



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
KİMYA ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ATIK PATATES KABUKLARI KULLANILARAK HAM PATATES
KABUĞU VE İŞLENMİŞ PATATES KABUĞU İLE SULU
ÇÖZELTİLERDEN Ni (II) İYONLARININ ADSORPSİYON
KAPASİTELERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI. İZOTERM,
KİNETİK VE TERMODİNAMİK ÇALIŞMALAR**

Aycan BULUT

**Aralık-2024
BATMAN**

**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
KİMYA ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ATIK PATATES KABUKLARI KULLANILARAK HAM PATATES
KABUĞU VE İŞLENMİŞ PATATES KABUĞU İLE SULU
ÇÖZELTİLERDEN Ni (II) İYONLARININ ADSORPSİYON
KAPASİTELERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI. İZOTERM,
KİNETİK VE TERMODİNAMİK ÇALIŞMALAR**

Aycan BULUT

**Danışman
Doç. Dr. Yalçın ALTUNKAYNAK**

Diğer Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ömer YAVUZ

Doç. Dr. Yalçın ALTUNKAYNAK

Öğr. Gör. Dr. Mutlu CANPOLAT

**Aralık-2024
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Aycan BULUT tarafından hazırlanan “Atık Patates Kabukları Kullanılarak Ham Patates Kabuğu Ve İşlenmiş Patates Kabuğu İle Sulu Çözeltilerden Ni (II) İyonlarının Adsorpsiyon Kapasitelerinin Karşılaştırılması. İzoterm, Kinetik ve Termodinamik Çalışmalar” adlı tez çalışması 25/12/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Kimya Ana Bilim/Sanat Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Ömer YAVUZ

.....

Danışman

Doç. Dr. Yalçın ALTUNKAYNAK

.....

Üye

Öğr. Gör. Dr. Mutlu CANPOLAT

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

Aycan BULUT
Tarih: 25/12/2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ATIK PATATES KABUKLARI KULLANILARAK HAM PATATES KABUĞU VE İŞLENMİŞ PATATES KABUĞU İLE SULU ÇÖZELTİLERDEN Ni(II) İYONLARININ ADSORPSİYON KAPASİTELERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI. İZOTERM, KİNETİK VE TERMODİNAMİK ÇALIŞMALAR

Aycan BULUT

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Kimya Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Yalçın ALTUNKAYNAK

2024, 53 Sayfa

Bu tez çalışmasında, sulu çözeltilerden Ni(II) iyonlarını etkili bir şekilde uzaklaştırmak için atık patates kabukları (PP) ve İşlenmiş Patates Kabuklarının (MPP) umut verici uygulamasını uygun bir çözüm olarak araştırmayı amaçlamaktadır. PP için, Ni(II) iyonlarının sulu çözeltiden uzaklaştırılmasında en iyi çalışma koşulları, 500 mg/L başlangıç konsantrasyonu, 0.3 g adsorban dozajı, 100 dakikalık temas süresi ve 6.21'lik bir çözelti pH'ı. MPP için ise en iyi çalışma koşulları 500 mg/L'lik bir başlangıç konsantrasyonu, adsorban dozu olarak 0.15 g, 100 dakikalık temas süresi ve çözelti pH'ının 6.21 olduğu durum belirlendi. Adsorban maddelerin uzaklaştırma kapasitelerini daha iyi anlamak için farklı sıcaklıklarda çalışmalar yapıldı. Ni(II) iyonlarının adsorpsiyon yetenekleri PP için farklı sıcaklıklarda (298 K, 308 K ve 318 K) sırasıyla 25.125, 29.325 ve 33.112 mg/g olarak belirlendi. Aynı şartlarda MPP için adsorpsiyon kapasitesi sırasıyla 68.965, 78.125 ve 85.470 olarak bulundu. Adsorpsiyon kinetiğinin daha ileri analizi, hem PP hem de MPP adsorbanları için deneysel verilerin yalancı ikinci dereceden modele uyduğu görüldü. Termodinamik araştırmalar, kullanılan adsorbanlar üzerindeki Ni(II) metal iyonlarıyla ilgili adsorpsiyon sürecinin endotermik ve kendiliğinden gerçekleştiğini ortaya koydu. Sonuç olarak PP ve MPP, Ni(II) iyonlarının sulu ortamdan uzaklaştırılması için son derece verimli ve çevreye duyarlı adsorbanlar olduğu belirlendi. Metal iyonlarını etkin bir şekilde uzaklaştırmada oldukça iyi adsorpsiyon kapasiteleri, basit erişilebilirlik, maliyet etkinliği ve tarımsal atık olarak kökeni ile birleştğinde, su arıtma ve çevre iyileştirmede sürdürülebilir uygulamalar için umut verici birer adsorban olarak konumlandırıyor.

Anahtar Kelimeler: Patates kabuğu, Adsorpsiyon, Nikel, İzoterm, Kinetik

ABSTRACT

MASTER THESIS

COMPARISON OF ADSORPTION CAPACITIES OF Ni (II) IONS FROM AQUEOUS SOLUTIONS WITH RAW POTATO PEEL AND PROCESSED POTATO PEEL USING WASTE POTATO PEEL. ISOTHERM, KINETIC, AND THERMODYNAMIC STUDIES

Aycan BULUT

Batman University Graduate Education Institute

Chemistry Department of Science

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Yalçın ALTUNKAYNAK

2024, 53 Pages

This thesis aims to investigate the promising application of waste potato peels (PP) and processed potato peels (MPP) as a suitable solution for effectively removing Ni(II) ions from aqueous solutions. For PP, the best working conditions for removing Ni(II) ions from aqueous solutions were determined as an initial concentration of 500 mg/L, an adsorbent dosage of 0.3 g, a contact time of 100 min, and a solution pH of 6.21. For MPP, the best working conditions were determined as an initial concentration of 500 mg/L, an adsorbent dosage of 0.15 g, a contact time of 100 min, and a solution pH of 6.21. In order to better understand the removal capacities of adsorbents, studies were conducted at different temperatures. Adsorption capacities of Ni(II) ions were determined as 25.125, 29.325, and 33.112 mg/g for PP at different temperatures (298 K, 308 K, and 318 K), respectively. Adsorption capacities for MPP under the same conditions were found to be 68.965, 78.125, and 85.470, respectively. Further analysis of adsorption kinetics showed that experimental data for both PP and MPP adsorbents fit the pseudo-second-order model. Thermodynamic studies revealed that the adsorption process related to Ni(II) metal ions on the used adsorbents was endothermic and spontaneous. As a result, PP and MPP were determined to be highly efficient and environmentally friendly adsorbents for the removal of Ni(II) ions from aqueous media. Their very good adsorption capacity in effectively removing metal ions, combined with their simple accessibility, cost-effectiveness, and origin as agricultural waste, positions them as promising adsorbents for sustainable applications in water treatment and environmental remediation.

Keywords: Potato peel, Adsorption, Nickel, Isotherm, Kinetics

ÖN SÖZ

Tez çalışmalarımda büyük desteklerini esirgemeyen danışmanım Sayın Doç. Dr. Yalçın ALTUNKAYNAK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, ders dönemimde ve tez çalışmaları sürecinde yanımda olan Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Kimya Anabilim Dalı Başkanı Prof. Dr. Abdulkadir LEVENT'e, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Müdür Yardımcısı Öğr. Gör. Dr. Mutlu CANPOLAT ve tez savunmamda yer alan jüri üyelerine içtenlikle teşekkür ederim.

Ayrıca eğitim hayatım boyunca yanımda olan ve desteklerini hiç esirgemeyen aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

Aycan BULUT
BATMAN-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1. Adsorpsiyon Hakkında Genel Bilgiler	4
2.2. Adsorpsiyonu Etkileyen Faktörler	5
2.3. Adsorpsiyon İzotermi.....	6
2.4. Adsorpsiyon Kinetik Modelleri	7
2.5. Adsorpsiyon Termodinamiği	9
2.6. Nikel	10
2.7. Adsorplayıcı.....	10
3. MATERYAL VE METOTLAR	13
3.1. Materyal	13
3.1.1. Kimyasal Maddeler	13
3.1.2. Kullanılan Cihazlar ve Yapılan Analizler	13
3.2. Metotlar	13
3.2.1. Patates Kabuğu (PP) ve Modifiye Patates Kabuğu (MPP) Hazırlanması.....	13
3.2.2. Çözeltilerin Hazırlanması	14
3.2.3. Adsorpsiyon Çalışmaları.....	14
3.2.4. Metal iyonunun başlangıç konsantrasyonunun adsorpsiyona etkisi	14
3.2.5. Adsorban dozajının etkisi	15
3.2.6. Temas süresinin etkisi.....	15
3.2.7. Sıfır yük noktası (PZC).....	15
3.2.8. pH'ın adsorpsiyona etkisinin belirlenmesi	15
3.2.9. Adsorbanın karakterizasyonu	16
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	17

4.1. Başlangıç Derişiminin Etkisi	17
4.2. pH'ın Etkisi	18
4.3. Adsorban dozunun etkisi	19
4.4. Temas Süresinin Adsorpsiyona Etkisi	20
4.5. Kinetik Çalışmalar	21
4.6. İzoterm Çalışmaları.....	24
4.7. Termodinamik Çalışmalar	27
4.8. Adsorban Karakterizasyonu.....	29
4.8.1. BET ve SEM/EDS analizleri	29
4.8.2. FT-IR analizi.....	31
4.9. Desorpsiyon çalışmaları.....	33
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	34
5.1 Sonuçlar	34
5.2 Öneriler	34
KAYNAKLAR	36

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 4.1. Başlangıç konsantrasyonunun PP ile Ni (II) giderimi üzerindeki etkisi	
B) Başlangıç konsantrasyonunun MPP ile Ni (II) giderimi üzerindeki etkisi (Ci ve Ce sırasıyla metal iyonlarının başlangıç ve denge derişimleri).....	17
Şekil 4.2. 0.1 mol/L KCl kullanılarak PP ve MPP' için sıfır yük PZC karakterizasyonu.....	18
Şekil 4.3. A) PP kullanılarak pH'ın Ni(II) iyonlarının uzaklaştırılması üzerindeki etkisi B) MPP kullanılarak pH'ın Ni(II) iyonlarının uzaklaştırılması üzerindeki etkisi.....	19
Şekil 4.4. PP ve MPP üzerindeki Ni(II) adsorpsiyonuna dozajın etkisi.....	20
Şekil 4.5. PP üzerine Ni(II) iyonu adsorpsiyonunda temas süresinin etkisi B) MPP üzerine Ni(II) iyonu adsorpsiyonunda temas süresinin etkisi... ..	21
Şekil 4.6. PP ve MPP üzerinde Ni(II) adsorpsiyonu için (A) PFO (B) PSO (C) Weber-Morris (D) Elovich kinetik model grafikleri.....	22
Şekil 4.7. Ni(II) iyonlarının PP ve MPP üzerine adsorpsiyonunda (A) Langmuir (B) Freundlich (C) Temkin (D) Dubinin- Radushkevich izoterm grafikleri.....	26
Şekil 4.8. A)PP'nin Adsorpsiyondan önce SEM/EDS görüntüsü B) PP'nin Adsorpsiyondan sonra SEM/EDS görüntüsü C) MPP'nin Adsorpsiyondan önce SEM/EDS görüntüsü D)) MPP'nin Adsorpsiyondan sonra SEM/EDS görüntüsü.....	30
Şekil 4.9. PP, MPP, PP-Ni ve MPP -Ni'nin FTIR spektrumları.....	32

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Fizisorpsiyon ve kemisorpsiyonun karşılaştırılması.....	5
Tablo 4.1. Farklı sıcaklıklarda, PP ve MPP ile 'taki Ni(II)'nin giderilmesine yönelik kinetik faktörler.....	23
Tablo 4.2. Farklı sıcaklıklarda Ni(II) iyonlarının PP ve MPP üzerine adsorpsiyonu için İzoterm parametreleri.....	25
Tablo 4.3. Ni(II) giderimi için çeşitli adsorbanların adsorpsiyon kapasitelerinin karşılaştırması.....	27
Tablo 4.4. PP ve MPP'de Ni(II) iyon adsorpsiyonunda: ΔG° , ΔH° ve ΔS° değerleri.....	28
Tablo 4.5. PP ve MPP nin BET yüzey analiz hesaplamaları.....	29
Tablo 4.6. PP ve MPP'de Ni(II) desorpsiyon değerleri. (Başlangıç Ni (II) iyon konsantrasyonu 500 mg/L.).....	33

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

q_e	Denge adsorpsiyon katsayısı (mg/g)
q_t	t anındaki adsorpsiyon katsayısı (mg/g)
δ	Kimyasal kayma (ppm)
$^{\circ}\text{C}$	Santigrad
C_e	Çözeltinin denge derişimi (mg/L)
C_i	Çözeltinin başlangıç derişimi (mg/L)
g	Gram
mg	Miligram
V	Çözelti hacmi (L)
t	Zaman (dk)
m	Adsorban kütlesi (g)
$\bar{\nu}_{\text{maks}}$	Maksimum dalga sayısı
k_1	PFO hız sabiti (1/dk)
k_2	PSO hız sabiti (g/mg dk)

Kısaltmalar

AAS	Atomik Adsorpsiyon Spektroskopisi
PP	Patates Kabuğu
MPP	Modifiye Patates Kabuğu
PFO	Yalancı birinci derede
PSO	Yalancı ikinci derece
FT-IR	Fourier transform infrared
NaOH	Sodyum hidroksit
HCl	Hidroklorik asit

1. GİRİŞ

Küresel ölçekteki artan sanayileşme ve hızlı kentleşme eğilimleri, ağır metal kirliliğinin önemli ölçüde artmasına neden olmaktadır. Bu durum, insan ve diğer canlı yaşamını ciddi şekilde tehdit eden bir sorunun ortaya çıkmasına yol açmaktadır. Ağır metaller, su kaynaklarına sızarak, toprakları etkileyerek, ekosistemlere ve biyo çeşitliliğe zarar vererek geniş bir çevresel etki yelpazesi oluşturur. Bu durum, cilt hastalıkları, solunum sorunları, kardiyovasküler hastalıklar ve değişik kanser tipleri gibi sağlık sorunlarına sebep olabilir. Bu nedenle, ağır metal kirliliğinin kontrol altına alınması ve azaltılması, sürdürülebilir bir çevre ve insan sağlığı için önemli bir öncelik haline gelmiştir (Riaz ve ark., 2018). Düşük maliyetli ve kolay teknikler ağır metallerin uzaklaştırılmasında en fazla tercih edilenler arasındadır. Başta elektronik ve maden sektörü olmak üzere endüstrinin çoğu alanında ağır metal içerikli atıklar bulunmaktadır. Bu tür atıklar genel olarak su kaynaklarının kirlenmesinde önemli bir rol oynarlar. Bu nedenle, ekonomik ve etkili atık yönetimi uygulamalarının benimsenmesi, çevresel etkilerin azaltılması ve su kaynaklarının korunması açısından kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, sürdürülebilir atık bertarafı ve geri dönüşüm sistemleri, çevresel sorumlulukları yerine getirme konusunda önemli bir rol oynamaktadır (Ofudje ve ark., 2017).

Biyokimyasal faaliyetler Bazı metallere ihtiyaç duyulabilir. Ancak, Cu, Co, Zn, Mn, Ni, Cd, Pb gibi ağır metallerin aşırı miktarda veya iz düzeylerinde bulunması, insanlar, hayvanlar ve bitkiler için yaşamsal öneme sahip olan biyolojik süreçleri ciddi şekilde etkileyebilir. Bu metallerin fazlalığı, çeşitli sağlık sorunlarına, ekosistem bozulmalarına ve biyoçeşitlilik kayıplarına yol açabilir. Bu nedenle, bu ağır metallerin kontrolü ve yönetimi, sürdürülebilir bir çevre ve sağlıklı yaşam için kritik bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, çevresel düzenlemelerin ve atık yönetimi politikalarının etkin bir şekilde uygulanması büyük bir önem taşımaktadır (Ofudje ve ark., 2013).

