

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AYÇİÇEK SAPINDAN SÜLFÜRİK ASİT KULLANILARAK BİYOKÖMÜR
ÜRETİMİ, KARAKTERİZASYONU VE SULU ÇÖZELTİLERDEN BAZI
MİKROKİRLETİCİLERİN GİDERİMİNDEKİ ETKİNLİĞİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Süleyman UZUN

Kimya Anabilim Dalı

Analitik Bilim Dalı

HAZİRAN 2025

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AYÇİÇEK SAPINDAN SÜLFÜRİK ASİT KULLANILARAK BİYOKÖMÜR
ÜRETİMİ, KARAKTERİZASYONU VE SULU ÇÖZELTİLERDEN BAZI
MİKROKİRLETİCİLERİN GİDERİMİNDEKİ ETKİNLİĞİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Süleyman UZUN

Kimya Anabilim Dalı

Analitik Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mustafa İMAMOĞLU

HAZİRAN 2025

Süleyman UZUN tarafından hazırlanan “AYÇİÇEK SAPINDAN SÜLFÜRİK ASİT KULLANILARAK BİYOKÖMÜR ÜRETİMİ, KARAKTERİZASYONU VE SULU ÇÖZELTİLERDEN BAZI MİKROKİRLETİCİLERİN GİDERİMİNDEKİ ETKİNLİĞİNİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması 13.06.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Anabilim Dalı Analitik Kimya Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :	Prof. Dr. Mustafa İMAMOĞLU (Danışman) Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Doç. Dr. Rabia KÖKLÜ Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Dr. Öğr. Üyesi Hülya DEMİRHAN Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi	



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “AYÇİÇEK SAPINDAN SÜLFÜRİK ASİT KULLANILARAK BİYOKÖMÜR ÜRETİMİ, KARAKTERİZASYONU VE SULU ÇÖZELTİLERDEN BAZI MİKROKİRLETİCİLERİN GİDERİMİNDEKİ ETKİNLİĞİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

28/05/2025

Süleyman UZUN



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca, bilgi ve emeğini esirgemeyen, yanında çalışmaktan onur duyduğum değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mustafa İMAMOĞLU'na,

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve tecrübelerini paylaşan Sakarya Üniversitesi Kimya Bölümünün saygıdeğer öğretim üyelerine,

Ayrıca bu çalışmayı Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü üzerinden BAPK-2024-26-62-4 nolu proje ile destekleyen Sakarya Üniversitesi'ne,

Hayatım boyunca yanımda olan ve bugünlere gelmemi sağlayan anneme, babama; çalışmam için beni şevklendiren, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen fedakar eşim Semra Uzun'a, çalışmam sırasında ve öncesinde beni cesaretlendiren, teknolojik konularda yardımcı olan çocuklarım Yakup Kaan ve Cemre'ye; çalışmamın tamamlanmasında emeği geçen dostlarıma sonsuz teşekkür ederim.

Süleyman UZUN



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SİMGELER	xiii
TABLO LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ VE ÇALIŞMANIN AMACI	3
2.1. Literatür Özeti	3
2.2. Çalışmanın Amacı	17
3. MATERYAL VE METOT	19
3.1. Kullanılan Cihazlar	19
3.2. Kullanılan Kimyasallar ve Çözeltiler	19
3.3. Ayçiçek Saplarından Biyokömürün Hazırlanması	19
3.4. Biyokömürün Karakterizasyonu	20
3.4.1. Kül tayini	20
3.4.2. Rutubet tayini	20
3.4.3. Suda Çözünübilirlik	21
3.4.4. Uçucu madde miktarı tayini	21
3.5. AYBK ile Cu(II) kesikli adsorpsiyon deneyleri	22
4. DENEYSEL BULGULAR	25
4.1. AYBK'nın karakterizasyonu	25
4.2. AYBK ile Cu(II) Adsorpsiyon Çalışmaları	29
4.2.1. AYBK ile Cu(II) Adsorpsiyonuna pH'nın etkisi	29
4.2.2. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonuna karıştırma süresinin etkisi	30
4.2.3. Cu(II) adsorpsiyonuna AYBK dozajının etkisi	31
4.2.4. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonuna başlangıç derişiminin etkisi	32
4.2.5. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonuna iyonik şiddetin etkisi	33
4.2.6. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonunun dengesinin incelenmesi	34
4.2.7. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyon kinetiğinin incelenmesi	37
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	41
KAYNAKLAR	45
ÖZGEÇMİŞ	49



KISALTMALAR

AAS	: Atomik absorpsiyon spektrometresi
AYBK	: Ayçiçeği saplarından sülfürik asit kullanılarak hazırlanan biyokömür
BET	: Brauner-Emmet-Teller
FAAS	: Alevli atomik absorpsiyon spektrometresi
FTIR	: Fourier dönüşümlü infrared spektroskopisi
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
XPS	: X-ışını fotoelektron spektroskopisi



SİMGELER

$^{\circ}\text{C}$	: Santigrat derece
b	: Langmuir izoterm sabiti
C_e	: Denge halinde çözeltide giderilmeden kalan Cu(II) miktarı (mg /L)
C_0	: Başlangıç durumunda çözeltideki Cu(II) derişimi (mg /L)
dk	: Dakika
g	: Gram
K_f	: Freundlich izoterm sabiti
L	: Litre
M	: Molarite
n	: Freundlich izoterm sabiti
mg	: Miligram
mL	: Mililitre
q_e	: Denge durumunda adsorplanan Cu(II) kütlesi (mg/g)
t_k	: Karıştırma süresi
V	: Adsorpsiyon prosesinin hacmi (L)
W	: AYBK kütlesi, g



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 4.1. AYBK'nın karakterizasyon sonuçları	25
Tablo 4.2. AYBK'nın EDS elementel analiz sonuçları.....	28
Tablo 4.3. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonuna sulu çözeltinin pH'sının etkisi	29
Tablo 4.4. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonuna karıştırma süresinin etkisi	30
Tablo 4.5. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonuna AYBK dozajının etkisi	31
Tablo 4.6. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonuna başlangıç derişiminin etkisi	32
Tablo 4.7. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonuna iyonik şiddetin etkisi.....	33
Tablo 4.8. AYBK ile Cu(II) giderimi için Langmuir ve Freundlich izoterm sabitleri	37
Tablo 4.9. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonu için yalancı birinci mertebeden ve yalancı ikinci mertebeden kinetik modellerin korelasyon katsayıları ile sabitleri	39
Tablo 5.1. AYBK'nın Cu(II) adsorpsiyon kapasitesi ile bazı adsorbanların kapasiteleri	43



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 4.1. AYBK'nın 100 kat büyütme ile alınan görüntüsü	26
Şekil 4.2. AYBK'nın 250 kat büyütme ile alınan görüntüsü	26
Şekil 4.3. AYBK'nın 500 kat büyütme ile alınan görüntüsü	27
Şekil 4.4. AYBK'nın 1000 kat büyütme ile alınan görüntüsü	27
Şekil 4.5. AYBK'nın EDS analiz spektrumu	28
Şekil 4.6. AYBK'nın FT-IR spektrumu	29
Şekil 4.6. Sulu çözeltinin pH'sı ile AYBK üzerinde Cu(II) adsorpsiyonun değişimi	30
Şekil 4.7. Karıştırma süresi ile AYBK üzerinde Cu(II) adsorpsiyonun değişimi	31
Şekil 4.8. AYBK dozajı ile adsorplanan Cu(II) miktarının ve Cu(II) giderim yüzdesinin değişimi	32
Şekil 4.9. Cu(II) başlangıç derişimi ile adsorplanan Cu(II) miktarının değişimi	33
Şekil 4.10. İyonik şiddet ile AYBK üzerinde adsorplanan Cu(II) miktarının değişimi	34
Şekil 4.11. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonunun deneysel olarak elde edilen izotermi	35
Şekil 4.12. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonunun lineer Langmuir izotermi	36
Şekil 4.13. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonunun lineer Freundlich izotermi	37
Şekil 4.14. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonu için yalancı birinci mertebeden grafiği .	38
Şekil 4.15. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonu için yalancı ikinci mertebeden grafiği...	39



AYÇİÇEK SAPINDAN SÜLFÜRİK ASİT KULLANILARAK BİYOKÖMÜR ÜRETİMİ, KARAKTERİZASYONU VE SULU ÇÖZELTİLERDEN BAZI MİKROKİRLETİCİLERİN GİDERMİNDEKİ ETKİNLİĞİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bakır elementi sulu çözeltilerde genellikle +2 yükseltgenme değerliğinde bulunmaktadır. Bakır (II) iyonları düşük derişimlerde insan sağlığı için zararlı olmamasına karşın yüksek derişimleri başta insan olmak üzere diğer canlılar için toksik özellik göstermektedir. Bakır (II) iyonlarını sulu çözeltilerden gidermek amacıyla sementasyon, adsorpsiyon, membran filtrasyonu, ultrafiltrasyon, elektokimyasal yöntemler ve fotokataliz gibi yöntemler kullanılmaktadır. Bunların arasında adsorpsiyon basit olarak uygulanabilirliği, maliyeti ve verimliği gibi nedenlerle öne çıkmaktadır. Bakır(II) iyonlarının sulu çözeltilerden giderilmesinde biyokömür kullanımı gittikçe önem kazanmaktadır.

Bu tez çalışmasında, ayçiçeği saplarından sülfürik asit kullanılarak oda sıcaklığında biyokömür (AYBK) hazırlandı. Üretilen biyokömür kısmi analizler ve FTIR ve SEM-EDS analizleri ile karakterize edildi. Ardından Cu(II) iyonlarının sulu çözeltilerden kesikli (batch) yöntem ile giderilmesi araştırıldı. Bu yöntemde etkili olan faktörler olan sulu fazın pH'sı, AYBK dozajı, Cu(II) başlangıç derişimi, ajitasyon süresi ayrı ayrı incelendi. Cu(II)'nin AYBK üzerinde adsorpsiyon denge verileri Langmuir ve Freundlich eşitliklerine uygulanarak incelendi.

AYBK'nın kısmi analiz sonuçlarına göre rutubeti % 10,6, uçucu madde miktarı % 35,3 ve kül miktarı % 9,3 olarak bulunmuştur. Diğer taraftan BET yüzey alanı ise 7,9 m²/g olarak bulunmuştur ki yapısının gözenekliliğinin çok küçük olduğunu göstermektedir. Bu bulgu SEM görüntüleri ile de doğrulanmaktadır. EDS analiz sonuçlarına göre AYBK'nın % 60,17 karbon ve % 35,48 oksijen içerdiği bulunmuştur. Ayrıca yapısında eser düzeyde inorganik safsızlıklar bulunduğu tespit edilmiştir. FTIR analizi sonucunda AYBK'nın yapısında fenolik ve asidik hidroksil gruplarının mevcudiyeti ortaya çıkmıştır. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyon deneylerinde en verimli pH değeri pH 5,0 ve adsorpsiyonun dengeye erişme süresi 300 dk. olarak bulunmuştur. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonunda Cu(II) başlangıç derişimin artması adsorplanan Cu(II) miktarının artmasına neden olmuştur. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyon dengesinin Langmuir izotermi ile uyumlu olduğu ve maksimum adsorpsiyon kapasitesinin 128,2 mg/g olduğu bulunmuştur. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyon kinetiği yalancı ikinci mertebeden kinetik model üzerinden yürüdüğü sonucuna varılmıştır. Ayçiçeği saplarından sülfürik asit kullanılarak üretilen AYBK'nın sulu çözeltilerden Cu(II) iyonlarını verimli bir şekilde giderebildiği sonucuna varılmıştır.



PRODUCTION OF BIOCHAR FROM SUNFLOWER STALK USING SULPHURIC ACID, ITS CHARACTERIZATION AND INVESTIGATION OF ITS EFFECTIVENESS IN REMOVAL OF SOME MICROPOLLUTANTS FROM AQUEOUS SOLUTIONS

SUMMARY

Industrial production plays a vital role in the development of human society, but the release of industrial wastes, especially heavy metal-polluted waters, into the environment and nature without treatment causes serious environmental pollution (Zhang et al. 2024). Heavy metals mainly refer to elements with relative atomic masses between 63.5 and 200.6, specific gravity greater than 5.0 and atomic density greater than 4.5 g/cm^{-3} (Liu et al. 2023). Copper is among the heavy metals widely used in the various industries, and as a result, Cu(II) is among the pollutants frequently encountered in industrial wastewaters.

Copper element is generally found in +2 oxidation state in aqueous solutions. Although copper (II) ions are not harmful to human health in low concentrations, Cu(II) is toxic to humans and other living organisms, in high concentrations.

In order to remove Cu(II) ions from aqueous solutions, various methods such as cementation, adsorption, membrane filtration, ultrafiltration, electrochemical methods and photocatalysis have been used (Ab Hamid et al., 2022). Among these, adsorption technique stands out due to its simple applicability, cost and efficiency (Ozer and İmamoglu, 2024).

In the adsorption method, various materials such as activated carbon, biochars (Chung et al., 2025), chelating resins (García-Elías et al., 2025), polymeric adsorbents (Rostami et al., 2024), zeolites (Lunardi et al., 2024) and fly ash (Munyengabe et al., 2024) have been used. Various biochars such as orthophosphoric acid modified biochar from coconut shell (Yadav et.al. 2024), calcium chloride modified Medulla Tetrapanacis biochar (Liu et.al. 2025), biochar obtained from bamboo bark (Nguyen et.al. 2024), biochar obtained from camel manure (Wilson et.al. 2024) biochar obtained from Gum Seyal (Babeker et.al. 2025), ammonia modified sawdust biochar (Eleryan et.al. 2024) biochar-sodium alginate composite (Salem et.al. 2025), Tieguanyin tea biochar (Zhang et.al. 2024), biochar obtained from mushroom compost (Madzin et.al. 2025) have been reported in the literature.

In this thesis study, biochar (AYBK) was prepared from sunflower stalks at room temperature using sulfuric acid. The produced biochar was characterized by partial analysis and FTIR and SEM-EDS analyses. Then, the removal of Cu(II) from aqueous solutions by batch method was investigated. The effective factors in this method such as pH of the aqueous phase, AYBK dosage, initial Cu(II) concentration, agitation time were investigated individually. The adsorption equilibrium data of Cu(II) on AYBK were investigated by applying Langmuir and Freundlich equations. In addition, the adsorption kinetics of Cu(II) on AYBK were investigated by using pseudo first and pseudo second order equations.

According to the partial analysis results of the produced adsorbent AYBK, its moisture content was found to be 10.6%, its volatile matter content was found to be 35.3 and its ash content was found to be 9.3%. On the other hand, the BET surface area was found to be 9 m²/g, which shows that the porosity of its structure is very small. This finding is also confirmed by SEM images. According to the EDS analysis results, it was found to contain 60.17% carbon and 35.48% oxygen. In addition, there are trace levels of inorganic impurities in its structure. As a result of FTIR analysis, the presence of phenolic and acidic hydroxyl groups in its structure was revealed.

In the adsorption studies of Cu(II) with AYBK, it was found that pH of the aqueous phase was very effective on the adsorption. For example, at pH 2.0, Cu(II) adsorption did not occur at all, and began to occur after pH 3.0. It reached its maximum level at pH 4.0 and 5.0. Higher pH values were not examined due to possible precipitation copper hydroxide species. It was also found that the mixing time was also effective on Cu(II) adsorption using AYBK, and it was found that a period of five hours was required for Cu(II) ions to reach and bind to the adsorption sites on the surface of AYBK. The effect of AYBK dosage on the Cu(II) adsorption, various amounts of AYBK were added to Cu(II) solutions at a concentration of 300 mg/L and pH 5.0 in 50 mL volume. The percentage of Cu(II) removed from the aqueous phase increased with the amount of AYBK added, as expected. However, since the amount of Cu(II) adsorbed is inversely proportional to the mass of AYBK, the amount of Cu(II) retained per gram of AYBK in milligrams decreased. The effect of the initial concentration on Cu(II) adsorption with AYBK was also investigated, and the increase in the initial concentration of Cu(II) caused the amount of Cu(II) retained per gram of AYBK in milligrams to increase. This is an expected event, because the analyte concentration is the driving force in adsorption process. The amount of adsorbed Cu(II) reaches a maximum level of 115.0 mg/g. After this point, increasing the initial concentration of Cu(II) adsorption does not cause any increase in Cu(II) adsorption. The effect of Cu(II) ionic strength on Cu(II) adsorption with AYBK was also investigated by adding sodium chloride to the aqueous phase at different concentrations, and the amount of adsorbed Cu(II) decreased from 115.0 mg/g to 85.0 mg/g as the NaCl concentration increased from zero to 0.1 M. The same value of 85.0 mg/g Cu(II) was found when the NaCl concentration increased to 1.0 M.

The Cu(II) adsorption equilibrium with AYBK was analyzed with Langmuir and Freundlich isotherms. The correlation coefficient of the Langmuir isotherm was found to be 0.9926, while that of the Freundlich isotherm was obtained as 0.9272. Accordingly, it was decided that Cu(II) adsorption with AYBK was compatible with the Langmuir isotherm. On the other hand, the maximum mono layer adsorption capacity of AYBK calculated with the Langmuir isotherm was found to be 128.2 mg/g. This value is also compatible with the experimentally obtained maximum adsorption capacity (127.5 mg/g). In the literature, the reported Cu(II) capacities were varied between 2.6 mg/g and 945.6 mg/g, many of them was in the range of 100 mg/g and 200 mg/g. When the Cu(II) adsorption capacity of AYBK adsorbent was compared with the others, it could be stated that it had a medium level Cu(II) capacity.

The adsorption kinetics of Cu(II) with AYBK was investigated by applying the pseudo-first-order kinetic model and pseudo-second-order kinetic model equations. When the experimental and model predicted q_e values were compared, it was seen that the q_e value predicted by the pseudo-first-order kinetic model (40.3 mg/g) was very far from the experimental q_e value (115.0 mg/g). The q_e value predicted by the pseudo-first-order kinetic model (116.3 mg/g) was found to be very near to the experimental

q_e value. On the other hand, the correlation coefficient of the pseudo-second-order kinetic model (0.9924) was much closer to unity than that of the other model. Therefore, it was concluded that the adsorption kinetics of Cu(II) with AYBK proceeded through the pseudo-second-order kinetic model.

As a result, it was concluded that the produced AYBK could efficiently remove Cu(II) ions from aqueous solutions.





1. GİRİŞ

Endüstriyel üretimler insan toplumunun gelişiminde hayati bir rol oynar, ancak endüstriyel atıkların, özellikle ağır metallere kirli suların arıtılmaksızın çevreye ve doğaya salınması ciddi çevre kirliliğine neden olmaktadır (Zhang ve ark. 2024). Ağır metaller esas olarak bağıl atom kütleleri 63,5 ile 200,6 arasında, özgül ağırlığı 5,0'dan büyük ve atom yoğunluğu $4,5 \text{ g/cm}^3$ 'den büyük olan elementleri ifade etmektedir (Liu ve ark. 2023). Ağır metaller arasında yer alan bakır endüstride yaygın olarak kullanılmakta ve bunun sonucunda da endüstriyel atık sularda sıklıkla karşılaşılan kirleticiler arasında almaktadır.

Bakır elementi sulu çözeltilerde genellikle +2 yükseltgenme değerliğinde bulunmaktadır. Bakır (II) iyonları düşük derişimlerde insan sağlığı için zararlı olmamasına karşın yüksek derişimleri başta insan olmak üzere diğer canlılar için toksik özellik göstermektedir.

