

**ŞEKER PANCARI KÜSPESİ ADSORBENTE TEKLİ  
NİKEL(II) VE TEKLİ KROM(VI) İYONLARININ VE EŞANLI  
VEYA ARDIŞIK OLARAK İKİLİ KARIŞIMLARININ  
ADSORPSİYONUNUN İNCELENMESİ**

**INVESTIGATION OF ADSORPTION OF SINGLE NICKEL(II)  
AND SINGLE CHROMIUM(VI) IONS AND SIMULTANEOUS  
OR SEQUENTIAL ADSORPTION OF THEIR BINARY  
MIXTURES TO SUGAR BEET PULP ADSORBENT**

**Seda BATMAZ**

**Prof. Dr. Zümriye AKSU**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Kimya Mühendisliğı Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2024

## ÖZET

# ŞEKER PANCARI KÜSPESİ ADSORBENTE TEKLİ NİKEL(II) VE TEKLİ KROM(VI) İYONLARININ VE EŞANLI VEYA ARDIŞIK OLARAK İKİLİ KARIŞIMLARININ ADSORPSİYONUNUN İNCELENMESİ

**Seda BATMAZ**

**Yüksek Lisans, Kimya Mühendisliği Bölümü**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Zümriye AKSU**

**Nisan 2024, 105 sayfa**

Bu tez çalışmasında kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbente krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının tekli adsorpsiyonu ve ikili karışımlarının eşanlı ve ardışık adsorpsiyonları kesikli sistemde incelenmiştir.

Tez çalışmasının ilk kısmında her bir metal iyonunun tekli adsorpsiyonu, başlangıç pH'ının, adsorbent tanecik boyut aralığının ve başlangıç metal iyon derişiminin fonksiyonu olarak incelenmiş ve en uygun çalışma pH değeri krom(VI) iyonları için 2, nikel(II) iyonları için ise 6 olarak tespit edilmiştir. En uygun tanecik boyut aralığı olarak saptanan 710–850 µm tanecik boyut aralığında her bir metal iyonu için başlangıç metal iyonu derişiminin 250 mg/L ye kadar artmasıyla adsorpsiyon kapasitesinin arttığı, adsorpsiyon veriminin ise azaldığı gözlenmiştir. Kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentin en yüksek krom(VI) adsorpsiyon kapasitesi pH 2'de 64,8 mg/g olarak, en yüksek nikel(II) adsorpsiyon kapasitesi pH 6'da 18,6 mg/g olarak saptanmıştır.

Çalışmaların bir sonraki aşamasında her bir metal iyonunun en iyi adsorplandığı pH değerleri olan pH 2 ve 6'da, krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının ikili karışımlarının kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbente eşanlı adsorpsiyonu araştırılmış ve sabit metal iyon derişiminde diğer metal iyonunun derişimi değiştirilerek her bir

metal iyonunun adsorpsiyon hız ve kapasitesine ortak etkileri incelenmiştir. Her iki pH değerinde de ortamdaki krom(VI) iyonlarının varlığının nikel(II) iyon adsorpsiyonunu çok fazla arttırdığı (sinerjik etki), nikel(II) iyonlarının varlığının ise krom(VI) adsorpsiyonunu yine önemli derecede azalttığı (antagonistik etki) gözlenmiştir. pH 2'de, ortamda nikel(II) iyonları bulunmadığı durumda, 250 mg/L başlangıç krom(VI) derişiminde küspe adsorbentin en yüksek krom(VI) adsorpsiyon kapasitesi 64,8 mg/g iken, yine aynı krom(VI) başlangıç derişiminde ortamda 250 mg/L nikel(II) iyonu bulunduğunda bu değer 11,9 mg/g'a düşmüştür. Yine pH 2'de ortamda krom(VI) iyonları bulunmadığı durumda, 250 mg/L başlangıç nikel(II) iyon derişiminde küspe adsorbentin en yüksek nikel(II) adsorpsiyon kapasitesi 6,0 mg/g iken, yine aynı başlangıç nikel(II) iyon derişiminde ortamda 250 mg/L krom(VI) iyonu bulunduğunda bu değer 18,5 mg/g'a çıkmıştır. pH 6'da ise tekli krom(VI) adsorpsiyonunda elde edilen en yüksek 14,1 mg/g adsorpsiyon kapasitesi 250 mg/L nikel(II) varlığında 9,2 mg/g'a düşmüştür. Aynı şekilde tekli nikel(II) adsorpsiyonunda elde edilen en yüksek 18,6 mg/g adsorpsiyon kapasitesi 250 mg/L krom(VI) varlığında 42,0 mg/g'a çıkmıştır.

Çalışmaların daha sonraki kısmında kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının ardışık adsorpsiyonunda pH 2 ve 6'da, sabit tutulan birinci metal iyon derişiminde adsorpsiyon dengesine ulaşıldığında adsorpsiyon ortamına eklenen ikinci metal iyonunun derişimindeki değişimin her bir metal iyonunun adsorpsiyon hız ve verimine ortak etkileri incelenmiştir. Eşanlı adsorpsiyonda elde edilen sonuçlara benzer şekilde her iki pH değerinde de ortamdaki krom(VI) varlığı nikel(II) adsorpsiyonunu artırırken (sinerjik etki), nikel(II) varlığının krom(VI) adsorpsiyonunu azalttığı (antagonistik etki) gözlenmiştir. Örnek olarak pH 2'de, ortamda nikel(II) iyonları bulunmadığı durumda, 200 mg/L başlangıç krom(VI) derişiminde küspe adsorbentin en yüksek krom(VI) adsorpsiyon kapasitesi 62,3 mg/g iken, adsorpsiyon ortamında 200 mg/L nikel(II) iyonlarının tekli adsorpsiyonu dengeye ulaştığında ortama 200 mg/L krom(VI) eklendiğinde küспенin krom(VI) adsorpsiyon kapasitesi 8,4 mg/g'a düşmüştür. Aynı pH'da 200 mg/L tekli nikel(II) adsorpsiyon denge kapasitesi 5,7 mg/g'dan, ortama 200 mg/L krom(VI) eklendiğinde nikel(II) adsorpsiyon kapasitesi pozitif etkilenererek 15,2 mg/g'a çıkmıştır.

