-589.
- Aksu, Z. ve Yener, J., (2001). A comparative adsorption/biosorption study of mono chlorinated phenols onto various sorbents. *Waste Management*, 21: 695-702.
- Aslan, C., Kekillioğlu, A., Şen, M. ve Kızılırmak A., (2021). Pestisitler Üzerine İnceleme. *750.Yıl Hüncar Hacı Bektaş Veli Anma ve Armağan Kitabı* (Cilt1,1.baskı) içinde (219-239). ISBN: 978-605-4163-51-9, Nevşehir: Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Yayınları No:32.
- Atabey, E. (2020). *Zirai ilaçlama-pestisitler ve zararları*. Erişim adresi: [ZİRAİ İLAÇLAMA-PESTİSİTLER VE ZARARLARI - Bodrum Güncel Haber \(bodrumguncelhaber.com\)](https://www.bodrumguncelhaber.com/zirai-ilaclama-pestisitler-ve-zararlari)

- Atasoy, A.D. (2019). Yeraltı sularında pestisit kirliliğinin pestisit özellikleri ve kullanım miktarları bakımından irdelenmesi. *Ziraat Mühendisliği*, (368) 46-52. [DOI: 10.33724/zm.627156](https://doi.org/10.33724/zm.627156)
- Aydın, Ş.B., Oğuz, C.N. ve Gül, A. (2021). Düşük kalite kuvars kumlarının flotasyon ve oksalik asit liçi ile zenginleştirilmesi. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, Mining, 2021, 60(1), 7-20. <https://doi.org/10.30797/madencilik.803383>
- Basf. (2018). *Analytical method for Imazamox and its metabolites Reg. No. 4110603 (CL 354825) and Reg. No. 4110542 (CL 312622) in water*. Florida: Adpen Laboratories, Basf Corporation.
- Başıbüyük, M. and Forster, C. F. (2003). An examination of adsorption characteristics of a basic dye (Maxilon Red Bl-N) on to live activated sludge system. *Process Biochem.*, 38: 1311-1316.
- Bayat, B. (2002). Comparative study of adsorption properties of Turkish fly ashes: I.The case of nickel(II), copper(II) and zinc(II)'. *Journal of Hazardous Materials*, 95: 251-273.
- Beesley, L. and Marmiroli, M. (2011). The immobilisation and retention of soluble arsenic, cadmium and zinc by biochar. *Environmental Pollution*, 159(2), 474-480.
- Bellitürk, K., Danışman, F. ve Sözübek., B. (2009). Tekirdağ yöresindeki toprakların bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri ile mineralizasyon kapasiteleri arasındaki ilişkiler. *Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 141-147.
- Bhandari, A. (2017). *Synthesis of iron-nano particles from solid industrial waste for mine water treatment*. (Master's Thesis). Lappeenranta University Of Technology Lut School Of Engineering Science.
- Birpınar, M. ve Dinçbaş, T. (2022). Net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda milli teknoloji hamlesi. *Milli Teknoloji Hamlesi* (s. ch21). içinde Türkiye Bilimler Akademisi ISBN: 978-625-8352-16-0.
- Bitkisel Üretim Verileri*. (2021). 10 Aralık 2021, T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Erişim [Slayt 1 \(tarimorman.gov.tr\)](https://tarimorman.gov.tr)
- Cabrera, A., Celis, R. and Hermosín, M.C. (2016) Imazamox–clay complexes with chitosan- and iron(III)-modified smectites and their use in nanoformulations. *Pest Managing Science*, 72 (2016) 1285–1294.
- Coşkun, E., Avan, N., Karabulut, S., Saldamlı, Ö. and Yılmazoğlu, Y. (2023). Pestisitler. *International Journal of Anatolian Science*, 2(2023), 36-40
- Çeşmeli, Ç. (2011). *Sentetik Kaynaklı Aktif Karbon ile Pestisit Giderimi* (Yüksek Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul.

- Çevre Durum Raporu 2019. (2022). *Tekirdağ Valiliği Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü*, 26 Nisan 2022, Erişim adresi tek-rdag_2019_cdr-20201006172441.pdf (csb.gov.tr)
- Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü. (2017). *Tekirdağ İli 2016 Yılı Çevre Durum Raporu*. Erişim adresi tek-rdag_-cdr2017-20181114160234-20181115093442.pdf (csb.gov.tr)
- Çevresel Etki Değerlendirmesi, İzin ve Denetim Genel Müdürlüğü. (2020). *Türkiye Çevre Sorunları ve Öncelikleri Değerlendirme Raporu*. Erişim adresi tu-rk-yecevesorunlariveoncel-kler-2020-20210401124420.pdf (csb.gov.tr)
- Çevresel Göstergeler. (2021). *T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı*. Erişim adresi cevreselgostergeler.csb.gov.tr/tarim-ilaci-pestisit-kullanimi-i-85834
- Çiçek, F., Özer, D., Özer, A. and Özer, A. (2007). Low cost removal of reactive dyes using wheat bran. *Journal Hazardous Materials*, 146: 408-416.
- Dadebo, D., Atukunda, A., İbrahim, M. and Nasr, M. (2023). Integrating chemical coagulation with fixed-bed column adsorption using rice husk-derived biochar for shipboard bilgewater treatment: Scale-up design and cost estimation. *Chemical Engineering Journal Advances*, 16-100520.
- Dan, Y., Ji, M., Tao, S., Luo, G., Shen, Z., Zhang, Y. and Sang, W. (2021). Impact of rice straw biochar addition on the sorption and leaching of phenylurea herbicides in saturated sand column. *Science of the Total Environment*, 144536.
- Demli, F., Orhan, G., Durak, Z.E. ve İter, H. (2018). Ankara ve Konya illerine ait suların organoklorlu ve organofosforlu pestisitler yönünden değerlendirilmesi. *Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji Dergisi*, 2018; 75(4): 391-398
- Dissanayake, P., You, S., Igalavithana, A., Xia, Y., Bhatnagar, A., Gupta, S., Kua, H.W., Kim, S., Kwon, J.H., Tsang D.C.W. and Ok, Y. (2020). Biochar-based adsorbents for carbon dioxide capture: a critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119:109582.
- Du, Z., Jia, R., Li, C., Cui, P., Song, W. and Liu, J. (2020). Pilot-scale UV/H₂O₂-BAC process for drinking water treatment – Analysis and comparison of different activated carbon columns. *Chemical Engineering Journal*, 382-123044.
- Dünya Bankası. (2016). *İklim Değişikliği, Su ve Ekonomi*. Washington: Dünya Bankası.
- Ekmekyapar, F., ve Şahinci, E. (2022). Agricultural and environmental effects of biochar applications. B. Sözübek, ve K. Bellitürk içinde, *Innovative Agricultural Practises in Soil, Plant and Environment* (s. 65-89). Ankara: İlksad Yayınevi.
- Elektrik Faturalarına Esas Tarife Tabloları. (2024). Erişim adresi www.epdk.gov.tr
- EPA. (2021). *United States Environmental Protection Agency*. Erişim adresi sor.epa.gov
- Ercan, A. (2012). *Adsorpsiyon Yöntemiyle Boyarmadde Giderimi*. (Bitirme Çalışması), Namık Kemal Üniversitesi Çorlu Mühendislik Fakültesi, Tekirdağ/Çorlu.