Bakır (II) iyonlarını sulu çözeltilerden gidermek amacıyla sementasyon, adsorpsiyon, membran filtrasyonu, ultrafiltrasyon, elektokimyasal yöntemler ve fotokataliz gibi yöntemler kullanılmaktadır (Ab Hamid ve ark., 2022). Bunların arasında adsorpsiyon basit olarak uygulanabilirliği, maliyeti ve verimliği gibi nedenlerle öne çıkmaktadır (Özer ve İmamoğlu, 2024).

Adsorpsiyon yönteminde başta aktif karbon olmak üzere biyokömürler (Chung ve ark., 2025), şelat reçineleri (García-Elías ve ark., 2025), polimerik adsorbanlar (Rostami ve ark., 2024), zeolitler (Lunardi ve ark., 2024) ve uçucu kül (Munyengabe ve ark., 2024) gibi çeşitli materyaller kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında ayçiçeği saplarından sülfürik asit kullanılarak oda sıcaklığında biyokömür (AYBK) hazırlandı. Üretilen biyokömür kısmi analiz, FTIR ve SEM-EDS analizleri ile karakterize edildi. Ardından Cu(II) sulu çözeltilerinden kesikli (batch) yöntem ile giderilmesi araştırıldı. Bu metotta etkili olan faktörler olan sulu fazın pH'sı, biyokömür dozajı, Cu(II) başlangıç derişimi, ajitasyon süresi ayrı ayrı incelendi. Cu(II)'nin AYBK üzerinde adsorpsiyon denge verileri Langmuir ve Freundlich eşitliklerine uygulanarak incelendi. Ayrıca Cu(II)'nin AYBK üzerinde adsorpsiyon

kinetiği de sahte birinci ve sahte ikinci derece eşitlikler kullanılarak incelendi. AYBK'nin Cu(II) tutma kapasitesi literatürde verilen çeşitli adsorbanların kapasiteleri ile mukayese edildi.



2. LİTERATÜR ÖZETİ VE ÇALIŞMANIN AMACI

2.1. Literatür Özeti

Eleryan ve ark. (2024) tarafından yapılan çalışmada, talaş biyokömüründe fiziksel aktivasyonlar (sonikasyonla) ve kimyasal aktivasyonlar (amonyak) arasındaki fark, Cu(II) iyonlarının oda sıcaklığında, pH değeri 5,5-6,0 ve 200 rpm'de karıştırılarak talaş biyokömürü (SD), sonikasyon uygulanmış talaş biyokömürü (SSD) ve amonyak modifiyeli talaş biyokömürü (SDA) üzerine adsorpsiyon yoluyla sulu ortamdan uzaklaştırılması karşılaştırılarak incelenmiştir. Biyokömür, talaşın sülfürik asitle geri akışla dehidratasyonu ile hazırlanmış ve oluşan biyokömür fiziksel olarak sonikasyonla ve kimyasal olarak amonyak çözeltileriyle aktive edilmiş ve daha sonra Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR); Brunauer, Emmett ve Teller (BET); taramalı elektron mikroskopu (SEM); termal gravimetrik analiz (TGA); ve enerji dağılımlı spektroskopisi (EDX) analizleri ile karakterize edilmiştir. Cu(II) iyonlarının giderilmesi 100 mL numune hacmi ve başlangıç Cu(II) iyon konsantrasyonları (kons) 50, 75, 100, 125, 150, 175 ve 200 mg/L ve 100, 150, 200, 250 ve 300 mg biyokömür dozlarını içerir. Cu(II) iyonlarının maksimum giderim yüzdesi, 50 mg/L Cu(II) iyon başlangıç konsantrasyonu ve 1,0 g/L adsorban dozu için sırasıyla SD, SSD ve SDA biyokömleri için %95,56, %96,67 ve %98,33'tür. İzoterm modellerinden elde edilen verileri doğrulamak için korelasyon katsayısı (R^2) kullanılmıştır. Langmuir izoterm modeli, SD, SSD ve SDA'nın deneysel verilerine en iyi şekilde uymuştur. SD, SSD ve SDA'nın maksimum adsorpsiyon kapasiteleri sırasıyla 91,74, 112,36 ve 133,33 mg g⁻¹'dir. Doğrusal olmayan izoterm modelleri kullanılarak uyum derecesi Langmuir (LNR) (ideal uyum) > Freundlich (FRH) > Temkin (SD ve SSD) ve FRH (ideal uyum) > LNR > Temkin (SDA) dizisindeydi. LNR ve FRH, doğrusal olmayan izoterm modelleri kullanılarak elde edilen düşük χ^2 ve R^2 değerleri nedeniyle Cu(II) iyonlarının SD ve SSD ve SDA'ya biyosorpsiyonunu ideal olarak tanımlanmıştır. Adsorpsiyon hızı, sahte-ikinci mertebeden hız modelleriyle iyi bir şekilde uyumludur. Son olarak, amonyak çözeltileriyle kimyasal olarak modifiye edilmiş biyokömür (SDA), Cu(II) iyonlarının adsorpsiyon verimliliğini sonikasyonlarla (SSD) fiziksel aktivasyonlardan daha fazla artırdığı gözlenmiştir. Cu(II) iyonlarının SD, SSD ve SDA

biyokömürleri kullanılarak uzaklaştırılması için tepki yüzeyi metodolojisi (RSM) optimizasyon analizi incelenmiştir.

Zhang ve ark. (2024) tarafından yapılan çalışmada, Tieguanyin çay sapı ham madde olarak kullanılmış ve potasyum hidroksit (KOH), hidroklorik asit (HCl), potasyum ferrat ve diğer değiştiriciler, bakır(II) ve çinko(II)'nin rekabetçi adsorpsiyonu için üç modifiye edilmiş biyokömür (HCl-BC, KOH-BC, Fe-BC'ler) sentezlemek için kullanılmıştır. Bunlar arasında Fe-BC'ler en yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip olduğu rapor edilmiştir. Fe-BC650 (650 °C'de ısıtılan K_2FeO_4 modifiye edilmiş biyokömür), yüksek adsorpsiyon kapasitesiyle 1 dakikada adsorpsiyon dengesine ulaşabilirdi. Fe-BC650'nin tek ağır metal çözeltisindeki Cu(II) ve Zn(II) için maksimum adsorpsiyon kapasitesi sırasıyla 303.6 mg/g ve 254. 1 mg/g olarak rapor edilmiştir. Ancak, genişletilmiş Langmuir modeli ile analizden sonra Cu(II) ve Zn(II) arasında antagonistik etkiler vardı. Brunauer-Emmett-Teller (BET) sonuçları, Fe-BC650'nin özgül yüzey alanının ham biyokömürden (BC650) 245 kat daha fazla olduğunu ve demir türlerinin yüzeyde değil Fe-O bağı yoluyla biyokömürün gözeneklerinde bulunduğunu göstermiştir. Çözünmüş organik karbon sonuçları, demir türlerinin aromatik yapının oluşumunu desteklediğini ancak bileşimdeki aromatik türlerin bolluğunu azalttığını göstermiştir. Dahası, K_2FeO_4 , Cu(II) ve Zn(II) ile kation değişim reaksiyonlarına girebilen büyük miktarda K^+ sağladığı rapor edilmiştir. Ağır metaller flokülün çökelti haline geldi ve flokülasyon yoluyla santrifüj tüpünün tabanına çöktüğü rapor edilmiştir. Bu özellikler, Fe-BC650'nin mükemmel adsorpsiyon performansını oluşturduğu rapor edilmiştir.

Babeker ve ark. (2025) tarafından yapılan çalışmada, Gum Seyal biyokömürü (BC GS500) hazırlanmıştır. Adsorban, büyük yüzey alanı ve gözeneklilik gösterse de, zayıf bağlayıcı yüzey fonksiyonel grupları nedeniyle Cu(II) için adsorpsiyon kapasitesi nispeten düşük olduğu rapor edilmiştir. Bu çalışmada, Cu(II)'yi seçici ve etkili bir şekilde adsorbe edebilen şelatlayıcı madde amonyum pirolidin ditiyokarbamat ile yenilikçi bir modifikasyon gerçekleştirilmiştir. Gum Seyal biyokömürü, “sert ve yumuşak asitler ve bazlar teorisi”ne (HSAB) dayalı amonyum pirolidin ditiyokarbamat kullanılarak pirolidin ditiyokarbamat ($C_5H_8NS_2-$), amin ($-NH_2$) ve imin ($-NH$) gruplarıyla aşılmiştir. Karakterizasyon (FITR, XPS ve SEM-EDS), moleküler elektrostatik potansiyel (MEP) haritalaması ve yoğunluk fonksiyonel teorisi (DFT) hesaplamaları ile birlikte toplu çalışmalar, seçici adsorpsiyonlu Cu(II)

gideriminden sorumlu adsorpsiyon performansını ve mekanizmayı araştırmak için uygulanmıştır. Modifiye edilmiş biyokömür tarafından Cu(II) adsorpsiyonunun endotermik ve kendiliğinden gerçekleştiği bulundu. pH 5'teki adsorpsiyon verileri, psödo-ikinci dereceden kinetik model ve Langmuir izotermiyle (211,24 mg/g) eşleşmiştir. DFT hesaplamaları, modifiye edilmiş biyokömürün, benzersiz bir şelatlama mekanizması yoluyla Mg(II) ve Ca(II) gibi yaygın iyonlardan daha üstün Cu(II)'yi seçici olarak bağladığını göstermektedir. Gerçek elektrokaplama atık suyuındaki performansları incelenmiş ve üretim maliyeti tahmin edilmiş. Modifiye edilmiş biyokömürün (BC APDC), Cu (II) yüklü atık su arıtımı için yüksek uygulanabilir potansiyele sahip olabileceği sonucuna varılmıştır.

Yadav ve ark. (2024) tarafından yapılan çalışma, Hindistan cevizi (Cocos nucifera) kabuğundan elde edilen ortofosforik asitle modifiye edilmiş biyokömür kullanılarak sulu fazdan bakır iyonlarının adsorpsiyonu ile ilgilidir. Biyokömür özellikleri, artan yüzey alanı (24 kat) ve -OH, -N-H, -CH₂, C=O ve -C-N gibi fonksiyonel gruplara sahip gözenekli bir yapı göstermiştir. Temel işlem parametreleri optimize edildi ve maksimum giderme verimliliği dozda (0,4 g/L), sürede (60 dk), pH'da (6,0) ve başlangıç konsantrasyonunda (10 mg/L) elde edilmiştir. Adsorptif giderimi tahmin etmek için yapay sinir ağı (YSA) modellenmesi gerçekleştirildi. Optimize edilmiş koşullarda ANN modeli tarafından sağlanan ortalama mutlak hata (MAE), kök ortalama kare hatası (RMSE) ve korelasyon katsayısı (R^2) sırasıyla 2,63, 4,60 ve 0,91 olarak bulundu. Cu(II) adsorpsiyonunun davranışı, 4-2-1 topolojik düzenlemesine sahip ileri beslemeli bir ANN (geri yayılım) öğrenme algoritmasına dayanarak yakından tahmin edilmiştir. Denge verileri, 175,44 mg/g'lık maksimum tek tabaka adsorpsiyon kapasitesi ve $R^2 = 0,990$ olan Langmuir izoterminin en uygun model olduğunu göstermektedir. Kolayca elde edilebilen bir tarımsal atık olan Hindistan cevizi kabuğu, bu nedenle inorganik ve organik kirleticiler için ekonomik bir adsorbanın geliştirilmesinde düşük maliyetli bir öncül olarak verimli bir şekilde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Wang ve ark. (2024) tarafından yapılan çalışmada, farklı piroliz yöntemleri, parametreleri ve hammaddeleri, ağır metaller için farklı özelliklere, yapılara ve uzaklaştırma kapasitelerine sahip biyokömürler ile sonuçlandığı bildirilmiştir. Ancak, her bir özelliğin adsorpsiyon kapasitesi üzerindeki rolü ve buna karşılık gelen nedensel ilişkiler hala belirsizliğini koruduğu bildirilmiştir. Burada, biyokütle kaynaklarının ve

piroliz süreçlerinin biyokömür özellikleri ve ağır metal adsorpsiyon performansı üzerindeki etkilerini açıklığa kavuşturmak için üç farklı yöntem ve iki farklı hammadde ile üretilen biyokömürün çeşitli fizikokimyasal özelliklerini araştırılmıştır. Deneyisel sonuçlar, biyokömürlerin hidrotermal karbonizasyondan sonra daha aromatik olduğunu ve daha fazla fonksiyonel grup içerdiğini, anaerobik piroliz ile üretilen gözenekler ve daha yüksek yüzey alanları geliştirdiğini göstermiştir. Oksijenin dahil edilmesi daha eksiksiz karbonizasyon ve daha yüksek CEC biyokömürü ile sonuçlanmıştır. Farklı biyokömür özellikleri, farklı adsorpsiyon kapasiteleri ile sonuçlanmıştır. Aerobik kalsinasyon ile üretilen biyokömür, Cu ve Pb için daha yüksek adsorpsiyon verimliliği göstermiştir. Korelasyon analizi, pH, katyon değişim kapasitesi ve karbonizasyon derecesinin adsorpsiyonu olumlu yönde etkilediğini, organik madde içeriği ve aromatikliğin ise adsorpsiyon için elverişsiz olduğunu göstermiştir. Mikro yapı ve bileşenler, biyokömürün makroskobik özelliklerini ve metal iyonları için nihai adsorpsiyon verimliliğini belirlediği bildirilmiştir. Bu çalışma, her bir özelliğin adsorpsiyondaki korelasyon derecesini ve yollarını tanımlayarak, ağır metal giderimindeki performansını artırmak için biyokömürün hedefli modifikasyonuna rehberlik sağladığı rapor edilmiştir.

Liu ve ark. (2025) tarafından yapılan çalışmada, yüksek performanslı kalsiyum klorür modifiye edilmiş Medulla Tetrapanacis bazlı biyokömür (MBC), basit emdirme işlemi ve tüp fırın karbonizasyonu ile hazırlanmıştır. Sorpsiyon deneylerinin sonuçları, 900 °C'de elde edilen MBC'nin (MBC3) belirli koşullar altında (0,2 g/L'de pH = 6) en yüksek sorpsiyona sahip olduğunu doğrulamıştır. MBC3, sahte-ikinci derece kinetik modeline ve Langmuir modeline ($R^2 = 0,996; 0,947$) en yüksek uyumu göstermiştir. Uygulanan MBC3, değiştirilmemiş biyokömürün (BC) adsorpsiyonundan 2,25 kat daha yüksek olan 945,6 mg/g'lık maksimum Cu(II) adsorpsiyonunu elde etmiştir. Çökelme, iyon değişimi ve yüzey kompleksleşmesi dahil olmak üzere çoklu mekanizmaların MBC3'ün mükemmel sorpsiyon özellikleriyle ilişkili olduğu kanıtlanmıştır. Zenginleştirilmiş Cu'nun potansiyel tehlikeleri göz önünde bulundurulduğunda, MBC3, kolay bir hidrotermal yöntemle (180 °C, 24 saat) sorpsiyondan sonra süperkapasitör elektrotları hazırlamak için ReBC/Cu olarak yeniden kullanılmıştır. Adsorplanan Cu elementlerinin ReBC/Cu'da esas olarak oksitler olarak yüklendiği bulunmuştur. ReBC/Cu elektrodunun 0,5 A/g'de 142,5 F/g'lık bir özgül kapasitans gösterdiği hesaplanmıştır; bu, kullanılmayan saf biyokömüre

kıyasla %49,01'lik bir iyileştirme olduğu rapor edilmiştir. Bu çalışma, biyokömür bazlı adsorpsiyonu süperkapasitör elektrotlarının hazırlanmasıyla birleştirilerek yalnızca sudan verimli bir şekilde bakır giderimi sağlamakla kalmayıp aynı zamanda bakır açısından zengin atık adsorbanların son işlemi için de umut verici bir seçenek sunduğu bildirilmiştir.

Wilson ve ark. (2024) tarafından yapılan çalışmada, deve gübresinden elde edilen biyokömürün kullanımıyla sulu çözeltilerdeki ağır metal iyonu kirliliğinin kritik sorununu ele almak için yenilikçi bir yaklaşımı araştırılmaktadır. Küresel çevresel endişeler ve ağır metal kirliliğinin ekosistemler ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri bağlamında, araştırma endüstriyel faaliyetlerden kaynaklanan en yaygın kirleticiler arasında yer alan bakır(II) ve krom(III) iyonlarına odaklanmaktadır. Araştırma, deve gübresinden elde edilen biyokömürün bakır(II) ve krom(III) iyonlarının giderilmesi için olağanüstü bir potansiyel sergilediğini, %90'ın üzerinde giderme verimliliği ve sırasıyla 23,20 ve 23,36 mg/g adsorpsiyon kapasiteleri gösterdiğini ortaya koymuştur. Adsorpsiyon süreçleri ikinci dereceden kinetiği takip etmiş ve veriler hem Langmuir hem de Freundlich adsorpsiyon modellerine uymuştur. Bu adsorpsiyon olgusunu yöneten temel mekanizmalar kompleksleşme reaksiyonları, kation değişimi ve kation- π etkileşimlerine dayanıyor gibi görünüyor ve biyokömür ile ağır metal iyonları arasındaki etkileşimlerin çok yönlü doğasını vurgulamaktadır. Bu araştırma sadece su arıtımı için sürdürülebilir malzemeler anlayışımızı ilerletmekle kalmamış, aynı zamanda deve gübresinin çevresel iyileştirme için değerli bir kaynak olarak yeterince kullanılmayan potansiyelini de değerlendirerek küresel su kirliliği zorluklarını ele almak için umut verici bir yol sunmuştur.

Nguyen ve ark. (2024) tarafından yapılan çalışmada, Tayvan'da tarım arazileri, esas olarak sulama suyu ve sulama kanallarındaki tortulardan kaynaklanan metallerle kirlendiği belirtilmiştir. Bu çalışma, bakırla kirlenmiş sulama suyunun arıtımı ve toprak iyileştirmesi için su bambu (*Zizania latifolia*) kabuğundan elde edilen biyokömür (WBC) kullanma potansiyelini araştırmaktadır. 600 °C'de üretilen WBC için BET-SSA 192 m²/g ve gözenek hacmi 0,174 cc/g'dir. WBC'nin FTIR spektrumu, biyokömür alkalinitesine katkıda bulunabilen fosfat, karboksilat (-COO) veya aromatik (C=C) gibi çeşitli fonksiyonel gruplar sergilemiştir. WBC'nin sıfır yük noktası (pH_{PZC}) 2,7 olarak belirlenmiştir. WBC tarafından bakırın optimum adsorpsiyonu pH 5,0'te gerçekleşmiştir. WBC tarafından bakır adsorpsiyonu,

kemisorpsiyon ve tek tabaka adsorpsiyonunun bakır giderimi için baskın mekanizmalar olduğunu gösteren sahte-ikinci derece kinetik model ve Langmuir izotermiyle iyi uyum sağlamıştır. WBC'nin maksimum Cu(II) adsorpsiyon kapasitesi 144,9 mg/g olup ve bu, mevcut birçok rapordan çok daha yüksektir. %1 ila %5 (ağırlık/ağırlık) WBC eklenmesi, asidik toprak pH'ını etkili bir şekilde nötralize ederek onu su bambusu yetiştiriciliği için uygun hale getirdiği belirtilmiştir.