Yine pH 2'de, bu sefer ortamda krom(VI) iyonları bulunmadığı durumda, 200 mg/L başlangıç nikel(II) derişiminde küspe adsorbentinin en yüksek nikel(II) adsorpsiyon kapasitesi 5,7 mg/g iken, adsorpsiyon ortamında 200 mg/L krom(VI) iyonlarının tekli adsorpsiyonu dengeye ulaştığında ortama 200 mg/L nikel(II) eklendiğinde küспенin nikel(II) adsorpsiyon kapasitesi 10,9 mg/g'a çıkmıştır. Aynı pH'da 200 mg/L tekli krom(VI) adsorpsiyon denge kapasitesi 62,3 mg/g'dan, ortama 200 mg/L nikel(II) eklendiğinde krom(VI) adsorpsiyon kapasitesi negatif etkilenerek 9,3 mg/g'a düşmüştür.

Çalışmaların son kısmında her bir metal iyonunun tekli adsorpsiyonunda adsorpsiyon dengesinin Langmuir ve Freundlich adsorpsiyon modellerine uyumu araştırılmış ve Langmuir modelinin adsorpsiyon dengesini daha iyi tanımladığı saptanmıştır. Krom(VI) ve nikel(II) ikili karışımların eşanlı ve ardışık adsorpsiyonunda adsorpsiyon dengesi sinerjistik ve antagonistik etkileşimleri birlikte içeren Langmuir modeli ile tanımlanmış ve model sabitleri bulunmuştur.

Sonuçlar krom(VI) iyonlarının nikel(II) iyonlarının varlığındaki adsorpsiyonunun ve seçiciliğinin çalışılan her bir metal iyonunun derişimine bağlı olarak önemli derecede azaldığını, pH 2'de karışımdaki krom(VI) adsorpsiyonunun çok daha fazla azaldığını, pH 6'da ise krom(VI) adsorpsiyonundaki azalmanın daha az olduğunu, krom(VI) iyonlarının karışıma eşanlı ya da ardışık eklenmesinin ise adsorpsiyon verimini çok fazla etkilemediğini göstermiştir. Yine deneysel sonuçlar nikel(II) iyonlarının krom(VI) iyonlarının varlığındaki adsorpsiyonunun ve seçiciliğinin çalışılan her bir metal iyonunun derişimine bağlı olarak önemli derecede arttığını, başlangıç pH'ının bu artışta çok etkili olmadığını, nikel(II) iyonlarının karışıma eşanlı ya da ardışık eklenmesinin ise adsorpsiyon verimini çok fazla etkilemediğini göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Atıksu, ağır metal, nikel(II), krom(VI), krom(VI)+nikel(II) karışımı, eşanlı/ardışık adsorpsiyon, şeker pancarı küspesi, adsorbent, kesikli sistem.



## **ABSTRACT**

# **INVESTIGATION OF ADSORPTION OF SINGLE NICKEL(II) AND SINGLE CHROMIUM(VI) IONS AND SIMULTANEOUS OR SEQUENTIAL ADSORPTION OF THEIR BINARY MIXTURES TO SUGAR BEET PULP ADSORBENT**

**Seda BATMAZ**

**Master, Department of Chemical Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Zümriye AKSU**

**April 2024, 105 pages**

In this thesis, adsorption of single nickel(II) and single chromium(VI) ions and simultaneous or sequential adsorption of their binary mixtures to sugar beet pulp adsorbent were examined in the batch environment.

In the first part of the thesis study, the single adsorption of each metal ion was examined as a function of the initial pH, adsorbent particle size range and initial metal ion concentration, and the optimal working pH value was determined as 2 for chromium(VI) ions and 6 for nickel(II) ions. It has been observed that the adsorption capacity increased and the adsorption efficiency decreased by increasing the initial metal ion concentration up to 250 mg/L for each metal ion in the 710–850  $\mu\text{m}$  particle size range, which is determined as the most suitable grain size range. The highest chromium(VI) adsorption capacity of dried sugar beet pulp adsorbent was 64,8 mg/g at pH 2, and the highest nickel(II) adsorption capacity was 18,6 mg/g at pH 6.

In the next stage of the studies, at pH 2 and 6, the pH values in which each metal ion is best adsorbed, the dried sugar beet pulp adsorbent simultaneous adsorption of the binary mixtures of chromium (VI) and nickel(II) ions was investigated and the concentration of the other metal ion in the fixed metal ion concentration was changed and the common effects of rate and capacity of the adsorption for each metal ion were examined. It was observed that the presence of chromium(II) ions in the environment at both pH values increased nickel(II) ion adsorption dramatically (synergistic effect), while the presence of nickel(II) ions significantly reduced chromium(VI) adsorption (antagonistic effect). At pH 2, in the absence of nickel(II) ions in the environment, the highest chromium (VI) adsorption capacity of pulp adsorbent was 64,8 mg/g in 250 mg/L initial chromium(VI) concentration, while this value decreased to 11,9 mg/g when 250 mg/L nickel(II) ion was found in the environment at the same chromium(VI) initial concentration. Again, when there is no chromium(VI) ions in the environment at pH 2, the highest nickel(II) adsorption capacity of pulpe adsorbent in 250 mg/L initial nickel(II) ion concentration was determined as 6,0 mg/g, while in the same initial nickel(II) ion concentration, this value increased to 18,5 mg/g when 250 mg/L chromium(VI) ion was found in the environment. At pH 6, the highest adsorption capacity was obtained as 14,1 mg/g in single chromium (VI) adsorption decreased to 9,2 mg/g in the presence of 250 mg/L nickel(II). Likewise, the highest adsorption capacity was obtained as 18,6 mg/g in single nickel(II) adsorption increased to 42,0 mg/g in the presence of 250 mg/L chromium(VI).