Sanayi sektörünün hızlı gelişimi ile, metal iyonlarının kullanımı ve buna bağlı olarak endüstriyel atıkların ciddi bir şekilde artışı sorun olarak sebep rtaya çıkmaktadır. Bu durum, ağır metallerin endüstriyel faaliyet alanlarında kullanılması nehir, dere yatağı, iç su yolu, akarsu gibi doğal ortamlara belirlenen sınırların üzerinde boşaltılmasına yol açmaktadır. Sonuç olarak, su akıntıları zaman içinde giderek daha fazla kirlenmektedir (Manikandaraja ve Senthilkumaran, 2014). Nikel, boya sanayi, maden arama, arıtma ve elektrokaplama endüstrilerinde oldukça fazla bir şekilde kullanılan, insan sağlığı için

potansiyel tehlike oluşturan bir toksik ağır metal iyonudur. Bu endüstrilerdeki yaygın kullanımı, nikelin çevresel ortamlara salınmasına ve su kaynaklarına bulaşmasına neden olabilir. Aşırı miktarda nikelin insan vücudunda birikmesi, ciddi sağlık sorunlarına yol açabilir. Bu sorunlar arasında kronik astım, prostat kanseri ve gırtlak kanseri gibi potansiyel olarak ölümcül hastalıklar bulunmaktadır. Bu nedenle, nikelin kontrolsüz salınımının önlenmesi ve etkili bir şekilde yönetilmesi, çevresel ve insan sağlığı açısından kritik bir öneme sahiptir (Yavuz ve ark. 2003; Bhattacharyya ve ark. 2008). Atık sularındaki ağır metallerin atık uzaklaştırılmasında kullanılan farklı teknikler arasında biyolojik işlemler, elektrokimyasal teknikler, çöktürme, iyon değişimi, membran filtrasyonu, ve adsorpsiyon bulunmaktadır (Tümsek ve ark. 2012). Nikel, içme sularındaki miktarı genellikle 0,02 mg/L'nin altında bulunmaktadır. Ancak, musluk ve tesisattan sızıya geçen nikel, özellikle doğal ya da endüstriyel kaynaklardan kaynaklanan birikimlerle birlikte, belirli durumlarda 1 mg/L konsantrasyonuna ulaşabilir. Bu durum, özellikle WHO (Dünya Sağlık Örgütü) tarafından belirtilmiş olup, özel durumlarda nikel birikiminin olduğu bölgelerde daha yüksek konsantrasyonların gözlemlenebileceğini vurgulamaktadır (Oğuz, 2015). Ağır metallerin içme suyundan uzaklaştırılması için çöktürme (Wang ve ark., 2019), adsorpsiyon (Hashim ve ark., 2019), biyolojik uzaklaştırma (Nasser Sahmoune, 2016), membran ayırma (Tripathy ve Hota, 2020), pıhtılaşma filtrasyonu (Wickramasinghe ve ark., 2004) , iyon değişimi (Rathi ve ark., 2021), ön oksidasyon (Habuda-Stanic ve ark., 2015), vb. dahil olmak üzere hem laboratuvar hem de saha koşullarında çeşitli fizyo-kimyasal arıtma yöntemleri benimsenmiştir. Günümüzde adsorpsiyon yöntemi basit çalışması, düşük maliyeti, düşük enerji tüketimi ve tekrar kullanılabilirliği nedeniyle giderek daha fazla ilgi görmektedir (Alka ve ark., 2020). Özellikle, arıtma kapasitesinin büyük olduğu ve metal iyon konsantrasyonunun düşük olduğu su kütleleri için adsorpsiyon yöntemi, su kütlesine yeni kirlilik bileşenleri eklemekten kirleticileri etkili bir şekilde adsorbe edebilir (Lee ve ark., 2019). Adsorpsiyon yöntemleri, adsorbat moleküllerinin adsorban yüzeyinde birikmesine dayanır ve bu süreç, çeşitli fiziksel ve kimyasal olayları içerir. Bu yöntemler, ucuz, kolay uygulanabilirlik, çevre dostu, yüksek uzaklaştırma kabiliyetleri ve doğal adsorbanların kullanım potansiyeli gibi avantajlarla diğer yöntemlere kıyasla önemli fırsatlar sunar. Ayrıca, canlı yaşamı için tehlikeli olan ağır metal iyonlarının sulardan arındırılması amacıyla farklı adsorbanlar özel olarak geliştirilmektedir. Bu adsorbanlar, atık sulardan ağır metalleri etkili bir şekilde uzaklaştırarak çevresel sağlığı koruma, su kaynaklarını temizleme ve ekosistemleri koruma açısından önemli bir rol oynar. Bu sayede,

adsorpsiyon yöntemleri sadece teknik etkinlikleriyle değil, aynı zamanda çevre dostu ve sürdürülebilir çözümler sunmalarıyla da dikkat çeker (Tamjidi ve ark., 2019). Bu bağlamda, buğday samanı, zeolit, kil, aktif karbon, diatomit, montmorillonit, biyokütle gibi oldukça fazla sayıda doğal adsorban, ağır metallerin atık sulardan uzaklaştırılması amacıyla başarıyla kullanılmaktadır (Guiza, 2017; Bhatnagar ve ark. 2010; Hanif ve ark. 2009; Sales ve ark., 2021).

Doğal tarımsal atıkların çevresel etkilerini azaltmak amacıyla kullanılan adsorbanlar, ağır metallerin uzaklaştırılmasında giderek daha fazla tercih edilmektedir. Bu tercihin arkasındaki nedenler, düşük maliyetleri ve ikincil atık oluşturmamalarıdır. Gıda tarım örgütü (FAO) verilerine göre; Dünyada patates üretimi 2020 yılında 359 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Bu üretimde 78 milyon tonluk üretim ile Çin ilk sırada yer alırken, Türkiye yaklaşık 5.2 milyon tonluk üretim ile 16'ncı sırada yer almaktadır (FAO, 2022).

Patates kabukları, genellikle çevreye atılarak çevre kirliliğine neden olan, ekonomik değeri düşük bir malzemedir. Su ortamından metal ayırma amacıyla etkin, uygun fiyatlı ve çevre dostu bir alternatif olarak kullanılabilir. Karbon bakımından zengin bitkisel atıklar, düzenli depolanarak başta ağır metal iyonları olmak üzere zararlı kirleticileri atık sulardan uzaklaştırmak kullanıldığında, bitkisel atıkların ticari değeri artar ve çevre kirliliği üzerindeki etkileri gittikçe azalır (Rafatullah ve ark., 2010).

Bu tez çalışmasında, Ni (II) iyonlarının; sulu çözeltilerden uzaklaştırılması amacıyla etkili bir adsorban olarak atık patates kabukları ve modifiye patates kabuklarının kullanılabilirliği araştırılmıştır. Adsorban ile kirletici arasındaki etkileşim yanında, adsorbanın yüzey alanı, sıcaklık, parçacık boyutu, çözeltinin pH'ı ve temas süresi gibi faktörler de adsorpsiyon sürecini etkiler. Adsorpsiyon faaliyetinde, farklı pH değerlerinde çözelti kullanılarak en yüksek adsorpsiyon verimi sağlayan optimum pH seviyesi belirlenmiştir. Daha sonra, Ni (II)'nin başlangıç konsantrasyonunun adsorpsiyon üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla belirlenen pH değerlerinde farklı derişimlerdeki Ni (II) çözeltileri kullanılarak en yüksek adsorpsiyonun gerçekleştiği başlangıç konsantrasyonu belirlenmiştir. Ni (II)'nin adsorban ile etkileşiminin zamanla nasıl değiştiğini anlamak için farklı zamanlarda alınan numunelerdeki Ni (II) konsantrasyonları belirlenmiş ve bu veriler Yalancı birinci derece (PFO), Yalancı ikinci derece (PSO) Weber-Morris ve Elovich modellerine göre analiz edilmiştir. Sonuç olarak, adsorpsiyon kinetiğinin hangi modele uyduğu belirlenmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Adsorpsiyon Hakkında Genel Bilgiler

Adsorpsiyon, bir adsorplayıcı maddenin yüzeyinin, adsorplanmış olan madde ile atom, molekül veya iyonların birbirine bağlanması yoluyla etkileşime girmesi sonucu oluşan fiziksel veya kimyasal bir süreçtir.

Adsorplayıcı veya adsorban, sıvı veya gaz fazındaki molekülleri yüzeyinde tutan madde olarak tanımlanırken; adsorplanan veya adsorbat, katının yüzeyinde bulunan maddeyi ifade eder (Onursal ve ark., 2020; Onursal ve ark., 2019; Güzel, 1991).

Adsorplanan ile adsorplayan molekülleri arasındaki, çekim kuvvetine bağlı olarak fiziksel adsorpsiyon veya kimyasal adsorpsiyon olmak üzere 2 tür adsorpsiyon gerçekleşir.

Fizisorpsiyon, adsorplayıcı ve adsorplanan moleküller arasındaki çekim kuvvetlerinin zayıf olduğu bir adsorpsiyon türüdür. Bu tür bir adsorpsiyonda, adsorban ile adsorbat arasında hiçbir elektron paylaşımı gerçekleşmez. Bu nedenle, sıcaklığın artırılması veya basıncın düşürülmesiyle adsorbe olan bir adsorbat kolaylıkla desorbe olabilir; yani bu işlem tersine çevrilebilir. Katı yüzeyde yüksek konsantrasyonda bulunan tanecikler, adsorban yüzeyinde zayıf bir tabaka oluşturarak hareketli olarak kalır ve bu durum, moleküllerin diğer faza geçmesine olanak tanır (Dinçer, 2007).

Kemisorpsiyon, adsorban ve adsorplayıcı arasındaki etkileşimlerin güçlü bağlarla gerçekleştiği bir süreçtir. Bu süreçte moleküller, yüzeyde valans kuvvetleri ile tutulurken, fizisorpsiyondaki Van der Waals etkisinden daha güçlü olan kovalent ve iyonik bağlarla birleşirler. Kimyasal adsorpsiyon sırasında, adsorplanan moleküller ile yüzeydeki moleküller arasında reaksiyon gerçekleşir. Bu etkileşim, adsorbatın elektronik yapısında önemli değişikliklere yol açar ve yüzeyde bir monolayer oluşumunu sağlar. Monolayer, yüzeyin tamamını kapladığında, adsorplayıcının adsorpsiyon kapasitesi dolmuş olur (Sarıkaya, 2000).

Bazı adsorpsiyon süreçlerinde hem fiziksel hem de kimyasal adsorpsiyon birlikte gerçekleşir. Düşük sıcaklık koşullarında fiziksel adsorpsiyon ön planda iken, yüksek sıcaklıklarda kimyasal adsorpsiyon ortaya çıkar.

Tablo 2.1. Fizisorpsiyon ve kemisorpsiyonun karşılaştırılması (Hünür, 2019)

Parametre	Fizisorpsiyon	Kemisorpsiyonun
1. Adsorban ve adsorbat arasındaki ilişki	Adsorbat, kritik sıcaklığın altında meydana gelir.	Kimyasal bir etkileşim gereklidir.
Sıcaklık	Sıcaklık yükseldikçe adsorpsiyon düşer.	Adsorpsiyon sıcaklık artar.
Etkin olan kuvvetler	Van der Waals bağları etkili olmaktadır.	Kimyasal bağ kuvvetleri belirleyicidir.
Adsorpsiyon ısı	Adsorbatın yoğunlaşma ısı, kimyasal tepkime ısı seviyesindedir (5 / 10 kcal/mol).	Kimyasal tepkime ısı aralığındadır (10 / 100 kcal/mol).
Olayın hızı ve aktivasyon enerjisi	İşlem çok hızlıdır ve aktivasyon enerjisi neredeyse sıfırdır.	Reaksiyon hızı, aktivasyon enerjisi tarafından belirlenir.
Yüzeyin dolması	Tek tabaka veya çok tabakalı yapı oluşturabilir.	Genellikle tek tabakalıdır.
Adsorpsiyon entalpisi	5 / 40 kJ/mol	40 / 800 kJ/mol
Tersinirlik	Adsorpsiyon dengesi tersinir..	Genellikle tersinmez.

2.2. Adsorpsiyonu Etkileyen Faktörler

Adsorpsiyon süreci, ortamın pH'ı, sıcaklık, adsorplanan ve adsorplayıcı maddeler, sürecin gerçekleştiği ortamda bulunan konsantrasyon, yüzeyin yapısı ve genişliği gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir.

Ortamın pH'ı, adsorpsiyon sürecini etkileyen önemli faktörler arasındadır. Genellikle adsorplayıcı yüzeyler negatif yüklüdür, bu yüzden katyonlar daha rahat adsorplanır. Bu durumda, pozitif ve negatif yükler arasında bulunan elektrostatik çekim kuvvetleri devreye girer. Düşük pH seviyelerinde (H_3O^+ iyonlarının yoğun olduğu durumlarda), H_3O^+ iyonu ile metal iyonu arasında bir rekabet söz konusudur. Yüksek pH seviyelerinde ise metal iyonu ile OH^- iyonları arasında etkileşim olur. Bu nedenle, yüksek pH değerlerinde adsorpsiyon oranı düşer.

Sıcaklık, adsorpsiyonu etkileyen önemli bir faktördür. Sıcaklığın adsorpsiyon üzerindeki etkisi, entalpi değerine bağlıdır. Adsorpsiyon ekzotermik ise sıcaklık yükseldikçe adsorpsiyon miktarı düşer. Öte yandan, eğer adsorpsiyon endotermikse, sıcaklık artışı ile birlikte adsorpsiyon yükselir.

Adsorpsiyon süreci, yüzey etkileşimleriyle ilgili olduğundan, adsorpsiyonun miktarı yüzey alanına bağlıdır. Adsorbanın fizikokimyasal özellikleri, adsorpsiyon kapasitesi ve hızı, spesifik yüzey alanıyla orantılıdır; bu da adsorpsiyonu etkileyen bir faktördür. Bu nedenle, adsorplayıcının büyük bir yüzey alanına, küçük partikül boyutuna ve gözenekli bir yapıya sahip olması tercih edilmektedir.

Adsorpsiyon maddenin çözünürlüğü ile ters orantılıdır. Yani, bir maddenin suda çözünürlük oranı azaldıkça, adsorpsiyon miktarı da azalır. Eğer çözünmüş madde, sisteme daha güçlü bir şekilde bağlanıyorsa, yani hidrofobik özellikleri zayıfsa, adsorplayıcının yüzeyine tutunma oranı da düşer. Aynı koşullar altında, hidrofilik gruplar içeren bir adsorbat, hidrofobik gruplara sahip bir adsorbata kıyasla daha az adsorplanır. İnorganik bileşikler, içeriklerindeki hidrofilik gruplar nedeniyle daha az adsorplanırken, hidrofobik maddeler daha fazla adsorplanma gösterir.

2.3. Adsorpsiyon İzotermi

Adsorpsiyon izotermi, belirli bir sıcaklık ve pH seviyesinde, adsorban üzerinde adsorplanmış madde miktarı ile çözeltide kalan madde derişimi arasındaki denge durumunu gösteren grafiklerdir (Okumuş ve Doğan, 2019).

Adsorpsiyon izotermi incelendiğinde, adsorpsiyon sürecinin adsorplayıcı ile adsorplanan arasındaki ilişkisi, adsorbentin adsorpsiyon kapasitesi, yüzey alanı, adsorpsiyon enerjisi ve sürecin hangi türde gerçekleştiği gibi çeşitli bilgiler elde edilebilir.

Deneyisel verilerin analizi için çeşitli adsorpsiyon denklemleri geliştirilmiştir. Bununla birlikte, genellikle Langmuir ve Freundlich izotermi tercih edilmektedir.

Finlay Freundlich'in geliştirdiği bu model (Freundlich, 1909), adsorpsiyon olayının tersinir olduğunu ve sadece tek tabakalı olmadığını belirtir. Adsorplanan maddenin konsantrasyonu yükseldikçe, adsorplanma miktarı da artış gösterir. Bu nedenle, maksimum adsorpsiyon düzeyi hakkında kesin bir tahminde bulunmak mümkün değildir.

Freundlich adsorpsiyon izoterm denklemi;

$$\log_{q_e} = \log_{K_f} + (1/n) \log_{C_e} \quad (2.1)$$

Şeklindedir.

Bu denklemde, q_e dengede adsorbanın birim kütlesi başına adsorplanan iyon miktarıdır, C_e ise çözeltideki metal iyonunun denge konsantrasyonudur. K_f , adsorpsiyon kapasitesine ilişkin Freundlich sabitidir (mg/g) ve n , adsorpsiyon yoğunluğunu ifade eden ampirik bir parametredir.