- Erdik, E. (2015). *Organik Kimyada Spektroskopik Yöntemler*. ISBN:9789757313045.
- Gani, A., Erdiwansyah, Munawar, E., Mahidin, Mamat, R. and Rosdi, S. (2023). Investigation of the potential biomass waste source for biocoke production in Indonesia: A review. *Energy Reports*, 2417-2438.
- Ghosh, S., Falyouna, O., Onyeaka, H., Malloum, A., Bornman, C., AlKafaas, S. S., Al-Sharify, Z.T., Ahmadi, S., Dehghani, M.H., Mahvi, A. H., Nasser, S., Tyagi, I., Mousazadeh, M., Koduru, J.R., Khan, A.H. and Suhas. (2023). Recent progress on the remediation of metronidazole antibiotic as emerging contaminant from water environments using sustainable adsorbents: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 103-405. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103405>
- Gosetti, F., Robotti, E., Bolfi, B., Mazzucco, E., Quasso, F., Manfredi, M., Silvestri, S., Facchi, A. and Marengo, E. (2019). Monitoring of water quality inflow and outflow of a farm in Italian Padana plain for rice cultivation: a case study of two years. *Environ. Sci. Pollut. R* 26, 21274–21294.
- Gök, O., Mesutoğlu, O. (2018). Adsorpsiyon Kolon Sisteminde Pirina Kullanılarak Ağır Metal Giderimi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi*.
- Gösterge Niteliğindeki Merkez Bankası Kurları. (2024). Erişim adresi [TCMB - Kurlar](#)
- Gürbüz, M., Kayalı, E., Bahar, E., Öz, T. ve Kurşun, İ. (2019). Trakya topraklarının veri tabanının oluşturulması ve bazı toprak özellikleri. *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi* 7(1) 28-36, e-ISSN: 2146-8141.
- Guilhen, S. N. Rovani, S., de Araujo, L. G., Tenorio, J. A. S. and Masek, O. (2021). Uranium Removal from Aqueous Solution Using Macauba Endocarp-Derived Biochar: Effect of Physical Activation. *Environmental Pollution*. 272:116022.
- Gwenzi, W., Chaukura, N., Noubactep, C. and Mukome, F. (2017). Biochar-based water treatment systems as a potential low-cost and sustainable technology for clean water provision. *Journal of Environmental Management*, 732-749.
- Hale, S., Lehmann, J., Rutherford, D., Zimmerman, A., Bachmann, R., Shitumbanuma, O'Toole, A. and Sundqvist, K.L., Arp, H.P.H., Cornelissen, G. (2012). Quantifying the Total and Bioavailable Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Dioxins in Biochars. *Environmental Science ve Technology*, 46 (5), 2830-2838.
- Hameed, B. H., Ahmad, A. A. and Aziz, N. (2007). Isotherms, kinetics and thermodynamics of acid dye adsorption on activated palm ash. *Chemical Engineering Journal*, 133: 195–203.
- Hamel, K. (2012). Environmental impact statement for penoxsulam, Imazamox, bispyribac-sodium, flumioxazin cenfentrazone-ethyl. *Water Quality Program* (s. 27-40). Washinton, USA: Washington State Department of Ecology.
- Hamit, E. (2019). *Biyokömür eklenen toprakta fiğ (vicia sativa) bitki gelişimine arsenikli sulama suyu etkisi* (Yüksek Lisans Tezi), Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.

- Harir, A., Frommberger, M., Gaspar, A., Martens, D., Kettrup, A., El Azzouzi, M. and Schmitt-Kopplin, P. (2007). Characterization of Imazamox degradation by-products by using liquid chromatography mass spectrometry and high-resolution fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry. *Anal Bioanal Chem*, 389,1459-1467.
- Hassaan, M., Eldeeb, T. and Nemr, A. E. (2022). Pesticides Removal Techniques from the Aquatic Environment. *Pesticides in the Natural Environment*, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90489-6.00019-7>.
- Haydari,I., Aziz,K., Kaya,S., Daştan T., Quazzani, N., Mandi, L. and Aziz, F. (2023). Green synthesis of reduced graphene oxide and their use on column adsorption of phenol from olive mill wastewater. *Process Safety and Environmental Protection*, [Process Safety and Environmental Protection | Journal | ScienceDirect.com by Elsevier](https://www.sciencedirect.com/journal/Process-Safety-and-Environmental-Protection)
- Herdforshire Üniversitesi. (2023). *Pestisit Özellikleri Veri Bankası*. Erişim adresi [PPDB - Pesticides Properties DataBase \(herts.ac.uk\)](https://ppdb.herts.ac.uk)
- Ho, Y.S., Wang, C.C. (2004).Pseudo-isotherms for the sorption of cadmium ion onto tree fern. *Process Biochemistry*, 39, 759-763.
- Hu,M., Liu, L., Hou, N., Li, X., Zeng, D. and Tan, H. (2021). Insight into the adsorption mechanisms of ionizable imidazolinone herbicides in sediments: Kinetics, adsorption model, and influencing factors. *Chemosphere*. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129655>
- İçme Suyu Temin Edilen Yüzeysel Suların Kalitesine ve Arıtılmasına Dair Yönetmelik . (2021). Erişim adresi mevzuat.gov.tr/anasayfa/MevzuatFihristDetayIframe?MevzuatTur=7veMevzuatNo=32653veMevzuatTertip=5
- İklim Değişikliği Başkanlığı. (2024). Erişim adresi [*undp_azaltim_spread.pdf \(iklim.gov.tr\)](https://iklim.gov.tr/undp_azaltim_spread.pdf)
- İlbank. (2013). *İçmesuyu Arıtma Tesisi Projesi Proses Şartnamesi*. Erişim adresi [aritma-tesisi-proses.pdf \(ilbank.gov.tr\)](https://ilbank.gov.tr/aritma-tesisi-proses.pdf)
- İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik. (2021). Erişim adresi [Mevzuat Bilgi Sistemi](https://mevzuat.bilgi.sistemi.gov.tr)
- International Biochar Initiative. (2022). [Home - International Biochar Initiative \(biochar-international.org\)](https://biochar-international.org)
- Kanbur, M., Aslan, C. (2024). *Pestisitler ve çevre kirliliğinden kaynaklanan olumsuzluk faktörleri*. Erişim adresi [Bölüm 19 \(1\).pdf \(nevsehir.edu.tr\)](https://nevrsehir.edu.tr/Bolum19(1).pdf)
- Kanburoğlu Çebi, Ü., Özcan, C., Gürbüz, M. A. ve Özer, S. (2017). Trakya bölgesinde ayçiçeği tarımında kullanılan Imazamox herbisitinin toprak ortamında kalıntı düzeylerinin izlenmesi ve değerlendirilmesi. *Toprak Su Dergisi*, 32-39.
- Kanburoğlu Çebi, Ü., Özcan, C., Gürbüz, M. ve Özer, S. (2017). Imazamox herbisitinin ve türevlerinin ayçiçeği bitkisinin farklı aksamalarında ve ayçiçeği florasının etkisi altında üretilen bal örneklerindeki kalıntı düzeyi. *Toprak Su Dergisi*, Cilt 6, Sayı 2, 32-39.