Salem ve ark. (2025) tarafından yapılan çalışmada, yeni bir biyokömür-sodyum aljinat kompoziti (SA/Si-BC) hazırlamak için basit ve uygun maliyetli bir teknik, çözeltisinden bakır iyonlarını (Cu(II)) çıkarmak için bir girişimde bulunulmuştur. Hazırlanan adsorban kompoziti yapısını doğrulamak için analiz etmek için X-ışını kırınımı (XRD), Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrumları (FTIR), Taramalı elektron mikroskobu (SEM); Enerji dağılımlı X-ışını (EDX), Dinamik Işık Saçılması (DLS) ve Zeta potansiyeli gibi birden fazla analiz aracı kullanılmıştır. Adsorpsiyon çalışmaları (örneğin temas süresi, başlangıç konsantrasyonu, adsorban dozajı, sıcaklık ve pH) çeşitli doğrusal olmayan izoterm ve kinetik modellerin yanı sıra araştırılmıştır. Sonuçlar, bakır iyonlarının en büyük adsorpsiyonunun (%99,55) pH 4,0 ve 100 mg/L'de, 120 dakikalık adsorpsiyon reaksiyon süresinde 0,1 g dozda elde edildiğini göstermektedir. Optimum sorpsiyon koşullarında, hazırlanan adsorban Langmuir modeline göre 47,469 mg/g'lik bir sorpsiyon kapasitesine sahiptir. Doğrusal olmayan adsorpsiyon izoterm sonuçları, Sips izoterm modelinin R^2 'ye ve hata analiz fonksiyonuna göre bakır (II) iyonlarının giderilmesine en iyi şekilde uyduğunu doğrulamıştır. Doğrusal olmayan kinetik veriler ve hata analizi çalışmaları, adsorpsiyon sürecinin doğrusal olmayan bir Avarmi kinetik modelini izlediğini kanıtlamaktadır. Termodinamik sınırlamalar da araştırılmış ve sonuçlar Cu(II) adsorpsiyonunun ekzotermik, kendiliğinden ve fiziksel olduğunu göstermektedir. Hazırlanan kompozitin Cu(II)'ye yönelik giderim verimliliği (%S), birkaç döngüden sonra bile daha yüksek kalmakta olduğu bulunmuştur. Ek olarak, sonuçlar üretilen uygun maliyetli ve zararsız kompozitin rafinat çözeltisinden Cu(II)'yi gidermede daha yüksek verimlilikle operasyonel adsorpsiyon davranışına sahip olduğunu göstermiş ve bu, gerçek proses atık suyunu arıtmak için güvenilir, ucuz ve etkili bir yol olabileceğini düşündürmektedir.

Madzin ve ark. (2025) tarafından yapılan çalışmaya göre, aşırı nüfus ve kentleşme su krizlerine yol açmış ve terk edilmiş maden suyu bazı ülkeler için alternatif su kaynağı

haline gelmiştir. Bu çalışma, maliyet etkin ve yerel olarak bol miktarda bulunan bir biyokütle kaynağı olan kullanılmış mantar kompostundan (SMC) elde edilen biyokömürün, terk edilmiş maden suyunda yaygın olarak bulunan belirli ağır metalleri (bakır - Cu, manganez - Mn, demir - Fe ve kurşun - Pb) giderme potansiyelini optimize etmektedir. SMC, farklı sıcaklıklarda (300 °C, 500 °C ve 700 °C) biyokömüre pirolize edilmiştir. Farklı piroliz sıcaklıklarında hazırlanan SMC biyokömürünün özelliklerini değerlendirmek için ön karakterizasyon ve derinlemesine parti çalışmaları yürütülmüştür. Sonuçlar, SMC biyokömürünün piroliz sıcaklığına bağlı olarak değişen performansla ağır metalleri etkili bir şekilde giderdiğini göstermektedir. En yüksek giderim Cu (2,573 mg/g), Mn (1,522 mg/g) ve Pb (2,491 mg/g) için 500 °C'de meydana gelmiştir. Toplu çalışmalar, adsorpsiyon performansının pH, piroliz sıcaklığı ve başlangıç metal konsantrasyonuna bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Langmuir ve psödo-ikinci derece modeller iyi uyum sağlamış ($R^2 > 0,99$), kation değişimi, elektrostatik etkileşimler ve π -kompleksleşme mekanizmaları tarafından yönlendirilen tek tabakalı adsorpsiyonu doğrulamıştır. Bu bulgular, SMC biyokömürünün ağır metal giderimi için aktif karbona çevre dostu bir alternatif olarak uygunluğunu vurgulamaktadır. Bu araştırma, maden suyu arıtımında biyokömür uygulamalarını ilerletmekte, sürdürülebilir kalkınmaya ve su kaynakları yönetimine katkıda bulunmakta olduğu rapor edilmiştir.

Ayçiçek saplarından biyokömür ve aktif karbon üretimi ile ilgili literatür araştırması yapılmış ve çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Kluska ve ark. (2024) tarafından yapılan çalışmada, ayçiçeği kabuğu peletleri ve ayçiçeği sünger sapı peletleri de dahil olmak üzere biyokütle atıklarının 450 ve 550 °C'lik karbonizasyon sıcaklıklarında karbonizasyonu yapılmıştır. Bu çalışmalar, barbekü kömürü hazırlanmasında kullanılan odun kaynaklarındaki azalmalar ve toprak katkı maddeleri açısından tarımsal faydalar nedeniyle önemlidir. Enerji dengesi açısından, elde edilen piroliz ototermal süreci garanti etmekte olduğu bildirilmiştir. Sabit yatağın ısıtma özellikleri, yığın yoğunluğundaki fark nedeniyle ayçiçeği kabuğu peletlerinin yatak sıcaklığının 110 dakikada 450 °C'ye ulaştığını, ayçiçeği sapı süngerinin yatak sıcaklığının ise 200 dakikada aynı sıcaklığa ulaştığını göstermiştir. Ayrıca, ayçiçeği kabuğu karbonizasyonu için kullanılan enerji 450 °C'de 2,9 kWh'den 550 °C'de 3,3 kWh'ye yükselirken, ayçiçeği sapı süngerinin 3,5'ten 3,9 kWh'ye yükselmiştir. TGA kullanılarak değerlendirilen yanma özellikleri, ayçiçeği kabuğunun

karbonizasyonunun ayçiçeği sapı süngerinden elde edilen biyokömüre göre daha yüksek yanma aktivitesine sahip biyokömür elde edilmesine yol açtığını göstermiştir. DeneySEL sonuçlara göre, ayçiçeği kabuğu peletlerinden elde edilen biyokömür, ayçiçeği sapı süngeri peletlerinden elde edilen biyokömüre göre daha yüksek su içeriği kapasitesine ve su emilim oranına sahip olduğu rapor edilmiştir.

Sun ve ark. (2019) tarafından yapılan çalışmada, ayçiçeği sapından elde edilen biyokömürler (BC), çeşitli sıcaklıklarda (yani, 500, 650 ve 1000 °C) hazırlanmış ve 60 °C'de p-nitrofenolün (PNP) oksidasyonu için persülfat (PS) aktivasyonunda oldukça etkili bir katalizör olarak gösterilmiştir. PS sistemi içeren BC500 (0,1543 L/mol.S), BC650 (0,6062 L/mol.S) veya BC1000'deki (2,1379 L/mol.S) görünen PNP oksidasyon hız sabiti, PS/PNP (0,0751 L/mol.S) sistemine göre sırasıyla yaklaşık 2, 8 ve 28 kat daha yüksek bulunmuş. Reaksiyon sıcaklığının PNP oksidasyonu üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Ayrıca, radikal söndürme testleri ve elektron paramagnetik rezonans spektroskopisi (EPR), PNP oksidasyonu için sülfat ve hidroksil radikallerini araştırmak için kullanılmıştır. Raman sonuçları, biyokömürlerdeki kusurlu bölgelerin PS sisteminde PNP'nin oksidasyonu için hayati bir role sahip olduğunu göstermiştir. PS/BC'nin olası aktivasyon yolu, BC'deki kusurlu bölgelerin PS'deki O–O bağına zayıflatmak ve daha sonra sülfat radikali üretmek için ısıyla O–O bağına kesmekle ilgili olduğu önerilmiştir. Düşük konsantrasyonda (100 µg/L'in altında) PNP'nin oksidasyonu, PS/BC sistemi tarafından kentsel atıksuda 30 dakika içinde tamamen giderilmiştir. Bu çalışma, BC katalizörü tarafından PS aktivasyonuna yeni bakış açıları sağlayacak ve yüksek sıcaklıktaki atık suda organik kirleticilerin giderilmesi için umut verici bir yöntem sunacağı ifade edilmiştir.

Feng ve ark. (2023) tarafından yapılan çalışmaya göre, biyokütleden türetilen güneş enerjili su buharlaştırıcısı esas olarak doğal yapısına bağlıdır. Ayçiçeği sapı, iç dokuları korumaktan, taşımaktan ve depolama maddesinden sorumlu olan en dıştaki dermal doku, damar dokusu ve öz dokusundan oluştuğu bildirilmiştir. Karbonize ayçiçeği saplarına dayalı üç buharlaştırıcı tipi, kalan, bir kısmını veya tamamını gövde özünün çıkarılmasıyla imal edilmiş ve buna göre karbonize ayçiçeği sapı (CSS), merkezsiz karbonize ayçiçeği sapı (C-CSS) ve içi boş karbonize ayçiçeği sapı (H-CSS) olarak adlandırılmıştır. Buharlaşma performansları ve su taşıma davranışları ayrıntılı olarak incelenmiştir. Buharlaşma hızı ve enerji dönüşüm verimliliği sonuçlarına göre, optimum karbonizasyon sıcaklığı 700 °C'dir ve optimum yükseklik CSS için 16 cm,

C-CSS ve H-CSS için 6,0 cm'dir. Tek bir güneş ışınımı altında, CSS en hızlı su buharlaşma oranını (11,62 kg/m².h) ve en iyi enerji dönüşüm verimliliğini (%344,69) göstermektedir; bu, önceki biyokütle tabanlı buharlaştırıcılardan daha iyidir. Aynı yükseklikteki (6,0 cm) bu buharlaştırıcıları karşılaştırdığımızda, H-CSS en hızlı su buharlaştırıcı oranını (8,65 kg/m².h) ve en iyi enerji dönüşüm verimliliğini (%252,93) göstermektedir; bu da CSS'ye kıyasla %49,13'lük bir iyileştirme anlamına geldiği ifade edilmiştir. Kızılötesi termal görüntüleyici aracılığıyla bu buharlaştırıcılar içindeki su dönüşümü fenomenini inceleyerek geliştirilmiş buharlaşma fenomenini doğrulamışlardır. Önerilen su buharlaştırıcıları sırasıyla yüksek konsantrasyonlu tuzlu su, deniz suyu, organik su ve asit/alkali atık su için potansiyel uygulamayı göstermektedir. Bu çalışma, biyokütle tabanlı güneş enerjili su buharlaştırıcısının tasarımı ve üretimi için tam bir değerlendirme sunduğu ifade edilmiştir.

Pfister ve ark. (2023) tarafından yapılan çalışmada, küresel enerji talebindeki artışla birlikte biyoenerjiye olan ihtiyaç da artmakta olduğu, biyoenerji hammaddesi üretimi için sürdürülebilir toprak ve gübre yönetimi uygulamaları önem kazandığı ifade edilmiştir. Bu sera çalışmasında, biyokömür ve gübre azotunun toprak ve enerji mahsulü ayçiçeği (*Helianthus annuus* L. var. *Giganteus*) üzerindeki etkilerini değerlendirilmiştir. Ayçiçeği bitkileri üç oranda biyokömür, üç oranda gübre, önerilen azot dozunun %0 (kontrol), %50 (düşük) ve %100 (yüksek) oranlarıyla muamele edilmiştir. Bitki boyu, kalitesi (klorofil içeriği), biyokütle verimi, hammadde enerjisi, kül içeriği ve doku besinleri, toprak nemi ve pH ile birlikte ölçülmüştür. Sonuçlar, düşük biyokömür altında kontrol biyokömürü ile muamele edilen bitkilere kıyasla ortalama bitki boyunda %11'lik bir artış olduğunu göstermiştir. Yüksek azot uygulaması, kontrol azot uygulamasına kıyasla sırasıyla %26 ve %18 daha fazla sap ve toplam yer üstü bitki (tüm bitki) biyokütlesi üretmiştir. Yüksek biyokömür uygulaması, kontrol biyokömür uygulamasına kıyasla daha yüksek toprak nemi tutma, ancak daha düşük toprak pH'ı ile sonuçlanmıştır. Bitki kalitesi, enerji ve kül içerikleri, biyokömür veya azot tarafından etkilenmediği bulunmuştur. Bitki doku analizi, daha önce yapılmamış olan ayçiçeği çeşidi *Giganteus*'ta eksiksiz bir doku makro ve mikro besin bilgisi sağladığı rapor edilmiştir.

Sert 2025, ayçiçeği sapı selülozundan elde edilen yenilikçi biyokömürlerin üretimini, karakterizasyonunu ve katalitik performansını araştırarak, bunların yeşil kimya uygulamalarında sürdürülebilir katalizörler olarak potansiyellerini vurgulamıştır.

Biyokömürler, sırasıyla SSB1, SSB2 ve SSB3 olarak etiketlenen numuneler elde edilerek 450, 550 ve 650 santigrat derecede piroliz yoluyla üretilmiştir. Gliserol ve dimetil karbonatın (DMC) transesterifikasyonu yoluyla gliserol karbonat üretimi, bu biyokömürlerin katalitik etkinliğini değerlendirmek için bir model reaksiyon olarak seçilmiştir. Bu yaklaşım, biyokütle atığının ve fazla gliserolün etkili bir şekilde kullanılmasını ele alırken, dairesel ekonomiye katkıda bulunarak yeşil kimya ilkeleriyle uyumludur. FTIR, XRD, TGA, azot adsorpsiyonu ve SEM-EDX analizleri kullanılarak yapılan karakterizasyon, piroliz sıcaklığının verim, pH, yüzey alanı ve mineral içeriği dahil olmak üzere biyokömürlerin fizikokimyasal özellikleri üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu ortaya koymuştur. Daha yüksek piroliz sıcaklıkları, katalitik performansı artıran artan gözenekliliğe, yüzey alanına ve mineral içeriğine yol açtığı bildirilmiştir. Optimize edilmiş koşullar altında, SSB1, SSB2 ve SSB3'ün katalitik aktivitesi 110 santigrat derece reaksiyon sıcaklığında, %5 ağırlıkça katalizör yüklemesinde, 20 dakikalık reaksiyon süresinde ve 5:1 DMC-gliserol molar oranında değerlendirilmiştir. Biyokömürler arasında SSB3, %65,3'lük bir gliserol dönüşüm oranı ve %53,4'lük bir gliserol karbonat seçiciliği elde ederek en yüksek katalitik aktiviteyi gösterdiği bulunmuştur. Bu makale, yapı-performans ilişkisini birbirine bağlayarak, biyokömürleri heterojen proseslerde etkili katalizörler olarak kullanmanın yenilikçiliğini ve mantığını vurgulamaktadır. Bulgular, ayçiçeği sapı kalıntılarından elde edilen biyokömürlerin geleneksel katalizörlere sürdürülebilir alternatifler olarak potansiyelini ortaya koyarak, çevre dostu kimyasal prosesler için işlevsel malzemelerin geliştirilmesine ilişkin değerli bilgiler sunduğu ifade edilmiştir.

Rajput 2025, seçilmiş karbonca zengin (diyar ağacı, talaş, pamuk sapı, ayçiçeği samanı ve muz sapı) ve besince zengin (yumurta kabuğu, tavuk kemiği, tavuk gübresi ve kanalizasyon çamuru) biyokütle kalıntılarından 1 saat boyunca 600 °C'de yavaş piroliz yoluyla geliştirilmiş P ve K geri kazanımı ile tasarlanmış biyokömürler üretilmiştir. Her iki kategorideki hammaddelerin ayrı pirolizi ve seçilmiş karbonca zengin ve besince zengin hammaddelerin 3:1 oranında karıştırılmasıyla eş pirolizi gerçekleştirilmiştir. Kanalizasyon çamuru ve ayçiçeği sapının eş pirolizinde, ayrı pirolizlerinin ortalamasına (%38,5) kıyasla daha yüksek biyokömür verimi (%41) elde edilmiştir. Besin değeri yüksek ve seçilmiş karbonca zengin hammaddelerin ayrı pirolizlerine kıyasla eş pirolizi yoluyla biyokömürde artan K geri kazanımı (%5,3 ila %19,5) ve artan P geri kazanımı (%1,8 ila %25,5) elde edilmiştir. Tavuk kemiği ve

kanalizasyon çamuru, muz sapı veya ayçiçeği sapı gibi karbon açısından zengin biyokütlelerle eş pirolizi yoluyla gelişmiş P ve K geri kazanımı için ideal hammaddeler olabileceği ifade edilmiştir.

Gradinaru 2020, inşaat endüstrisi küresel ekonomide çok büyük bir alan olduğunu ve birçok farklı yönüyle çevre üzerinde birçok sonucu olduğunu belirtmiştir. Bu sonuçlar, inşaatın giderek daha geniş bir alana yayılmasından, malzeme üretimi ve nakliyesi, inşaat süreci, binaların işletilmesi ve son olarak yıkımı sırasında salınan gaz emisyonlarına kadar çeşitli olduğunu ifade etmiştir. Tüm dünyada inşaat endüstrisinde en çok kullanılan malzeme olan beton, her geçen gün daha da yeşil hale gelmesi gerektiğini ifade etmiştir. Beton bileşimine doğal ve yenilenebilir hammaddelerin dahil edilmesi, daha az tükenen mineral kaynağı kullanarak ve atmosfere salınan gaz emisyonlarını azaltarak daha sağlıklı bir çevreyi sürdüren ekolojik bir beton geliştirmenin bir çeşidi olduğunu ifade etmiştir. Bu araştırma, beton bileşimindeki mineral agregaların kısmen yerine kullanılan ayçiçeği saplarının etkilerini, katkı maddesi olarak kullanılan sodyum silikatın etkileriyle birleştirmeyi amaçlaması nedeniyle yüksek derecede yeniliğe sahip olduğunu ifade etmiştir. Ayçiçeği saplarının parçalanarak %40 sodyum silikat çözeltisi ile muamele edilmesi ve mineral agregaların düzenli beton katkı maddeleri ile %20, %50 ve %80 oranında değiştirilmesi ile beton reçeteleri geliştirilmiş ve ardından beton bileşimindeki çimento hacminin %5'i oranında sodyum silikat takviyesi yapılmış. Betonun 28. ve 3. aydaki yoğunluk ve basınç dayanımı ile 28. gündeki eğilme ve ayrılma çekme dayanımı üzerine testler yapılmış. Sonuçlar, sodyum silikat ilavesinin beton basınç dayanımı üzerinde olumlu etkileri olduğunu ve yoğunluk ve çekme dayanımı üzerinde hiç veya çok az olumsuz etkisi olduğunu gösterdiği bulunmuştur.