Irving Langmuir'in 1916 yılında geliştirdiği bu model, tek tabakalı kemisorpsiyon için geçerlidir. Bu modele göre, adsorban yüzeyinde belirli bir sayıda aktif bölge bulunur

ve bu bölgelere yalnızca bir tanecik yerleşebilir. Langmuir izoterminin denklemi ise 2.2. numaralı ifadeye göre oluşturulmuştur.

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{max} \cdot K_L} + \frac{C_e}{q_{max}} \quad (2.2)$$

K_L (L/mg), adsorpsiyon enerjisinin ve bağlanma bölgelerinin afinitesi hakkında önemli bilgiler verir. K_L ve q_{max} değerlerini bulmak için C_e/q_e ve C_e arasındaki grafikteki eğim ve kayma değerleri kullanılır.

Dubinin-Radushkevich modeli, adsorpsiyon işleminin heterojen ve homojen yüzeylerde olabileceğini kabul ederek kimyasal ve fiziksel adsorpsiyonu ayırt etme imkanı sunar. Bu model, Denklem 2.3 ve 2.4'te açıklanmaktadır.

$$\ln q_e = \ln q_{max} - K_{DR} \varepsilon^2 \quad (2.3)$$

$$\varepsilon = RT \ln \left(1 + \frac{1}{C_e} \right) \quad (2.4)$$

Burada K_{DR} , Dubinin-Radushkevich sabiti, q_e dengede adsorplanan maksimum adsorbat miktarını, q_m maksimum adsorpsiyon miktarını, ε Polanyi potansiyelini, R ise gaz sabitini temsil eder. T ise sıcaklığı ifade etmektedir.

Temkin modeli, taneciklerin adsorpsiyon ısısının yüzey kaplamasının artması ile doğrusal bir şekilde düştüğünü kabul ederek, heterojen sistemlerde adsorbat-adsorban etkileşimlerini dikkate alır (Wu ve ark., 2016). Ayrıca, maksimum bağlanma enerjisine kadar düzgün bir bağlanma enerjisi dağılımı, Temkin modelinin temelini oluşturur. Bu özellikler, Denklem 2.5'te belirtilen matematiksel modelde, maksimum bağlanma enerjisi ile ilişkili adsorpsiyon ısıyla ilgili b_T (J/mol) ve denge bağlanma sabiti A_T (L/mg) ile ifade edilmektedir.

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

2.4. Adsorpsiyon Kinetik Modelleri

Adsorpsiyon, zamana bağlı olarak gerçekleşen bir süreçtir. Adsorpsiyon kinetiğinde, adsorplayıcı ile adsorplanan arasındaki denge temas süresi önemlidir. Bu süre, adsorbanın doygunluk anına ulaştığı süreyi ifade eder. Bu durum temas süresi ile doğru, adsorpsiyon hızıyla ters orantılıdır.

Adsorpsiyon sürecinin gerçekleştiği mekanizmaları tanımlayan farklı kinetik modeller bulunmaktadır. Bu çalışmada, Yalancı-Birinci Dereceli, Yalancı-İkinci

Dereceli, Weber-Morris ve Elovich olmak üzere farklı kinetik modellerin uygunluğu incelenmiştir.

İlk olarak 1898 yılında Lagergren tarafından, odun kömürü kullanılarak malonik asit ve oksalik asidin adsorpsiyonu için birinci dereceli kinetik model tanıtılmıştır. Daha sonra Ho modeli tekrar düzenlenmiş ve adsorpsiyon kapasitesinin çözelti derişimine bağılı modellerden ayırmak için, modelin adının önüne "yalancı" (pseudo) ifadesini eklenmiştir (Ho, 2005). Buna göre:

$$q_t = (q_m - q_t) d_t \text{ (Lagergren, 1898).} \quad (2.6)$$

Denklem, Ho tarafından tekrar düzenlenerek lineer bir form haline getirilmiştir (Ho ve McKay, 1999; Simonin, 2016). Bu doğrusal denklem;

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - kt \quad (2.7)$$

Burada;

Q_m: Dengeye anında adsorban tarafından adsorplanan madde miktarı (mg/g)

Q_t: t anında, adsorplayıcı tarafından adsorplanan madde miktarı

k: adsorpsiyona ait hız sabiti (dk⁻¹)

t temas süresidir.

Yalancı ikinci dereceli kinetik model, hız sınırlayıcı adımın adsorplayıcı ile adsorplanan madde arasındaki etkileşimlerin kemisorpsiyon olabileceği öngörüsüne dayanmaktadır. Ayrıca, adsorpsiyon kapasitesinin, adsorban madde üzerindeki aktif bölgelerin sayısı ile orantılı olduğu kabul edilir. Bu durumda, kinetik hız kanunu şu şekilde ifade edilebilir (Ho ve McKay, 1998).

$$\frac{t}{q_t} = \frac{t}{q_e} + \frac{1}{k_2 q_e^2} \quad (2.8)$$

Burada;

q_e (mg/g): Denge adsorpsiyon kapasitesi

q_t (mg/g): t zamanda birim adsorbanda adsorplanan adsorbat miktarı

k₂ (g/mgdk) : ikinci dereceli hız sabitidir.

Difüzyon mekanizmalarının yalancı birinci dereceli (pseudo first) veya ikinci dereceli denklemlerle tam olarak açıklanamayan durumlar söz konusuysa, bu durumlar parçacık içi difüzyon modeli ile açıklanmaya çalışılır.

Adsorpsiyon sürecinde difüzyonun etkili gücü oldukça kritiktir. Bu gücün seviyesi, genellikle kullanılan ağır metalin konsantrasyonuyla ilişkilidir. Konsantrasyon yükseldikçe, yürütücü kuvvet de artış gösterir. Böylece difüzyon hızı da artar. Model aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$q_t = k_d t^{0.5} + C \quad (2.9)$$

Burada;

C: sınır tabakasının kalınlığı

k_d : Parçacık içi difüzyon oranı ($\text{mg/g dk}^{1/2}$)

q_t : t anında adsorplanan madde miktarı (mg/g)

$t^{0.5}$: Adsorpsiyonun yarı zamanı ($\text{dk}^{1/2}$) değerlerini ifade etmektedir.

Elovich modelindeki asıl amaç katının yüzeyinde adsorpsiyon işlevinin nasıl oluştuğunu ifade etmektedir (Dal ve ark., 2021).

$$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta} \ln t \quad (2.10)$$

Burada;

A: Başlangıçtaki adsorpsiyon hızı (mg/gdk)

B: Desorpsiyon hız sabiti (g/mg) değerlerini ifade etmektedir.

2.5. Adsorpsiyon Termodinamiği

Termodinamiğin kapsamı, genellikle denge durumundaki sistemlerle sınırlıdır. Termodinamik, kimyasal veya fiziksel bir reaksiyonun ardından sistem enerjisini, enerji değişimlerini, entropi ile serbest enerji değişimlerini araştırır. Ayrıca, bir değişimin gerçekleşip gerçekleşmeyeceği hakkında bilgi sağlar. Olayın yönü ile birlikte kendiliğinden gerçekleşip gerçekleşmeyeceği konusunda bilgi verir. Bununla birlikte, tepkime mekanizması, hız ve süre ile ilgili herhangi bir bilgi vermez, çünkü yalnızca olayın başlangı ve sonu ile ilgilenir.

Entalpi, bir maddenin sabit basınç altında sahip olduğu tüm enerji türlerinin toplamını ifade eder. Fakat bu enerji doğrudan ölçülemez; bunun yerine, bir reaksiyonda ürünlerin enerjisinden reaktanların enerjisi çıkarılarak bulunabilir. Bir reaksiyonda, ürünlerin toplam entalpilerinden reaktanların toplam entalpileri çıkarıldığında bulunan değere entalpi değişimi (ΔH) denir.

Entropi (ΔS), bir sistemin düzensizliğini ölçen bir kavramdır. Evrendeki tüm maddeler ve sistemler, dış etkilere maruz kalmadıklarında düzensizliklerini, yani entropilerini artırma eğilimindedir. Ancak adsorpsiyon süreçlerinde, adsorplanan maddenin zamanla adsorplayıcı yüzeyde birikmesi ve hareketli durumdan düzenli bir duruma geçmesi nedeniyle entropi azalır.

Bir tepkimenin istemli veya istemsiz olduğunu belirleyen en önemli termodinamik parametre serbest enerji değişimidir (ΔG). Dışarıdan herhangi bir etki olmaksızın, yani

kendiliğinden meydana gelen reaksiyonlarda sistem, daha kararlı bir duruma ulaşmak için enerjisini azaltmayı ve entropisini artırmayı amaçlar.

2.6. Nikel

Nikel, periyodik tablodaki 28 numaralı element olup simgesi "Ni"dir. Gümüş beyazı bir renge sahip, parlak ve ferromanyetik bir metal olan nikel, doğada yaygın olarak bulunur ancak serbest halde değil, genellikle diğer metallerle birlikte çeşitli minerallerde bulunur. En yaygın nikel mineralleri arasında pentlandit, garnierit ve limonit yer alır. Nikelin fiziksel özellikleri, onu sanayide oldukça değerli kılmaktadır. Yaklaşık 58.69 g/mol atom ağırlığına sahip olan nikel, 1455 °C'de erir ve 2913 °C'de kaynar. Ayrıca, yoğunluğu 8.90 g/cm³ olan bu metal, yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklıdır ve düşük ısı genleşme katsayısına sahiptir.

Kimyasal açıdan nikel, genellikle +2 ve +3 oksidasyon durumlarında bulunur. Oksitleri ve sülfürleri gibi birçok bileşik oluşturma yeteneğine sahiptir. Nikelin asidik ve alkalın ortamlara karşı gösterdiği dayanıklılık, onu çeşitli endüstriyel uygulamalarda vazgeçilmez kılar. En çok paslanmaz çelik ve diğer alaşımların üretiminde kullanılmaktadır. Paslanmaz çelikte, nikelin varlığı, malzemenin korozyon direncini artırarak ürünlerin ömrünü uzatır. Ayrıca, nikel, elektronik bileşenler, otomotiv parçaları ve uzay sanayisi gibi yüksek teknoloji alanlarında da önemli bir role sahiptir; örneğin, nikel-kadmiyum ve lityum-iyon bataryalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Nikel, sağlık açısından da dikkat edilmesi gereken bir elementtir. Bazı bireylerde nikel alerjisi gelişebilir ve bu alerji, ciltte döküntü gibi reaksiyonlara yol açabilir. Ayrıca, aşırı nikel maruziyeti çeşitli sağlık sorunlarına neden olabilir; bu nedenle iş sağlığı ve güvenliği açısından uygun önlemler alınması gerekmektedir. Genel olarak, nikelin sanayi ve teknoloji alanındaki önemi, onun çok yönlü kullanım alanları ve dayanıklılık özellikleri ile ortaya çıkmaktadır. Bu özellikler, nikelin gelecekteki uygulamaları için de önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

2.7. Adsorplayıcı

İyi bir adsorplayıcı, çeşitli önemli özelliklere sahip olmalıdır. Öncelikle, yüksek bir spesifik yüzey alanına sahip olması, daha fazla adsorbat molekülünün yüzeye bağlanmasını sağlar. Ayrıca, gözenekli bir yapıya sahip olması, hem büyük hem de küçük moleküllerin adsorpsiyonunu kolaylaştırır. Kimyasal stabilite de kritik bir öneme sahiptir;

adsorplayıcının, kimyasal reaksiyonlar veya dış etkenler karşısında yapısını koruyabilmesi gerekir. Yüksek adsorpsiyon kapasitesi, belirli bir sıcaklık ve basınçta istenen maddeyi tutabilme yeteneği açısından önemlidir. Bunun yanı sıra, seçicilik özelliği sayesinde adsorplayıcı, karmaşık karışımlarda belirli bileşenleri ayırıştırma yeteneğine sahip olmalıdır. Düşük tersinirlik, adsorbanın yüzeyinden kolayca ayrılmasını önler ve adsorpsiyonun kalıcılığını artırır. Ekonomik açıdan, yeniden kullanılabilirlik de önemlidir; iyi bir adsorplayıcı, yeniden aktif hale getirilebilir olmalı ve maliyet etkinliği sağlamalıdır. Son olarak, çevresel güvenlik göz önünde bulundurulmalı, adsorplayıcı materyaller çevre dostu ve insan sağlığına zarar vermeyen malzemelerden üretilmelidir. Bu özellikler, iyi bir adsorplayıcının etkinliğini artırırken, uygulama alanına ve hedef adsorbat türüne göre farklılık gösterebilir.

Rao ve ark. (2007), Asitle (HCl) işlem görmüş saman kullanarak hazırladıkları adsorban üzerinde Ni (II) adsorpsiyon izotermi belirlenmiş ve yaygın izotermlerle ilişkilendirmişlerdir. Adsorban üzerinde Ni (II) için denge verileri, maksimum tek katman adsorpsiyon kapasitesi olan 74,1 mg/g değeri ile Langmuir denkleminde iyi uyum sağladığını bulmuşlardır.

Wu ve ark. (2016), amin gruplarıyla birleştirilmiş pirinç samanının kullanılmasıyla Ni (II)'nin sulu çözeltilerinden uzaklaştırılmasını araştırmışlardır. Adsorpsiyonun termodinamiği ve kinetiği de inceleyerek adsorpsiyon izotermi Freundlich modeli yerine Langmuir modeli ile daha iyi tanımlanabildiğini belirlemişlerdir. Ni (II) adsorpsiyon kapasitesi 39 mg/g olarak belirlemişler.

Güzel ve ark. (2008), Siyah havuç (*Daucus carota* L.) kalıntıları ile sulu çözeltilerden Ni (II)'nin uzaklaştırılmasındaki etkinliği incelenmişlerdir. Adsorpsiyon işlemi 60 dakikada dengeye ulaştığını ve Langmuir izoterminin daha iyi uyum sağladığı belirlemişlerdir. Yalancı-ikinci derece reaksiyon modeli adsorpsiyon kinetiğini en iyi tanımlayan model olduğunu ve maksimum adsorpsiyon kapasitesinin, 6,49 mg/g olarak hesaplamışlardır.

Bhattacharyya ve Gupta (2009,) Kalsine edilmiş tetrabutylamonyum kaolinit ve montmorillonit ile sulu çözeltilerden Ni (II) adsorpsiyonu araştırdılar. Denge verileri, Langmuir izoterminin modeli ile en iyi şekilde temsil edildiğini ve maksimum tek katman adsorpsiyon kapasitesi 11,9 mg/g olarak belirlenmişlerdir. Adsorpsiyon kinetiği, yalancı-ikinci derece modeli ile en iyi şekilde tanımlandığını belirlemişlerdir.

Çelebi ve ark. (2020), Demlenmiş çay atığının Ni (II) ağır metal iyonları içeren sularda adsorpsiyon kabiliyeti incelenmiş. Demlenmiş çay atığının fiziksel özellikleri

belirlenmiş ve Ni (II) adsorpsiyon kapasitesini değerlendirmişlerdir. Denge izotermi Langmuir denklemi ile iyi bir şekilde tanımlanmış ve en yüksek alım kapasitesini 1,163 mg/g olarak bulmuşlardır.

Altunkaynak (2022), Kimyasal olarak işlenmemiş Midyat taşı kullanılarak sulu çözeltilerden Ni (II) iyonlarının etkili bir şekilde uzaklaştırılması üzerine çalışma yaptı. Sonuçlar, Ni (II) tutulumunun yalancı-ikinci derece denklemine uyduğunu ve sürecin difüzyon kontrollü katı-hal reaksiyonu olduğunu belirlemişlerdir. Langmuir denklemi, izoterm verilerine uyum sağladığını adsorpsiyon katsayısının (q_e) 4,30 mg/g olduğunu belirledi.

Onursal ve ark. (2023), Malatya kili kullanılarak sulu çözeltilerden nikel (II) iyonlarının adsorpsiyonu üzerine bir çalışma gerçekleştirdiler. Adsorpsiyon verilerinin Langmuir denklemleri ile uyumlu olduğunu ve maksimum adsorpsiyon kapasitesinin ise (q_e) 10,26 mg/g olduğunu bulmuşlardır.