In the later part of the studies, in the sequential adsorption of chromium (VI) and nickel (II) ions to the dried sugar beet pulp adsorbent, at pH 2 and 6, when the adsorption equilibrium was reached at the first metal ion concentration kept constant, the change in the concentration of the second metal ion added to the adsorption environment affected the adsorption of each metal ion. Their joint effects on speed and efficiency were examined. Similar to the results obtained in simultaneous adsorption, it was observed that the presence of chromium(II) in the environment increased nickel(II) adsorption (synergistic effect) at both pH values, while the presence of nickel(II) decreased chromium(II) adsorption (antagonistic effect). For example, at pH 2, in the absence of nickel(II) ions in the environment,

the highest chromium(VI) adsorption capacity of the pulp adsorbent is 62,3 mg/g at an initial chromium(VI) concentration of 200 mg/L, while it is 200 mg/L in the adsorption environment. When the single adsorption of nickel(II) ions reached equilibrium, when 200 mg/L chromium(VI) was added to the environment, the chromium(VI) adsorption capacity of the pulp decreased to 8,4 mg/g. At the same pH, the 200 mg/L single nickel(II) adsorption equilibrium capacity changes from 5,7 mg/g, and when 200 mg/L chromium(VI) is added to the environment, the nickel(II) adsorption capacity is positively affected and increases to 15,2 mg/g.

Again, at pH 2, this time in the absence of chromium(VI) ions in the environment, the highest nickel(II) adsorption capacity of the pulp adsorbent was 5,7 mg/g at an initial nickel(II) concentration of 200 mg/L, while chromium(VI) concentration was 200 mg/g in the adsorption environment. When the single adsorption of chromium(VI) ions reached equilibrium, the nickel(II) adsorption capacity of the pulp increased to 10,9 mg/g when 200 mg/L nickel(II) was added to the environment. At the same pH, the adsorption equilibrium capacity of 200 mg/L single chromium(VI) was 62,3 mg/g, and when 200 mg/L nickel(II) was added to the environment, the chromium(VI) adsorption capacity was negatively affected and decreased to 9,3 mg/g.

In the last part of the studies, the compatibility of the adsorption equilibrium with the Langmuir and Freundlich adsorption models in the single adsorption of each metal ion was investigated and it was determined that the Langmuir model describes the adsorption equilibrium better. In the simultaneous and sequential adsorption of chromium(VI) and nickel(II) binary mixtures, the adsorption equilibrium was defined by the Langmuir model, which includes synergistic and antagonistic interactions, and the model constants were found.

The results showed that the adsorption and selectivity of chromium(VI) ions in the presence of nickel(II) ions decreased significantly depending on the concentration of each metal ion studied, that at pH 2, the adsorption of chromium(VI) in the mixture decreased much more, and at pH 6, chromium(VI) adsorption decreased significantly depending on the concentration of each metal ion studied. It was



observed that the decrease in adsorption was less, and simultaneous or sequential addition of chromium(VI) ions to the mixture did not affect the adsorption efficiency much. Again, experimental results show that the adsorption and selectivity of nickel(II) ions in the presence of chromium(VI) ions increases significantly depending on the concentration of each metal ion studied, that the initial pH is not very effective in this increase, and that the simultaneous or sequential addition of nickel(II) ions to the mixture increases significantly. It was shown that it did not affect the adsorption efficiency much.

**Keywords:** Keywords: Wastewater, heavy metals, nickel(II), chromium(VI), nickel(II)-chromium(VI) mixture, simultaneous/sequential adsorption, sugar beet pulp, adsorbent, batch environment.

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmalarım boyunca gerek iş, gerek hayat tecrübesi ve engin bilgisi ile beni yönlendiren; özveri ve zamanını esirgemeyerek üzerimde büyük emeğe sahip olan tez danışmanım, çok değerli hocam Prof. Dr. Zümriye AKSU'ya,

Laboratuvar çalışmalarım boyunca bana destek olan, güler yüzleri ve yardımseverlikleriyle ne zaman yardıma ihtiyacım olsa geri çevirmeyen arkadaşlarım Özge Sevcan HATAY, Utku ÇELİK ve Şevval TUTAN'a,

Yüksek lisans eğitimim boyunca bana tüm imkanlarını sunan Hacettepe Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü'ne,

Yaşamımın her anında olduğu gibi tez çalışmamda da desteklerini esirgemeyen, benimle birlikte gecesini gündüzüne katan, üzerimdeki emek ve haklarını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim çok değerli annem Tülin DEMİRBAŐ'a ve sekiz yıl önce sonsuzluğa uğurladığımız emektar babam Halit DEMİRBAŐ'a,

Çalışmamın başından sonuna kadar, en zor anlarımda yanımda olup, yardımlarını esirgemeyen, desteğini hep hissettiğim hayat arkadaşım, canım eşim Anıl BATMAZ'a ve iki sene önce hayatıma giren, beni sevgisiyle motive eden canım oğlum Can BATMAZ'a,

Katkılarından dolayı sonsuz teşekkür ve minnetlerimi sunarım.

Seda BATMAZ

# İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iv
TEŞEKKÜR .....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ÇİZELGELER .....	xiv
ŞEKİLLER .....	xx
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xxiii
1. GİRİŞ .....	1
2. TEMEL BİLGİLER.....	3
2.1.1. Su Kirliliği ve Kaynakları .....	3
2.1.2. Ağır Metaller .....	4
2.2. Ağır Metallerin Çevresel ve Biyolojik Etkileri .....	4
2.2.1.1. Krom, Özellikleri ve Kullanım Alanları .....	5
2.2.1.2. Nikel, Özellikleri ve Kullanım Alanları.....	7
2.2.1.3. Krom ve Nikelin Birlikte Kullanıldığı Endüstriler .....	8
2.3. Ağır Metal Kirliliği İçeren Atıksular.....	9
2.3.1.1. Krom(VI) Kirliliği İçeren Atıksular .....	11
2.3.1.2. Nikel(II) Kirliliği İçeren Atıksular .....	11
2.3.1.3. Krom(VI) ve Nikel(II) Kirliliğini Birlikte İçeren Atıksular.....	12
2.4. Atıksulardan Ağır Metal İyonlarının Giderim Yöntemleri .....	12
2.4.1.1. Atıksulardan Krom(VI) İyonlarının Giderim Yöntemleri .....	15
2.4.1.2. Atıksulardan Nikel(II) İyonlarının Giderim Yöntemleri .....	16
2.4.1.3. Krom(VI) ve Nikel(II) İyonlarının Atıksulardan Birlikte Giderim Yöntemleri.....	16
2.4.2. Adsorpsiyon.....	17
2.5. Biyosorpsiyon .....	18
2.6. Adsorpsiyon Çeşitleri.....	18
2.7. Adsorpsiyonun Hız ve Verimini Etkileyen Faktörler.....	19
2.7.1.1. Çözeltinin Özellikleri.....	20