- Kaur, P., Kaur, P. and Kaur, K. (2020) Adsorptive removal of imazethapyr and Imazamox from aqueous solution using modified rice husk, *Journal of Cleaner Production*, 244 (2020) 118699.
- Kaur, P., Kaur, P., Kaur, N., Jain, D., Singh, K. and Bhullar, M.S. (2020) Dissipation and phytotoxicity of imazethapyr and Imazamox in soils amended with β -cyclodextrin-chitosan biocomposite, *Science of Total Environment*, 735 (2020) 139566
- Kaur, P. and Kaur, P. (2024). Insights into adsorption performance and mechanism of chitosan-bentonite biocomposites for removal of imazethapyr and Imazamox. *International Journal of Biological Macromolecules*, 262 (2024) 129903.
- Kaya, Y. (2024) *Ayçiçeği tarımı*. Erişim adresi [Ayçiçeği Tarımı \(Yazar: Doç. Dr. Yalçın KAYA\) \(tarimormman.gov.tr\)](https://tarimormman.gov.tr)
- Kaykioğlu, G., Yıldız, A. and Bayramol, D.V. (2023). Adsorption of AR114 onto humic acid-modified Fe₃O₄ nanoparticles. *Industria Textila*, 2023, Vol 74 No 6.
- Keivani, B. (2018). *Biyokömür Üretimi ve Dolaşım Akışkan Yataklı Bir Yakma Sisteminde Linyit ve Biyokömürün Oksijen Zengin Ortamda Birlikte Yakılmasının İncelenmesi* (Doktora Tezi), Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Kekillioğlu, A. (2020). Pestisitler ve arılar üzerindeki etkilerinin incelenmesi. *Ejns International Journal on Mathematic, Engineering and Natural Sciences*, Vol 13, ISSN 2602-4136.
- Khan, A., Khan, S., Lei, M., Alam, M., Khan, M. A. and Khan, A. (2020). Biochar Characteristics, Applications and Importance in Health Risk Reduction through Metal Immobilization, *Environmental Technology & Innovation*, 20: 101121.
- Kınacı, G. (2019). *Ayçiçeği ve çeltik yetiştiriciliğinde kullanılan bazı herbisitlerin kalıntı miktarlarının tayini* (Yüksek Lisans Tezi), Niğde Ömer Halis Demir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
- Koruma Klor Alkali San. Tic. A.Ş. . (2022). Erişim adresi [KORZAMOX-ULTRA-SDS4805-TR.pdf \(korumatarim.com\)](https://korumatarim.com)
- Koyuncu, İ., Paşaoğlu, M.E., Türken, T. ve Yüksekdağ, A. (2023). Su, Atıksu Arıtımı ve Yeniden Kullanımı. M.E. Aydın ve A.E. Şahin içinde, İklim Değişimi Çerçevesinde Su Kaynaklarının Mevcut Durumu ve Geleceği, (sf 207-239), TÜBA Yayınları. Erişim adresi: [DOI: 10.53478/TUBA.978-625-8352-56-6.ch10](https://doi.org/10.53478/TUBA.978-625-8352-56-6.ch10)
- Krasucka, P., Pan, B., Ok, Y. S., Mohan, D., Sarkar, B. and Oleszczuk, P. (2021). Engineered-Biochar –A Sustainable Solution for the Removal of Antibiotics from Water, *Chemical Engineering Journal*, 405: 126926.
- Kuraklık Analizi. (2023). Erişim adresi [Kuraklık Analizi - Meteoroloji Genel Müdürlüğü \(mgm.gov.tr\)](https://mgm.gov.tr)
- Larasati, A., Fowler, G.D. and Graham, J.D. (2022). Extending granular activated carbon (GAC) bed life: A column study of in-situ chemical regeneration of pesticide loaded

- activated carbon for water treatment. *Chemosphere*, 286-131888. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131888>
- Lehmann, J. and Joseph, S. (2009). *Biochar Environmental Management*. ISBN: 978-1-84407-658-1: Earthscan Yayıncılık.
- Lei Sun, H. K. (2003). Stability studies of propoxur herbicide in environmental water samples by liquid chromatography–atmospheric pressure chemical ionization ion-trap mass spectrometry. *Journal of Chromatography*, 153-163. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(03\)00850-1](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(03)00850-1)
- Leng, L., Xiong, Q., Yang, L. Li, H., Zhou, Y., Zhang, W., Jiang, S., Li, H. and Huang H. (2021). An overview on engineering the surface area and porosity of biochar. *Science of the Total Environment*, 144204. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144204>
- Li, Y., Liu, S., Wang, C., Ying, Z., Huo, M. and Yang, W. (2020). Effective column adsorption of triclosan from pure water and wastewater treatment plant effluent by using magnetic porous reduced graphene oxide. *Journal of Hazardous Materials*, 386-121942. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121942>
- Lorenzo, T. D., Di Marzio, W. D., Sáenz, M. E., Baratti, M., Dedonno, A. A., Iannucci, A., Cannicci, S., Messana, G. and Galassi, D. M. P. (2014). Sensitivity of hypogean and epigean freshwater copepods to agricultural pollutants. *Environ Sci Pollut Res*, 4643-4655. DOI 10.1007/s11356-013-2390-6
- Machado, L. M. M., Lütke, S. F., Perondi, D., Godinho, M., Oliveira, M. L. S., Collazzo, G. C. and Dotto, G. L. (2020). Treatment of Effluents Containing 2- Chlorophenol by Adsorption onto Chemically and Physically Activated Biochars, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8: 104473. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104473>
- Manap, R.Y., Güneç, E. ve Doğaç, E. (2023). Pesticides: Their classification, Toxicological effects, and Detection, *Ata-Kimya Dergisi*, Cilt 3 Sayı 2 9-23
- Massachusetts Çevre Koruma Departmanı. (2014). *Imazamox*. Erişim adresi [download \(mass.gov\)](https://www.mass.gov/download)
- Mengüç, Ç. (2018). Herbisit Toksisitesi ve Yabancı Otlara Karşı Alternatif Mücadele Stratejileri. *Turkish Journal of Weed Science*. 2018:21(1):61-73.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2023). Erişim adresi [Kuraklık Analizi - Meteoroloji Genel Müdürlüğü \(mgm.gov.tr\)](https://kuraklik.mgm.gov.tr/)
- Mohan, D., Sharma, R., Singh, V., Steele, P. and Pittman Jr, C. (2012). Fluoride removal from water using bio-char, a green waste, low-cost adsorbent: equilibrium uptake and sorption dynamics modeling. *Industrial ve Engineering Chemistry Research*, 51 (2), 900-914.
- Mohan, D., Sarswat, A., Ok, Y. and Pittman Jr, C. (2014). Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable

- adsorbent–a critical review. *Bioresource technology*, 160, 191-202. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.120>
- Morlay, C., Quivet, E., Pilshofer, M., Faure, R. and Joly, J. (2012). Adsorption of Imazamox herbicide onto Filtrasorb 400 activated carbon. *J Porous Mater*, 19:79–86.
- Nabiltem. (2024). Erişim adresi [Merkezi Laboratuvar \(nku.edu.tr\)](https://merkezi.laboratuvar.nku.edu.tr)
- Namlı , A., Akça, M. and Akça, H. (2017). Effects of Biochar from Agricultural Wastes on the Development of Wheat Plant and Some Soil Properties. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 5 (1) : 39-47.
- Ok, Y., Uchimiya, S., Chang, S. and Bolan, N. (2016). *Biochar Production, Characterization, and Applications*. p.406. CRC Press, Taylor ve Francis Group.
- Oxford Üniversitesi. (2024). *Dünyada pestisit kullanımının türlerine göre dağılımı (1999-2020)*. Erişim adresi [Pesticide breakdown by type, World, 1990 to 2020 \(owid.netlify.app\)](https://owid.netlify.app/pesticide-breakdown-by-type/world/1990-to-2020)
- Özcan, A.S. and Özcan, A. (2004). Adsorption of acid dyes from aqueous solutions onto acid-activated bentonite. *Journal of Colloid and Interface Science*, (276): 3946.
- Papadakis, E., Tsaboula, A., Vryzas, Z., Kotopoulou, A., Kintzikoglou, K. and Papadopoulou-Mourkidou, E. (2018). Pesticides in the rivers and streams of two river basins in northern Greece. *Science of the Total Environment*, 732-743. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.074>
- Pfenning M, P. G. (2008). The Clearfield® technology- a new broad spectrum post-emergence weed control system for european sunflower growers. *Journal of Plant Diseases and Protection Special Issue XXI*,000-000,Issn 1861.
- Quispe, J.I.B., Campos, L.C., Masek, O. and Bogush, A. (2022). Use of biochar-based column filtration systems for greywater treatment: A systematic literature review. *Journal of Water Process Engineering*, 48-102908. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102908>
- Rambabu, K., Bharath, G., Avornyo, A., Thanigaivelan, A., Hai, A. and Banat, F. (2023). Valorization of date palm leaves for adsorptive remediation of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid herbicide polluted agricultural runoff. *Environmental Pollution*, 120612. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120612>
- REC, Kaynak, Çevre ve İklim Derneği. (2023). *A'dan z'ye iklim değişikliği başucu rehberi*. Ankara: ISBN: 978-975-6180-43-3.
- Rouquerol, J., Rouquerol, F., Llewellyn, P., Maurin, G. and Sing, K. S. (2013). *Adsorption by powders and porous solids: principles, methodology and applications*. Great Britain: Academic press.
- Sağlam, H. (2008). *Melen havzasında pestisit uygulamaları ve pestisitlerin biyolojik bozunma, yüzeysel akış ve sızma yüzdelerinin tahmini* (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