3. MATERYAL VE METOTLAR

3.1. Materyal

3.1.1. Kimyasal Maddeler

Hedef bileşiklerin sentezi çalışmalarında kullanılan kimyasallar analitik saflığa sahip olup ek bir saflaştırma işlemi yapılmadan kullanılmıştır. Bu kimyasallar, bu alanda faaliyet gösteren ticari firmaların Türkiye temsilcilerinden tedarik edilmiştir. Araştırmada kullanılan tüm kimyasal maddeler, Merck ve Sigma Aldrich'ten satın alınmıştır; özellikle $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Sigma Aldrich'ten alınmıştır. Adsorpsiyon deneylerinde kullanılacak farklı konsantrasyonlardaki metal iyonu çözeltileri, gerekli miktardaki $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'nun saf suda çözülmesiyle hazırlanmıştır. Çözeltilerin pH değerleri, 0.1 M NaOH ve 0.1 M HCl çözeltileri yardımıyla ayarlanmıştır.

3.1.2. Kullanılan Cihazlar ve Yapılan Analizler

Çalışmada, PP ve MPP yüzeyinde adsorpsiyondan sorumlu fonksiyonel grupları tanımlamak için Fourier dönüşümü kızılötesi (FTIR) (IRXross: SHIMADZU) analizi gibi ileri analitik teknikler kullanıldı. Ek olarak, yüzey morfolojisini analiz etmek ve elementel analizleri yürütmek için enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) bağlantılı taramalı elektron mikroskobu (SEM) JEOL (model JSM-6010LA) kullanıldı.

3.2. Metotlar

3.2.1. Patates Kabuğu (PP) ve Modifiye Patates Kabuğu (MPP) Hazırlanması

Bu çalışmada kullanılan patates kabukları (PP) Türkiye'nin Niğde ilinde üretilen patateslerden elde edilmiştir. Toplanan PP ler yıkanıp oda sıcaklığında kurutulduktan sonra öğütüldü. Öğütme işlemi tamamlanan patates kabukları 100 mikrometrenin altına elendi ve daha sonra 105 °C sıcaklıktaki etüvde kurutularak kullanıma hazır hale getirildi. Bu çalışmada öncelikle PP lerin adsorpsiyon kapasitesini artırmak için modifikasyon işlemi gerçekleştirildi. Modifikasyon işlemi Feng ve Guo'nun literatürde sunduğu yöntem uygulanarak gerçekleştirildi (Feng ve Guo, 2012). Bu işlem için öncelikle; 20 g önceden yıkanmış ve kurutulmuş PP üzerine 100 ml etanol, 50 ml 0.8 M NaOH ve 50 ml 0.8 M CaCl_2 çözeltisi ilave edildi. Karışım hazırlandıktan sonra 24 saat oda sıcaklığında bekletildi. Daha sonra karışım filtrasyona tabi tutuldu ve ardından pH değeri 7 olana kadar

damıtılmış su ile titiz bir durulama işlemi yapıldı. Karışım 24 saatlik işlemten sonra elde edildi. Daha sonra 60°C'de 24 saat boyunca sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutuldu. Elde edilen Modifiye Patates Kabukları (MPP) ile adsorpsiyon kinetiği, kapasiteleri, seçiciliği, yeniden kullanılabilirliği ve adsorpsiyon mekanizması araştırıldı.

3.2.2. Çözeltilerin Hazırlanması

Adsorpsiyon deneylerinde farklı konsantrasyonlardaki metal iyonu çözeltileri, gereken miktarda $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'nun distile su içinde çözülmesiyle elde edilmiştir. Çözeltilerin pH değeri, NaOH ve HCl çözeltileri kullanılarak ayarlanmıştır.

3.2.3. Adsorpsiyon Çalışmaları

Adsorpsiyon işlemi hem PP için hem de MPP için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler için; konsantrasyonu 50 ila 500 mg/L derişim aralığında olan 25 mL Ni(II) iyon çözeltilerinden kullanıldı. Bu işlemler, 100 rpm'lik bir hızda yavaşça karıştırılan 250 mL'lik konik şişelerde gerçekleştirildi. Adsorpsiyon işlemi tamamlandıktan sonra filtrasyona tabi tutuldu ve atomik absorpsiyon spektrofotometresi (AAS) (PerkinElmer Analyst AA2-400 modeli) ile çözeltide kalan Ni (II) iyonlarının derişimi belirlendi. Adsorpsiyon işlemi dengeye ulaştıktan sonra denklem 3.1 kullanılarak hem PP hem de MPP üzerinde tutunan Ni (II) iyon miktarı hesaplandı (Savastru ve ark., 2022).

$$q_e = \frac{C_i - C_e}{W} V \quad (3.1)$$

Burada C_i ve C_e sırayla metal iyonu başlangıç ve denge derişimini, V çözelti hacmi ve W(g) kullanılan adsorbanın kütlesini ifade eder.

3.2.4. Metal iyonunun başlangıç konsantrasyonunun adsorpsiyona etkisi

Metal iyonu başlangıç konsantrasyonunun adsorpsiyon üzerine etkisini belirlemek için çalışmalar hem PP hem de MPP için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler için konsantrasyonları 50 ila 500 mg/L arasında değişen 25 mL hacimdeki Ni (II) iyon çözeltilerine 0.5 g adsorban (PP ve ya MPP) ilave edildi. İşlem sırasında 298, 308 ve 318 K sıcaklıkta 120 dakika çalkalama yapıldı. 120 dakikalık bir çalkalama periyodunun ardından AAS cihazı kullanılarak adsorbe edilmemiş metal iyonlarının kalan miktarları hesaplandı. Maksimum adsorpsiyonun gerçekleştiği başlangıç konsantrasyon değerleri belirlendi.

3.2.5. Adsorban dozajının etkisi

Kullanılacak adsorban madde dozunun belirlenmesi için, belirli derişimde ve hacimde Ni (II) iyonu 0,05 ila 0,5 g arasında değişen miktarlarda adsorban üzerine ilave edilerek araştırıldı. Bu testler, 100 rpm hızında karıştırılarak üç farklı sıcaklıkta (318, 308 ve 298 K) 120 dakika süreyle gerçekleştirildi.

3.2.6. Temas süresinin etkisi

Temas süresinin adsorpsiyon üzerindeki etkisini incelemek amacıyla 25 er mL 500 mg/L Ni (II) çözeltilerine 0.5 g PP eklendi. 10 ile 120 dakika arasında farklı zaman aralıklarında karıştırılan çözeltiler süzülerek çözelti içinde adsorbe edilmeden kalan metal iyon derişimi AAS cihazı kullanılarak belirlendi. PP için yapılan işlemlerin aynısı MPP içinde gerçekleştirildi. Toplanan veriler, Ni (II) çözeltilerinin doygunluğa ulaşması için gereken adsorpsiyon sürelerini hesaplamak için kullanıldı.

3.2.7. Sıfır yük noktası (PZC)

Bu çalışma, adsorban yüzeyinin nötr olarak yüklendiği pH seviyesini gösteren sıfır yük noktasını (PZC) tanımlamıştır (Hosny ve ark., 2022; Loya-González ve ark., 2019). PZC'yi hesaplamak için, HCl ve NaOH çözeltileri kullanılarak pH' leri 2 ile 12 arasında ayarlanan iyon çözeltilerinin 50 şer mL si üzerine, 30 °C'de 0.5 g PP ilave edildi. Çözeltinin iyonik gücünü değiştirmek için 0.1 mol/L KCl eklendi. 24 saat süreyle 100 rpm sabit hızda çalkalanarak dengeye ulaşması sağlandı. Çözeltilerin son Ph pH değeri belirlendi. PZC'deki pH, başlangıç pH'ının nihai pH değerine karşı grafiğini çizerek hesaplandı. Bu teknik, PP'nin yüzeyindeki nötr yükü ifade eden PZC değerinin belirlenmesine olanak sağlamıştır. Aynı işlem MPP için de gerçekleştirilerek MPP'nin PZC değeri belirlendi.

3.2.8. pH'ın adsorpsiyona etkisinin belirlenmesi

pH'ın adsorpsiyon kapasitesine etkisini belirlemek için farklı pH değerlerinde (pH = 2 ile pH = 7 aralığı) 25 mL, 500 mg/L derişiminde Ni(II) çözeltisi üzerine 0.5 g PP, eklendi. 120 dakika süreyle çalkalandıktan sonra adsorbe olmayan Ni (II) iyon derişimleri AAS ile belirlendi. Bulunan veriler değerlendirilerek adsorplanan madde miktarı hesaplandı. Doygunluęun elde edildiği ideal pH belirlendi. İstenilen pH seviyesi NaOH

ve HCl çözeltileri kullanılarak ayarlandı. Aynı işlem MPP için de tekrarlanarak optimum çalışma pH değeri belirlendi.

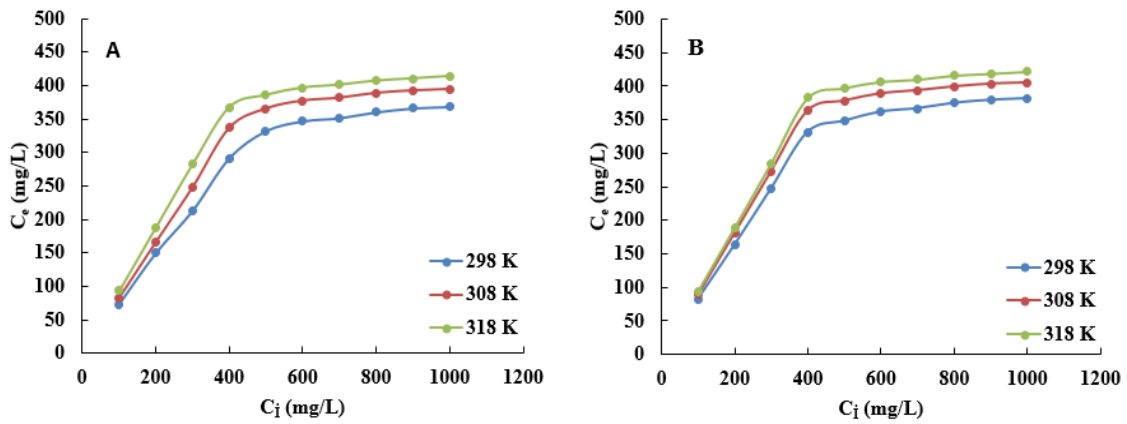
3.2.9. Adsorbanın karakterizasyonu

Çalışmada, PP ve MPP yüzeyinde adsorpsiyondan sorumlu fonksiyonel grupları tanımlamak için Fourier dönüşümü kızılötesi (FTIR) (IRXross: SHIMADZU) analizi gibi ileri analitik teknikler kullanıldı. Ek olarak, yüzey morfolojisini analiz etmek ve elementel analizleri yürütmek için enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) bağlantılı taramalı elektron mikroskobu (SEM) JEOL (model JSM-6010LA) kullanıldı.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Başlangıç Derişiminin Etkisi

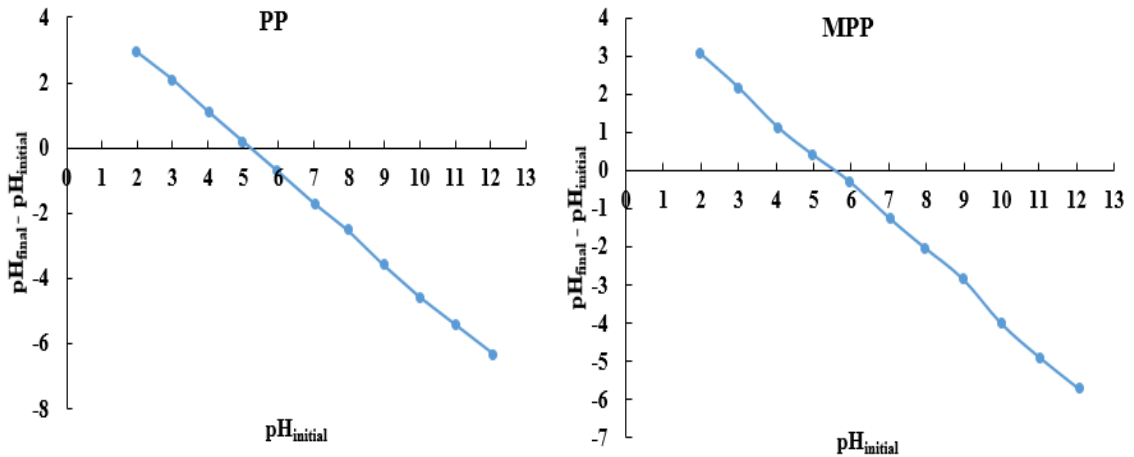
Şekil 4.1, PP ve MPP kullanılarak Ni(II) iyon çözeltisinin uzaklaştırılmasında başlangıç konsantrasyonu etkisini göstermektedir. Çözeltinin başlangıç derişimi uzaklaştırma işlemini ciddi bir şekilde etkiler. Bu çalışmaya göre adsorpsiyon oranları, başlangıç konsantrasyonuna ve adsorpsiyon süresine bağlı olarak değişebilmektedir (Valerio-Cárdenas ve ark., 2021). PP ve MPP adsorbanları tarafından uzaklaştırılan metal iyonlarının miktarı başlangıç konsantrasyonundan etkilenmiştir. Şekil 4.1 incelendiğinde Ni(II) iyonlarının adsorpsiyonu, metal iyonu çözeltisinin konsantrasyonuyla belli bir noktaya kadar artmış, sonrasında sabit kalmıştır. Bu durum hem PP hem de MPP' nin aktif bölgelerinin Ni(II) iyonları ile doygunluğa ulaşmasına neden olur. Şekil 1, 298, 308 ve 318 K sıcaklıklarda PP ve MPP için adsorbe edilen Ni(II) metal iyon derişiminin sırasıyla 368.18, 394.46 ve 413.92 mg/L ve 381.64, 405.11 ve 422.26 mg/L olduğunu göstermektedir. Bu bulgular artan sıcaklıkla metal iyonu adsorpsiyonunun arttığını göstermektedir. Bu sonuçlardan yola çıkarak araştırmanın devamında 500 mg/L'lik Ni(II) iyon çözeltileri kullanıldı.



Şekil 4.1. Başlangıç konsantrasyonunun PP ile Ni (II) giderimi üzerindeki etkisi B) Başlangıç konsantrasyonunun MPP ile Ni (II) giderimi üzerindeki etkisi (C_i ve C_e sırasıyla metal iyonlarının başlangıç ve denge derişimleri)

4.2. pH'ın Etkisi

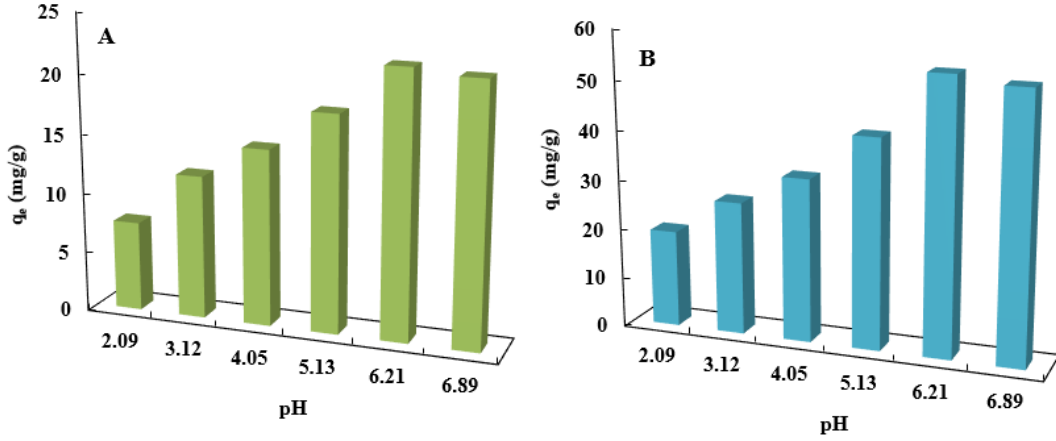
Sıfır yük noktası (PZC), madde yüzeyindeki elektrik yükünün sıfır olduğunu ifade etmektedir. pH değerinin adsorban yüzeyindeki yük değişikliklerini kontrol etmek için kullanılabileceği düşünülmektedir (Feng ve Guo, 2012). Biyosorbent örneklerinde hem iyon değişimi hem de fiziksel adsorpsiyon adsorpsiyon kapasitesiyle bağlantılıdır. Bu mekanizmaların çalışması adsorpsiyon işlemindeki pH değişimine bağlıdır, ancak bunlar genellikle su ortamındaki metal iyonlarını tutabilen yüzey gruplarına ihtiyaç duyar. Sonuç olarak PP ve MPP' nin asit-baz davranışını anlamak için bir ön çalışma yapılarak PZC değerleri belirlendi (Şekil 2). PZC değeri PP ve MPP için sırasıyla 5.18 ve 5.63 olarak elde edildi. Çözeltilerin pH değerleri PZC'nin altında olduğunda adsorban pozitif yüzey yüklerine sahip olma eğilimindedir. Ancak pH değerleri arttıkça yüzey yükleri pozitiften negatife doğru kayar.