2.7.1.2.	Adsorplanan Bileşenin Özellikleri .....	20
2.7.1.3.	Adsorbentın Özellikleri .....	21
2.7.2.	Adsorbentler .....	22
2.8.	Şeker Pancarı Küspesi ve Özellikleri .....	24
<b>3.</b>	<b>DENEY SİSTEMİNİN MATEMATİKSEL TANIMLANMASI .....</b>	<b>27</b>
3.1.1.	Tek ve İki Bileşenli Sistemlerde Adsorpsiyon ve Denge Adsorpsiyon Kapasiteleri.....	27
3.1.2.	Tek ve İki Bileşenli Sistemlerde Adsorpsiyon ve Toplam Adsorpsiyon Verimi	28
3.1.3.	Adsorpsiyon Dengesinin Modellenmesi .....	29
3.2.	Tek Bileşenli Sistemlerde Adsorpsiyon Denge Modelleri .....	29
3.3.	İki Bileşenli Sistemlerde Adsorpsiyon Denge Modelleri .....	31
<b>4.</b>	<b>DENEY SİSTEMİ VE YÖNTEMLERİ.....</b>	<b>34</b>
4.1.	Adsorbentın Deneysel Çalışmalar için Hazırlanması .....	34
4.2.	Adsorpsiyon Çözeltilerinin Hazırlanması.....	34
4.2.1.	Krom(VI) Çözeltilerinin Hazırlanması .....	34
4.2.2.	Nikel(II) Çözeltilerinin Hazırlanması .....	34
4.2.3.	Krom(VI) ve Nikel(II) İyonlarını Birlikte İçeren Karışım Çözeltilerinin Hazırlanması .....	34
4.3.	Deney Düzenegi.....	34
4.4.	Adsorpsiyon Çalışmaları .....	35
4.5.	Krom(VI) ve Nikel(II) Analizleri .....	36
<b>5.</b>	<b>DENEYSEL SONUÇLAR .....</b>	<b>37</b>
5.1.1.	Tek Bileşenli Sistem Çalışmaları .....	37
5.2.	Krom(VI) İyonlarının Adsorpsiyonu .....	37
5.2.1.1.	Başlangıç pH'ının etkisi.....	37
5.2.1.2.	Adsorbent Tanecik Boyut Aralığının Etkisi .....	38
5.2.1.3.	Başlangıç Krom(VI) İyon Derişiminin Etkisi.....	39
5.2.1.4.	Adsorpsiyon Dengesinin Modellenmesi ve Adsorpsiyon Denge Sabitlerinin Bulunması .....	40
5.3.	Nikel(II) İyonlarının Adsorpsiyonu .....	41
5.3.1.1.	Başlangıç pH'ının Etkisi .....	42
5.3.1.2.	Başlangıç Nikel(II) İyon Derişiminin Etkisi.....	42

5.3.1.3. Adsorpsiyon Dengesinin Modellenmesi ve Adsorpsiyon Denge Sabitlerinin Bulunması .....	43
5.3.2. İki Bileşenli Sistem Çalışmaları .....	45
5.4. Krom(VI) ve Nikel(II) İyonlarının Eşanlı Adsorpsiyon Çalışmaları ....	45
5.4.1.1. Krom(VI) İyonları için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 2) ve Sabit Tutulan Her Bir Farklı Nikel(II) İyon Derişiminde, Başlangıç Krom(VI) İyon Derişiminin Krom(VI) ve Nikel(II) İyonlarının Adsorpsiyon Hız ve Kapasitesine Ortak Etkisi.....	45
5.4.1.2. Krom(VI) İyonları için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 2) ve Sabit Tutulan Her Bir Farklı Nikel(II) İyon Derişiminde, Krom(VI) Adsorpsiyon İzotermlerinin Elde Edilmesi.....	48
5.4.1.3. Krom(VI) İyonları için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 2) ve Sabit Tutulan Her Bir Farklı Krom(VI) İyon Derişiminde, Başlangıç Nikel(II) İyon Derişiminin Nikel(II) ve Krom(VI) İyonlarının Adsorpsiyon Hız ve Kapasitesine Ortak Etkisi.....	49
5.4.1.4. Krom(VI) İyonları için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 2) ve Sabit Tutulan Her Bir Farklı Krom(VI) İyon Derişiminde, Nikel(II) Adsorpsiyon İzotermlerinin Elde Edilmesi.....	52
5.4.1.5. Krom(VI) İyonları için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 2), Krom(VI)+Nikel(II) İyonlarının Eşanlı Adsorpsiyonunun Denge Modellemesi ve Denge Model Sabitlerinin Bulunması.....	52
5.4.1.6. Nikel(II) İyonları için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 6) ve Sabit Tutulan Her Bir Farklı Nikel(II) İyon Derişiminde, Başlangıç Krom(VI) İyon Derişiminin Krom(VI) ve Nikel(II) İyonlarının Adsorpsiyon Hız ve Kapasitesine Ortak Etkisi.....	53
5.4.1.7. Nikel(II) İyonları için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 6) ve Sabit Tutulan Her Bir Farklı Nikel(II) İyon Derişiminde, Krom(VI) Adsorpsiyon İzotermlerinin Elde Edilmesi.....	56
5.4.1.8. Nikel(II) İyonu için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 6) ve Sabit Tutulan Her Bir Farklı Krom(VI) İyon Derişiminde, Başlangıç Nikel(II) İyon Derişiminin Nikel(II) ve Krom(VI) İyonlarının Adsorpsiyon Hız ve Kapasitesine Ortak Etkisi .....	57