Maajed 2023, yaptığı çalışmada toprakta Ni'nin immobilizasyonu ve nihayetinde bitkilerde oksidatif stresin ve insan sağlığı riskinin azaltılması yoluyla kinoa sapı biyokömürü (QSB) ve manyetik kinoa sapı biyokömürü (MQSB) kullanılarak *Helianthus annuus*'un fitoremediasyon iyileştirme potansiyelinin artırılmasına odaklanmaktadır. Mevcut çalışmada, kinoa sapı biyokömürü (QSB) ve onun manyetik nanokompoziti (MQSB) uygulamasıyla ayçiçeğinin Ni-immobilizasyonunu ve fitoremediasyon potansiyelini değerlendirmek için gerçekleştirilmiştir. QSB ve MQSB, yüzey özellikleri hakkında bilgi edinmek için FTIR, SEM, EDX ve XRD ile karakterize edilmiştir. Üç haftalık ayçiçeği fideleri, doğal koşullar altında tel evde Ni

(0, 15, 30, 60, 90 mg/kg), QSB ve MQSB (%0, 1 ve 2) ile zenginleştirilmiş toprağa nakledilmiştir. Sonuçlar, artan Ni seviyelerinin, reaktif oksijen türlerinin (ROS) yüksek üretimi ve lipid peroksidasyonu nedeniyle ayçiçeği büyümesini ve verimini engellediğini göstermiştir. Süperoksit dismutaz (SOD), katalaz (CAT), askorbat peroksidaz (APX) ve peroksidaz (POX) gibi enzim aktiviteleri de Ni seviyeleri arttıkça artmıştır. Ancak, QSB ve MQSB uygulaması Ni alımını, kök-sürgün ve sürgün-tohum taşınmasını azaltmış ve ROS oluşumunu azalttı ve SOD, CAT, APX ve POX aktivitesini düşürmüş, özellikle MQSB ile gelişmiş büyüme ve verime yol açmıştır. Bu, SEM, EDX, XRD ve FTIR ile doğrulanmıştır. QSB ve MQSB'nin ayçiçeklerinde Ni toleransını etkili bir şekilde artırabileceği ve oksidatif stresi ve insan sağlığı risklerini hafifletebileceği sonucuna varılabileceği ifade edilmiştir.

Zubkova 2019, tarımsal atık (yumuşak odun (SW), ayçiçeği kabukları (SH), mısır sapları (CS), ceviz kabukları (WN) ve buğday samanı (WS)) dahil olmak üzere 5 farklı biyokütle atığının piroliz işleminin seyri TG/FT-IR kullanılarak incelenmiştir. İncelenen örnekler, 300, 400 ve 1000 °C'lik sıcaklıklara ısıtılırken havasız bir çelik retortta karbonize edilmiştir. Biyokütle örnekleri, 150 °C sıcaklıkta 18 bar basınç altında bir mikrodalga ekstraktöründe kloroform ve metanol karışımı ile çıkarılmıştır. 1000 °C'ye ısıtılan örnekler X-ışını kırınımı kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, kütle kaybı oranı eğrisindeki maksimum sıcaklığın, incelenen örnekler için 750 °C sıcaklıkta kütlede bir artışla daha yüksek sıcaklıklara doğru kaydığını göstermektedir. 300 °C sıcaklıkta pirolizin uçucu ürünlerinin kompozisyonunun karşılaştırılması ve 300 °C sıcaklıkta piroliz edilen biyokömürün ATR spektrumlarının analizi temelinde, pirolizin uçucu ürünlerinin kompozisyonunda ekstrakte edilen materyalden elde edilen bileşiklerin içeriğinin SW numunesi için yaklaşık 1/8, WN numunesi için -1/6, CS numunesi için -1/5 ve SH numunesi için yaklaşık 1/4 olduğu belirlenmiştir. WN numunesinden elde edilen biyokömür en yüksek yapısal düzenlenme derecesine sahip olduğu belirtilmiştir. Hem piroliz sırasında açığa çıkan uçucu ürün miktarının hem de inorganik bileşen içeriğinin incelenen numunelerdeki biyokömürün yapısal düzenlenme derecesini etkilediği ileri sürülmektedir.

Wan 2022, biyokütle bileşenleri ile biyokömürlerdeki karbon tutulumu veya kaybı arasındaki ilişkinin belirsiz olduğunu bildirmiştir. Bu çalışmada, dört karakteristik hammadde pirolize edilerek biyokömüre dönüştürülmüş ve biyokömürdeki karbonun dönüşümü ve kararlılığı ayrıntılı olarak incelenmiştir. Termogravimetri-kütle

spektrometrisi (TG-MS) ile on üç çeşit iyon parçası tespit edilmiş olup, bunların arasında H₂O, CO₂ ve CO başlıca gaz ürünler olarak bulunmuştur. Ek olarak, ligninin varlığı biyokütlenin pirolizini yavaşlatmış ve daha fazla CO üretmiş, bu da sonunda daha fazla aromatik biyokömüre yol açmıştır. Piroliz sırasında lignin, selüloz ve ksilanın karbon tutulumu sırasıyla %78,7, %41,7 ve %40,2 olmuştur. Karbon tutulumu hesaplamaları, ligninin biyokömür oluşumuna önemli bir katkıda bulunduğunu (%40,1-53,2) göstermiştir. K₂Cr₂O₇ oksidasyon deneyinde, ayçiçeği ve pamuk sapı kömürünün karbon kararlılığı nispeten zayıftı, bu da termal kararlılık sonuçlarıyla tutarlı bulunmuştur. Spektral karakterizasyon analizi, düşük lignin içeriğine sahip biyokütlenin piroliz sırasında daha kararsız karbon ürettiğini ve bunun oksitlenmiş bir ortamda kaybolma veya dönüştürülme olasılığının daha yüksek olduğunu gösterdiği ifade edilmiştir. Bu bulgular, biyokömür hazırlamada rehberlik etmek ve çevresel risklerinden kaçınmak için anlamlı olduğu belirtilmiştir.

Saini, 2025'e göre, sanayileşme, tekstil, kağıt, deri, kozmetik ve boya üretimi gibi çeşitli endüstriler tarafından üretilen atık suların deşarjı yoluyla su kirliliğinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu sektörlerde yaygın olarak kullanılan pozitif yüklü sentetik bir boya olan metilen mavisi (MB), önemli toksisite endişeleri oluşturduğu belirtilmiştir. Adsorpsiyon, atık su arıtımı için gelişmiş giderim verimliliği, hızlı yanıt ve operasyonel basitlik sunan oldukça verimli ve uygun maliyetli bir yaklaşım olarak ortaya çıktığı belirtilmiştir. Bu çalışma, biyokütleyle kıyasla daha yüksek kapasite ve daha hızlı etki gösteren hidrokömürün gelişmiş adsorpsiyon potansiyelini araştırmaktadır. Hidrotermal karbonizasyon (HTC) işleminden yararlanılarak, MB boyasını sentetik atık sudan gidermedeki etkinliğini değerlendirmek için ayçiçeği saplarından (biyokütle) hidrokömür üretilmiştir. Hidrokömür ve biyokütlenin fiziksel ve kimyasal özellikleri incelenmiştir. Toplu adsorpsiyon deneyleri yoluyla, zaman, adsorban dozu, pH, ilk MB boya konsantrasyonu ve sıcaklık dahil olmak üzere çeşitli parametreler sistematik olarak araştırılmıştır. Sonuçlar, daha büyük yüzey alanı, yüzey kompleksleşmesi ve gözenek hacmi nedeniyle hidrokömürün, optimum koşullar altında 24,24 mg/g'a ulaşan biyokütleyle kıyasla 49,37 mg/g'lık üstün bir adsorpsiyon kapasitesi sergilediğini ortaya koymuştur. Ek olarak, her iki adsorban üzerindeki MB'nin adsorpsiyon davranışını anlamak için çeşitli izoterm, kinetik ve kütle transferi modelleri analiz edilmiştir. Her iki adsorban için deneysel sonuçlar, Sips izotermi ve psödo-ikinci dereceden kinetik modelle iyi bir şekilde uyumlu bulunmuştur. Özellikle,

Sips modeli, biyokütle (BM) ve hidrokömür (HC) için sırasıyla 0,433 ve 0,636 (L/mg)^{1/m}lik k_s değerleri verirken, kinetik k değerleri 0,0069 ve 0,0036 (g/mg.dak) olarak belirlenmiştir. Kütle transferi çalışmalarıyla yapılan daha ileri analizler, hız sınırlayıcı adımın hem parçacık içi difüzyon hem de film difüzyon süreçlerini kapsadığını gösterdiği belirtilmiştir.

Tag 2018, yaptığı çalışmada, sıcaklık, biyokütle:su oranı ve reaksiyon süresi gibi proses değişkenlerinin hidrotermal karbonizasyondaki (HTC) etkisi farklı tipteki biyokütller için incelemiştir. Çalışmada, her bir faktörün etkisini ve bunların birleşik etkileşimli etkisini hidrokömürlerin kütle verimi ve enerji yoğunluğu üzerinde incelemek için tepki yüzey metodolojisi kullanılmıştır. Sonuçlar, ayçiçeği sapı ve alglerin HTC'sinde kütle verimi ve enerji yoğunlaştırma oranını etkileyen önemli faktörler sıcaklık ve zaman olduğunu, buna karşın sıcaklığın sadece kümes hayvanı altlığı HTC'sinde önemli bir faktör olduğunu gösterdiği belirtilmiştir. Biyokütle:su oranı tüm test edilen biyokütller için önemsiz olduğu belirtilmiştir. Ek olarak, hidrokömürlerin yakıt özellikleri, 300 °C'de torrefaksiyondan elde edilen biyokömürün özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, test edilen tüm biyokütller için biyokömürlerin hidrokömürlerden daha düşük uçucu madde ve sabit karbona sahip olduğunu gösterdiği belirtilmiştir.

Akhtar 2021, üç tarımsal atık biyokütlesinin (mısır koçanı, pamuk sapı ve ayçiçeği) yoğunlaştırılması torrefikasyon tekniği kullanılarak incelemiştir. Numuneler ılımlı sıcaklık koşullarında (200-320 °C) ve farklı kalış sürelerinde (10 dak-60 dak) pirolize edilmiştir. Elde edilen biyokömür numunelerinin termal özellikleri termo-gravimetrik analiz (TGA) ile analiz edilmiştir. Torrelenmiş numunelerin kompozisyon analizi de hemiselüloz, selüloz ve lignin içeriklerinin varlığını belirlemek için gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın sonuçlarına göre, optimum sıcaklık koşullarının 260 °C-300 °C ve 20 dakika-30 dakika kalış süresi olduğu bulunmuştur. Kompozisyon analizine dayanarak, biyokömürün orijinal numunelere göre daha fazla lignin ve selüloz ve daha düşük hemiselüloz içeriği içerdiği bulunmuştur. Uçucu hemiselülozların uzaklaştırılması, biyokütle yapı taşlarının birbirine kenetlenmesini kırarak biyokömürü kırılkan, öğütülebilir ve daha az reaktif hale getirdiği belirtilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, tarımsal atık kalıntılarının enerji geri kazanım şemalarında kullanılmak üzere değerli, katı biyoyakıtlara dönüştürülmesine ilişkin anlayışımızı iyileştirmede yardımcı olacağı belirtilmiştir. Torrefiye edilmiş mısır

koçanları için optimum sıcaklık koşulu, kalış süresi ve GCV'nin sırasıyla 290 °C, 20 dakika ve 5444 kcal/kg olduğu bulunmuştur. Torrefiye edilmiş pamuk topları için optimum sıcaklık koşulu, kalış süresi ve GCV'nin sırasıyla 270 °C, 30 dakika ve 4481 kcal/kg olduğu bulunmuştur. Ayçiçeği numuneleri durumunda, kalış süresinin 10 dakikadan 60 dakikaya çıkarılmasıyla torrefiye edilmiş numunenin kütle verimi sırasıyla %85'ten %71'e düşmüştür.

2.2. Çalışmanın Amacı

Bu tezde, literatürde daha önce rapor edilmemiş olan ayçiçek saplarından sülfürik asit kullanılarak biyokömür üretimi, karakterizasyonu ve Cu(II) iyonlarını sulu çözeltilerden giderme performansı test edilmesi amaçlanmaktadır.



3. MATERYAL VE METOT

3.1. Kullanılan Cihazlar

Bu tez çalışmasında Cu(II) derişimlerinin ölçümü Shimadzu AA7000 (Shimadzu Corp., Kyoto, Japonya) alevli atomik absorpsiyon spektrometresi (FAAS) ile gerçekleştirildi.

Schott marka CG 840 model pH metre çözeltilerin pH değerlerinin belirlenmesinde kullanıldı. Ohaus marka hassas terazi ile tüm kütle ölçümleri alındı. Ters ozmoz sisteminden geçirilmiş su tekrar Milli-Q Millipore cihazından (Millipore, Bedford, MA, ABD) geçirilerek deiyonize su üretildi ve çalışmanın tüm basamaklarında saf su olarak kullanıldı. Sıcaklık kontrollü orbital çalkalayıcı olan IKA 4000i marka cihaz (IKA Werke GmbH, Staufen, Almanya) AYBK-Cu(II) çözeltisi süspansiyonları karıştırma için kullanıldı.

3.2. Kullanılan Kimyasallar ve Çözeltiler

Bu tez çalışmasının tüm basamaklarında analitik saflık mertebesindeki kimyasallar Merck KGaA (Darmstadt, Almanya) şirketinin Türkiye bayilerinden temin edilerek kullanıldı.

1000 mg/L Cu(II) içeren stok çalışma çözeltisi $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 'dan gerekli tartım alınarak deiyonize su içinde hazırlandı. Kesikli adsorpsiyon deneylerinde kullanılmak üzere gerekli oranlarda seyreltili. FAAS ile Cu(II) derişiminin tayini için 1,0 mg/L ile 5 mg/L arasında kalibrasyon çözeltileri basamaklı seyreltme tekniğı ile yapıldı.

Kesikli adsorpsiyon deneylerinde Cu(II) çözeltilerinin pH değerlerini pH 4,0; 5,0 ve 6,'ya ayarlamak için 0,1 M sodyum asetattan 5 mL ve arzu edilen pH değeri elde edilene kadar damla damla 0,1 M sülfürik asit ilave edildi. Çözeltilerin daha asidik pH değerleri ise 0,1 M sülfürik asit ile ayarlandı.

3.3. Ayçiçek Saplarından Biyokömürün Hazırlanması

Bilecik ilinden yerel üreticilerden temin edilen Ayçiçek sapları kırılarak küçük parçalara ayrıldı. Daha sonra öğütme makinesi (Waring® 2000, Waring Laboratory

Science, Chicago, USA) ile öğütüldü ve 0,212 mm'nin altında olanlar biyokömür üretimi için kullanıldı.

Öğütülmüş ayçiçek saplarının 40 g'ı üzerine 40 g derişik sülfürik asit (%98) katıldı ve 10 dakika boyunca iyice karıştırıldı. Ardından oda sıcaklığında bir gece bekletildi. Daha sonra yıkama sularının pH değeri 6,0 olana kadar deiyonize su ile yıkandı. Daha sonra kalması muhtemel asit safsızlıklarını nötrleştirmek için %1'lik sodyum bikarbonat çözeltisinde (200 mL) bir gece bekletildi. Sonra biyokömürün yıkama sularının pH değeri 7,0 olana kadar deiyonize su ile iyice yıkandı. Sonra elde edilen biyokömür 105 °C'de bir gece bekletildi. Tekrar öğütölüp elendi ve 0,212 mm'nin altındaki tanecik boyutunda olan biyokömürler çalışmada kullanılmak üzere kahverengi cam şiş içinde muhafaza altına alındı. Üretilen ayçiçek saplarından biyokömür AYBK olarak kodlandı. Ayçiçek saplarından biyokömür üretim verimi % 45,0 olarak hesaplandı.

3.4. Biyokömürün Karakterizasyonu

3.4.1. Kül tayini

Kapaklı porselen kroze kül fırınında 650±25 °C'de sabit tartıma getirildi. Krozenin içine 0,1 mg duyarlıkta 1 g AYBK konularak aynı sıcaklıkta 3 saat bekletildi. AYBK'nın içerdiği kül miktarı aşağıdaki formülle bulundu (ASTM D4607-94, 1999).

$$TK = [(D - B) / (C - B)].100 \quad (3.1)$$

Burada;

- TK : Toplam kül miktarı (%),
- B : Boş kroze kütlesi (g),
- C : AYBK konulmuş krozenin ağırlığı (g),
- D : Kül kalıntısı olan kroze ağırlığı (g)'dır.

3.4.2. Rutubet tayini

Nem tayini için kullanılacak olan kapsül 145-155 °C'de sabit tartıma getirildi ve içerisine 0,1 mg duyarlıkta 1 g AYBK ilave edilerek aynı sıcaklıkta 3 saat muhafaza edildi. Tartım alındıktan sonra yüzde rutubet miktarı aşağıdaki eşitlikle hesaplandı (ASTM D4607-94, 1999).

$$\% \text{ Nem} = [(C-D)/(C-B)].100 \quad (3.2)$$

Burada;

- B : Boş kapsül kütlesi (g),
C : AYBK içeren kapsül ağırlığı (g),
D : Kuru AYBK ve kapsül ağırlığı (g)'dır.

3.4.3. Suda Çözünübilirlik

Suda çözünübilirlik tayini için kullanılacak porselen kapsül önce 150 °C'de etüvde sabit tartıma getirildi. Ayrı bir beher içine 0,1 mg duyarlıkta 1 g AYBK ve 11 mL su konuldu ve süspansiyon 900±10sn süre kaynatıldı. Sonra süspansiyon süzüldü ve süzüntüden 1 mL alınarak kapsülün içine koyuldu. Su banyosunda süzüntüdeki su buharlaştırıldı. Ardından kapsül 150 °C etüvde kurtuldu ve tartım alındı. Suda çözünübilirlik miktarı aşağıdaki eşitlikle bulundu (ASTM D4607-94, 1999).

$$\% \text{ Suda çözünübilirlik} = (B-A).(D).(100)/(C).(E) \quad (3.3)$$

Burada;

- A : Boş kapsül ağırlığı (g)
B : En son kapsül ağırlığı (g)
C : AYBK ağırlığı (g)
D : Su hacmi (mL)
E : Süzüntü hacmi (mL)'dir.

3.4.4. Uçucu madde miktarı tayini

AYBK'daki uçucu madde miktarı belirlenmesinde sabit tartıma getirilmiş kroze içine 0,1 mg duyarlıkta 1 g AYBK ilave edildi. Kroze 950 ±25 °C sıcaklıktaki fırının içinde 7.0 ± 0.2 dakika bekletildi ve tartım alınarak hesaplama yapıldı (ASTM D4607-94, 1999).

$$UM = [(C - D) / (C - B)].100 \quad (3.4)$$

Burada;

- UM : Uçucu madde miktarı (%),
- B : Kapaklı boş kroze ağırlığı (g),
- C : Kapaklı kroze ve numune ağırlığı toplamı (g),
- D : Kapaklı kroze ile geride kalan maddenin ağırlığı toplamı (g)'dır.

AYBK'nın sabit karbon yüzde miktarı (% SK) ise uçucu madde (UM) ve toplam kül miktarlarından (TK) aşağıdaki eşitlik kullanılarak bulundu.

$$\% SK = 100 - (UM + TK) \quad (3.5)$$

3.4.5. pH_{pzc} tayini

AYBK'nın pH_{pzc} değerini belirlemek amacıyla 0,1 mg duyarlıkta 0,1 g AYBK, başlangıç pH değerleri 2–12 arasında 0,1 M bir seri NaCl çözeltisinin (100 mL) içine koyuldu ve elde edilen süspansiyonlar 24 saat sallandı. Çözeltilerin pH'ları 0,1 M NaOH ya da 0,1 M HNO₃ ile ayarlandı.