Şekil 4.2. 0.1 mol/L KCl kullanılarak PP ve MPP' için sıfır yük PZC karakterizasyonu

Metal iyonları Alkali ortamda hidroksitleri halinde çökerler, bu çökelmenin önüne geçmek için alkali pH değerlerinde çalışılmadı (Bhattacharyya ve Gupta, 2011). PP ve MPP üzerine metal iyon adsorpsiyonunda pH değerinin etkisi Şekil 3'te gösterilmektedir. Alkali ortamlarda metal iyon çözeltilerinin adsorpsiyon kapasitesi pH arttıkça giderek azalır. Bunun nedeni, pH düşük olduğunda H⁺ iyonlarının adsorbanın aktif bölgelerindeki metal iyonlarıyla rekabet etmesi olabilir. Çözünür hidroksil komplekslerinin oluşumu, yüksek pH'ta adsorpsiyon veriminin azalmasına neden olur. PP ve MPP kullanılarak farklı pH'lerde yapılan çalışmalarda Ni(II) iyon çözeltisinin adsorpsiyon kapasitelerinin sırasıyla 7.49 ile 21.97 mg/g ve 19.49 ila 54.64

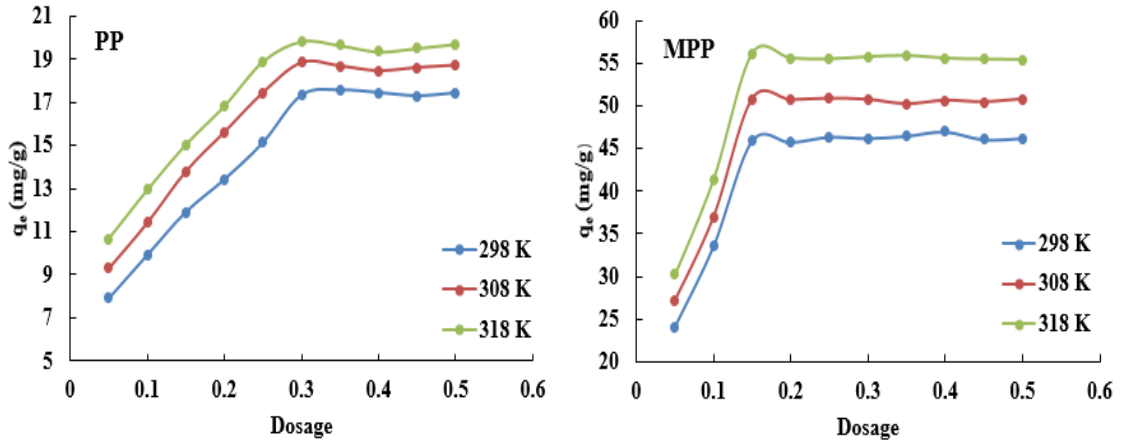
mg/g aralığında olduğu görülmüştür. Kompleks oluşumunu önlemek için çalışmanın bundan sonraki aşamalarının Ni(II) iyon çözeltisinin doğal pH değeri olan pH = 6.21’de gerçekleştirilmesine karar verildi.



Şekil 4.3. A) PP kullanılarak pH'ın Ni(II) iyonlarının uzaklaştırılması üzerindeki etkisi B) MPP kullanılarak pH'ın Ni(II) iyonlarının uzaklaştırılması üzerindeki etkisi.

4.3. Adsorban dozunun etkisi

PP ve MPP üzerinde Ni(II) adsorpsiyonunda kullanılacak adsorban miktarının belirlenmesi için yapılan çalışmadan elde edilen verilerden yararlanarak adsorban madde miktarı belirlenmiştir (Şekil 4). Bu işlem için 0.05 ile 0.5 g aralığında adsorban üzerine 25 mL hacminde 500 mg/L derişiminde Ni(II) çözeltisi ilave edilerek 120 dakika süre ile 100 rpm hızda çalkalanmış. Daha sonra çözeltine kalan Ni(II) derişimi AAS ile belirlenerek kullanılacak en uygun adsorban madde miktarı tespit edilmiştir. Adsorban miktarı arttıkça Ni(II) iyonlarının PP ve MPP tarafından adsorpsiyonu tutarlı bir artış eğilimi göstererek PP’de 0.3 g’da zirveye ulaşırken MPP’de 0.15 g’da maksimum seviyeye ulaştı. Sonrasında adsorban miktarının artması adsorplanan Ni(II) iyonlarının miktarını hemen hemen değıştirmede. Bu durum muhtemel adsorpsiyon bölgelerinin doygunluğa ulaşmasından dolayıdır. Daha fazla adsorban mevcut olduğunda adsorpsiyon kapasitesi ya aynı kalacak ya da azalacaktır (Zhang ve ark., 2021). Bu nedenle çalışmanın bundan sonraki aşamalarında PP ve MPP için sırasıyla 0.3 g ve 0.15 g madde miktarı ile çalışılmasına karar verildi.

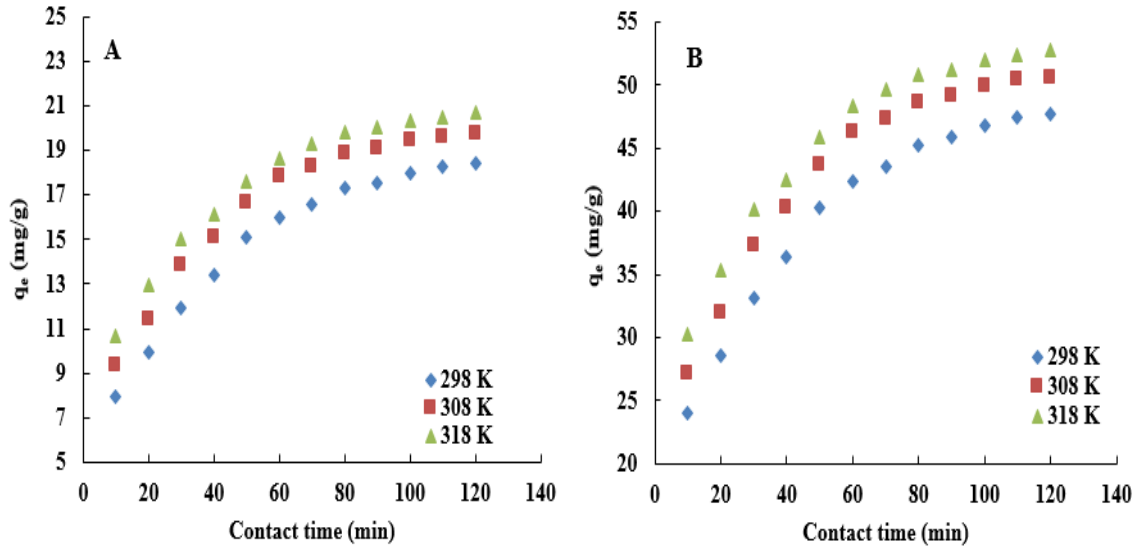


Şekil 4.4. PP ve MPP üzerindeki Ni(II) adsorpsiyonuna dozajın etkisi

4.4. Temas Süresinin Adsorpsiyona Etkisi

Adsorpsiyon çalışmalarında metal iyon çözeltileri ile adsorban badde arasındaki temas süresi oldukça önemli bir etkidir. PP ve MPP kullanılarak Ni(II) iyonlarının uzaklaştırılmasında temas süresinin belirlemek için 298, 308 ve 318 K sıcaklıklarda ayrı ayrı 500 mg/L derişiminde 25 mL hacminde Ni(II) iyon çözeltisi adsorban madde üzerine ilave edilerek 10 ile 120 dakika aralığında 100 rpm çalkalama hızında çalışıldı. Daha sonra çözeltide kalan Ni(II) iyon derişimi AAS ile belirlenerek denge süresi tespit edildi. Hem PP hem de MPP için denge süresi 100 dakika olarak bulundu.

Adsorpsiyon işleminin başlangıcında, Ni(II) iyonları, adsorbanın bol miktardaki mevcut yüzey alanından yararlanarak hızlı bir adsorpsiyon hızı gösterdi. Ancak adsorban yüzeyi doygunluğa yaklaştıkça uzaklaştırma hızı yavaş yavaş azaldı (Oh ve ark., 2019). PP kullanılarak 298, 308 ve 318 K'de dengede Ni(II) iyonlarının hesaplanan adsorpsiyon miktarları sırasıyla 18.01, 19.43 ve 20.35 mg/g olarak bulundu. Ni(II) iyonlarının uzaklaştırılmasında MPP kullanıldığında 298, 308 ve 318 K sıcaklıklarda adsorpsiyon kapasitesi sırasıyla sırasıyla 46.85, 49.92 ve 52.06 mg/g olarak bulunmuştur. Bu verilere dayanarak adsorpsiyon işleminin kinetiği değerlendirildi.

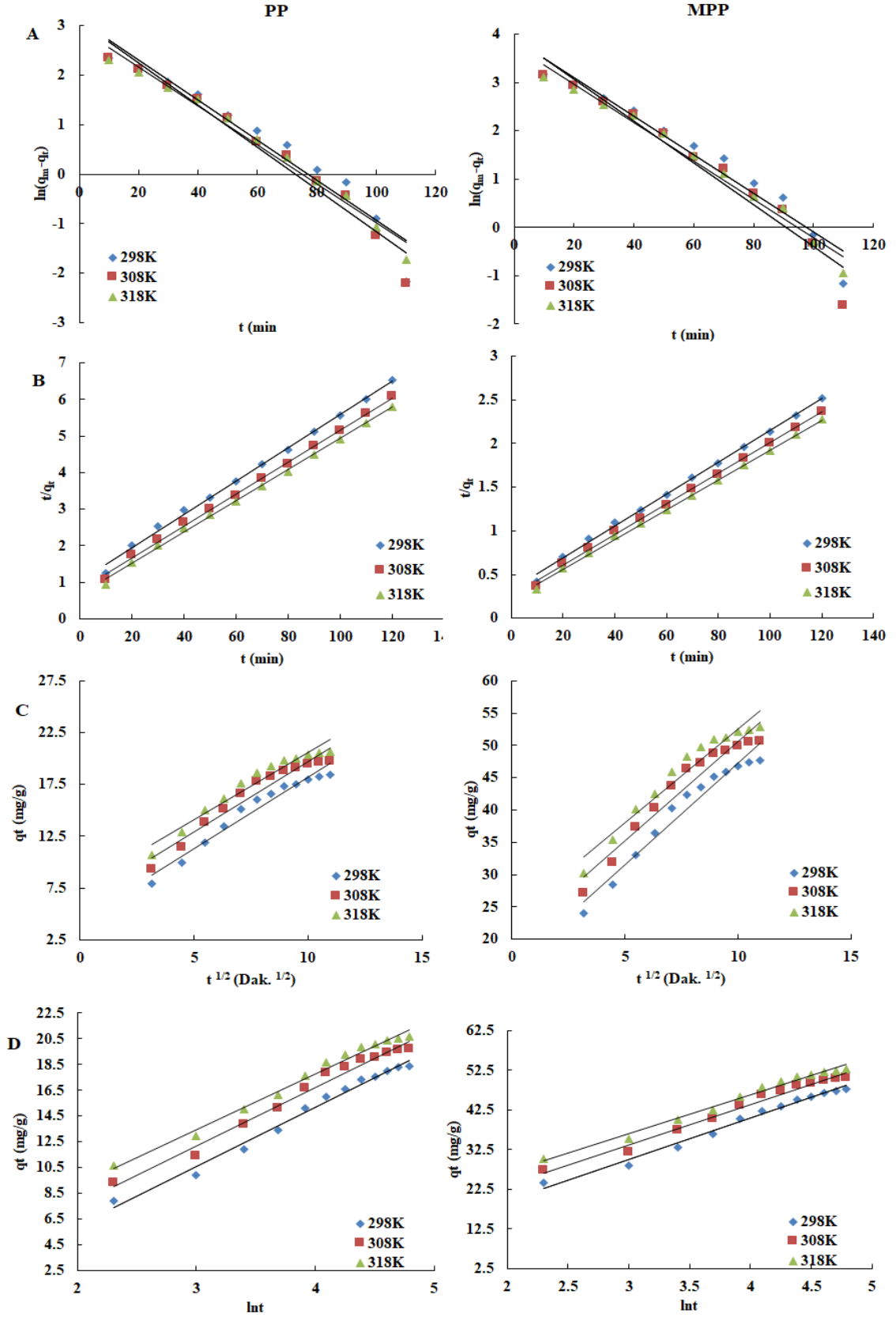


Şekil 4.5. A) PP üzerine Ni(II) iyonu adsorpsiyonunda temas süresinin etkisi B) MPP üzerine Ni(II) iyonu adsorpsiyonunda temas süresinin etkisi

4.5. Kinetik Çalışmalar

Metal iyonlarının PP v MPP üzerinde adsorpsiyonunda zaman ve hız sınırlayıcı adımın etkisi birinci yalancı derece (PFO) ve ikinci yalancı derece (PSO) ve Elovich kinetik modeller (Denklem 2.7-2.10) kullanılarak belirlendi (Rahdar ve ark., 2019; Medhi ve ark., 2020). Ayrıca, film difüzyonu ve gözenek difüzyon hızlarını açıklığa kavuşturmak amacıyla Weber-Morris kinetik modeli de kullanılabilmektedir. Şekil 4.6 incelendiğinde PP ve MPP adsorpsiyon kapasitesinin ilk temas süresi boyunca hızlı bir şekilde arttığını görülmektedir. Her iki adsorban için de Ni(II) iyonlarının önemli bir kısmı ilk 100 dakikalık temas süresi içinde adsorbe edildi. Başlangıçta hızlı bir adsorpsiyon işlemi gerçekleşti. Ancak temas süresi arttıkça hedef iyonların boş alanları yavaş yavaş işgal etmesi nedeniyle adsorpsiyon süreci yavaşladı.

Kinetik modellerin doğrusal grafiklerinden elde edilen veriler şekil 4.6 ve tablo 4.1' de verilmiştir. Tablo 4.1' de verilen q_e ve t değerleri 318, 308 ve 298 K sıcaklıkları için ayrı ayrı belirlenmiştir. Katyon adsorpsiyonu, düşük R^2 ile bağlantılı olan PFO, adsorpsiyon modeline uymamaktadır. Teorik olarak öngörülen adsorpsiyon kapasitesi ile deneysel olarak belirlenen değer arasında nispeten yüksek R^2 değerleri arasında güçlü bir uyum vardır; bunun aksine PSO, metal katyonlarının PP ve MPP tarafından adsorpsiyon kinetiğini etkili bir şekilde tanımlar. Ayrıca sıcaklığın 298 K'den 318 K'ye artmasıyla Ni(II)'nin adsorpsiyonu için öngörülen k_2 değerleri de artar, bu da aralarındaki etkileşimlerin sıcaklığa bağlılığını gösterir.