5.4.1.9. Nikel(II) İyonu için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 6) ve Sabit Tutulan Her Bir Farklı Krom(VI) İyon Derişiminde, Nikel(II) Adsorpsiyon İzotermelerinin Elde Edilmesi.....	59
5.4.1.10. Nikel(II) İyonu için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 6), Krom(VI)+Nikel(II) İyonlarının Eşanlı Adsorpsiyonunun Denge Modellemesi ve Denge Model Sabitlerinin Bulunması.....	60
5.5. Krom(VI) ve Nikel(II) İyonlarının Ardışık Adsorpsiyon Çalışmaları...	61
5.5.1.1. Krom(VI) İyonları için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 2) ve Sabit Nikel(II) Derişiminde Tekli Nikel(II) Adsorpsiyon Dengesinde Ortama Ardışık Eklenen Krom(VI) İyon Derişimindeki Değişimin Krom(VI) ve Nikel(II) İyonlarının Adsorpsiyon Hız ve Kapasitesine Ortak Etkisi.....	61
5.5.1.2. Krom(VI) İyonları için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 2) Sabit Tutulan Her Bir Farklı Nikel(II) İyon Derişiminde Krom(VI) Adsorpsiyon İzotermelerinin Elde Edilmesi ve Sabit Tutulan Her Bir Farklı Nikel(II) İyon Derişimi için, Nikel(II) Adsorpsiyon Dengesindeki Değişimin İncelenmesi.....	63
5.5.1.3. Krom(VI) İyonları için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 2) Krom(VI)+Nikel(II) İyonlarının Ardışık Adsorpsiyonunun Denge Modellemesi ve Denge Model Sabitlerinin Bulunması.....	64
5.5.1.4. Krom(VI) İyonları için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 2) ve Sabit Krom(VI) Derişiminde Tekli Krom(VI) Adsorpsiyon Dengesinde Ortama Ardışık Eklenen Nikel(II) İyon Derişimindeki Değişimin Nikel(II) ve Krom(VI) İyonlarının Adsorpsiyon Hız ve Kapasitesine Ortak Etkisi.....	66
5.5.1.5. Krom(VI) İyonları için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 2) Sabit Tutulan Her Bir Farklı Krom(VI) İyon Derişiminde Nikel(II) Adsorpsiyon İzotermelerinin Elde Edilmesi ve Sabit Tutulan Her Bir Farklı Krom(VI) İyon Derişimi için, Krom(VI) Adsorpsiyon Dengesindeki Değişimin İncelenmesi.....	67
5.5.1.6. Krom(VI) İyonları için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 2) Nikel(II)+Krom(VI) İyonlarının Ardışık Adsorpsiyonunun Denge Modellemesi ve Denge Model Sabitlerinin Bulunması.....	69

5.5.1.7. Nikel(II) İyonu için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 6) ve Sabit Nikel(II) Derişiminde Tekli Nikel(II) Adsorpsiyon Dengesinde Ortama Ardışık Eklenen Krom(VI) İyon Derişimindeki Değişimin Krom(VI) ve Nikel(II) İyonlarının Adsorpsiyon Hız ve Kapasitesine Ortak Etkisi.....	70
5.5.1.8. Nikel(II) İyonu için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 6) Sabit Tutulan Her Bir Farklı Nikel(II) İyon Derişiminde Krom(VI) Adsorpsiyon İzotermelerinin Elde Edilmesi ve Sabit Tutulan Her Bir Farklı Nikel(II) İyon Derişimi için, Nikel(II) Adsorpsiyon Dengesindeki Değişimin İncelenmesi.....	72
5.5.1.9. Nikel(II) İyonu için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 6) Krom(VI)+Nikel(II) İyonlarının Ardışık Adsorpsiyonunun Denge Modellemesi ve Denge Model Sabitlerinin Bulunması.....	74
5.5.1.10. Nikel(II) İyonu için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 6) ve Sabit Krom(VI) Derişiminde Tekli Krom(VI) Adsorpsiyon Dengesinde Ortama Ardışık Eklenen Nikel(II) İyon Derişimindeki Değişimin Nikel(II) ve Krom(VI) İyonlarının Adsorpsiyon Hız ve Kapasitesine Ortak Etkisi.....	75
5.5.1.11. Nikel(II) İyonu için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 6) Sabit Tutulan Her Bir Farklı Krom(VI) İyon Derişiminde Nikel(II) Adsorpsiyon İzotermelerinin Elde Edilmesi ve Sabit Tutulan Her Bir Farklı Krom(VI) İyon Derişimi için, Krom(VI) Adsorpsiyon Dengesindeki Değişimin İncelenmesi.....	77
5.5.1.12. Nikel(II) İyonu için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 6) Nikel(II)+Krom(VI) İyonlarının Ardışık Adsorpsiyonunun Denge Modellemesi ve Denge Model Sabitlerinin Bulunması.....	79
<b>6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>81</b>
<b>7. KAYNAKÇA .....</b>	<b>96</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>102</b>
EK 1. Krom(VI) Tayini.....	102
EK 2. Nikel(II) Tayini.....	103
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>105</b>