- Sanayi Deposu. (2024). *Toz aktif karbon (1kg)*. Erişim adresi sanayideposu.com/urun/aktif-karbon-toz-1-kg
- Sanchez-Yepes, A., Santoz, A., Romero, A. and Lorenzo, D. (2024). Sustainable application of surfactants in soil remediation: Selective pollutants adsorption and hydrogen peroxide-driven adsorbent regeneration. *Science of Total Environment*, 926 (2024) 171847.
- Sarıgöl, B. (2018). *Pomza bazlı nano-kompozitler ile seryum adsorpsiyonu* (Bitirme Çalışması), Namık Kemal Üniversitesi Çorlu Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Tekirdağ.
- Sarkar, B., Venkateswralu, N., Rao, N., Bhattacharjee, C. and Kale, V. (2007). Treatment of pesticide contaminated surface water for production of potable water by a coagulation–adsorption–nanofiltration approach. *Desalination*, 129-140. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.09.021>
- Satyro, S., Li, H., Dehkhoda, A. M., McMillan, R., Ellis, N. and Baldwin, S. A. (2021). Application of Fe-Biochar Composites for Selenium (Se+6) Removal from Aqueous Solution and Effect of the Presence of Competing Anions under Environmentally Relevant Conditions, *Journal of Environmental Management*, 277: 111472. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111472>
- Sayın, F. (2020). *Hplc ile tayin edilebilen bazı yaygın antibiyotiklerin aktif biyokömür ile sulu ortamdan uzaklaştırılması* (Doktora Tezi), Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Singh, E., Kumar, A., Mishra, R., You, S., Singh, L., Kumar, S. and Kumar, R. (2021). Pyrolysis of Waste Biomass and Plastics for Production of Biochar and its Use for Removal of Heavy Metals from Aqueous Solution. *Bioresource Technology*, 320: 124278. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124278>
- Sohi, S. (2012). Carbon storage with benefits. *Science*, 338 (6110), 1034-1035.
- Su Yönetimi Genel Müdürlüğü. (2021). *Tarım sektöründe su verimliliğine ilişkin metodolojik rehber*. Ankara: Tarım ve Orman Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü.
- Su Yönetimi Genel Müdürlüğü. (2023). *Değişen iklime uyum çerçevesinde su verimliliği ve eylem planı*. Ankara: Tarım ve Orman Bakanlığı.
- Su Yönetimi Genel Müdürlüğü. (2024). *Yönetmelikler*. Erişim adresi : [YÖNETMELİKLER \(tarimorman.gov.tr\)](https://yonetmelikler.tarimorman.gov.tr)
- Sun, Y. ve Tsang, D. (2023). *Biochar applications for waste water treatment*. Print ISBN: 9781119764373.
- Sümer, S.K., Kavdır, Y. and Çiçek, G. (2016). Türkiye’de Tarımsal ve Hayvansal Atıklardan Biyokömür Üretim Potansiyelinin Belirlenmesi. *KSÜ Doğa Bilimleri Dergisi*, 19(4), 379-387, 2016.

- Süzer, S. (2022). *Trakya Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü*. Erişim adresi [Trakya Koşullarında Sürdürülebilir Tarımın Toprak Verimliliği ve Ekosistemin Korunmasına Etkisi \(Yazar: Dr. Sami Süzer\) \(tarimormman.gov.tr\)](https://tarimormman.gov.tr)
- Tahmasebi, A.A., Beni, A.S., Azhdarpoor, A. and Moeini, Z. (2023). The application of granular and biological activated carbon columns in removal of organochlorine and organophosphorus pesticides in a water treatment plant. *Journal of Water Process Engineering*, 56-104383. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104383>
- Tan, R. L. (2019). Trace enantioselective determination of imidazolinone herbicides in various food matrices using a modified quechers method and ultra-performance liquid chromatography/tandem mass spectrometry. *Food Analytical Methods*, 12:2647-2664.
- Tan, X., Liu, Y., Zeng, G., Wang, X., Hu, X., Gu, Y. and Yang, Z. (2015). Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. *Chemosphere*, 125, 70-85. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.12.058>
- Tarım Raporları*. (2022). Erişim adresi [Tarım Raporları \(tarimormman.gov.tr\)](https://tarimormman.gov.tr)
- Terrón-Sánchez, J., Martín-Franco, C., Vicente, L.A., Fernández-Rodríguez, D., Albarrán, Á., Nunes, J. M. R., Peña, D. and López-Piñeiro, A. (2023). Combined use of biochar and alternative management systems for Imazamox induced pollution control in rice growing environments. *Journal of Environmental Management*, 117430. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117430>
- TESKİ. (2023). *Tekirdağ vizyonu ve afet bölgelerinde su yönetimi*. Afetler Odağında Su Webinarı, Marmara Belediyeler Birliği, Mart 2023.
- Tetik, Ü. (2019). Ayçiçeği üretiminde kullanılan herbisitlerin verim ile kalite unsurlarına etkisi (Yüksek Lisans Tezi), Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ
- Tiryaki, O., Canhilal, R., ve Horuz, S. (2010). Tarım ilaçları kullanımı ve riskleri. *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 154-169.
- Tiryaki, O. (2017). *Pestisit kalıntı analizlerinde kalite kontrol (QC) ve kalite güvencesi (QA)*. Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd. Şti., ISBN:978-605-320-604-0.
- TÜİK. (2024). *İşgücü İstatistikleri*. Erişim adresi [TÜİK Kurumsal \(tuik.gov.tr\)](https://tuik.gov.tr)
- Uğuz, G. (2024). *Temel Kömür Analizleri Deney Föyü* Erişim adresi: [KİMYA MÜHENDİSLİĞİ LABORATUVARI - II \(omu.edu.tr\)](https://omu.edu.tr)
- UN. (2022). *World Population Prospects*. Erişim adresi [Dünya Nüfus Beklentileri - Nüfus Bölümü - Birleşmiş Milletler \(un.org\)](https://un.org)
- UN. (2024). *Ekonomik ve Sosyal İşler Dairesi Başkanlığı*. Erişim adresi [Dünya nüfusunun 2050'de 9,8 milyara, 2100'de 11,2 milyara ulaşacağı tahmin ediliyor | Birleşmiş Milletler](https://un.org)

- Usta, B., ve Karaca, M. (2021). Herbisit uygulamalarında önemli bir sorun: sürüklenme. *Turkish Journal of Weed Science* , 39-48.
- Varshney, J. and Sondhia, S. (2021). *Weed Management.Introduction to Herbicides*.
Erişim adresi
<http://nsdl.niscair.res.in/jspui/bitstream/123456789/559/1/Introduction%20to%20Herbicides%20-%20Formatted.pdf>
- Vats, S. (2015). Herbicides: history, classification and genetic manipulation of plants for herbicide resistance. *Sustainable Agriculture Reviews Vol 15*, 92-153.
- Xu, X., Cao, X. and Zhao, L. (2013). Comparison of Rice Husk- and Dairy ManureDerived Biochars for Simultaneously Removing Heavy Metals from Aqueous Solutions: Role of Mineral Components in Biochars. *Chemosphere*, 92 (8): 955-961.
- Xu, Z., Xiang, Y., Zhou, H., Yang, J., He, Y., Zhu, Z. and Zhou, Y. (2021). Manganese Ferrite Modified Biochar from Vinasse for Enhanced Adsorption of Levofloxacin: Effects and Mechanisms, *Environmental Pollution*, 272: 115968.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115968>
- Yang, Y., Ye, S., Zhang, C., Zeng, G., Tan, X., Song, B., Zhang, P., Yang, H., Li, M. and Chen, Q. (2021). Application of Biochar for the Remediation of Polluted Sediments, *Journal of Hazardous Material*, 404: 124052.
- Yankovych, H., Novaseltseva, V., Kovalenko, O., Behunova, D.V., Kanuchova, M., Vaclavikova, M. and Melnyk, I. (2021). New perception of Zn(II) and Mn(II) removal mechanism on sustainable sunflower biochar from alkaline batteries contaminated water. *Journal of Environmental Management*. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112757>
- Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği. (2021). Erişim adresi [Mevzuat Bilgi Sistemi](#)
- Yıldız, S. and Solmaz, S. (2016). *Effect of non profit organizations on mitigation of climate change: carbon capture and storage*. 7. Uluslararası Sivil Toplum Kuruluşları Kongresi Çanakkale [\(PDF\) Effects of Non Profit Organizations on Mitigation of Climate Change: Carbon Capture and Storage \(researchgate.net\)](#)
- Yüksel, Ş. (2017). *Kayıt ve şeftali çekirdeği ile badem kabuğu karışımından hazırlanmış olan aktif karbon ile sulu ortamlardan anyonik ve katyonik yapıları kirleticilerin giderilmesi* (Yüksek Lisans Tezi), Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Zhang, Z., Zhu, Z., Shen, B. and Liu, L. (2019). Insights into Biochar and Hydrochar Production and Applications: A Review. *Energy*, 171: 581-598.
- Zhang, M., Song, G., Gelardi, D. L., Huang L., Khan, E., Masek, O., Parikh, S. J. and Ok, Y. S. (2020). Evaluating Biochar and its Modifications for the Removal of Ammonium, Nitrate, and Phosphate in Water, *Water Research*, 186: 116303.
- Zhang, X., Miao, X., Xiang, W., Zhang, J., Cao, C., Wang, H., Hu, X. and Gao, B. (2021). Ball Milling Biochar with Ammonia Hydroxide or Hydrogen Peroxide Enhances its Adsorption of Phenyl Volatile Organic Compounds (VOCs), *Journal of Hazardous Materials*, 403: 123540.