Şekil 4.6. PP ve MPP üzerinde Ni(II) adsorpsiyonu için (A) PFO (B) PSO (C) Weber-Morris (D) Elovich kinetik model grafikleri

Tablo 4.1, adsorpsiyonun reaksiyon hız sabitlerinin (k_2) sıcaklık arttıkça yükseldiğini göstermektedir. Bu değerler, aktivasyon enerjisi (E_a , J/mol) belirlemek için lineerleştirilmiş Arrhenius denklemi (Denklem 4.1) kullanılarak değerlendirilmiştir. Burada R , gaz sabiti; A , Arrhenius üstel faktörü; T ise çözelti sıcaklığını ifade eder. Aktifleşme enerjileri, Arrhenius grafiğinde ($\ln k_2$ 'ye karşı $1/T$) düz çizgilerin eğimleri olan ($-E_a/R$) kullanılarak kolaylıkla hesaplanabilir. PP ve MPP üzerinde Ni (II) adsorpsiyonu için E_a değerleri sırasıyla 11.845 KJ/mol ve 10.773 KJ/mol olarak bulunmuştur. Adsorpsiyon sürecinin özellikleri dikkate alındığında, zayıf etkileşimlerin etkin olduğu fizisorpsiyon için aktifleşme enerjisi 4,2 kJ/mol'un altında kalmaktadır (Taha ve ark., 2016). Buna karşın, kemisorpsiyon sürecinde etkili olan daha güçlü kuvvetler, aktifleşmiş işlemler için 8,4 ile 83,7 kJ/mol arasında aktifleşme enerjisi değerlerine yol açmaktadır. Bu bağlamda, bu çalışmada belirlenen E_a değerleri, PP ve MPP üzerindeki metal iyonlarının adsorpsiyonunu yönlendiren temel mekanizmanın aktif kemisorpsiyon olduğunu göstermektedir. Ayrıca, E_a 'nın pozitif bir değer alması, sıcaklık artışının adsorpsiyonu teşvik ettiğini ortaya koymaktadır.

$$\ln k_2 = \ln A - \frac{E_a}{RT} \quad (4.1)$$

Tablo 4.1. Farklı sıcaklıklarda, PP ve MPP ile 'taki Ni(II)'nin giderilmesine yönelik kinetik faktörler.

	PP			MPP		
	298 K	308 K	318 K	298 K	308 K	318 K
PFO						
Q_{max}	22.39	22.05	18.94	49.24	51.18	42.84
k_1	0.0405	0.0427	0.0393	0.0399	0.0433	0.0396
R^2	0.9384	0.9628	0.9823	0.9513	0.9510	0.9813
PSO						
Q_{max}	21.97	22.83	23.41	54.64	56.81	58.13
k_2	0.0020	0.0024	0.0027	0.00105	0.00122	0.00138
R^2	0.9969	0.9980	0.9983	0.9975	0.9984	0.9987
Weber morris						
C	4.32	6.09	7.63	15.93	19.87	23.44
K_d	1.3904	1.3624	1.2992	3.1360	3.0741	2.9208
R^2	0.9600	0.9432	0.9490	0.9603	0.9439	0.9473
Elovich						
β	0.2171	0.2198	0.2308	0.0962	0.0974	0.1026
α	4298	4620	4892	9.340	13.560	20.633
R^2	0.9870	0.9850	0.9884	0.9868	0.9850	0.9879

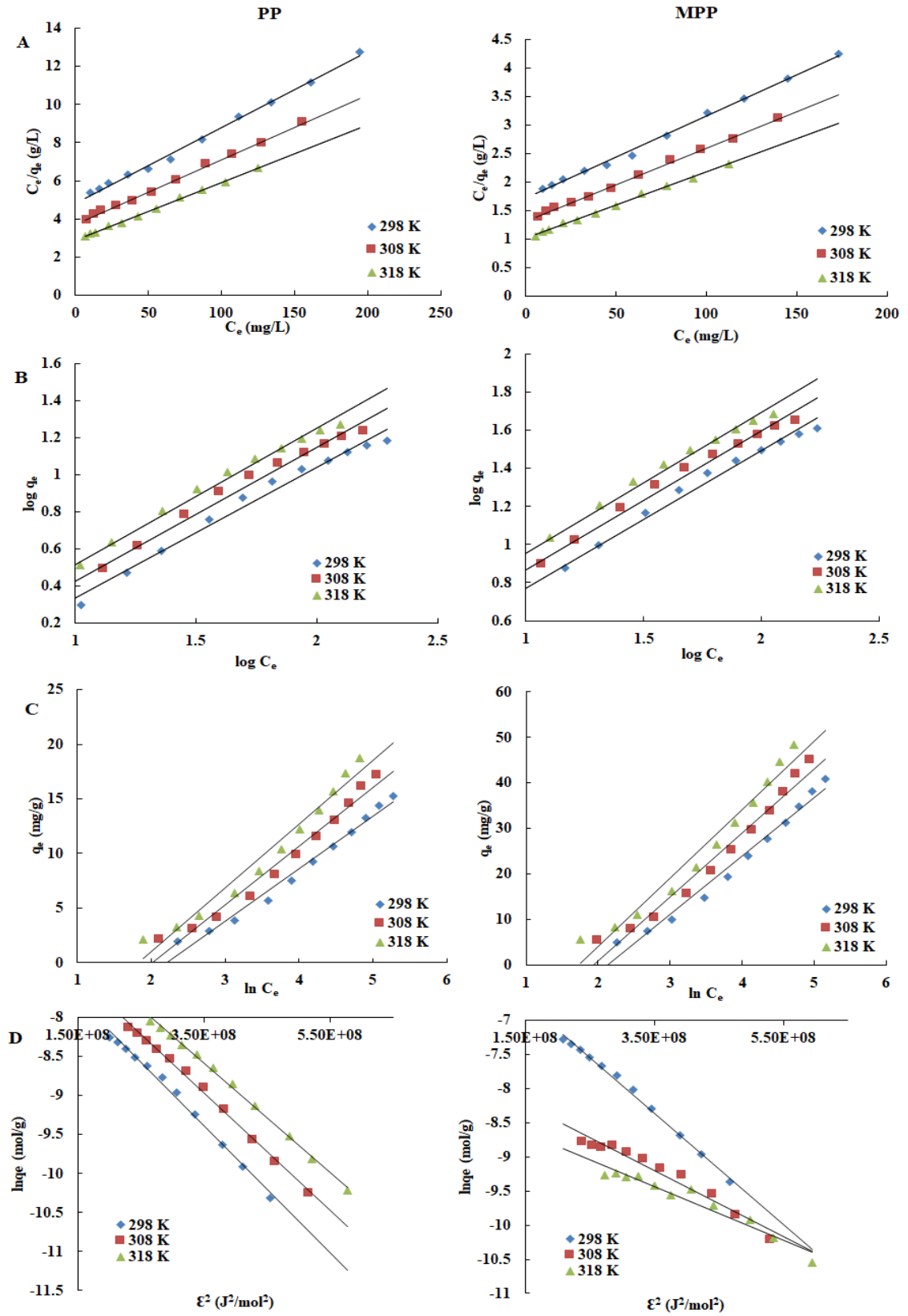
4.6. İzoterm Çalışmaları

PP ve MPP'nin denge davranışını değerlendirmek amacıyla Langmuir, Freundlich, Dubinin-Radushkevich ve Temkin izoterm modelleri uygulanmıştır (Rahdar ve ark., 2019; Ashouri ve ark., 2021). Bu adsorpsiyon izotermelerinin doğrusal formları (Denklemler 2.1 - Denklem 2.5) 2. Bölümde verilmiştir.

Langmuir, Freundlich, Dubinin-Radushkevich ve Temkin izoterm modelleri kullanılarak elde edilen denge verileri Şekil 4.7'de sunulmuştur. Bu modellerin hesaplanan parametreleri de Tablo 4.2 'de listelenmiştir. R^2 değerleri karşılaştırıldığında, Langmuir izoterm modelinin, Ni(II) adsorpsiyonu için hem PP hem de MPP üzerinde en uygun izoterm modelinin bu işlemi tanımladığı görülmektedir. Bu modelin uygunluğu, sürecin kimyasal adsorpsiyon özelliklerini ve muhtemel tersinmezlik durumunu da desteklemektedir. PP üzerinde Ni(II) çözeltisinin adsorpsiyon kapasitesi 298, 308 ve 318 K'de sırasıyla 25.125, 29.325 ve 33.112 mg/g olarak belirlenmiştir. Aynı çözeltinin aynı şartlarda MPP üzerindeki adsorpsiyon kapasitesi ise sırasıyla 68.959, 78.125 ve 85.470 mg/g olarak bulundu. Bu durum, tek tabakalı bir kaplama ile ilişkilidir. Bu özellik, hem PP hem de MPP'nin Ni(II) iyonu için oldukça etkili adsorpsiyon kapasitelerine sahip olduğunu göstermektedir.

Table 4.2. Farklı sıcaklıklarda Ni(II) iyonlarının PP ve MPP üzerine adsorpsiyonu için İzoterm parametreleri.

	298 K	308 K	318 K	298 K	308 K	318 K
Langmuir						
$Q_{\max}$	25.125	29.325	33.112	68.965	78.125	85.470
K_L	0.0082	0.0092	0.0104	0.0084	0.0097	0.0115
R^2	0.9956	0.9971	0.9986	0.9967	0.9972	0.9977
Freundlich						
K_f	0.4205	0.5033	0.5940	1.1207	1.3596	1.6409
n	1.4120	1.3814	1.3542	1.3863	1.3670	1.3529
R^2	0.9828	0.9881	0.9903	0.9858	0.9893	0.9920
Temkin						
B_T	513.77	475.88	451.91	192.76	188.33	176.32
A_T	0.1095	0.1324	0.1598	0.1179	0.1445	0.1781
R^2	0.9826	0.9745	0.9701	0.9787	0.9719	0.9659
Dubinin- Radushkevich						
K_{DR}	8.10^{-9}	8.10^{-9}	7.10^{-9}	8.10^{-9}	5.10^{-9}	4.10^{-9}
E	7.91	7.91	8.45	7.91	10.00	11.18
R^2	0.9939	0.9966	0.9977	0.9955	0.9553	0.9472



Şekil 4.7. Ni(II) iyonlarının PP ve MPP üzerine adsorpsiyonunda (A) Langmuir (B) Freundlich (C) Temkin (D) Dubinin- Radushkevich izoterm grafikleri.

Ni(II) iyonlarının sulu çözeltilerden uzaklaştırılmasında elde edilen sonuçlar daha önce yapılan başka çalışmalarla karşılaştırıldı (Tablo 3). Tablo 4.3 incelendiğinde, MPP'nin PP ye göre çok daha iyi adsorpsiyon yeteneğine sahip olduğu görülmektedir. Aynı zamanda MPP'nin adsorpsiyon kapasitesinin, diğer karşılaştırılabilir adsorbanlar kullanılarak elde edilen sonuçların bir kısmından daha yüksek bir kısmından ise daha düşük olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 4.3. Ni(II) giderimi için çeşitli adsorbanların adsorpsiyon kapasitelerinin karşılaştırması

Adsorban	Adsorpsiyon Kapasitesi (mg/g)	Referans
Asitle işlenmiş talaş	74.1	(Rao ve ark., 2007)
Pirinç samanı	3.95	(Wu ve ark., 2016)
Kaolin	1.67	(Yavuz ve ark., 2003)
Siyah havuç	6.49	(Güzel ve ark., 2008)
Asitle Aktifleştirilmiş Kaolinit	11.9	(Bhattacharyya ve ark., 2009)
Demlenmiş çay atığı	1.163	(Çelebi ve ark., 2020)
Oksitlenmiş MWCNT'ler (Çok Duvarlı Karbon Nanotüpler)	7.94	(Chen ve ark., 2006)
Deaktive edilmiş protonlanmış maya	9.01	(Padmavathy ve ark., 2008)
Portakal kabuğu	4.92 (298K), 5.90 (308K), 8.04 (318K)	(Canpolat ve Altunkaynak, 2022)
Midyat taşı	4.30 (298K), 5.35 (308K), 6.12 (318K)	(Altunkaynak, 2022)
Malatya kili	10.267 (298K), 11.834(308K), 12.285 (318K)	(Onursal ve ark., 2023)
PP	25.125 (298K) 29.325 (308K) 33.112 (318K)	Bu Çalışma
MPP	68.965 (298K) 78.125 (308K), 85.470 (318K)	Bu Çalışma

4.7. Termodinamik Çalışmalar

Farklı sıcaklıklarda PP ve MPP ile Ni(II) adsorpsiyonuna ilişkin termodinamik sabitler Tablo 4.4'te gösterilmektedir. Serbest enerji değişiminin (ΔG°) değerlerini belirlemek için Denklem 4.2. kullanıldı (Tulashie ve Kotoka, 2022; Altunkaynak, 2022).

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ = -RT\ln K_e^\circ \quad (4.2)$$

Bu bağlamda K_e° , Denklem 8'den elde edilen denge sabitini temsil eder. En uygun izoterm modelinden elde edilen K_e° , Denklem 4.3 kullanılarak boyutsuz bir termodinamik denge sabitine dönüştürülür.

$$K_e^0 = \frac{(1000KM)[Adsorbat]^0}{\gamma} \quad (4.3)$$

Burada, M adsorbatın molekül ağırlığını, $[Adsorbat]^0$ ise standart adsorbat derişimini (1 mol/L) olarak belirtmektedir. Ayrıca, γ , adsorbat çözeltisi seyreltildiğinde birim aktivite katsayısını ifade eder.

Denklem 4.4'teki Langmuir Denge sabiti, entalpi ve entropideki değışikliklerle ilgilidir. $\ln K_e^0$ ve $1/T$ grafiğinin eğimi ΔS^0 ve ΔH^0 'yi belirlemek için kullanılabilir (Şekil 6) (Altunkaynak ve Canpolat, 2022).

$$\ln K_e^0 = \frac{\Delta S^0}{R} - \frac{\Delta H^0}{RT} \quad (4.4)$$

Beklendiği üzere, dağılım sabitinin ($\ln K_d$) sıcaklıkla güçlü bir ilişkisi bulunmaktadır. PP ve MPP kullanılarak gerçekleştirilen adsorpsiyon sürecinde, sıcaklığın artmasıyla Ni(II) iyonunun uzaklaştırılması için daha yüksek veriler elde edilmiştir. ΔS^0 , sistemin kaos derecesini ifade eder. Bu parametrenin pozitif bir değer alması, adsorpsiyon süreci boyunca sıvı/katı ara yüzeyi üzerindeki serbestlik derecesinin yükseldiğini göstermektedir (Gupta, 1998). Ni(II) için pozitif bir ΔH^0 değeri (+24.942 kJ/mol PP için, +16.628 kJ/mol MPP için), hem PP hem de MPP üzerinde Ni(II) adsorpsiyonunun endotermik bir süreç olduğunu ortaya koymaktadır. Negatif ΔG^0 değerleri, PP ve MPP üzerinde Ni(II) adsorpsiyonunun termodinamik olarak kendiliğinden ve doğal bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Ayrıca, artan sıcaklık ile birlikte ΔG^0 değerindeki düşüş, Ni(II) adsorpsiyon sürecinin yüksek sıcaklıklarda daha gerçekleştiğini ifade etmektedir.

Tablo 4.4. PP ve MPP'de Ni(II) iyon adsorpsiyonunda: ΔG^0 , ΔH^0 ve ΔS^0 değerleri.