## ÇİZELGELER

<b>Çizelge 2.1.</b> Ağır metal iyonlarının insan sağlığına etkileri.....	5
<b>Çizelge 2.2.</b> Çeşitli endüstrilerin atıksularında yer alan ağır metal iyonları .....	10
<b>Çizelge 2.3.</b> İçme suyunda izin verilen ağır metal iyon derişimlerine ait sınır değerleri (İTSHY 2005).....	10
<b>Çizelge 2.4.</b> Sulama suyunda izin verilen ağır metal iyon derişimlerinin sınır değerleri (AATTUT 2010) .....	11
<b>Çizelge 2.6.</b> Bazı işletmelerin atıksu çıkışı nikel(II) iyon derişimleri .....	12
<b>Çizelge 2.7.</b> Krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının birlikte kullanıldığı işletmelerin atıksularında yer alan krom(VI) ve nikel(II) derişimleri.....	12
<b>Çizelge 2.8.</b> Fiziksel ve kimyasal adsorpsiyon arasındaki farklar.....	19
<b>Çizelge 2.9.</b> Şeker pancarı bileşenleri ve ortalama yüzdeleri.....	24
<b>Çizelge 5.1.</b> Kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine krom(VI) adsorpsiyonunda farklı tanecik boyut aralıklarında elde edilen adsorpsiyon hızları, dengede adsorplanan krom(VI) miktarları ve % giderim değerleri (pH=2, C <sub>0</sub> =100 mg/L, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm) .....	39
<b>Çizelge 5.2.</b> Kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine krom(VI) adsorpsiyonunda farklı başlangıç krom(VI) derişimlerinde elde edilen adsorpsiyon hızları, birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) miktarları ve % giderim değerleri (pH=2, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm) ...	39
<b>Çizelge 5.3.</b> Kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine krom(VI) adsorpsiyonunda Langmuir ve Freundlich adsorpsiyon modellerinden bulunan adsorpsiyon sabitleri (pH=2, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm).....	40
<b>Çizelge 5.4.</b> Kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine krom(VI) iyonlarının adsorpsiyonunda elde edilen deneysel q <sub>den</sub> değerlerinin, Langmuir ve Freundlich adsorpsiyon modellerinden hesaplanan teorik q <sub>den</sub> değerleri ile % hata değerleri verilerek karşılaştırılması .....	40
<b>Çizelge 5.5.</b> Kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine nikel(II) adsorpsiyonunda farklı başlangıç nikel(II) derişimlerinde elde edilen adsorpsiyon hızları, birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) miktarları ve % giderim değerleri (pH=6, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm) ...	43



- Çizelge 5.6.** Kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine nikel(II) adsorpsiyonunda Langmuir ve Freundlich adsorpsiyon modellerinden bulunan adsorpsiyon sabitleri (pH=6, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm).....43
- Çizelge 5.7.** Kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine nikel(II) iyonlarının adsorpsiyonunda elde edilen deneysel  $q_{den}$  değerlerinin, Langmuir ve Freundlich adsorpsiyon modellerinden hesaplanan teorik  $q_{den}$  değerleri ile % hata değerleri verilerek karşılaştırılması .....44
- Çizelge 5.8.** pH 2'de ve sabit tutulan her bir farklı nikel(II) iyon derişiminde başlangıç krom(VI) iyon derişiminin değiştirilmesiyle elde edilen dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarları, krom(VI) adsorpsiyon hızı ve % giderim değerleri, birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarları ve % giderim değerleri ile birim adsorbent kütlesi başına toplam adsorplanan krom(VI)+nikel(II) iyon miktarları ve toplam % krom(VI)+nikel(II) giderim değerleri (pH=2, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm) .....46
- Çizelge 5.9.** pH 2'de ve sabit tutulan her bir farklı krom(VI) iyon derişiminde başlangıç nikel(II) iyon derişiminin değiştirilmesiyle elde edilen dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarları, nikel(II) adsorpsiyon hızı ve % giderim değerleri, birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarları ve % giderim değerleri ile birim adsorbent kütlesi başına toplam adsorplanan nikel(II)+krom(VI) iyon miktarları ve toplam % nikel(II)+krom(VI) giderim değerleri (pH=2, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm) .....50
- Çizelge 5.10.** Krom(VI) iyonları için saptanan en uygun çalışma pH'ı 2'de kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının ikili karışımlarının eşanlı adsorpsiyonunda kullanılan antagonistik ve sinerjistik Langmuir modellerinden elde edilen denge model sabitleri ve % ortalama hata değerleri (pH=2, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm) .....53
- Çizelge 5.11.** pH 6'da ve sabit tutulan her bir farklı nikel(II) iyon derişiminde başlangıç krom(VI) iyon derişiminin değiştirilmesiyle elde edilen dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarları, krom(VI) adsorpsiyon hızı ve % giderim değerleri, birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarları ve % giderim değerleri ile birim adsorbent

kütlesi başına toplam adsorplanan krom(VI)+nikel(II) iyon miktarları ve toplam % krom(VI)+nikel(II) giderim değerleri (pH=6, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm) .....	54
<b>Çizelge 5.12.</b> pH 2'de ve sabit tutulan her bir farklı krom(VI) iyon derişiminde başlangıç nikel(II) iyon derişiminin değiştirilmesiyle elde edilen dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarları, nikel(II) adsorpsiyon hızı ve % giderim değerleri, birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarları ve % giderim değerleri ile birim adsorbent kütlesi başına toplam adsorplanan nikel(II)+krom(VI) iyon miktarları ve toplam % nikel(II)+krom(VI) giderim değerleri (pH=2, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm) .....	58
<b>Çizelge 5.13.</b> Nikel(II) iyonları için saptanan en uygun çalışma pH'ı 6'da kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının ikili karışımlarının eşanlı adsorpsiyonunda kullanılan antagonistik ve sinerjistik Langmuir modellerinden elde edilen denge model sabitleri ve % ortalama hata değerleri (pH=6, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm) .....	61
<b>Çizelge 5.14.</b> pH 2'de ve sabit tutulan her bir farklı nikel(II) iyon derişiminde tekli nikel(II) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde adsorpsiyon ortamına farklı derişimlerde ardışık eklenen krom(VI) iyonlarının adsorpsiyonunda elde edilen birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarları, krom(VI) adsorpsiyon hızı ve % giderim değerleri, birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarları ve % giderim değerleri ile birim adsorbent kütlesi başına toplam adsorplanan krom(VI)+nikel(II) iyon miktarları ve toplam % krom(VI)+nikel(II) giderim değerleri (pH=2, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm) .....	62
<b>Çizelge 5.15.</b> Krom(VI) iyonları için saptanan en uygun çalışma pH'ı 2'de kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine önce tekli nikel(II) iyonlarının adsorplandığı, sonra adsorpsiyon dengesinde ortama krom(VI) iyonlarının eklenmesiyle gerçekleştirilen krom(VI) ve nikel(II) iyon karışımlarının ardışık adsorpsiyonunda kullanılan antagonistik ve sinerjistik Langmuir modellerinden elde edilen denge model sabitleri ve % ortalama hata değerleri (pH=2, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm).....	65