Zhao, J., Zhou, D., Zhang, J., Li, F., Chu, G., Wu, M., Pan, B. and Steinberg, C. E. W. (2021). The Contrasting Role of Minerals in Biochars in Bisfenol A and Sulfamethoxazole Sorption, *Chemosphere*, 264: 128490.

Zubair , M., Ihsanullah , I., Aziz, H., Ahmad, M. and Al-Harthi, M. (2021). Sustainable wastewater treatment by biochar/layered double hydroxide composites: progress, challenges and outlook . *Bioresource Technology* , 319:124128.



EKLER

EK-1. KORZAMOX ULTRA GÜVENLİK BİLGİ FORMU

Yeni düzenleme tarihi 26.09.2016
Hazırlama tarihi 19.04.2012
GBF No 192

Kaçınıcı düzenleme olduğu 01



Kısım I GÜVENLİK BİLGİ FORMU KORZAMOX ULTRA

13 Aralık 2014 tarihli, 29204 sayılı, "T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Zararlı Maddeler Ve Karışımlara İlişkin Güvenlik Bilgi Formları Hakkında Yönetmelik" hükümlerine uygun düzenlenmiştir

BÖLÜM 1: Maddenin/karışımın ve şirketin/değiricinin kimliği

1.1. Madde/Karışım kimliği

Ürün adı KORZAMOX ULTRA
Ürün numarası 192
Aktif Madde ve Oranı 40 gr/l İmazamox içerir. (RS)-2-(4-isopropyl-4-methyl-5-oxo-2-imidazolin-2-yl)-5-methoxymethylnicotinic acid

1.2. Madde veya karışımın belirlenmiş kullanımları ve tavsiye edilmeyen kullanımları

Belirlenmiş kullanımlar Herbisit (Yabancı ot ilacı)
Tavsiye edilmeyen kullanımlar Tavsiye edilmeyen özel kullanımları tanımlanmamıştır.

1.3. Güvenlik bilgi formu tedarikçisinin bilgileri

Tedarikçi KORUMA KLOR ALKALİ SAN. VE TİC. A.Ş.
Deniz Mah. Petrol Ofisi Cad. No:43
Posta Kodu:41900 Derince / KOCAELİ
Tel: 0(262) 239 22 70
E-posta : koruma@koruma.com.tr
web: koruma.com

Temas kişisi koruma@koruma.com.tr

1.4. Acil durum telefon numarası

Acil durum telefon numarası Koruma Tel : (0262)239 22 70
Ulusal acil durum telefonu Acil Sağlık Hizmetleri : 112 UZEM (Ulusal Zehir Danışma Merkezi) : 114

BÖLÜM 2: Zararlılık tanımlanması

2.1. Madde veya karışımın sınıflandırılması

Sınıflandırma T.C. 28848

Fiziksel zararlar Zararlı olarak sınıflandırılmamıştır.
Sağlık zararları Zararlı olarak sınıflandırılmamıştır.
Çevresel zararlar Sucul Kronik 2- H411

2.2. Etiket unsurları

Zararlılık ikareti



Kısım I
GÜVENLİK BİLGİ FORMU
KORZAMOX ULTRA

13 Aralık 2014 tarihli, 29204 sayılı, "T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Zararlı Maddeler Ve Karışımlara İlişkin Güvenlik Bilgi Formları Hakkında Yönetmelik" hükümlerine uygun düzenlenmiştir

Zararlılık İfadeleri	H411 Sucul ortamda uzun süre kalıcı, toksik etki.
Önem İfadeleri	P273 Çevreye verilmesinden kaçının. P391 Döküntüleri toplayın. P501 İçeriği/ kabı ulusal yönetmeliklere göre bertaraf edin.
İlave etiket bilgileri	EUH401 İnsan sağlığına ve çevreye yönelik riskleri önlemek için, kullanma talimatlarına uyun.

2.3. Diğer zararlar

Ürün, PBT veya vPvB olarak sınıflandırılan herhangi bir madde içermez.

BÖLÜM 3: Bileşim/içindekiler hakkında bilgi

3.2. Karışımlar

(RS)-2-(4-İsopropyl-4-methyl-5-oxo-2-imidazolin-2-yl)-5-methoxyymethylnicotinic acid	1-5%
CAS numarası: 114311-32-9	
M faktörü (akut) = 1	M faktörü (kronik) = 1
Sınıflandırma T.C. 28848	
Sucul Akut 1- H400	
Sucul Kronik 1- H410	
AMONYUM KARBONAT	1-5%
CAS numarası: 10361-29-2	EC numarası: 233-786-0
Sınıflandırma T.C. 28848	
Akut Tok. 4- H302	

Zararlılık ifadelerinin tam metni Bölüm16'da verilmiştir.

BÖLÜM 4: İlk yardım önlemleri

4.1. İlk yardım önlemlerinin açıklaması

Genel bilgi	Şüphe durumunda, derhal tıbbi yardım alın. Bu Güvenlik Bilgi Formunu sağlık personeline gösterin.
Soluma	Maruz kalan kişiyi temiz havaya çıkarın ve rahat nefes alabileceği bir pozisyonda sıcak tutun ve dinlendirin. Yaka, kravat veya kemer gibi giysinin sıkı bölümlerini gevşetin. Belirtiler ciddi veya kalıcı ise tıbbi yardım alın.
Yutma	Ağızı suyla iyice çalkalayın. Kendinizi iyi hissetmezseniz, tıbbi tavsiye/müdahale alınız. Sağlık personeli tarafından belirtilmedikçe kusturmaya çalışmayın.
Cilt teması	Su ile yıkayın.
Göz teması	Su ile yıkayın. Rahatsızlığın devam etmesi halinde tıbbi yardım alın.

Kısım I GÜVENLİK BİLGİ FORMU KORZAMOX ULTRA

13 Aralık 2014 tarihli, 29204 sayılı, "T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Zararlı Maddeler Ve Karışımlara İlişkin Güvenlik Bilgi Formları Hakkında Yönetmelik" hükümlerine uygun düzenlenmiştir

İlk yardım görevlilerinin korunması İlk yardım personeli, kurtarma sırasında uygun koruyucu ekipman giymelidir.

4.2. Akut ve sonradan görülen önemli belirtiler ve etidiler

Genel bilgi	Tanımlanan belirtilerin şiddeti maruziyetin konsantrasyonuna ve süresine bağlı olarak değişebilir.
Soluma	Bilinen spesifik semptomları bulunmamaktadır.
Yutma	Bilinen spesifik semptomları bulunmamaktadır.
Cilt teması	Bilinen spesifik semptomları bulunmamaktadır.
Göz teması	Bilinen spesifik semptomları bulunmamaktadır. Gözleri hafif bir şekilde tahriş edebilir.