Adsorban	Sıcaklık (K)	$\ln K_d$	ΔG^0 (kJ/mol)	ΔH^0 (kJ/mol)	ΔS^0 (J/molK)
PP	298	6.433	-11.953	24.942	123.812
	308	6.708	-13.192		
	318	6.965	-14.430		
MPP	298	7.479	-22.360	16.628	130.835
	308	7.486	-23.669		
	318	8.010	-24.977		

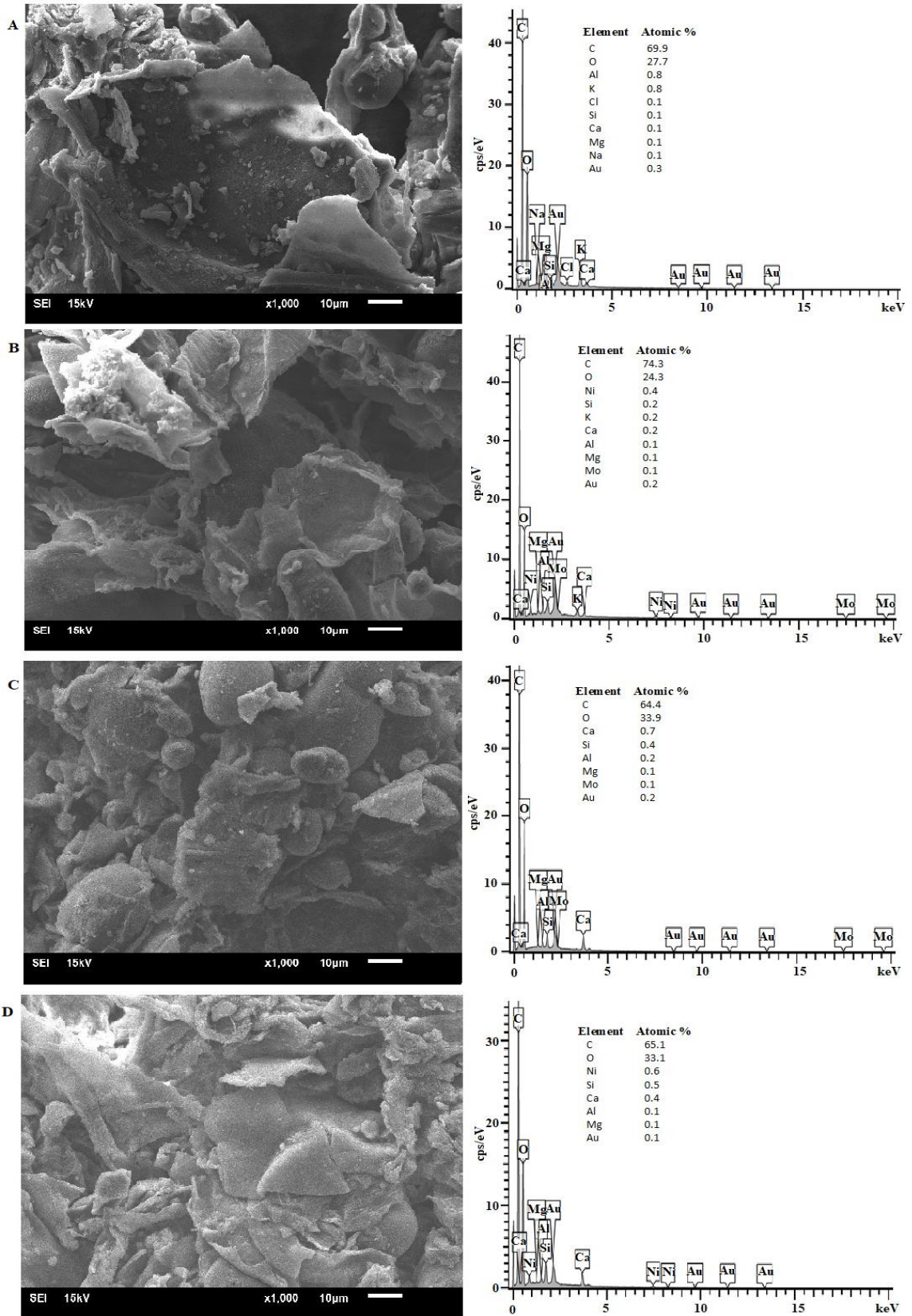
4.8. Adsorban Karakterizasyonu

4.8.1. BET ve SEM/EDS analizleri

Adsorban olarak kullanılan malzemenin (PP ve MPP) yüzey şekli ve adsorpsiyon işleminin neden olduğu değişiklikler SEM kullanılarak araştırıldı. Hem PP hem de MPP'nin, adsorpsiyondan önce ve adsorpsiyondan sonra ayrı ayrı SEM görüntüleri çekilmiştir (Şekil 4.8). PP ve MPP'nin çok çeşitli boyutlarda ve düzensiz, açısız parçacıkların varlığını gösteren adsorpsiyondan önceki SEM mikrografileri sırasıyla Şekil 4.8A ve 4.8C'de gösterilmektedir. Ni(II) iyonları adsorbe edildikten sonra PP ve MPP yüzey şekilleri üzerinde küçük değişiklikler görüldü. Ayrıca daha büyük kristal yapılar üzerinde küçük topaklanmalar oluştu. Şekil 4.8B ve 4.8D'de, sırasıyla PP ve MPP'nin adsorpsiyon sonrası görüntüleri verilmiştir. Bu değişiklikler yeni kimyasal türlerin yüzey oluşumunu ve adsorban malzemenin yapısal özelliklerinin değiştiğini göstermektedir. PP ve MPP yüzeyindeki bu benzersiz desen, sulu çözeltilerden metal iyonunun uzaklaştırılmasının bir çözünme-çökeltme mekanizması içerdiğini göstermektedir (Canpolat ve ark., 2022; Altunkaynak, ve ark., 2023). Adsorban olarak kullanılan maddelerin adsorpsiyon kapasitesi, yüzey alanı ve gözenek hacmi ile yakından ilişkilidir. Katyonik değişim kapasitesi ile katyonik iyon adsorpsiyonu arasında güçlü bir ilişki vardır. Bu morfoloji Brunauer, Emmet ve Teller (BET) teorisi (Mikromeritics Gemini V) kullanılarak (Tablo 4.5) hesaplandı. PP ve MPP için elde edilen verilerin Goyi ve arkadaşları (Goyi ve ark., 2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmalarla uyumlu olduğu görülmektedir.

Tablo 4.5. PP ve MPP nin BET yüzey analiz hesaplamaları

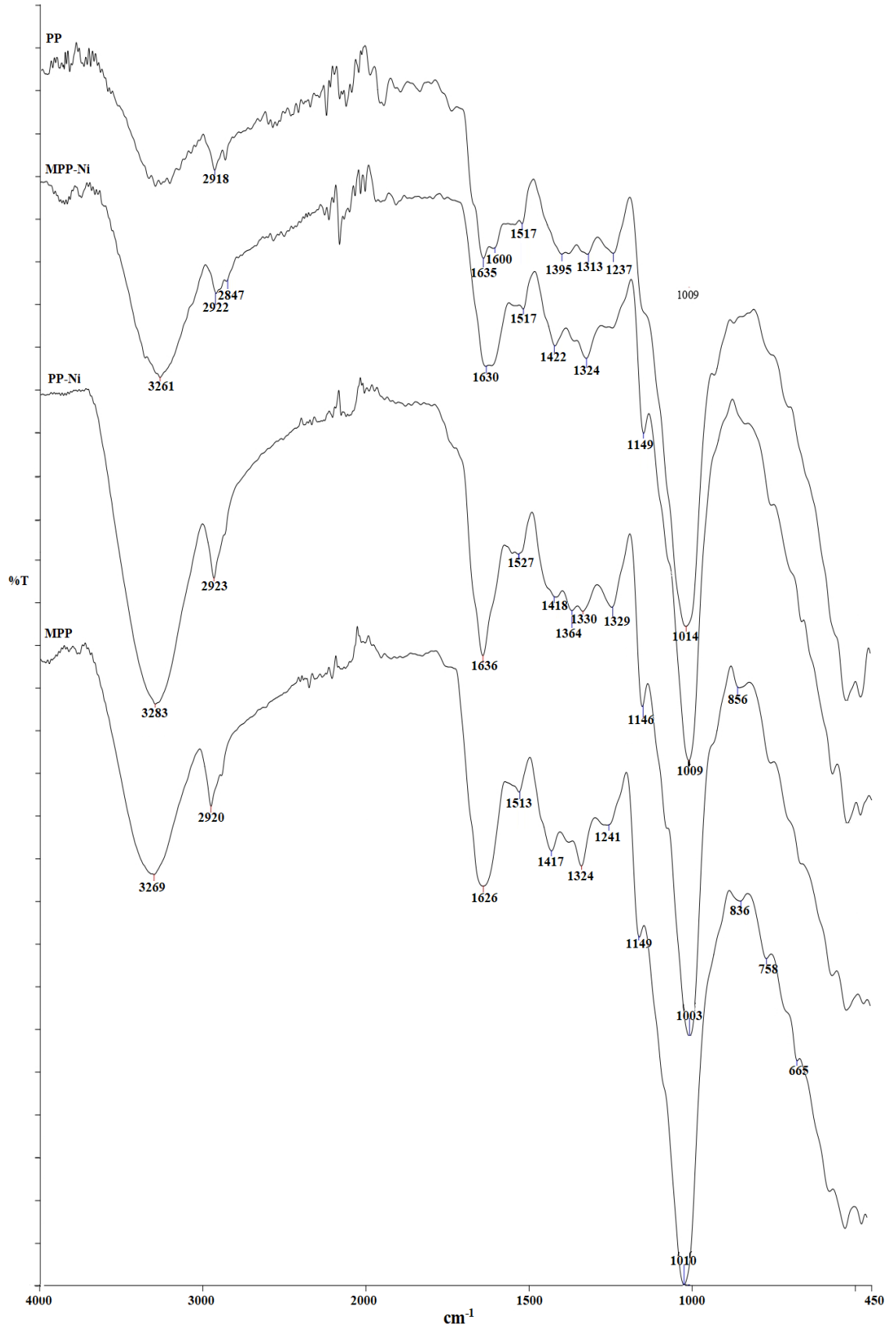
Adsorbanlar	Yüzey alanı (m ² /g)	Toplam gözenek hacmi (cm ³ /g)	Ortalama Gözenek çapı (nm)
PP	130.18	0.29	2.27
MPP	602.48	0.09	9.71



Şekil 4.8. A) PP'nin Adsorpsiyondan önce SEM/EDS görüntüsü B) PP'nin Adsorpsiyondan sonra SEM/EDS görüntüsü C) MPP'nin Adsorpsiyondan önce SEM/EDS görüntüsü D)) MPP'nin Adsorpsiyondan sonra SEM/EDS görüntüsü

4.8.2. FT-IR analizi

FTIR kullanılarak, patates kabuğu ve işlenmiş patates kabuğu yüzeyinde metal iyonlarının adsorban ile etkileşimine yol açan olası adsorpsiyon bölgeleri belirlendi. Şekil 4.9 PP ve MPP numunelerinin FTIR spektrumunu göstermektedir. PP ve MPP örnekleri, FTIR spektrumunda çeşitli fonksiyonel grupları temsil eden O-H titreşimleri olarak karakterize edilen tepe noktaları sergiler. 2918 cm^{-1} 'deki zirvenin alkan grubunun -CH uzaması olduğu düşünülürken, 3274 cm^{-1} 'deki zirveler hidroksil gruplarını belirtir. 1600 cm^{-1} civarındaki pikler, aromatik veya benzen halkalarının varlığının bir sonucu olarak C=C gerilmesiyle meydana gelir. Esterler ve karboksilik asit grupları, 1014 cm^{-1} 'deki sinyalde görüldüğü gibi C-O bağı sergiler. Bu fonksiyonel grupların zirvelerindeki değişimler Ni(II) iyonlarının adsorpsiyonundan sonra görüldü ve bu durum bu grupların adsorpsiyonda rol oynayabileceğini düşündürdü. Örneğin, Ni(II) alımından sonra PP'ta 2918 cm^{-1} , 1517 cm^{-1} ve 1395 cm^{-1} 'deki pikler değişti (2923 cm^{-1} , 1527 cm^{-1} , 1418 cm^{-1}). Ayrıca MPP'de 3269 cm^{-1} 'deki pik, Ni(II) adsorbsiyonu üzerine 3261 cm^{-1} 'e düştü.



Şekil 4.9. PP, MPP, PP-Ni ve MPP -Ni'nin FTIR spektrumları

4.9. Desorpsiyon çalışmaları

PP ve MPP adsorbanlarının geri kazanılabilirliğini ve yeniden kullanılabilirliğini değerlendirmek için toplu (batch) desorpsiyon testleri kullanıldı. Bu yöntem için (Yusuff, 2019), 0.2 g adsorban madde üzerine 25 mL 500 mg/L derişiminde Ni(II) çözeltisi ilave edildi ve ardından 120 dakika boyunca karıştırıldı. Adsorplanan metal iyonlarının konsantrasyonunu belirlemek için AAS kullanıldı. Filtrelenen adsorban (PP, MPP), 150 mL distile su ile yıkandı ve 50°C'lık bir fırında 24 saat kurutuldu. Kurutulduktan sonra, metal iyonu ile doyurulmuş adsorban'a 50 mL 0.1 M HCl çözeltisi ilave edildi. Karışım, numunenin desorbe edilmiş metal içeriğini değerlendirmek için AAS kullanılmadan önce 100 rpm'de 120 dakika çalkalandı. Stabilesini ve yeniden kullanılabilirliğini değerlendirmek için ardı ardına on test tekrarlandı. Her döngüden sonra kullanılan adsorban, 0,1 mol/L HCl'ye batırıldı ve daha sonra yeniden kullanılmadan önce 80 °C'de 1 saat kurutuldu. Tablo 4.6 incelendiğinde hem PP hem de MPP'nin 10 döngüde Ni(II) için iyi bir uzaklaştırma kapasitesi gösterdiği anlaşılmaktadır.

Tablo 4.6. PP ve MPP'de Ni(II) desorpsiyon değerleri. (Başlangıç Ni (II) iyon konsantrasyonu 500 mg/L.)

PP		MPP	
Döngüler	% Desorpsiyon	Döngüler	% Desorpsiyon
1. Döngü	79.25	1. Döngü	85.71
2. Döngü	77.91	2. Döngü	84.52
3. Döngü	76.05	3. Döngü	83.74
4. Döngü	74.19	4. Döngü	82.17
5. Döngü	72.03	5. Döngü	80.06
6. Döngü	69.71	6. Döngü	78.12
7. Döngü	64.79	7. Döngü	76.43
8. Döngü	62.47	8. Döngü	73.82
9. Döngü	60.03	9. Döngü	69.21
10. Döngü	57.17	10. Döngü	66.67

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Tez çalışması kapsamında, PP ve MPP adsorbanları kullanılarak, Ni(II) iyonlarının uzaklaştırılması üzerine adsorpsiyon kapasiteleri arasındaki değişim incelenmiştir. Adsorpsiyon işlemi üzerinde başlangıç konsantrasyonu, pH, temas süresi, sıcaklık ve adsorban dozajı gibi birçok parametrenin etkilerini araştırmak için kapsamlı deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ni(II) giderimi için ideal parametreler PP için 500 mg/L'lik bir başlangıç konsantrasyonu, 0.3 g adsorban dozajı, 100 dakikalık temas süresi ve 6.21'lik bir pH, MPP için de 500 mg/L'lik bir başlangıç konsantrasyonu, 0.15 g adsorban dozajı, 100 dakikalık temas süresi ve 6.21'lik bir pH olarak belirlendi. 298 K, 308 K ve 318 K'de PP için sırasıyla 25.125, 29.325 ve 33.112 mg/g, MPP için ise aynı sıcaklıklarda 68.965, 78.125 ve 85.470 mg/g adsorpsiyon kapasiteleriyle Ni(II) iyonlarının giderilmesinde oldukça iyi uzaklaştırma kapasitesi görüldü. Kinetik çalışmalara göre, Ni(II) iyonlarının uzaklaştırılmasında PSO denkleminin hem PP hem de MPP adsorbanlarında en uygun kinetik model olduğu görüldü. Her iki adsorban için denge verileri Langmuir izoterm modeline çok iyi uyuyordu. Termodinamik hesaplamalar, adsorpsiyon sürecinin hem mümkün hem de kendiliğinden olduğunu gösterdi; pozitif entropi değişikliği, katı-çözeltili arayüzünde artan rastgeleliği akla getiriyor. PP ve MPP'nin yüzey özelliklerinin FTIR ve SEM analizleri, Ni(II) iyonlarının kümелendiğini ortaya çıkardı. Termodinamik parametreler adsorpsiyon sürecinin endotermik olduğunu doğruladı. Genel olarak bu çalışma, hem doğal hem de modifiye patates kabuklarının, sulu çözeltilerden Ni(II) iyonlarını verimli bir şekilde uzaklaştırmak için uygun maliyetli, çevre dostu ve kolayca bulunabilen alternatif adsorbanlar olarak kullanılma potansiyelini ortaya çıkardı.

5.2 Öneriler

Bu tez çalışmasında, patates kabuğu ve modifiye kabuğu adsorban olarak kullanılmıştır. PP ve MPP ile, sulu çözeltilerden Ni (II) etkili bir şekilde uzaklaştırmıştır. Bitkisel atıkları farklı fonksiyonel gruplar içerebileceği için çeşitli ağır metallerin adsorpsiyon çalışmalarında kullanılabilir. Ayrıca, bu atıkların biyolojik ve tıbbi

özellikleri de araştırılabilir. Bu çalışmanın, sulu çözeltilerden kirleticilerin uzaklaştırılmasında yeni ve etkili adsorbanların geliştirilmesine yönelik önemli bir adımı temsil ettiği kanaatindeyiz.