Karıştırma işlemi bittikten sonra süspansiyon santrifüj edildi ve sulu fazın pH değerleri pH metre ile belirlendi. Başlangıç pH değerlerinden ölçülen son denge pH değerlerinin farkları alındı ve ΔpH değerleri hesaplandı. Başlangıç pH değerlerine (x ekseninde) karşı ΔpH değerleri arasında şekil çizildi. Eğrinin x eksenini kestiği nokta, AYBK'nın pH_{pzc} değeri olarak alındı (Karaçetin ve ark., 2014).

3.5. AYBK ile Cu(II) kesikli adsorpsiyon deneyleri

AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonuna pH etkisi deneyleri için 100 mL hacminde 100 mg/L derişimde Cu(II) çözeltilerine 50 mg AYBK ilave edildikten sonra 25 °C'de 24 saat süre boyunca 200 rpm karıştırma hızına çalkalandı.

AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonuna karıştırma süresinin etkisi deneyleri 50 mL hacminde pH'sı 5,0 olan 300 mg/L derişimde Cu(II) çözeltilerine 50 mg AYBK ilave edildikten sonra elde edilen süspansiyonlar değişik sürelerde çalkalandı.

AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonuna AYBK dozajının etkisinin incelenmesi için 50 mL hacminde pH'sı 5,0 olan 300 mg/L derişimde Cu(II) çözeltilerine değişen miktarlarda AYBK katıldı ve elde edilen süspansiyonlar 10 saat süreyle çalkalandı.

AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonuna Cu(II) başlangıç derişimin etkisinin incelenmesi için 50 mL hacminde pH'sı 5,0 olan değişik derişimlerde Cu(II) çözeltileri hazırlandı ve üzerlerine 50 mg AYBK konularak 10 saat süreyle karıştırıldı.

AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonuna Cu(II) iyonik şiddetin etkisinin incelenmesi için 50 mL hacminde pH'sı 5,0 olan 300 mg/L derişimde Cu(II) çözeltileri değişik derişimlerde NaCl içerecek şekilde hazırlandı ve üzerlerine 50 mg AYBK konularak 10 saat süreyle karıştırıldı.

Tüm karıştırma işlemlerinden sonra Cu(II) çözeltisi-AYBK süspansiyonları mavi band süzgeç kağıdı kullanılarak filtre edildi ve süzüntüde adsorplanmadan kalan Cu(II) derişimleri FAAS ile belirlendi. AYBK üzerindeki Cu(II) miktarı (q_e) aşağıdaki kütle denkliği eşitliği (eşitlik 3.6) ile hesaplandı.

$$q_e = (C_0 - C_e)V/W \quad (3.6)$$

Burada, q_e denge durumunda mg/g olarak adsorplanan Cu(II) miktarı, V litre(L) biriminden adsorpsiyon prosesinin hacmi, W gram (g) cinsinden AYBK kütlesi, C_e ve C_0 ise dengedeki ve başlangıç durumundaki mg/L biriminde çözeltideki Cu(II) derişimidir. Her bir deney iki kere tekrar edilerek gerçekleştirilmiştir.



4. DENEYSEL BULGULAR

4.1. AYBK'nın karakterizasyonu

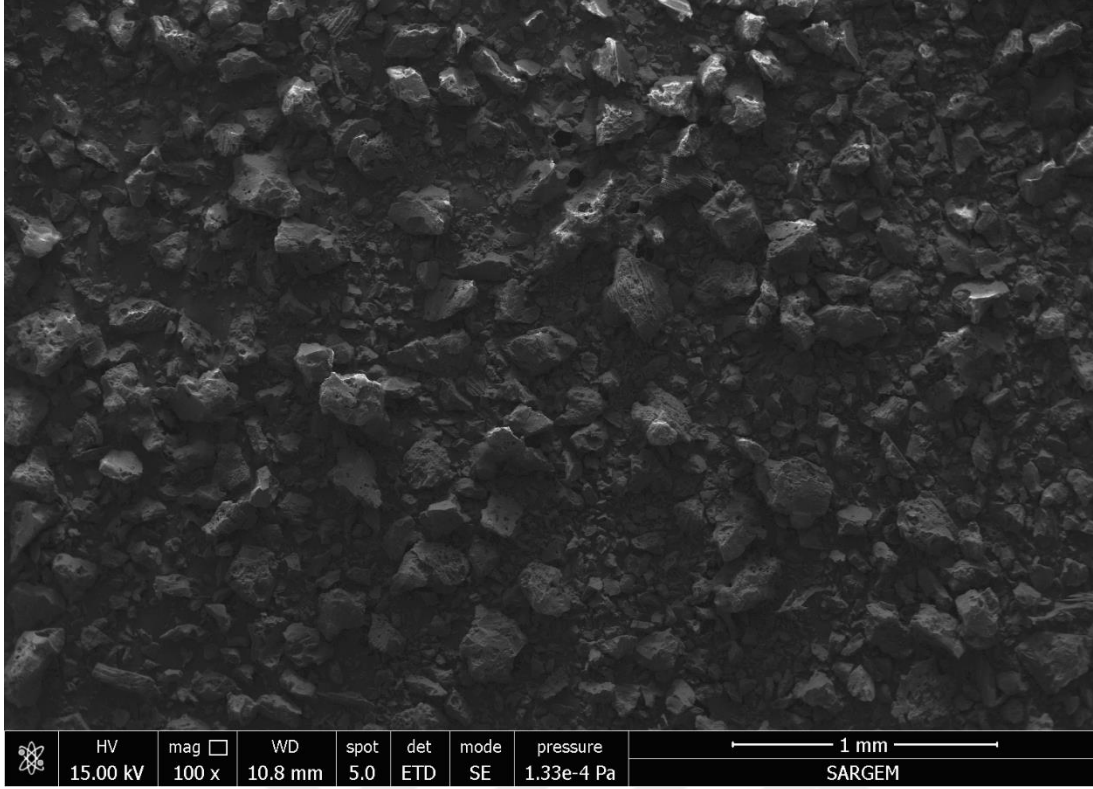
Ayçiçek saplarından elde edilen biyokömürün nem, uçucu madde, sabit karbon, suda çözünabilirlik ve kül miktarları ve BET yüzey alanı değerleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. AYBK'nın karakterizasyon sonuçları

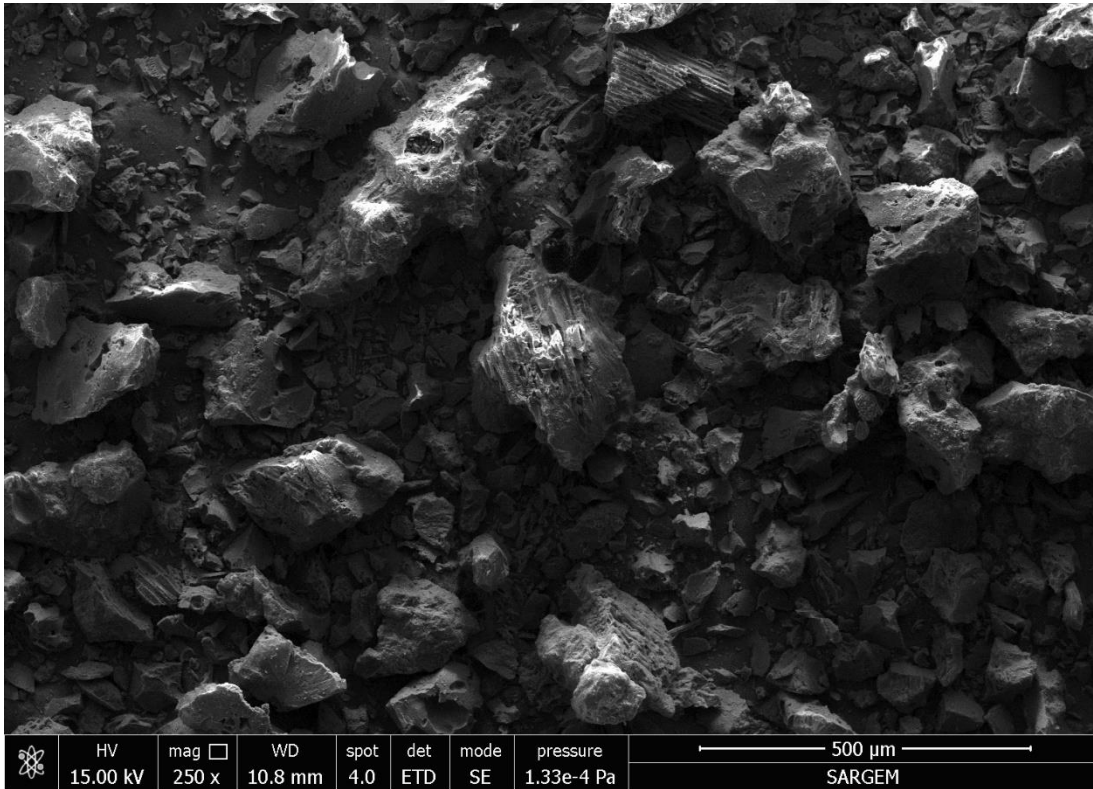
Kısmi analiz (%)	
Nem	10,6
Uçucu madde	35,3
Sabit karbon	55,4
Kül	9,3
Üretim verimi	45,0
pH _{pzc}	4,49
BET yüzey alanı (m ² /g)	7,9

AYBK'nın kısmi analiz sonuçlarına göre rutubeti %10,6 bulunmuştur. Uçucu madde miktarı 35,3 olarak bulunmuştur ki bu da beklenen bir durumdur. Çünkü herhangi bir piroliz işlemine tabi tutulmadan üretilen AYBK, ısı altında uçucu madde oluşturmuştur. Kül miktarının yüksek olmasının (%9,3) nedeni, AYBK'nın içerdiği inorganik türler olabilir. BET yüzey alanının küçük (7,9 m²/g) olması da beklenen durumdur. Çünkü sülfürik asidin gözenek açma gibi bir özelliği bulunmamakta yalnızca bitkisel maddelerin biyokömüre dönüşümünü sağlamaktadır. Literatürde benzer yüzey alanları rapor edilmiştir (Özer ve İmamoglu, 2023; Bal ve ark.,2021).

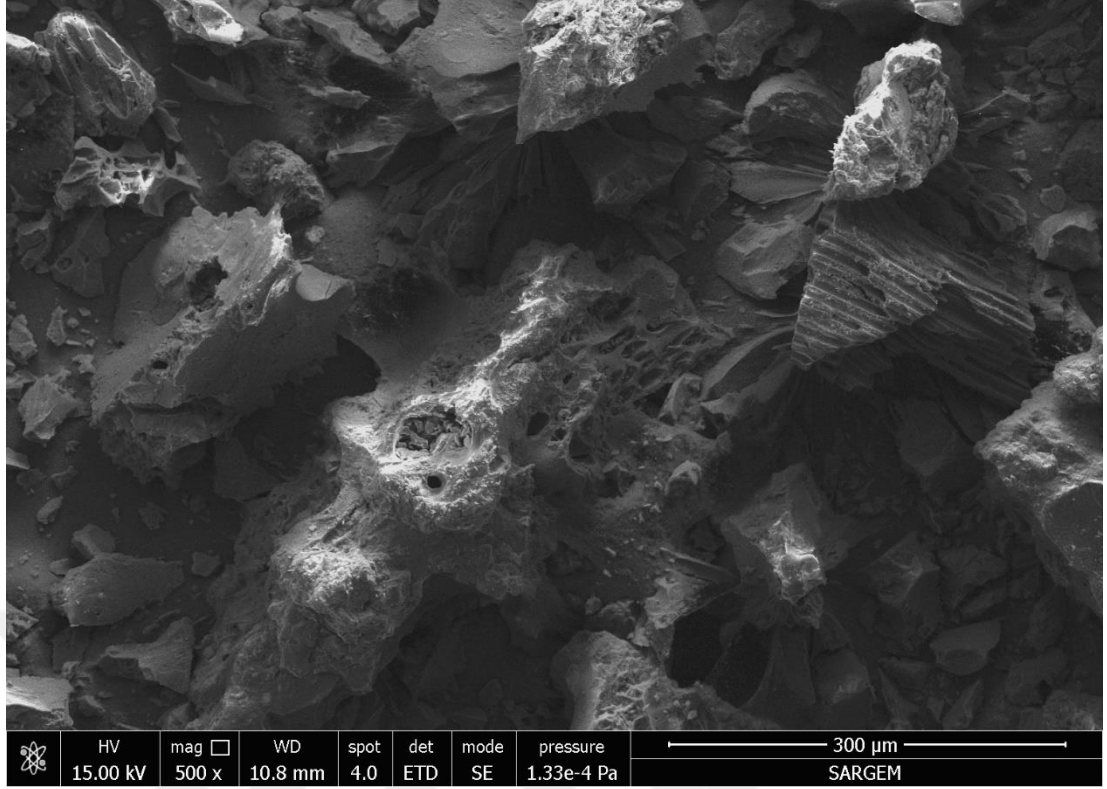
AYBK'nın yüzey yapısı SEM görüntüleme tekniği ile incelenmiştir. Değişik büyütmelerde alınan yüzey görüntülerinden 100 kat büyütme ile alınan görüntü Şekil 4.1'de, 250 kat büyütme ile alınan görüntü Şekil 4.2'de, 500 kat büyütme ile alınan görüntü Şekil 4.3'de ve 1000 kat büyütme ile alınan görüntü Şekil 4.4.'de gösterilmektedir.



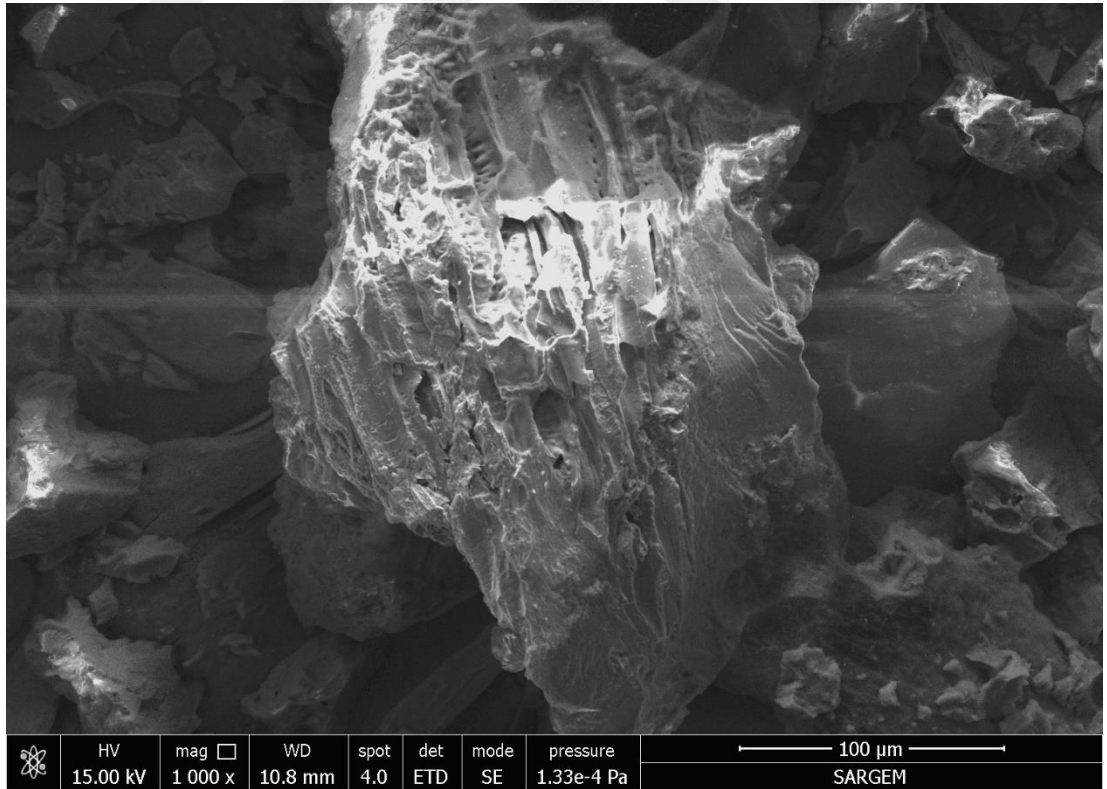
Şekil 4.1. AYBK'nın 100 kat büyütme ile alınan görüntüsü



Şekil 4.2. AYBK'nın 250 kat büyütme ile alınan görüntüsü

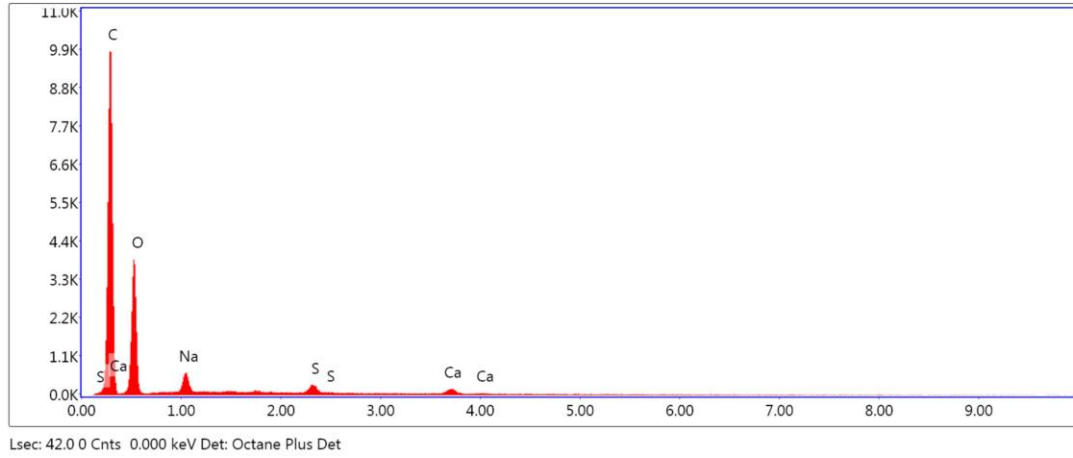


Şekil 4.3. AYBK'nın 500 kat büyütme ile alınan görüntüsü



Şekil 4.4. AYBK'nın 1000 kat büyütme ile alınan görüntüsü

AYBK'nın EDS analiz spektrumu Şekil 4.5.'de ve elementel analiz sonuçları Tablo 4.2.'de verilmektedir.