4.3. Tıbbi müdahale ve özel tedavi gereği için ilk işaretler

Doktora verilecek bilgiler Semptomatik tedavi uygulayın.

BÖLÜM 5: Yangınla mücadele önlemleri

5.1. Yangın söndürücüler

Uygun söndürücü maddeler	Ürün alevlenir değildir. Alkole dirençli köpük, karbondioksit, kuru toz veya su sisi ile söndürün. Yangını çevrelemek için uygun bir yangın söndürme malzemesi kullanın.
Uygun olmayan söndürücü maddeler	Yangını dağıtma ihtimaline karşı, yangını söndürmek için su jeti kullanmayın.

5.2. Madde veya karışımdan kaynaklanan özel zararlar

Özel zararlar	Kaplar, içinde aşırı basınç oluşması nedeniyle ısıtıldığında şiddetli bir şekilde patlayabilir.
Zararlı yanma ürünleri	Termal bozunma veya yanma ürünleri aşağıdaki maddeleri içerebilir: Zararlı gazlar veya buharlar.

5.3. Yangın söndürme ekipleri için tavsiyeler

Yangın söndürme sırasında alınması gereken koruyucu önlemler	Yangın gazlarını veya buharlarını solumaktan kaçının. Alanı boşaltın. Isıya maruz kalmış kapları su spreyi ile soğutun ve herhangi bir risk bulunmuyorsa, bu kapları yangın alanından başka bir yere götürün. Alevlere maruz kalan kapları, yangın sönene kadar suyla soğutun. Sızıntı veya döküntü ateşlenmemişse, buharları su püskürterek dağıtın ve sızıntı yerini kapatmaya çalışan personeli koruyun. Sucul ortama dökülmesinden kaçının. Akan yangın söndürme suyunu, kanalizasyon ve su yollarına girişini sınırlayarak ve engelleyerek kontrol altına alın. Suyun kirlenme tehlikesi varsa, ilgili makamlara haber verin.
Yangın söndürme ekipleri için özel koruyucu ekipman	Pozitif basınçlı kendi kendine yeterli kapalı devre solunum aparatı ve uygun koruyucu giysi giyin. Avrupa standardı EN469'a uygun olan itfaiyeci kıyafetleri (kasklar, koruyucu botlar ve eldivenler dahil) kimyasal kazalar için temel seviyede bir koruma sağlayacaktır.

BÖLÜM 6: Kaza sonucu yayılmaya karşı önlemler

6.1. Kişisel önlemler, koruyucu donanım ve acil durum prosedürleri

Kişisel önlemler	Bu Güvenlik Bilgi Formunun 8. Bölümünde gösterilen şekilde koruyucu giysi giyin. Uygun eğitim olmadan veya kişisel tehlike içeren herhangi bir harekette bulunulmamalıdır.
-------------------------	--

Kısım I GÜVENLİK BİLGİ FORMU KORZAMOX ULTRA

13 Aralık 2014 tarihli, 29204 sayılı, "T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Zararlı Maddeler Ve Karışımlara İlişkin Güvenlik Bilgi Formları Hakkında Yönetmelik" hükümlerine uygun düzenlenmiştir

6.2. Çevresel önlemler

Çevresel önlemler

Kanalizasyona veya su kaynaklarına veya toprağa dökülmesinden kaçının. Sucul ortama dökülmesinden kaçının.

6.3. Muhafaza etme ve temizleme için yöntemler ve materyaller

Döküntü temizleme yöntemleri

Bu Güvenlik Bilgi Formunun 8. Bölümünde gösterilen şekilde koruyucu giysi giyin. Döküntüleri hemen temizleyin ve atıkları güvenli bertaraf edin. Ürün suda çözünür ise, döküntüyü suyla seyreltin ve emdirerek temizleyin. Alternatif olarak, suda-çözünür değilse, döküntüyü inert, kuru bir malzemeyle absorbe edin ve uygun bir atık bertaraf kabına koyun. Kirlenmiş emici madde, dökülen malzemede olduğu gibi benzer tehlikeleri ortaya çıkarabilir. Atık ve kirlenmiş maddeleri içeren kapları etiketleyin ve en kısa sürede alandan uzaklaştırın. Kirlenmiş alanı bol suyla yıkayın. Bir döküntüyle uğraştıktan sonra kendinizi iyice arındırın. Çevre için tehlikeli. Kanalizasyona boşaltmayın. Atıkların bertaraf edilmesi için 13. Bölüme bakın.

6.4. Diğer bölümlere atıflar

Diğer bölümlere atıflar

Kişisel korunma için 8. bölüme bakın. Sağlığa zararları hakkında ek bilgi için Bölüm 11'e bakın. Ekolojik tehlikeler hakkında ek bilgi için 12. Bölüme bakın. Atıkların bertaraf edilmesi için 13. Bölüme bakın.

BÖLÜM 7: Elleçleme ve depolama

7.1. Güvenli elleçleme için önlemler

Kullanım tedbirleri

Üreticinin önerilerini okuyun ve takip edin. Bu Güvenlik Bilgi Formunun 8. Bölümünde gösterilen şekilde koruyucu giysi giyin. Yiyeceklerden, içeceklerden ve hayvan yemlerinden uzak tutun. Dökülmeleri en aza indirmek için tüm ambalajları ve kapları dikkatlice elleçleyin. Kaplar kullanılmadığında sıkıca mühürlenmiş şekilde muhafaza edilmelidir. Sis oluşumundan kaçının. Sucul ortama dökülmesinden kaçının.

Genel meslekî hijyenle ilgili tavsiyeler

Cildin kirlenmesi halinde hemen yıkayın. Kirlenmiş giysilerinizi çıkarın ve yeniden kullanmadan önce yıkayın. Kirlenmiş giysilerinizi yeniden kullanmadan önce yıkayın.

7.2. Uyumsuzluktan da içeren güvenli depolama için koşullar

Depolama tedbirleri

Çocukların ulaşabileceği yerlerden uzak tutun. Yiyeceklerden, içeceklerden ve hayvan yemlerinden uzak tutun. Sadece orijinal kabında muhafaza edin. Kabı sıkıca kapalı halde, serin ve iyi havalandırılan bir ortamda muhafaza edin. Kapları dik bir şekilde tutun. Kapları hasardan koruyun.

Depolama sınıfı

Çeşitli tehlikeli maddelerin depolanması.

Raf ömrü

2 yıl

7.3. Belirli son kullanım(lar)

Belirli son kullanım(lar)

Bu ürün için tanımlanmış kullanımlar Bölüm 1.2'de ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

BÖLÜM 8: Maruz Kalma Kontrolleri/Kişisel korunma

8.1. Kontrol parametreleri

Meslekî maruziyet limitleri

Uygun bilgi yok.

Kısım I GÜVENLİK BİLGİ FORMU KORZAMOX ULTRA

13 Aralık 2014 tarihli, 29204 sayılı, "T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Zararlı Maddeler Ve Karışımlara İlişkin Güvenlik Bilgi Formları Hakkında Yönetmelik" hükümlerine uygun düzenlenmiştir

8.2. Maruz kalma kontrolleri

Koruyucu donanım



Uygun mühendislik kontrolleri

Yeterli havalandırma sağlayın.

Göz/Yüz korunması

Göz ile temasından sakının. Büyük Döküntüler: Risk değerlendirmesi gözlerle temas ihtimalini belirtiyorsa, onaylanmış bir standart ile uyumlu göz koruyucusu kullanılmalıdır.

Ellerin korunması

Eller için önerilen özel bir koruma bulunmamaktadır. Cilt ile temasından sakının.

Sağlık tedbirleri

Elleçlemeden sonra ellerinizi iyice yıkayın. Bu ürünü kullanırken hiçbir şey yemeyin, içmeyin veya sigara içmeyin. Kirlenmiş giysilerinizi yeniden kullanmadan önce yıkayın.

Solunum elsteminin korunması

Önerilen özel depolama tedbirleri yoktur. Yeterli havalandırma sağlayın. Büyük Döküntüler: Yetersiz havalandırma halinde, uygun solunum koruyucu kullanılmalıdır.