KAYNAKLAR

- Alka, S., Shahir, S., Ibrahim, N., Ndejiko, M. J., Vo, D. V. N., & Abd Manan, F. (2021). Arsenic removal technologies and future trends: A mini review. *Journal of cleaner production*, 278, 123805.
- Altunkaynak, Y. (2022). Effectively removing Cu (II) and Ni (II) ions from aqueous solutions using chemically non-processed Midyat stone: equivalent, kinetic and thermodynamic studies. *Journal of the Iranian Chemical Society*, 19(8), 3357-3370.
- Altunkaynak, Y. (2023). Using chemically unprocessed orange peel to effectively remove Hg (II) ions from aqueous solutions: equivalent, thermodynamic, and kinetic investigations. *Sakarya University Journal of Science*, 27(1), 189-203.
- Altunkaynak, Y., & Canpolat, M. (2022). Sulu Çözeltilerden Nikel (II) İyonlarının Uzaklaştırılmasında Portakal Kabuğu Atığının Kullanılması: Denge, Kinetik Ve Termodinamik Çalışmalar. *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*, 8(2), 322-339.
- Altunkaynak, Y., Canpolat, M., & Aslan, M. (2023). Adsorption of lead (II) ions on kaolinite from aqueous solutions: isothermal, kinetic, and thermodynamic studies. *Ionics*, 29(10), 4311-4323.
- Ashouri, V., Adib, K., & Nasrabadi, M. R. (2021). A new strategy for the adsorption and removal of fenitrothion from real samples by active-extruded MOF (AE-MOF UiO-66) as an adsorbent. *New Journal of Chemistry*, 45(11), 5029-5039.
- Bhatnagar, A., & Minocha, A. K. (2010). Biosorption optimization of nickel removal from water using Punica granatum peel waste. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 76(2), 544-548.
- Bhattacharyya, K. G., & Gupta, S. S. (2008). Influence of acid activation on adsorption of Ni (II) and Cu (II) on kaolinite and montmorillonite: kinetic and thermodynamic study. *Chemical Engineering Journal*, 136(1), 1-13.
- Bhattacharyya, K. G., & Gupta, S. S. (2009). Calcined tetrabutylammonium kaolinite and montmorillonite and adsorption of Fe (II), Co (II) and Ni (II) from solution. *Applied Clay Science*, 46(2), 216-221.
- Bhattacharyya, K. G., & Gupta, S. S. (2011). Removal of Cu (II) by natural and acid-activated clays: An insight of adsorption isotherm, kinetic and thermodynamics. *Desalination*, 272(1-3), 66-75.
- Bozdoğan, A. M., & Bozdoğan, N. Y. (2023). Reviews in Agriculture, Forestry and ACuOculture.
- Canpolat, M., Altunkaynak, Y., & Yavuz, Ö. (2022). Bakır (II) İyonlarının Sulu Çözeltilerden Atık Portakal Kabuğu İle Uzaklaştırılması: Denge, Kinetik Ve

Termodinamik Çalışmalar. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(3), 498-507.

Cárdenas, C. V., Martínez-Herrera, J., Velázquez-Vargas, D. L., & De la Cruz-Burelo, P. (2021). Determination of the point of zero charge of pineapple (*Ananas comosus* L.) peel and its application as copper adsorbent. *Agro Productividad*.

Chen, C., & Wang, X. (2006). Adsorption of Ni (II) from aqueous solution using oxidized multiwall carbon nanotubes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45(26), 9144-9149.

Çelebi, H., Gök, G., & Gök, O. (2020). Adsorption capability of brewed tea waste in waters containing toxic lead (II), cadmium (II), nickel (II), and zinc (II) heavy metal ions. *Scientific reports*, 10(1), 17570.

Dal, M. C., Onursal, N., Arıca, E., & Yavuz, Ö. (2021). Diyarbakır Karacadağ Kırmızı Tepe Skoryası ile Cu (II) Adsorpsiyon Kinetiğinin İncelenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 12(2), 337-346.

Dinçer, A. (2007). *Sepiyolit ve genleşmiş perlit üzerine katyonik poliakrilamid adsorpsiyonu* (Master's thesis, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).

FENG, N. C., & GUO, X. Y. (2012). Characterization of adsorptive capacity and mechanisms on adsorption of copper, lead and zinc by modified orange peel. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22(5), 1224-1231.

Freundlich, H. (1909). Die Bedeutung der Kapillarchemie für technische und physiologische Fragen. *Angewandte Chemie*, 22(28), 1393-1395.

Goyi, A. A., Sher Mohammad, N. M., & Omer, K. M. (2024). Preparation and characterization of potato peel derived hydrochar and its application for removal of Congo red: a comparative study with potato peel powder. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(1), 631-642.

Guiza, S. (2017). Biosorption of heavy metal from aqueous solution using cellulosic waste orange peel. *Ecological Engineering*, 99, 134-140.

Gupta, V. K. (1998). Equilibrium uptake, sorption dynamics, process development, and column operations for the removal of copper and nickel from aqueous solution and wastewater using activated slag, a low-cost adsorbent. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 37(1), 192-202.

Güzel, F. (1991). Fındık ve badem kabuklarından çeşitli hazırlama koşullarında aktif karbon üretimi ve bunların adsorpsiyon karakteristiklerinin belirlenmesi. *Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Basılmamış Doktora Tezi, Diyarbakır*.

Güzel, F., Yakut, H., & Topal, G. (2008). Determination of kinetic and equilibrium parameters of the batch adsorption of Mn (II), Co (II), Ni (II) and Cu (II) from aqueous solution by black carrot (*Daucus carota* L.) residues. *Journal of hazardous materials*, 153(3), 1275-1287.

- Habuda-Stanić, M., Nujić, M., Romić, Ž., Lončarić, A., Ergović Ravančić, M., & Kralj, E. (2015). Arsenic preoxidation and its removal from groundwater using iron coagulants. *Desalination and Water Treatment*, 56(8), 2105-2113.
- Hanif, A., Bhatti, H. N., & Hanif, M. A. (2009). Removal and recovery of Cu (II) and Zn (II) using immobilized *Mentha arvensis* distillation waste biomass. *Ecological Engineering*, 35(10), 1427-1434.
- Hashim, M. A., Kundu, A., Mukherjee, S., Ng, Y. S., Mukhopadhyay, S., Redzwan, G., & Gupta, B. S. (2019). Arsenic removal by adsorption on activated carbon in a rotating packed bed. *Journal of Water Process Engineering*, 30, 100591.
- Ho, Y. S. (2005). Comment on "Removal of heavy metals from aqueous solution by carbon nanotubes: adsorption equilibrium and kinetics" by Li, YH, Di, ZC, Luan, ZK, Ding, J., Zuo, H., Wu, XQ, Xu, CL and Wu, DH. *Journal of environmental sciences (China)*, 17(1), 175-176.
- Ho, Y. S., & McKay, G. (1998). Kinetic models for the sorption of dye from aqueous solution by wood. *Process safety and environmental protection*, 76(2), 183-191.
- Ho, Y. S., & McKay, G. (1999). Pseudo-second order model for sorption processes. *Process biochemistry*, 34(5), 451-465.
- Hosny, N. M., Rady, S., & Dossoki, F. I. E. (2022). Adsorption of methylene blue onto synthesized Co₃O₄, NiO, CuO and ZnO nanoparticles. *Journal of the Iranian Chemical Society*, 1-11.
- Hünür, S., (2019). Metilen Mavisinin Sulu Çözeltilerden Klorit İçeren Killerle Uzaklaştırılması, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Kimya Anabilim Dalı, Basılmamış Yüksek Lisans Tezi, Diyarbakır.
- Lee, S. H., Jang, Y. H., Nguyen, D. D., Chang, S. W., Kim, S. C., Lee, S. M., & Kim, S. S. (2019). Adsorption properties of arsenic on sulfated TiO₂ adsorbents. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 80, 444-449.
- Loya-González, D., Loredó-Cancino, M., Soto-Regalado, E., Rivas-García, P., de Jesús Cerino-Córdova, F., García-Reyes, R. B., ... & Estrada-Baltazar, A. (2019). Optimal activated carbon production from corn pericarp: a life cycle assessment approach. *Journal of Cleaner Production*, 219, 316-325.
- Manikandaraja, P., & Senthilkumaran, R. (2014). A study on degradation and characterization of heavy metals in industrial effluents waste using *Pseudomonas* sp. isolated from soil samples. *Int. J. Advan. Multi. Res*, 1(1), 63-72.
- Medhi, H., Chowdhury, P. R., Baruah, P. D., & Bhattacharyya, K. G. (2020). Kinetics of aqueous Cu (II) biosorption onto *Thevetia peruviana* leaf powder. *ACS omega*, 5(23), 13489-13502.

- Ofudje, E. A., Awotula, A. O., Hambate, G. V., Akinwunmi, F., Alayande, S. O., & Olukanni, O. D. (2017). Acid activation of groundnut husk for copper adsorption: kinetics and equilibrium studies. *Desalination and Water Treatment*, 86, 240-251.
- Ofudje, E. A., Williams, O. D., Asogwa, K. K., & Awotula, A. O. (2013). Assessment of Langmuir, Freundlich and Rubunin-Radushhkevich Adsorption Isotherms in the study of the biosorption of Mn (II) ions from aqueous solution by untreated and acid-treated corn shaft. *Int J Sci Eng Res*, 4(7), 1628-1634.
- OĞUZ, T. C. İÇME SUYU ARITIMINDA YAYGIN OLARAK KARŞILAŞILAN SU KALİTE PROBLEMLERİ VE ARITIMI İÇİN ÇÖZÜM ÖNERİLERİ.
- Oh, W. D., Lee, M. G. H., Udayanga, W. C., Veksha, A., Bao, Y., Giannis, A., ... & Lisak, G. (2019). Insights into the single and binary adsorption of copper (II) and nickel (II) on hexagonal boron nitride: performance and mechanistic studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(1), 102872.
- Okumuş, Z. Ç., & Doğan, T. H. (2019). Biyodizeldeki suyun reçine ile uzaklaştırılması: adsorpsiyon izotermi, kinetiği ve termodinamik incelemesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (15), 561-570.
- Onursal, N., Altunkaynak, Y., Baran, A., & Dal, M. C. (2023). Adsorption of nickel (II) ions from aqueous solutions using Malatya clay: Equilibrium, kinetic, and thermodynamic studies. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 42(5), e14150.
- Onursal, N., Dal, M. C., Kul, A. R., & Yavuz, Ö. (2020). Cu (I) İyonlarının Doğal Karışık Tipteki Kil İle Sulu Ortamdan Uzaklaştırılması, İzoterm, Kinetik Ve Termodinamik Parametrelerin İncelenmesi. *Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences*, 7(9), 85-103.
- Onursal, N., Kul, A., & Yavuz, Ö. (2019). Pb (II) İyonlarının Aktive Edilmiş Karışık Tipteki Kil İle Sudan Uzaklaştırılması İzoterm Kinetik ve Termodinamik Parametrelerin İncelenmesi. *Euroasia of Mathematics Engineering Natural & Medical Sciences*, 6(7).
- Padmavathy, V. (2008). Biosorption of nickel (II) ions by baker's yeast: Kinetic, thermodynamic and desorption studies. *Bioresource Technology*, 99(8), 3100-3109.
- Rafatullah, M., Sulaiman, O., Hashim, R., & Ahmad, A. (2010). Adsorption of methylene blue on low-cost adsorbents: a review. *Journal of hazardous materials*, 177(1-3), 70-80.
- Rahdar, A., Rahdar, S., Ahmadi, S., & Fu, J. (2019). Adsorption of ciprofloxacin from aqueous environment by using synthesized nanoceria. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 26(2), 299-311.

- Rathi, B. S., Kumar, P. S., Ponprasath, R., Rohan, K., & Jahnavi, N. (2021). An effective separation of toxic arsenic from aquatic environment using electrochemical ion exchange process. *Journal of Hazardous Materials*, 412, 125240.
- Riaz, U., Murtaza, G., Saifullah, F. M., & Farooq, M. (2018). Comparable effect of commercial composts on chemical properties of sandy clay loam soil and accumulation of trace elements in soil-plant system. *Int J Agric Biol*, 20, 85-92.
- Sahmoune, M. N. (2016). The role of biosorbents in the removal of arsenic from water. *Chemical Engineering & Technology*, 39(9), 1617-1628.
- Sales, C. S., de Melo Camargo, L. T. F., Araújo, C. S. T., Carvalho-Silva, V. H., & Signini, R. (2021). Efficiency of water treatment with crushed shell of jatobá-do-cerrado (*Hymenaea stigonocarpa*) fruit to adsorb Cu (II) and Ni (II) ions: experimental and quantum chemical assessment of the complexation process. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(42), 60041-60059.
- Sarıkaya, Y. (2000). Fizikokimya. Ankara Üni. Fen Fakültesi. Ankara.
- Savastru, E., Bulgariu, D., Zamfir, C. I., & Bulgariu, L. (2022). Application of *Saccharomyces cerevisiae* in the biosorption of Co (II), Zn (II) and Cu (II) ions from aqueous media. *Water*, 14(6), 976.
- Simonin, J. P. (2016). On the comparison of pseudo-first order and pseudo-second order rate laws in the modeling of adsorption kinetics. *Chemical Engineering Journal*, 300, 254-263.
- Srinivasa Rao, P., Suresh Reddy, K. V. N., Kalyani, S., & Krishnaiah, A. (2007). Comparative sorption of copper and nickel from aqueous solutions by natural neem (*Azadirachta indica*) sawdust and acid treated sawdust. *Wood Science and Technology*, 41, 427-442.
- Taha, A. A., Shreadah, M. A., Ahmed, A. M., & Heiba, H. F. (2016). Multi-component adsorption of Pb (II), Cd (II), and Ni (II) onto Egyptian Na-activated bentonite; equilibrium, kinetics, thermodynamics, and application for seawater desalination. *Journal of environmental chemical engineering*, 4(1), 1166-1180.
- Tamjidi, S., Esmaeili, H., & Moghadas, B. K. (2019). Application of magnetic adsorbents for removal of heavy metals from wastewater: a review study. *Materials Research Express*, 6(10), 102004.
- Tripathy, M., & Hota, G. (2019). Maghemite and graphene oxide embedded polyacrylonitrile electrospun nanofiber matrix for remediation of arsenate ions. *ACS Applied Polymer Materials*, 2(2), 604-617.
- Tulashie, S. K., & Kotoka, F. (2022). Kinetics and thermodynamic studies on *Moringa oleifera* oil extraction for biodiesel production via transesterification. *Biofuels*, 13(3), 341-349.

- Tümsek, F., & Karabacakoğlu, B. (2012). Nikel (II) iyonlarının sulu çözeltiden granül aktif karbon üzerine adsorpsiyonu. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14(2), 1-6.
- Wang, Y., Lv, C., Xiao, L., Fu, G., Liu, Y., Ye, S., & Chen, Y. (2019). Arsenic removal from alkaline leaching solution using Fe (III) precipitation. *Environmental technology*, 40(13), 1714-1720.
- Wickramasinghe, S. R., Han, B., Zimbron, J., Shen, Z., & Karim, M. N. (2004). Arsenic removal by coagulation and filtration: comparison of groundwaters from the United States and Bangladesh. *Desalination*, 169(3), 231-244.
- Wu, Y., Fan, Y., Zhang, M., Ming, Z., Yang, S., Arkin, A., & Fang, P. (2016). Functionalized agricultural biomass as a low-cost adsorbent: Utilization of rice straw incorporated with amine groups for the adsorption of Cr (VI) and Ni (II) from single and binary systems. *Biochemical Engineering Journal*, 105, 27-35.
- Yavuz, Ö., Altunkaynak, Y., & Güzel, F. (2003). Removal of copper, nickel, cobalt and manganese from aqueous solution by kaolinite. *Water research*, 37(4), 948-952.
- Yusuff, A. S. (2019). Adsorption of hexavalent chromium from aqueous solution by *Leucaena leucocephala* seed pod activated carbon: equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *Arab journal of basic and applied sciences*, 26(1), 89-102.
- Zhang, Y., Xu, S., Zhou, H., Qi, H., & Wang, H. (2021). Adsorption of organic pollutants and heavy metal by Co-doped core-shell MoO₂/Mo₂C adsorbent. *Journal Of Solid State Chemistry*, 293, 121801.