**Çizelge 5.16.** pH 2'de ve sabit tutulan her bir farklı krom(VI) iyon derişiminde tekli krom(VI) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde adsorpsiyon ortamına farklı derişimlerde ardışık eklenen nikel(II) iyonlarının adsorpsiyonunda elde edilen birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarları, nikel(II) adsorpsiyon hızı ve % giderim değerleri, birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarları ve % giderim değerleri ile birim adsorbent kütlesi başına toplam adsorplanan nikel(II)+krom(VI) iyon miktarları ve toplam % nikel(II)+krom(VI) giderim değerleri (pH=2, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm) .....67

**Çizelge 5.17.** Krom(VI) iyonları için saptanan en uygun çalışma pH'ı 2'de kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine önce tekli krom(VI) iyonlarının adsorplandığı, sonra adsorpsiyon dengesinde ortama nikel(II) iyonlarının eklenmesiyle gerçekleştirilen nikel(II) ve krom(VI) iyon karışımlarının ardışık adsorpsiyonunda kullanılan antagonistik ve sinerjistik Langmuir modellerinden elde edilen denge model sabitleri ve % ortalama hata değerleri (pH=2, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm).....70

**Çizelge 5.18.** pH 6'da ve sabit tutulan her bir farklı nikel(II) iyon derişiminde tekli nikel(II) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde adsorpsiyon ortamına farklı derişimlerde ardışık eklenen krom(VI) iyonlarının adsorpsiyonunda elde edilen birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarları, krom(VI) adsorpsiyon hızı ve % giderim değerleri, birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarları ve % giderim değerleri ile birim adsorbent kütlesi başına toplam adsorplanan krom(VI)+nikel(II) iyon miktarları ve toplam % krom(VI)+nikel(II) giderim değerleri (pH=6, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm) .....71

**Çizelge 5.19.** Nikel(II) iyonları için saptanan en uygun çalışma pH'ı 6'da kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine önce tekli nikel(II) iyonlarının adsorplandığı, sonra adsorpsiyon dengesinde ortama krom(VI) iyonlarının eklenmesiyle gerçekleştirilen krom(VI) ve nikel(II) iyon karışımlarının ardışık adsorpsiyonunda kullanılan antagonistik ve sinerjistik Langmuir modellerinden elde edilen denge model sabitleri ve % ortalama hata değerleri (pH=6, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm).....75

- Çizelge 5.20.** pH 6'da ve sabit tutulan her bir farklı krom(VI) iyon derişiminde tekli krom(VI) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde adsorpsiyon ortamına farklı derişimlerde ardışık eklenen nikel(II) iyonlarının adsorpsiyonunda elde edilen birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarları, nikel(II) adsorpsiyon hızı ve % giderim değerleri, birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarları ve % giderim değerleri ile birim adsorbent kütlesi başına toplam adsorplanan nikel(II)+krom(VI) iyon miktarları ve toplam % nikel(II)+krom(VI) giderim değerleri (pH=6, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm) .....76
- Çizelge 5.21.** Nikel(II) iyonları için saptanan en uygun çalışma pH'ı 6'da kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine önce tekli krom(VI) iyonlarının adsorplandığı, sonra adsorpsiyon dengesinde ortama nikel(II) iyonlarının eklenmesiyle gerçekleştirilen nikel(II) ve krom(VI) iyon karışımlarının ardışık adsorpsiyonunda kullanılan antagonistik ve sinerjistik Langmuir modellerinden elde edilen denge model sabitleri ve % ortalama hata değerleri (pH=6, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm).....80
- Çizelge 6.1.** pH 2 ve 6'da, kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine tekli krom(VI) ve nikel(II) adsorpsiyonunda farklı başlangıç krom(VI) ve nikel(II) derişimlerinde dengede elde edilen birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) ve nikel(II) miktarları ve % giderim değerleri (T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm) .....83
- Çizelge 6.2.** pH 2 ve 6'da, kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının adsorpsiyonunda Langmuir ve Freundlich modellerinden elde edilen denge sabitleri (T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm) 84
- Çizelge 6.3.** pH 2 ve 6'da kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının tekli adsorpsiyonunda her bir metal iyonu için başlangıç metal iyon derişiminin değışimiyle elde edilen, krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının eşanlı adsorpsiyonunda sabit tutulan birinci metal iyon derişiminde ikinci metal iyon derişiminin değıştirilmesiyle karışım içindeki her bir metal iyonu için elde edilen ve krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının ardışık adsorpsiyonunda karışımındaki birinci metal iyonunun aynı başlangıç iyon derişimindeki dengede, ikinci metal iyonunun farklı derişimlerinde karışım içindeki her bir metal iyonu

için elde edilen dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan metal iyon miktarlarının karşılaştırılması.....89

**Çizelge 6.4.** Literatürde çeşitli adsorbentlerle tekli ve ikili metal iyonlarının adsorpsiyonunda farklı deneysel koşullarda elde edilen adsorpsiyon kapasite değerleri ile bu tez çalışmasında küspe adsorbente krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının tekli, eşanlı ve ardışık adsorpsiyonunda elde edilen kapasite değerlerinin karşılaştırılması.....93