Çevresel maruz kalma kontrolleri

Kaplar kullanılmadığında sıkıca mühürlenmiş şekilde muhafaza edilmelidir. Çevreye verilmesinden kaçının.

BÖLÜM 9: Fiziksel ve Kimyasal Özellikler

9.1. Temel fiziksel ve kimyasal özellikler hakkında bilgi

Görünüm	Homojen, berrak sıvı
Renk	Renksizden koyu sarı-kahverengiye değişebilen renkte
Koku	Karakteristik.
pH	6 ±3
Parlama noktası	Uygulanamaz.
Çözünürlük (ler)	Su ile her oranda karıştırılabilir.
Özgül Ağırlık	1.075 ± 0.05 gr/cm3 (20°C):

9.2. Diğer bilgiler

BÖLÜM 10: Kararlılık ve tepkime

10.1. Tepkime

Tepkime

Bu ürünle ilgili, bilinen herhangi bir reaktif tehlike yoktur.

10.2. Kimyasal kararlılık

Kararlılık

Normal ortam sıcaklıklarında ve tavsiye edildiği gibi kullanıldığında kararlıdır. Öngörülen depolama şartları altında kararlıdır.

10.3. Zararlı tepkime olasılığı

Zararlı tepkime olasılığı

Bilinen herhangi bir muhtemel tehlikeli reaksiyon yoktur.

Kısım I GÜVENLİK BİLGİ FORMU KORZAMOX ULTRA

13 Aralık 2014 tarihli, 29204 sayılı, "T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Zararlı Maddeler Ve Karışımlara İlişkin Güvenlik Bilgi Formları Hakkında Yönetmelik" hükümlerine uygun düzenlenmiştir

10.4. Kaçınılması gereken durumlar

Kaçınılması gereken durumlar Tehlikeli bir şekilde sonuçlanabilmesi muhtemel, bilinen herhangi bir durum yoktur.

10.5. Kaçınılması gereken maddeler

Kaçınılması gereken maddeler Ürünle reaksiyonu halinde, tehlikeli bir durum oluşturması muhtemel özel bir madde veya madde grubu yoktur.

10.6. Zararlı bozunma ürünleri

Zararlı bozunma ürünleri Tavsiye edilen şartlara uygun olarak kullanıldığında ve depolandığında bozunma olmaz. Termal bozunma veya yanma ürünleri aşağıdaki maddeleri içerebilir: Zararlı gazlar veya buharlar.

BÖLÜM 11: Toksikolojik bilgiler

11.1. Toksik etkiler hakkında bilgi

Akut toksisite - oral

Notlar (oral LD₅₀) Mevcut verilere dayanarak sınıflandırma kriteri karşılanmaz.

ATE oral (mg/kg) 20.000,0

Akut toksisite - dermal

Notlar (dermal LD₅₀) Mevcut verilere dayanarak sınıflandırma kriteri karşılanmaz.

Akut toksisite - solunum

Notlar (solunum LC₅₀) Mevcut verilere dayanarak sınıflandırma kriteri karşılanmaz.

Cilt aşınması/tahriş

Hayvan verisi Mevcut verilere dayanarak sınıflandırma kriteri karşılanmaz.

Ciddi göz hasarı/tahriş

Ciddi göz hasarı/tahriş Mevcut verilere dayanarak sınıflandırma kriteri karşılanmaz.

Solunum yolları hassaslaşması

Solunum yolları hassaslaşması Mevcut verilere dayanarak sınıflandırma kriteri karşılanmaz.

Cilt hassaslaşması

Cilt hassaslaşması Mevcut verilere dayanarak sınıflandırma kriteri karşılanmaz.

Eşey hücre mutajenitesi

Genotoksikite - in vitro Mevcut verilere dayanarak sınıflandırma kriteri karşılanmaz.

Kanserojenite

Kanserojenite Mevcut verilere dayanarak sınıflandırma kriteri karşılanmaz.

IARC kanserojenite

Bileşenlerin hiçbirisi listelenmemiş veya muaf tutulmamıştır.

Örme sistemi toksisitesi

Örme sistemi toksisitesi-doğurganlık Mevcut verilere dayanarak sınıflandırma kriteri karşılanmaz.

Kısım I
GÜVENLİK BİLGİ FORMU
KORZAMOX ULTRA

13 Aralık 2014 tarihli, 29204 sayılı, "T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Zararlı Maddeler Ve Karışımlara İlişkin Güvenlik Bilgi Formları Hakkında Yönetmelik" hükümlerine uygun düzenlenmiştir

Örme sistemli toksisite-gelişimel	Mevcut verilere dayanarak sınıflandırma kriteri karşılanmaz.
Belirli hedef organ toksisite-tekrarlı maruz kalma	
BHOT- tek maruz kalma	Tek maruziyet sonrası, belirli hedef organ toksik madde olarak sınıflandırılmaz.
Belirli hedef organ toksisite-tekrarlı maruz kalma	
BHOT- tekrarlı maruz kalma	Tekrarlanan maruziyet sonrasında, özel hedef organ toksik madde olarak sınıflandırılmaz.
Aspirasyon zararı	
Aspirasyon zararı	Mevcut verilere dayanarak sınıflandırma kriteri karşılanmaz.
Genel bilgi	Tanımlanan belirtilerin şiddeti maruziyetin konsantrasyonuna ve süresine bağlı olarak değişebilir.
Solunum	Bilinen spesifik semptomları bulunmamaktadır.
Yutma	Bilinen spesifik semptomları bulunmamaktadır.
Cilt ile temas	Bilinen spesifik semptomları bulunmamaktadır.
Göz ile temas	Bilinen spesifik semptomları bulunmamaktadır.
Maruz kalma yolu	Yutma Solunum Cilt ve/veya göz teması.
Hedef organlar	Bilinen herhangi bir belirli hedef organ yoktur.
Bileşenler hakkında toksikolojik bilgi	

AMONYUM KARBONAT

Akut toksisite - oral	
ATE oral (mg/kg)	500,0

BÖLÜM 12: Ekolojik bilgiler

12.1. Toksikite

Toksikite	Sucul Kronik 2- H411 Sucul ortamda uzun süre kalıcı, toksik etki.
------------------	---

Bileşenler hakkında ekolojik bilgi

(RS)-2-(4-isopropyl-4-methyl-5-oxo-2-imidazolin-2-yl)-5-methoxy-N-methylnicotinic acid

Akut sucul toksisite	
L(E)C₅₀	0.1 < L(E)C ₅₀ ≤ 1
M faktörü (akut)	1
Kronik sucul toksisite	
M faktörü (kronik)	1

12.2. Kalıcılık ve bozunabilirlik

Kısım I GÜVENLİK BİLGİ FORMU KORZAMOX ULTRA

13 Aralık 2014 tarihli, 29204 sayılı, "T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Zararlı Maddeler Ve Karışımlara İlişkin Güvenlik Bilgi Formları Hakkında Yönetmelik" hükümlerine uygun düzenlenmiştir

Kalıcılık ve bozunabilirlik Ürünün bozunurluğu bilinmemektedir.

12.3. Biyobirikim potansiyeli

Biyobirikim potansiyeli Biyobirikim hakkında uygun veri yoktur.

12.4. Toprakta hareketlilik

Hareketlilik Uygun veri yoktur.

12.5. PBT ve vPvB değerlendirilmesinin sonuçları

PBT ve vPvB değerlendirilmesinin sonuçları Ürün, PBT veya vPvB olarak sınıflandırılan herhangi bir madde içermez.

12.6. Diğer olumsuz etkiler

Diğer olumsuz etkiler Bilinmiyor.