Şekil 4.5. AYBK'nın EDS analiz spektrumu

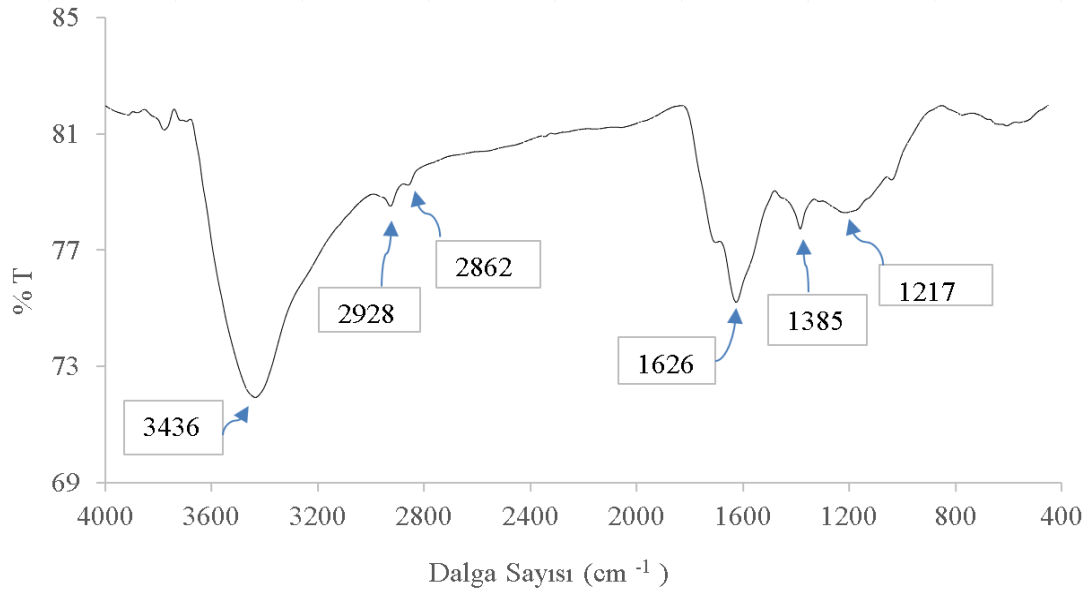
Tablo 4.2. AYBK'nın EDS elementel analiz sonuçları

Element	% Ağırlık	% Atom
C	60,17	67,85
O	35,48	30,04
Na	2,25	1,32
S	0,92	0,39
Ca	1,18	0,40

AYBK'nın SEM-EDS görüntülerinden az gözenekli bir yapıya sahip 0,200 mm civarında boyutlardaki taneciklerden oluştuğu görülmektedir. Tablo 4.2.'de verilen elementel analiz sonuçları incelendiğinde yüksek oksijen içeriğine ve aktif karbonlara kıyasla düşük karbon içeriğine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca yapısında %1,18 Ca ve %2,25 Na içermektedir ki bu durumun yüksek kül içeriğine sahip olmasının nedeni olarak değerlendirilebilir.

AYBK'nın FT-IR spektrumu Şekil 4.6.'da verilmektedir. 3436 cm^{-1} 'de adsorplanmış suya veya AYBK'nın yapısındaki asidik ve fenolik gruplara ait O-H gruplarının gerilme piki, 2928 cm^{-1} 'de ve 2862 cm^{-1} 'de görülen pikler alkil gruplarına ait C-H gerilme pikleri, 1626 cm^{-1} 'de gözlemlenen pikler C-O fonksiyonel grubunun gerilme titreşimine ait pikler olarak yorumlandı (Bal ve ark., 2021, Köklü ve İmamoğlu, 2022). 1385 cm^{-1} 'de gözlemlenen pikin alken ve alkanların C-H bükülmesi olduğu düşünülmektedir (Sun ve ark., 2013). 1217 cm^{-1} 'de görülen yayvan pik alifatik eterlere

ait C-O gerilmesinden ve C–O–C köprüsünün asimetrik gerilmesinden kaynaklanıyor olabilir (Özer ve İmamoğlu, 2024)



Şekil 4.6. AYBK'nın FTIR spektrumu

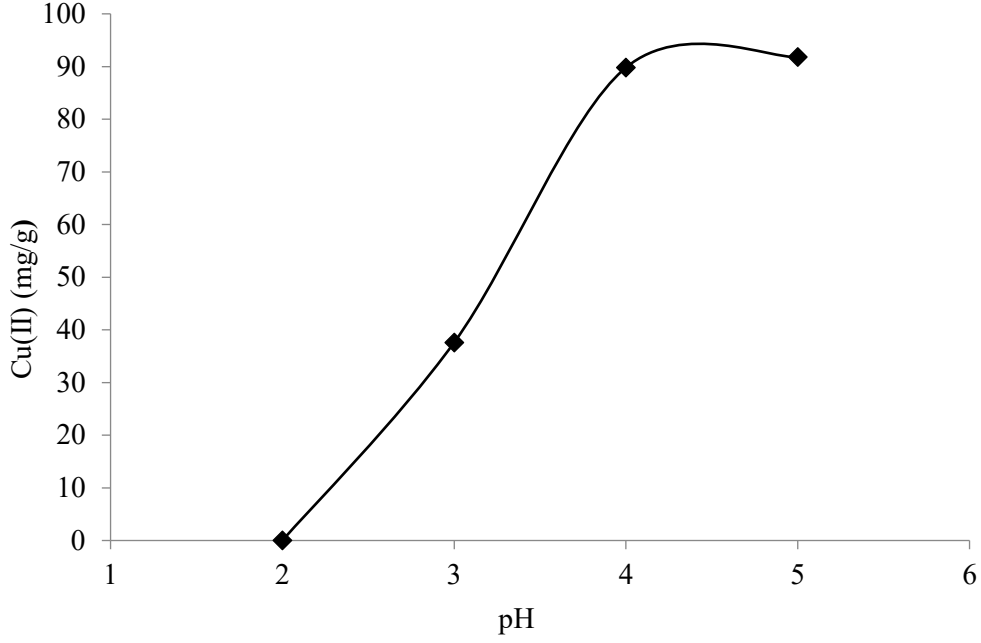
4.2. AYBK ile Cu(II) Adsorpsiyon Çalışmaları

4.2.1. AYBK ile Cu(II) Adsorpsiyonuna pH'nın etkisi

AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonuna pH etkisini incelemek için pH'ları 2,0 ile 5,0 arasında değişen 100 mL hacminde 100 mg/L derişimde Cu(II) çözeltilerine 50 mg AYBK ilave edildikten sonra 25 °C'de 24 saat 200 rpm karıştırma hızına çalkalandı. Ardından AYBK-Cu(II) çözeltisi süspansiyonlarının mavi bant süzgeç kağıdı kullanılarak filtre edildi ve süzüntüde adsorplanmadan kalan Cu(II) derişimleri FAAS ile belirlendi. Hesaplanan sonuçlar Tablo 4.3.'de verilmektedir. Sulu çözeltilerin pH'sı ile AYBK üzerinde Cu(II) adsorpsiyonun değişimi ise Şekil 4.6.'da gösterilmektedir.

Tablo 4.3. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonuna sulu çözeltilerin pH'sının etkisi

İlk pH	Denge pH'sı	Denge derişimi (mg/L)	Adsorplanan miktar (mg/g)
2,0	2,3	100,0	0
3,0	3,1	81,2	37,6
4,0	3,9	55,1	89,8
5,0	4,1	54,1	91,8



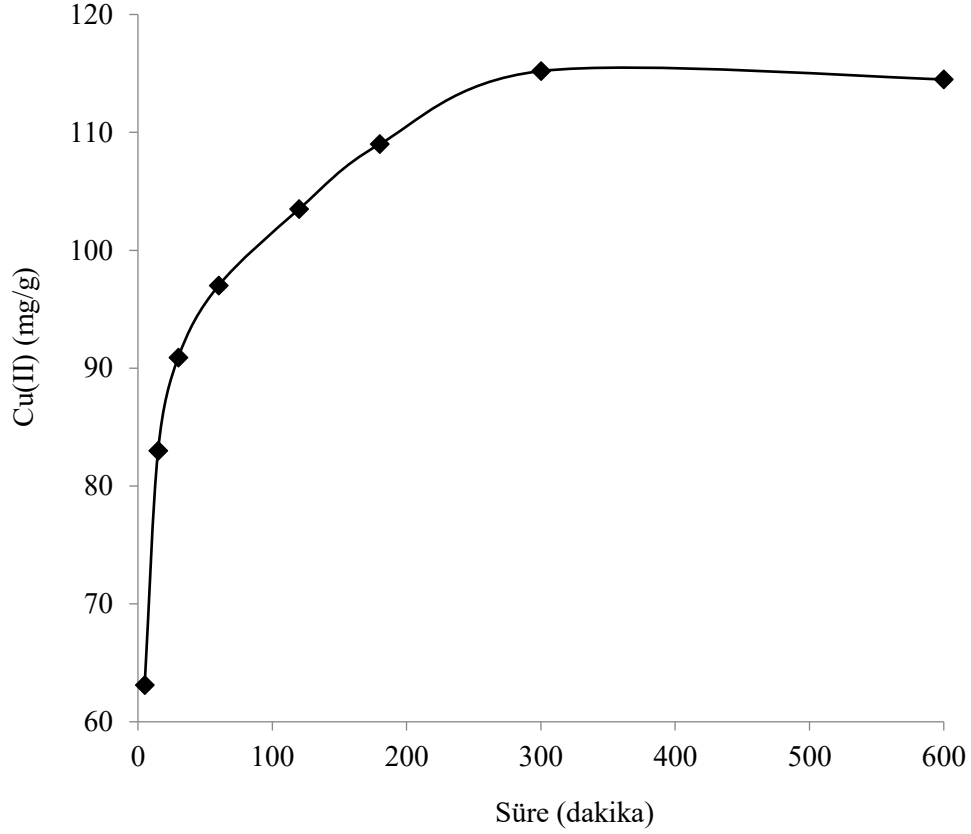
Şekil 4.6. Sulu çözeltinin pH'sı ile AYBK üzerinde Cu(II) adsorpsiyonunun değişimi

4.2.2. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonuna karıştırma süresinin etkisi

AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonuna karıştırma süresinin etkisi deneyleri 50 mL hacminde pH'sı 5,0 olan 300 mg/L derişimde Cu(II) çözeltilerine 50 mg AYBK ilave edildikten sonra elde edilen süspansiyonlar değişik sürelerde çalkalandı. Ardından süspansiyonlardan mavi bant süzgeç kağıdı kullanılarak sulu faz ayrıldı ve sulu fazda adsorplanmadan kalan Cu(II) derişimleri FAAS ile tayin edildi. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.4.'de verilmektedir. Karıştırma süresi ile AYBK üzerinde Cu(II) adsorpsiyonunun değişimi ise Şekil 4.7.'da gösterilmektedir.

Tablo 4.4. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonuna karıştırma süresinin etkisi

Karıştırma Süresi (dk.)	Denge derişimi (mg/L)	Adsorplanan miktar (mg/g)
5	236,9	63,1
15	217,0	83,0
30	209,1	90,9
60	203,0	97,0
120	196,5	103,5
180	191,0	109,0
300	188,0	115,0
600	185,0	115,0



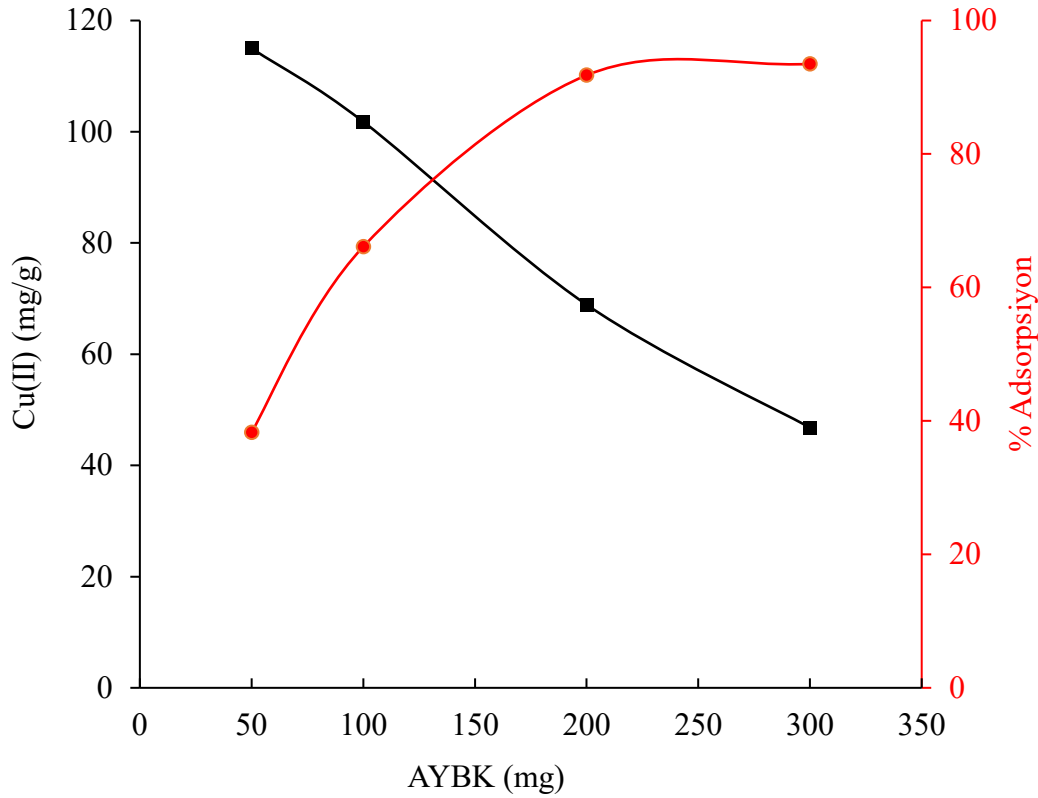
Şekil 4.7. Karıştırma süresi ile AYBK üzerinde Cu(II) adsorpsiyonun değişimi

4.2.3. Cu(II) adsorpsiyonuna AYBK dozajının etkisi

AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonuna AYBK dozajının etkisinin incelenmesi için 50 mL hacminde pH'sı 5,0 olan 300 mg/L derişimde Cu(II) çözeltilerine değişen miktarlarda AYBK katıldı ve elde edilen süspansiyonlar 10 saat süreyle çalkalandı. Daha sonra AYBK-Cu(II) çözeltileri süspansiyonları mavi bant süzgeç kağıdı kullanılarak filtre edildi ve sulu fazda giderilmeden kalan Cu(II) konsantrasyonları FAAS ile ölçüldü. Hesaplanan sonuçlar Tablo 4.5.'de verilmektedir. AYBK dozajı ile adsorplanan Cu(II) miktarının değişimi ise Şekil 4.8.'de gösterilmektedir.

Tablo 4.5. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonuna AYBK dozajının etkisi

AYBK miktarı (mg)	Cu(II) denge derişimi (mg/L)	Adsorplanan miktar (mg/g)	% Adsorpsiyon
50	185,0	115,0	38,3
100	96,5	101,8	66,1
200	24,5	68,9	91,8
300	19,4	46,8	93,5



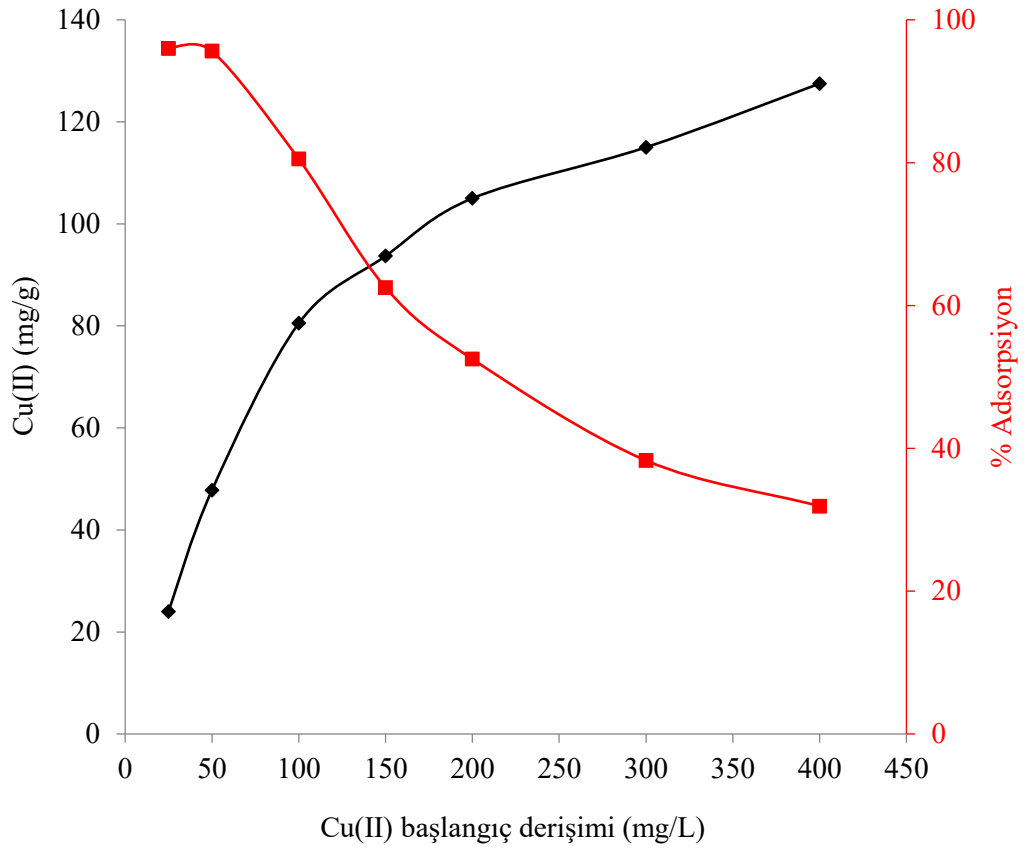
Şekil 4.8. AYBK dozajı ile adsorplanan Cu(II) miktarının ve Cu(II) giderim yüzdesinin değişimi

4.2.4. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonuna başlangıç derişiminin etkisi

AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonuna Cu(II) başlangıç derişimin etkisinin incelenmesi için 50 mL hacminde pH'sı 5,0 olan değişik derişimlerde Cu(II) çözeltileri hazırlandı ve üzerlerine 50 mg AYBK konularak 10 saat süreyle karıştırıldı. Daha sonra AYBK-Cu(II) çözeltisi süspansiyonları mavi bant süzgeç kağıdı kullanılarak filtre edildi ve sulu fazda giderilmeden kalan Cu(II) konsantrasyonları FAAS ile ölçüldü. Hesaplanan sonuçlar Tablo 4.6.'de verilmektedir. Cu(II) başlangıç derişimi ile adsorplanan Cu(II) miktarının değişimi ise Şekil 4.9.'da gösterilmektedir.