BÖLÜM 13: Bertaraf etme bilgileri

13.1. Atık işleme yöntemleri

Genel bilgi Atık oluşumu en aza indirilmeli veya mümkün olan her yerde atık oluşumundan kaçınılmalıdır. Mümkün olduğu yerlerde, ürünleri yeniden kullanın veya geri dönüştürün. Bu madde ve kabı güvenli bir biçimde bertaraf edilmelidir. Atıkların elleçlenmesi sırasında, ürünün elleçlenmesi için uygulanan güvenlik önlemleri dikkate alınmalıdır. Boşaltılmış kaplar elleçlenirken, iyice temizlenmesine ve yıkanmasına dikkat edilmelidir. Boş kaplar veya katmanlarında kalabilecek ürün kalıntıları, potansiyel olarak tehlike oluşturabilirler.

Atık işleme yöntemleri Atıkları, yerel Atık Bertaraf Mercilerinin gerekliliklerine uygun olarak, lisanslı bir atık bertaraf tesisinde bertaraf edin.

BÖLÜM 14: Taşımacılık bilgileri

Genel Sınırlı miktarda ambalajlama/sınırlı yük bilgileri için, bu bölümde gösterilen bilgileri kullanarak ilgili model dokümantasyona danışın.

14.1. UN numarası

UN No. (ADR/RID) 3082

UN No. (IMDG) 3082

UN No. (ICAO) 3082

UN No. (ADN) 3082

14.2. Uygun UN taşımacılık adı

Uygun sevkiyat adı (ADR/RID) ÇEVRE İÇİN ZARARLI MADDE SIVI B.B.B.(IMAZAMOX)

Uygun sevkiyat adı (IMDG) ÇEVRE İÇİN ZARARLI MADDE SIVI B.B.B.(IMAZAMOX)

Uygun sevkiyat adı (ICAO) ÇEVRE İÇİN ZARARLI MADDE SIVI B.B.B.(IMAZAMOX)

Uygun sevkiyat adı (ADN) ÇEVRE İÇİN ZARARLI MADDE SIVI B.B.B.(IMAZAMOX)

Kısım I
GÜVENLİK BİLGİ FORMU
KORZAMOX ULTRA

13 Aralık 2014 tarihli, 29204 sayılı, "T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Zararlı Maddeler Ve Karışımlara İlişkin Güvenlik Bilgi Formları Hakkında Yönetmelik" hükümlerine uygun düzenlenmiştir

14.3. Taşımacılık zararlılık sınıfı(ları)

ADR/RID sınıfı	9
ADR/RID sınıflandırma kodu	M6
ADR/RID etiketi	9
IMDG sınıfı	9
ICAO sınıfı/bölümü	9
ADN sınıfı	9

Sevkiyat etiketleri



14.4. Ambalajlama grubu

ADR/RID ambalajlama grubu	III
IMDG ambalajlama grubu	III
ADN ambalajlama grubu	III
ICAO ambalajlama grubu	III

14.5. Çevresel zararlar

Çevre açısından zararlı/deniz kirliliği



14.6. Kullanıcı için özel önlemler

Her zaman kapalı kaplarda dik ve güvenli biçimde taşıyın. Ürünü nakleden kişilerin, bir kaza veya dökülme durumunda ne yapacaklarını bildiklerinden emin olunuz.

EmS	F-A, S-F
ADR sevkiyat kategorisi	3
Acil durum aksiyon kodu	*3Z
Zararlılık Tanımlama Numarası (ADR/RID)	90
Tünel kısıtlama kodu	(E)

14.7. MARPOL 73/78 ek II ve IBC koduna göre dökme taşımacılık

MARPOL 73/78 Ek II ve IBC koduna göre dökme taşımacılık	Uygulanamaz.
---	--------------

Kısım I GÜVENLİK BİLGİ FORMU KORZAMOX ULTRA

13 Aralık 2014 tarihli, 29204 sayılı, "T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Zararlı Maddeler Ve Karışımlara İlişkin Güvenlik Bilgi Formları Hakkında Yönetmelik" hükümlerine uygun düzenlenmiştir

BÖLÜM 15: Mevzuat bilgileri

15.1. Madde veya karışıma özgü güvenlik, sağlık ve çevre mevzuatı

Ulusal yönetmelikler

T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, 12 Ağustos 2013 tarihli, 28733 sayılı, Kimyasal Maddelerle Çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik Önlemleri Hakkında Yönetmelik.
T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, 2 Temmuz 2013 tarihli, 28695 sayılı, Kişisel Koruyucu Donanımların İşyerlerinde Kullanılması Hakkında Yönetmelik.
T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, 30 Haziran 2012 tarihli, 6331 sayılı, İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu.
T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, 6 Ağustos 2013 tarihli, 28730 sayılı, Kanserojen ve Mutajen Maddelerle Çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik Önlemleri Hakkında Yönetmelik.
T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 11 Aralık 2013 tarihli, 28848 Sayılı, Maddelerin Ve Karışımların Sınıflandırılması, Etiketlenmesi Ve Ambalajlanması Hakkında Yönetmelik.
T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2 Nisan 2015 tarihli, 29314 sayılı, Atık Yönetimi Yönetmeliği.
T.C. Tarım ve Köyşleri Bakanlığı, 25 Mart 2011 tarihli, 27885 Sayılı, Bitki Koruma Ürünlerinin Sınıflandırılması, Ambalajlanması ve Etiketlenmesi Hakkında Yönetmelik.

AB mevzuatı

Kimyasalların Kaydı, Değerlendirilmesi, İzni ve Kısıtlanmasına ilişkin (REACH), 18 Aralık 2006 tarihli (EC) Avrupa Parlamentosu ve Konseyi'nin 1907/2006 sayılı Yönetmeliği (düzenlenmiş şekliyle).
(AB) 453/2010 sayılı ve 20 Mayıs 2010 tarihli Komisyon Yönetmeliği.
Maddelerin ve karışımların sınıflandırılması, etiketlenmesi ve ambalajlanması hakkında yönetmelik Çevre ve Şehircilik Bakanlığından 11 Aralık 2013 Resmî Gazete Sayı: 28848 (Mükerrer).

Kimyasal Güvenlik Değerlendirilmesi uygulaması yoktur.

BÖLÜM 16: Diğer bilgiler

11 Aralık 2013 tarihli ve 28848 Sayılı Kronik 2- H411: : Hesaplama yöntemi.
sayılı yönetmeliğe göre
sınıflandırma koşulları

Eğitime dair tavsiye

Üreticinin önerilerini okuyun ve takip edin.

Düzenleyen

Vildan OCAK - vildan.ocak@koruma.com.tr
GBF Yeterlilik Belge Tarihi ve Numarası: 01.06.2016/ GBF-A-0-2351

Yeni düzenleme tarihi

26.09.2016

Kaçınıcı düzenleme olduğu

01

Hazırlama tarihi

19.04.2012

GBF No

192

Zararlılık ifadelerinin tümü

H302 Yutulması halinde zararlıdır.
H400 Sucul ortamda çok toksiktir.
H410 Sucul ortamda uzun süre kalıcı, çok toksik etki.
H411 Sucul ortamda uzun süre kalıcı, toksik etki.

Kısım I
GÜVENLİK BİLGİ FORMU
KORZAMOX ULTRA

13 Aralık 2014 tarihli, 29204 sayılı, "T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Zararlı Maddeler Ve Karışımlara İlişkin Güvenlik Bilgi Formları Hakkında Yönetmelik" hükümlerine uygun düzenlenmiştir

Bu bilgi yalnızca belirli özgün bir maddeye ilişkindir ve aynı maddenin başka maddelerle birlikte kullanıldığı bir bileşimde veya herhangi bir proseste kullanılmamalıdır. Bu bilgi, firmanın üst düzeyde bilgisi ve kanaati dahilinde, belirtilen tarih itibariyle doğru ve güvenilir bilgidir. Yine de doğruluğu, güvenilirliği ve eksiksizliği yönünde hiçbir teminat garantisi veya beyanda bulunulamaz. Bu bilginin kendi kullanımına yönelik uygunluğu konusunda ikna olmak kullanıcının kendi sorumluluğudur.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ ESERLER

G. Projeler

1. Uluslararası Kitap Bölümü

Ekmekyapar F., Şahinci E. (2022) Innovative Agricultural Practices In Soil, Plant And Environment Chapter 3 *Agricultural and Environmental Effects of Biochar Applications* Ankara: ISBN: 978-625-8377-02-6