Tablo 4.6. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonuna başlangıç derişiminin etkisi

Cu(II) başlangıç derişimi (mg/L)	Cu(II) denge derişimi (mg/L)	Adsorplanan miktar (mg/g)	% Adsorpsiyon
25	1,0	24,0	96,0
50	2,2	47,8	95,6
100	19,5	80,5	80,5
150	56,3	93,7	62,5
200	95,0	105,0	52,5
300	185,0	115,0	38,3
400	272,5	127,5	31,9



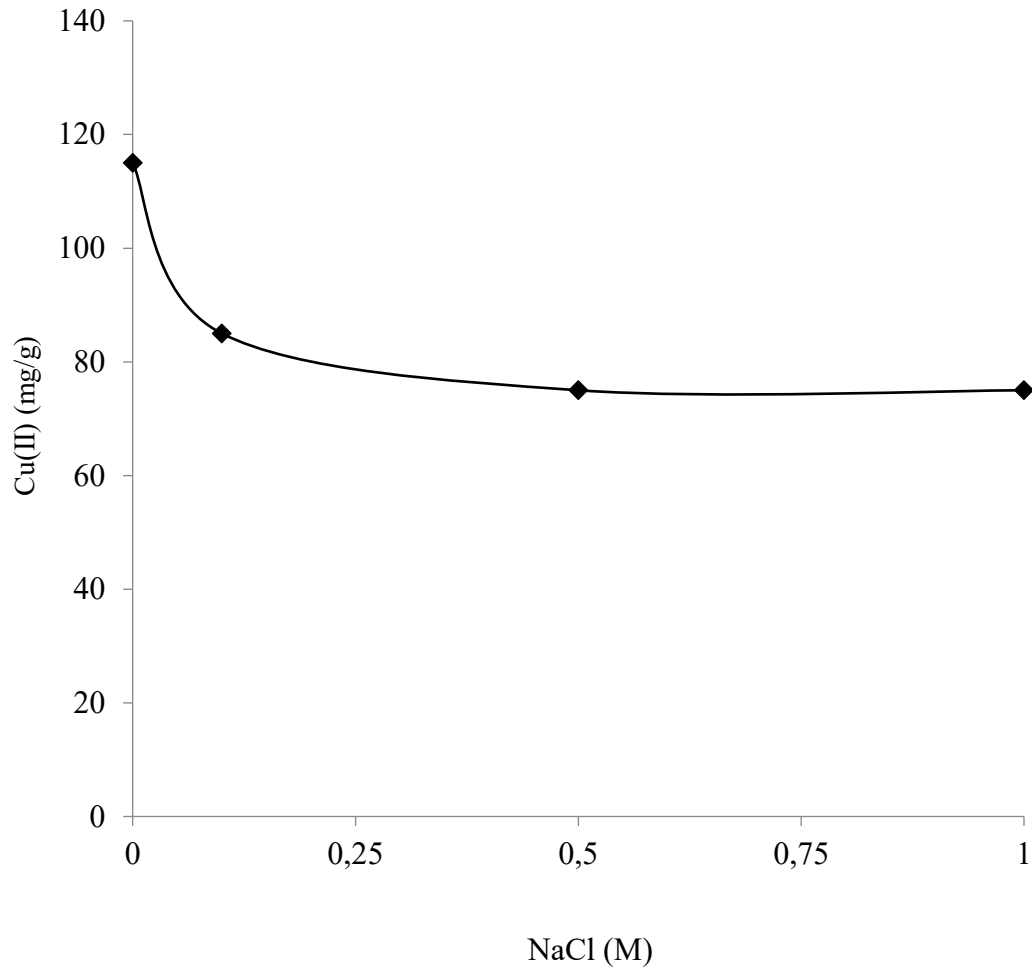
Şekil 4.9. Cu(II) başlangıç derişimi ile adsorplanan Cu(II) miktarının değişimi

4.2.5. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonuna iyonik şiddetin etkisi

AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonuna Cu(II) iyonik şiddetin etkisinin incelenmesi için 50 mL hacminde pH'sı 5,0 olan 300 mg/L derişimde Cu(II) çözeltileri değişik derişimlerde NaCl içerecek şekilde hazırlandı ve üzerlerine 50 mg AYBK konularak 10 saat süreyle karıştırıldı. Karıştırma işlemlerinden sonra AYBK-Cu(II) çözeltileri süspansiyonları mavi bant süzgeç kağıdı kullanılarak filtre edildi ve süzüntüde giderilmemiş olan Cu(II) derişimleri FAAS ile tayin edildi. Hesaplanan sonuçlar Tablo 4.7.'de verilmektedir. İyonik şiddet ile AYBK üzerinde adsorplanan Cu(II) miktarının değişimi ise Şekil 4.10.'da gösterilmektedir.

Tablo 4.7. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonuna iyonik şiddetin etkisi

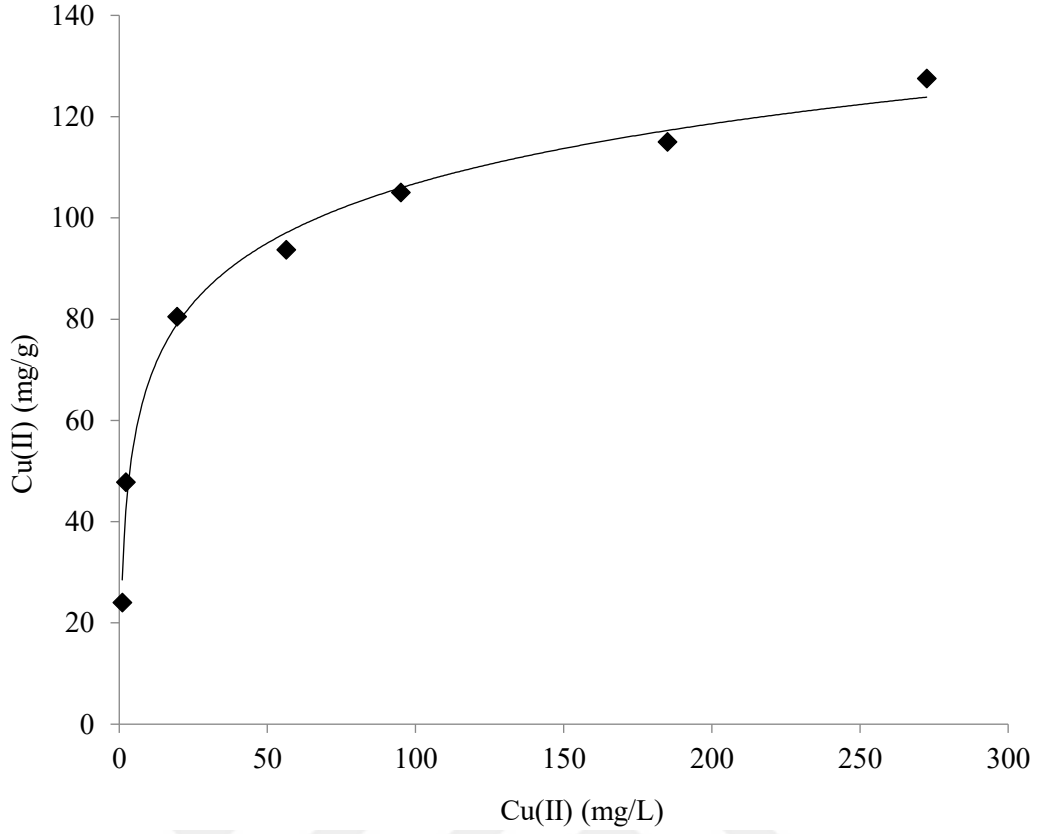
NaCl derişimi (M)	Cu(II) denge derişimi (mg/L)	Adsorplanan miktar (mg/g)
0	185,0	115,0
0,1	215,0	85
0,5	225,0	75
1,0	225,0	75



Şekil 4.10. İyonik şiddet ile AYBK üzerinde adsorplanan Cu(II) miktarının değişimi

4.2.6. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonunun dengesinin incelenmesi

AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonunun deneysel olarak elde edilen izotermi Şekil 4.11.'de sunulmaktadır. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonunun denge verileri Langmuir ve Freundlich izotermine uygulandı.



Şekil 4.11. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonunun deneysel olarak elde edilen izotermi
Langmuir (Langmuir, 1918) ve Freundlich (Freundlich, 1906) izotermelerinin doğrusal formları, sırasıyla eşitlik 4.1 ve eşitlik 4.2 de verilmektedir.

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{bq_{maks}} + \frac{C_e}{q_{maks}} \quad (4.1)$$

$$\ln q_e = \ln K_f + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (4.2)$$

Bu eşitliklerde;

q_e : AYBK'nın gramı başına tuttuğu Cu(II) kütlesi (mg/g),

q_{maks} : Maksimum Cu(II) tek tabaka tutma kapasitesi (mg/g),

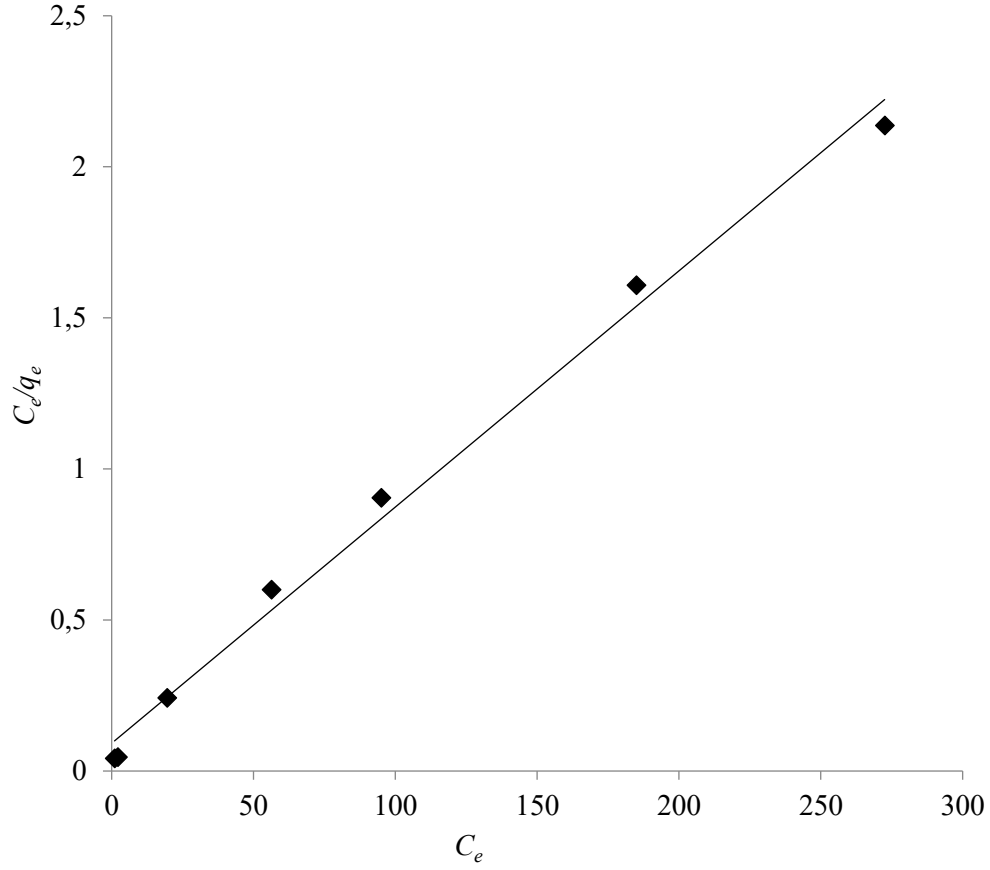
C_e : Denge halinde çözeltide giderilmeden kalan Cu(II) miktarı (mg/L),

b : Serbest enerji ya da adsorpsiyon entalpisi ile ilgili Langmuir sabiti (L/mg),

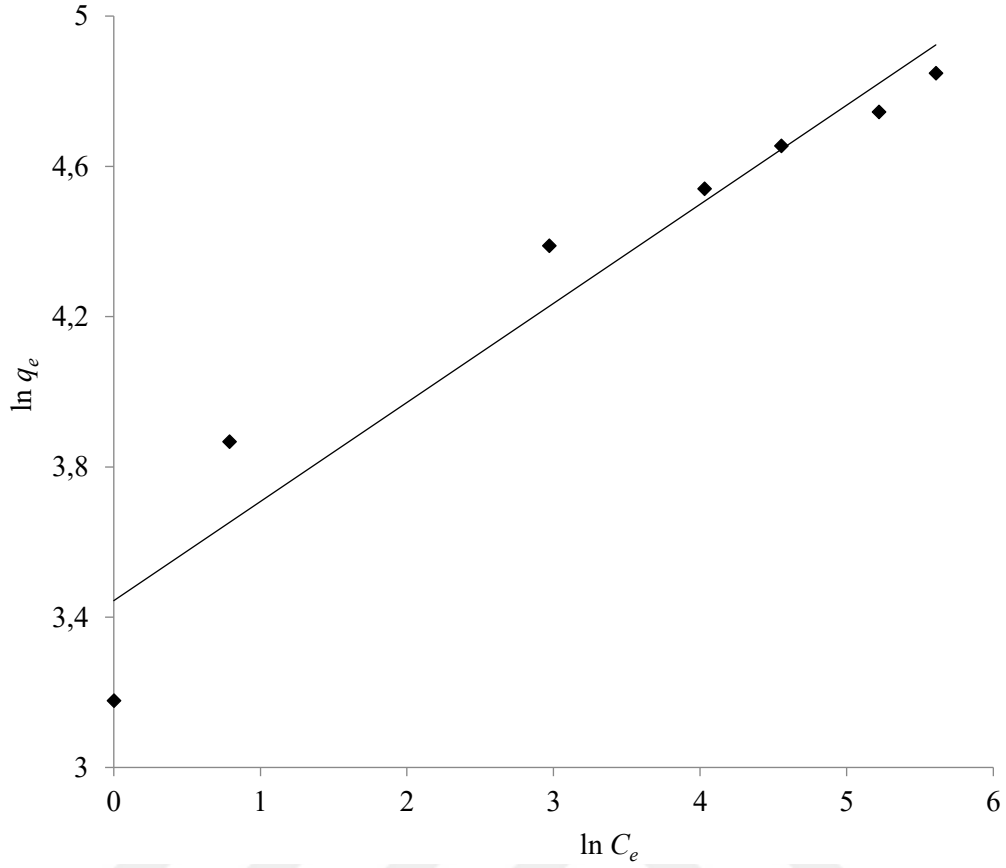
K_f : Adsorpsiyon kapasitesi ile ilgili Freundlich izoterm sabiti,

n : Adsorpsiyon yoğunluğu ile ilgili Freundlich izoterm sabitidir.

AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonunun lineer Langmuir izotermi Şekil 4.12.'de ve lineer Freundlich izotermi ise Şekil 4.13.'de gösterilmektedir. Her iki izoterm korelasyon katsayıları ile diğer sabitleri ise Tablo 4.8.'de verilmektedir.



Şekil 4.12. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonunun lineer Langmuir izotermi



Şekil 4.13. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonunun lineer Freundlich izotermi

Tablo 4.8. AYBK ile Cu(II) giderimi için Langmuir ve Freundlich izoterm sabitleri

Langmuir izoterm sabitleri			Freundlich izoterm sabitleri		
q_{max}	b	R^2	K_f	$1/n$	R^2
128,2	0,085	0,9926	31,3	0,26	0,9272

4.2.7. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyon kinetiğinin incelenmesi

AYBK ile Cu(II) adsorpsiyon kinetiği yalancı birinci mertebeden kinetik model ve yalancı ikinci mertebeden kinetik model eşitliklerine uygulanarak araştırıldı.

Yalancı birinci mertebeden (Lagergren, 1998; Senturk ve ark.,2009) ve yalancı ikinci mertebeden (Ho ve McKay,1998) kinetik model eşitliklerinin doğrusal formları, sırasıyla eşitlik 4.3 ve eşitlik 4.4 de verilmektedir.

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (4.3)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (4.4)$$

Bu eşitliklerde;

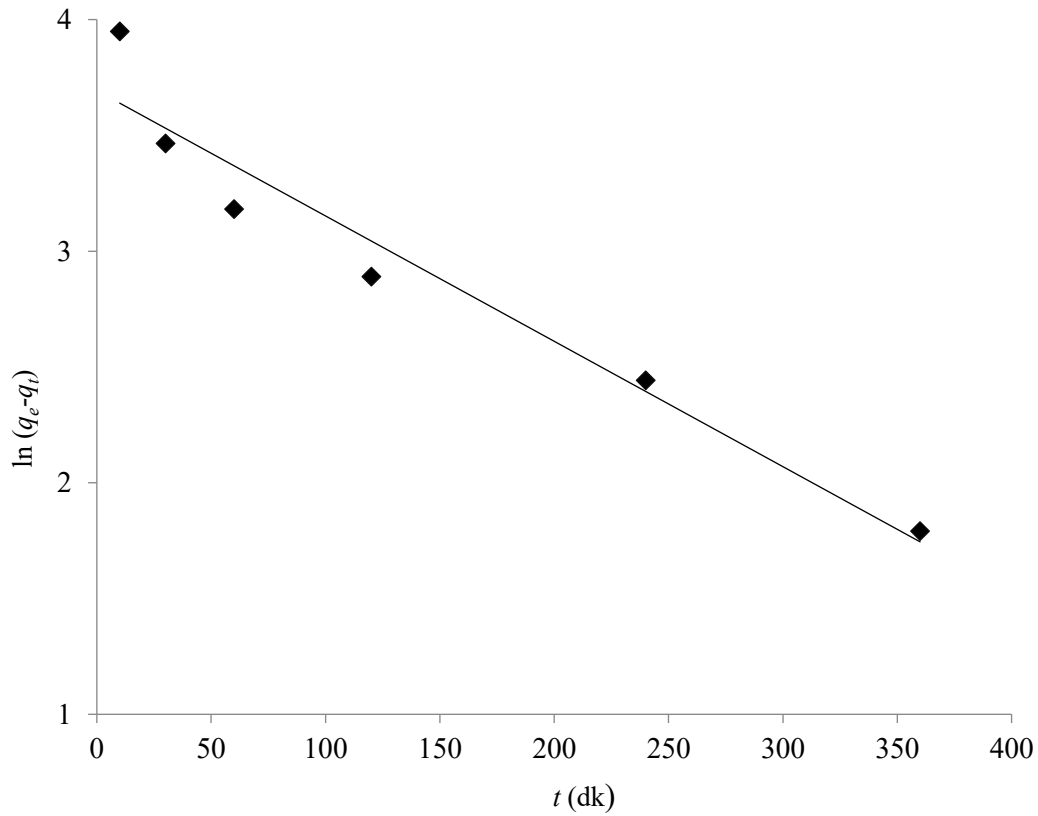
q_e : Denge halinde AYBK'nın gramı başına tuttuğu Cu(II) kütlesi (mg/g),

q_t : Bir t anında AYBK'nın gramı başına tuttuğu Cu(II) kütlesi (mg/g),

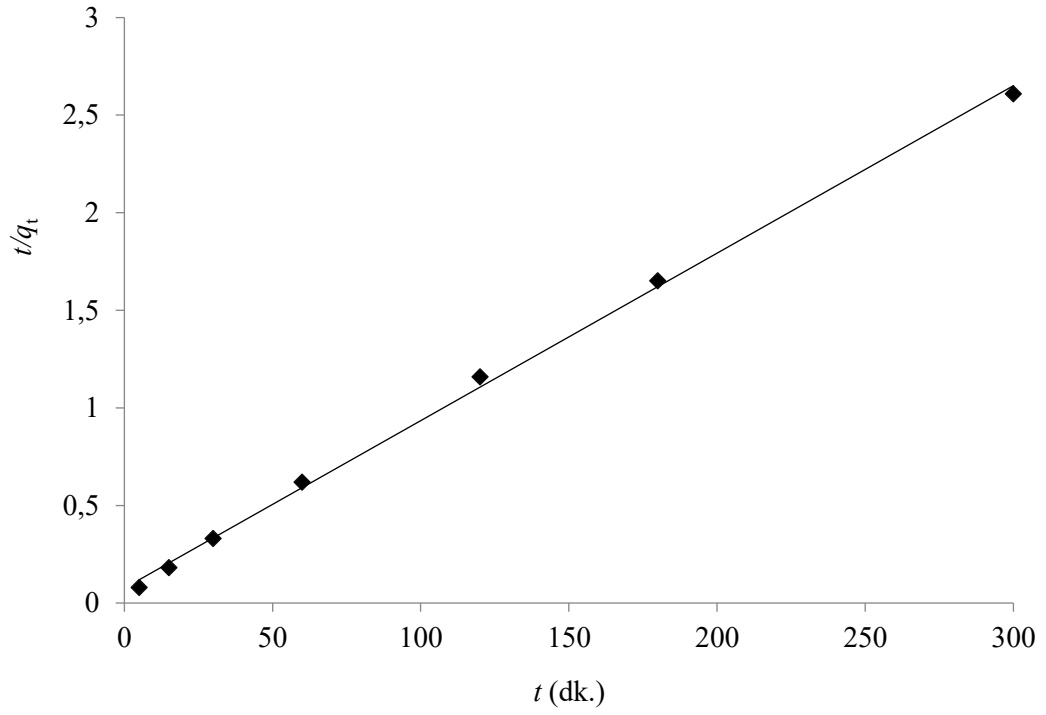
k_1 : yalancı birinci mertebeden hız sabiti (1/dk)

k_2 : yalancı ikinci mertebeden hız sabiti (g/ mg·dk)'dir.

AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonu için yalancı birinci mertebeden ve yalancı ikinci mertebeden kinetik model grafikleri sırasıyla Şekil 4.14. ve Şekil 4.15.'da sunulmaktadır. Her iki kinetik modelin korelasyon katsayıları ile diğer sabitleri ise Tablo 4.9.'da verilmektedir.



Şekil 4.14. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonu için yalancı birinci mertebeden grafiği



Şekil 4.15. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonu için yalancı ikinci mertebeden grafiği

Tablo 4.9. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonu için yalancı birinci mertebeden ve yalancı ikinci mertebeden kinetik modellerin korelasyon katsayıları ile sabitleri

q _e den (mg/g)	Yalancı birinci mertebe			Yalancı ikinci mertebe		
	k ₁ x 10 ³ (1/dk)	q _e hes (mg/g)	R ²	k ₂ x 10 ³ (g/mg·dak)	q _e hes (mg/g)	R ²
115,0	5,4	40,3	0,9441	0,97	116,3	0,9983



5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, ayçiçek saplarından başarılı bir şekilde biyokömür (AYBK) üretilmiştir. AYBK'nın kısmi analiz sonuçlarına göre rutubeti %10,6, uçucu madde miktarı 35,3 ve kül miktarı %9,3 olarak bulunmuştur. Diğer taraftan BET yüzey alanı ise 7,9 m²/g olarak bulunmuştur ki yapısının gözenekliliğinin çok küçük olduğunu göstermektedir. Bu bulgu SEM görüntüleri ile de doğrulanmaktadır. EDS analiz sonuçlarına göre ise %60,17 karbon ve %35,48 ise oksijen içerdiği bulunmuştur. Ayrıca yapısında eser düzeyde inorganik safsızlıklar bulunmaktadır. FTIR analizi sonucunda yapısında fenolik ve asidik hidroksil gruplarının mevcudiyeti ortaya çıkmıştır.

AYBK ile Cu(II) adsorpsiyon çalışmalarında pH'nın Cu(II) adsorpsiyonuna çok etkili olduğu bulunmuştur. Şöyle ki pH 2,0 değerinde Cu(II) adsorpsiyonu hiç gerçekleşmemekte, pH 3,0 değerinden sonra oluşmaya başlamaktadır. pH 4,0 ve 5,0 değerlerinde ise maksimum düzeye erişmektedir. Daha yüksek pH değerleri muhtemel çökeltme ihtimalinden dolayı incelenmemiştir. Karıştırma süresinin de AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonuna etkili olduğu bulunmuş, AYBK'nın yüzeyindeki adsorpsiyon bölgelerine Cu(II) iyonlarının erişmesi ve bu bölgelere bağlanması için beş saatlik bir süre gerekli olduğu bulunmuştur.

AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonuna AYBK dozajının etkisi, 50 mL hacminde pH'sı 5,0 olan 300 mg/L derişimde Cu(II) çözeltilerine değişik miktarlarda AYBK ilave edilmiş ve katılan AYBK miktarı ile sulu fazdan giderilen Cu(II) yüzdesi beklendiği gibi artmıştır. Fakat AYBK kütlesi ile adsorplanan Cu(II) miktarı ters orantılı olduğu için AYBK'nın gramı başına tutulan Cu(II)'nin miligram olarak miktarları azalmıştır.

AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonuna başlangıç derişiminin etkisi de araştırılmış ve Cu(II) başlangıç derişimin artması AYBK'nın gramı başına tutulan Cu(II)'nin miligram olarak miktarının artmasına neden olmuştur. Bu durum beklenen bir olaydır, çünkü analit derişimi adsorpsiyonda itici güçtür. Deneysel olarak adsorplanan Cu(II) miktarı maksimum 127,5 mg/g olarak bulunmuştur.

AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonuna Cu(II) iyonik şiddetin etkisi de sulu faza değişik derişimlerde sodyum klorür ilave edilerek araştırılmış ve NaCl derişimin sıfırdan 0,1 M' çıkması ile adsorplanan Cu(II) miktarı 115,0 mg/g'dan 85,0 mg/g'a düşmesine neden olmuştur. NaCl derişiminin 1,0 M çıkması ile yine aynı değer olan 85,0 mg/g Cu(II) bulunmuştur.

AYBK ile Cu(II) adsorpsiyon dengesi, Langmuir ve Freundlich izotermi ile analiz edilmiştir. Langmuir izotermin korelasyon katsayısı 0,9926 olarak bulunmuşken Freundlich izoterminin ki ise 0,9272 olarak elde edilmiştir. Buna göre AYBK ile Cu(II) adsorpsiyonu Langmuir izotermi ile uyumlu olduğuna karar verilmiştir. Diğer taraftan Langmuir izotermine AYBK'nın tek tabaka maksimum adsorpsiyon kapasitesi ise 128,2 mg/g olarak bulunmuştur. Bu değer, deneysel olarak elde edilen adsorpsiyon kapasitesi (115,0 mg/g) ile de uyumludur. AYBK ile Cu(II) adsorpsiyon kapasitesi literatürdeki bazı adsorbanların kapasiteleri ile mukayese edilmek üzere Tablo 5.1.'de verilmektedir. Kapasitelerin 2,6 mg/g ile 945,6 mg/g arasında değiştiği görülmüştür. Rapor edilen kapasitelerin üç tanesi 100 mg/g'dan düşük, iki tanesi ise 300 mg/g değerinden büyük, diğerleri ise 100 mg/g ile 200 mg/g aralığındadır. AYBK adsorbanının Cu(II) adsorpsiyon kapasitesi diğerleri ile karşılaştırıldığında orta seviye Cu(II) kapasitesine sahip olduğu ifade edilebilir.

AYBK ile Cu(II) adsorpsiyon kinetiği yalancı birinci mertebeden kinetik model ve yalancı ikinci mertebeden kinetik model eşitliklerine uygulanarak araştırılmıştır. Deneysel ve modeller ile tahmin edilen q_e değerleri karşılaştırıldığında yalancı birinci mertebeden kinetik model ile tahmin edilen q_e değerinin (40,3 mg/g), yalancı ikinci mertebeden kinetik model ile tahmin edilen q_e değerinden (116,3 mg/g) deneysel q_e değerine (115,0 mg/g) çok uzak olduğu görülmüştür. Diğer taraftan yalancı ikinci mertebeden kinetik modelinin korelasyon katsayısı (0,9924) diğer modele kıyasla bir değerine çok daha yakındır. Bu nedenle AYBK ile Cu(II) adsorpsiyon kinetiği yalancı ikinci mertebeden kinetik model üzerinden yürüdüğü sonucuna varılmıştır.

Tablo 5.1. AYBK'nın Cu(II) adsorpsiyon kapasitesi ile bazı adsorbanların kapasiteleri

Cu(II) Adsorpsiyon Kapasitesi (mg/g)	Adsorban	Kaynak
175,4	Hindistan cevizi kabuğundan ortofosforik asitle modifiye edilmiş biyokömür	Yadav ve ark. (2024)
945,6	Kalsiyum klorür modifiye edilmiş Medulla Tetrapanacis biyokömürü	Liu ve ark. (2025)
144,9	Su bambu kabuğundan elde edilen biyokömür	Nguyen ve ark. (2024)
23,2	Deve gübresinden elde edilen biyokömür	Wilson ve ark. (2024)
211,2	Gum Seyal biyokömürü	Babeker ve ark. (2025)
133,3	Amonyak modifiyeli talaş biyokömürü	Eleryan ve ark. (2024)
47,5	Biyokömür-sodyum aljinat kompoziti	Salem ve ark. (2025)
303,3	Tieguanyin çayı biyokömürü	Zhang ve ark. (2024)
2,6	Mantar kompostundan elde edilen biyokömür	Madzin ve ark. (2025)
128,2	AYBK	Bu çalışma

Bu tez çalışmasında ayçiçek saplarından başarılı bir şekilde biyokömür (AYBK) üretilmiştir. Ayçiçeği saplarından sülfürik asit kullanılarak üretilen yeni adsorbanın sulu çözeltilerden Cu(II) iyonlarını verimli bir şekilde giderebildiği sonucuna varılmıştır.



KAYNAKLAR

- Ab Hamid, N. H., bin Mohd Tahir, M. I. H., Chowdhury, A., Nordin, A. H., Alshaikh, A. A., Suid, M. A., ... & Rushdan, A. I. (2022). The current state-of-art of copper removal from wastewater: A review. *Water*, 14(19), 3086.
- Akhtar, J., Imran, M., Ali, A. M., Nawaz, Z., Muhammad, A., Butt, R. K., ... & Naeem, H. A. (2021). Torrefaction and thermochemical properties of agriculture residues. *Energies*, 14(14), 4218.
- ASTM D4607-94(1999), Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon, Annual Book of ASTM Standards, 2006, vol.15.01.
- Babeker, T. M. A., Lv, S., Khalil, M. N., Hao, Z., & Chen, Q. (2025). Biochar modified by ammonium pyrrolidine dithiocarbamate for high selective adsorption of copper in wastewater. *Separation and Purification Technology*, 354, 129436.
- Bal, D., Özer, Ç., & İmamoğlu, M. (2021). Green and ecofriendly biochar preparation from pumpkin peel and its usage as an adsorbent for methylene blue removal from aqueous solutions. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232, 1-16.
- Chung, N. T., Thuy, D. T., Trang, L. H., & Vu, N. T. (2025). Evaluating coffee husk biochar as a sustainable and novel adsorbent for lead and copper in wastewater. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-17.
- Eleryan, A., Aigbe, U. O., Ukhurebor, K. E., Onyancha, R. B., Eldeeb, T. M., El-Nemr, M. A., ... & El Nemr, A. (2024). Copper (II) ion removal by chemically and physically modified sawdust biochar. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(8), 9283-9320.
- Feng, Z., OuYang, X., Zhou, S., Wang, J., Lu, F., Wang, S., & Deng, Q. (2023). Carbonized sunflower stalks with or without storage tissue for highly efficient water purification and desalination. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(3), 110284.
- Freundlich, H.M.F. 1906. "Over the Adsorption in Solution." *J. Phys. Chem* 57: 1100–1107.
- García-Elías, J., Ochoa-Terán, A., López-Maldonado, E. A., Pérez-Sicairos, S., Trujillo-Navarrete, B., Rivero, I. A., ... & Ramírez-Zatarain, S. D. (2025). Adsorption properties of Merrifield-bCCA chelating resins: a new alternative for Pb 2+ removal from water. *RSC advances*, 15(12), 8999-9016.
- Grădinaru, C. M., Șerbănoiu, A. A., Mihai, P., Sarbu, G. C., & Muntean, R. (2020). Synergic effects of sunflower stalks and sodium silicate in developing an ecological concrete. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, 19(1).
- Ho, Y. S., & McKay, G. (1998). Sorption of dye from aqueous solution by peat. *Chemical engineering journal*, 70(2), 115-124.

- Karaçetin, G., Sivrikaya, S., & Imamoğlu, M. (2014). Adsorption of methylene blue from aqueous solutions by activated carbon prepared from hazelnut husk using zinc chloride. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 110, 270-276.
- Kluska, J., Matej-Lukowicz, K., & Nawrot, N. (2024). Characterization of Sunflower Waste Carbonization: Energy Balance and Water Holding Properties. *Sustainability*, 16(24), 11234.
- Koklu, R., & Imamoğlu, M. (2022). Removal of ciprofloxacin from aqueous solution by activated carbon prepared from orange peel using zinc chloride. *Membrane and Water Treatment*, 13(3), 129-137.
- Lagergren, S. (1898). About the theory of so-called adsorption of soluble substance, *Kung Sven. Vetén. Hand.*, 24, 1-39.
- Langmuir, I. 1918. "The Adsorption of Gases on Plane Surfaces of Glass, Mica and Platinum." *Journal of the American Chemical Society* 40: 1361–1403.
- Li, S., Wen, Y., Wang, Y., Liu, M., Su, L., Peng, Z., ... & Zhou, N. (2024). Novel α -amino acid-like structure decorated biochar for heavy metal remediation in acid soil. *Journal of Hazardous Materials*, 462, 132740.
- Liu, Y., Wang, H., Cui, Y., & Chen, N. (2023). Removal of copper ions from wastewater: a review. *International journal of environmental research and public health*, 20(5), 3885.
- Liu, Z., Dai, C., Hu, Y., Zhang, J., Wang, Y., Zhang, L., ... & Gao, H. (2025). Efficient removal of Cu^{2+} on Medulla Tetrapanacis-based modified biochar: adsorption performance, mechanisms and recycling for fabrication of supercapacitor electrodes. *Chemical Engineering Journal*, 162825.
- Lunardi, V. B., Santoso, S. P., Angkawijaya, A. E., Cheng, K. C., Tran-Nguyen, P. L., Go, A. W., ... & Ismadji, S. (2024). Synthesis of cellulose hydrogel by utilizing agricultural waste and zeolite for adsorption of copper metal ions. *Industrial Crops and Products*, 210, 118179.
- Madzin, Z., Zahidi, I., Talei, A., Raghunandan, M. E., Hermawan, A. A., & Karam, D. S. (2025). Optimising spent mushroom compost biochar for heavy metal removal: Mechanisms and kinetics in mine water treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 69, 106829.
- Majeed, A., Amjad, M., Imran, M., Murtaza, B., Naeem, M. A., Jawad, H., ... & Akhtar, S. S. (2023). Iron enriched quinoa biochar enhances Nickel phytoremediation potential of *Helianthus annuus* L. by its immobilization and attenuation of oxidative stress: implications for human health. *International Journal of Phytoremediation*, 25(13), 1830-1843.
- Munyengabe, A., Banda, M., Augustyn, W., Netshiongolwe, K., & Ramutshatsha-Makhwedzha, D. (2024). Application of coal fly ash for trace metal adsorption from wastewater: A review. *Heliyon*, 10(10), e31494. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31494>.
- Nguyen, T. M., Chen, H. H., Yang, C. C., Tsai, Y. P., Kuo, M. Y., Liao, Y. T., ... & Chen, K. F. (2024). The application of water bamboo (*Zizania latifolia*) husk-derived biochar for copper-contaminated irrigation water treatment and soil amendment. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 10(9), 2048-2061.

- Özer, Ç., & İmamoğlu, M. (2024). Removal of ciprofloxacin from aqueous solutions by pumpkin peel biochar prepared using phosphoric acid. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(5), 6521-6531.
- Özer, Ç., & İmamoğlu, M. (2023). Isolation of nickel (II) and lead (II) from aqueous solution by sulfuric acid prepared pumpkin peel biochar. *Analytical Letters*, 56(3), 491-503.
- Pfister, M., & Saha, S. (2017). Effects of biochar and fertilizer management on sunflower (*Helianthus annuus* L.) feedstock and soil properties. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63(5), 651-662.
- Rajput, N. A., Laghari, M., & Soothar, R. K. (2024). Enhanced phosphorus and potassium recovery through co-pyrolysis of nutrient-rich biomass feedstocks for engineered biochar production. *Bioresource Technology Reports*, 26, 101818.
- Rostami, P., Moradi, M. R., Pordsari, M. A., & Ghaemi, A. (2024). Carboxylic acid functionalized para-xylene based hyper crosslinked polymer as a novel and high performance adsorbent for heavy metal removal. *Arabian Journal of Chemistry*, 17(4), 105634.
- Saini, R., Pandey, M., Mishra, R. K., & Kumar, P. (2024). Adsorption potential of hydrochar derived from hydrothermal carbonization of waste biomass towards the removal of methylene blue dye from wastewater. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-21.
- Salem, A. R., Kassab, W. A., Adel, A. M., El-Sakhawy, M., & Al-Shemy, M. T. (2025). Insight into the efficient removal of Cu (II) from aqueous solutions on a biochar-alginate composite. *Process Safety and Environmental Protection*, 197, 106985.
- Senturk, H. B., Ozdes, D., Gundogdu, A., Duran, C., & Soylak, M. (2009). Removal of phenol from aqueous solutions by adsorption onto organomodified Tirebolu bentonite: Equilibrium, kinetic and thermodynamic study. *Journal of hazardous materials*, 172(1), 353-362.
- Sert, E., Mertsoy, E. Y., & Sert, M. (2024). Catalytic Production of Glycerol Carbonate from Glycerol Using Sunflower Stalk-Derived Biochars: Fabrication, Characterization, and Performance Evaluation. *Catalysis Surveys from Asia*, 1-12.
- Sun, L., Wan, S., & Luo, W. (2013). Biochars prepared from anaerobic digestion residue, palm bark, and eucalyptus for adsorption of cationic methylene blue dye: characterization, equilibrium, and kinetic studies. *Bioresource technology*, 140, 406-413.
- Sun, P., Zhang, K., Gong, J., Khan, A., Zhang, Y., Islama, M. S., & Zhang, Y. (2019). Sunflower stalk-derived biochar enhanced thermal activation of persulfate for high efficient oxidation of p-nitrophenol. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 27482-27493.
- Tag, A. T., Duman, G., & Yanik, J. (2018). Influences of feedstock type and process variables on hydrochar properties. *Bioresource Technology*, 250, 337-344.

- Wan, J., Liu, L., Liu, F., Wang, G., Liang, W., Zhang, W., ... & Yang, J. Unveiling the Mechanisms of Carbon Conversion and Loss in Biochars Derived from Characteristic Biomass. Available at SSRN 3985462.
- Wang, Y., Wang, K., Wang, X., Zhao, Q., Jiang, J., & Jiang, M. (2024). Effect of different production methods on physicochemical properties and adsorption capacities of biochar from sewage sludge and kitchen waste: Mechanism and correlation analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 461, 132690.
- Wilson, K., Iqbal, J., Obaid Abdalla Obaid Hableel, A., Naji Khalaf Beyaha Alzaabi, Z., & Nazzal, Y. (2024). Camel dung-derived biochar for the removal of Copper (II) and Chromium (III) Ions from aqueous solutions: adsorption and kinetics studies. *ACS omega*, 9(10), 11500-11509.
- Yadav, K., Raphi, M., & Jagadevan, S. (2024). Adsorption of copper (II) on chemically modified biochar: a single-stage batch adsorber design and predictive modeling through artificial neural network. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(5), 6011-6026.
- Zhang, M., Liu, G., Liu, R., Xu, J., Si, W., & Wei, Y. (2024). High-efficient co-removal of copper and zinc by modified biochar derived from tea stalk: Characteristics, adsorption behaviors, and mechanisms. *Journal of Water Process Engineering*, 57, 104533.
- Zubkova, V., Strojwas, A., Bielecki, M., Kieush, L., & Koverya, A. (2019). Comparative study of pyrolytic behavior of the biomass wastes originating in the Ukraine and potential application of such biomass. Part 1. Analysis of the course of pyrolysis process and the composition of formed products. *Fuel*, 254, 115688.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Süleyman UZUN

ÖĞRENİM DURUMU:

- Lisans** : 1995, Atatürk Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü
- Yüksek lisans** : Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya ABD Analitik Kimya Bilim Dalı (devam ediyor)

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 1995- halen: Millî Eğitim Bakanlığı'nda öğretmen olarak çalışmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Uzun S., İmamoğlu, M. (2025) "Removal of Cu(II) ions from aqueous solutions using sunflower stalk biochar prepared with sulfuric acid", Turkish Journal of Analytical Chemistry, incelemede.