## ŞEKİLLER

- Şekil 5.1.** Kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine tekli krom(VI) adsorpsiyonunda başlangıç pH'ının dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarına etkisi ( $C_o=100$  mg/L,  $T=25^\circ\text{C}$ ,  $X=1,0$  g/L, K.H.= 120 rpm). .....38
- Şekil 5.2.** Kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine krom(VI) iyonlarının adsorpsiyonunda elde edilen deneysel denge verilerinin Langmuir ve Freundlich adsorpsiyon modellerinden bulunan teorik adsorpsiyon izotermiyle karşılaştırılması ( $\text{pH}=2$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ ,  $X=1,0$  g/L, K.H.=120 rpm) .....41
- Şekil 5.3.** Kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine tekli nikel(II) adsorpsiyonunda başlangıç pH'ının dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarına etkisi ( $C_o=100$  mg/L,  $T=25^\circ\text{C}$ ,  $X=1,0$  g/L, K.H.=120 rpm). .....42
- Şekil 5.4.** Kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine nikel(II) iyonlarının adsorpsiyonunda elde edilen deneysel denge verilerinin Langmuir ve Freundlich adsorpsiyon modellerinden bulunan teorik adsorpsiyon izotermiyle karşılaştırılması ( $\text{pH}=6$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ ,  $X=1,0$  g/L, K.H.=120 rpm) .....45
- Şekil 5.5.** Krom(VI)+nikel(II) iyon karışımlarının kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine eşanlı adsorpsiyonunda, sabit tutulan her bir farklı nikel(II) iyon derişiminde elde edilen krom(VI) adsorpsiyon izotermi ( $\text{pH}=2$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ ,  $X=1,0$  g/L, K.H.=120 rpm) .....49
- Şekil 5.6.** Nikel(II)+krom(VI) iyon karışımlarının kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine eşanlı adsorpsiyonunda, sabit tutulan her bir farklı krom(VI) iyon derişiminde elde edilen nikel(II) adsorpsiyon izotermi ( $\text{pH}=2$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ ,  $X=1,0$  g/L, K.H.=120 rpm) .....52
- Şekil 5.7.** Krom(VI)+nikel(II) iyon karışımlarının kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine eşanlı adsorpsiyonunda, sabit tutulan her bir farklı nikel(II) iyon derişiminde elde edilen krom(VI) adsorpsiyon izotermi ( $\text{pH}=6$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ ,  $X=1,0$  g/L, K.H.=120 rpm) .....57
- Şekil 5.8.** Nikel(II)+krom(VI) iyon karışımlarının kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine eşanlı adsorpsiyonunda, sabit tutulan her bir farklı krom(VI) iyon

derişiminde elde edilen nikel(II) adsorpsiyon izotermi (pH=6, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm) .....	60
<b>Şekil 5.9.</b> Sabit tutulan her bir farklı nikel(II) iyon derişiminde tekli nikel(II) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde adsorpsiyon ortamına farklı derişimlerde ardışık eklenen krom(VI) iyonlarının adsorpsiyonunda elde edilen krom(VI) adsorpsiyon izotermi (pH=2, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm).....	63
<b>Şekil 5.10.</b> Sabit tutulan her bir farklı nikel(II) iyon derişiminde tekli nikel(II) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde adsorpsiyon ortamına farklı derişimlerde ardışık eklenen krom(VI) iyonlarının nikel(II) adsorpsiyon dengesine etkisi (pH=2, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm).....	64
<b>Şekil 5.11.</b> Sabit Tutulan Her bir farklı krom(VI) iyon derişiminde tekli krom(VI) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde adsorpsiyon ortamına farklı derişimlerde ardışık eklenen nikel(II) iyonlarının adsorpsiyonunda elde edilen nikel(II) adsorpsiyon izotermi.....	68
<b>Şekil 5.12.</b> Sabit tutulan her bir farklı krom(VI) iyon derişiminde tekli krom(VI) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde adsorpsiyon ortamına farklı derişimlerde ardışık eklenen nikel(II) iyonlarının krom(VI) adsorpsiyon dengesine etkisi (pH=2, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm).....	69
<b>Şekil 5.13.</b> Sabit Tutulan Her bir farklı nikel(II) iyon derişiminde tekli nikel(II) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde adsorpsiyon ortamına farklı derişimlerde ardışık eklenen krom(VI) iyonlarının adsorpsiyonunda elde edilen krom(VI) adsorpsiyon izotermi (pH=6, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm).....	73
<b>Şekil 5.14.</b> Sabit tutulan her bir farklı nikel(II) iyon derişiminde tekli nikel(II) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde adsorpsiyon ortamına farklı derişimlerde ardışık eklenen krom(VI) iyonlarının nikel(II) adsorpsiyon dengesine etkisi (pH=6, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm).....	74
<b>Şekil 5.15.</b> Sabit tutulan Her bir farklı krom(VI) iyon derişiminde tekli krom(VI) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde adsorpsiyon ortamına farklı derişimlerde ardışık eklenen nikel(II) iyonlarının adsorpsiyonunda elde edilen nikel(II) adsorpsiyon izotermi.....	78
<b>Şekil 5.16.</b> Sabit tutulan her bir farklı krom(VI) iyon derişiminde tekli krom(VI) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde adsorpsiyon ortamına farklı derişimlerde	

ardışık eklenen nikel(II) iyonlarının krom(VI) adsorpsiyon dengesine etkisi (pH=2, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm).....	79
<b>Şekil 6.1.</b> pH 2 ve 6'da krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine tekli adsorpsiyonunda 100 mg/L başlangıç krom(VI) ve 100 mg/L başlangıç nikel(II) derişimlerinde elde edilen birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) ve nikel(II) miktarlarının zamanla değişim eğrileri .....	84
<b>Şekil 6.2.</b> pH 2 ve 6'da nikel(II) içermeyen ve 200 mg/L nikel(II) içeren adsorpsiyon ortamında farklı krom(VI) iyon derişimlerinde, tekli, eşanlı ve önce nikel(II) ardışık krom(VI) adsorpsiyon çalışmalarında elde edilen % krom(VI) giderim verimlerinin karşılaştırılması .....	91
<b>Şekil 6.3.</b> pH 2 ve 6'da krom(VI) içermeyen ve 200 mg/L krom(VI) içeren adsorpsiyon ortamında farklı nikel(II) iyon derişimlerinde, tekli, eşanlı ve önce krom(VI) ardışık nikel(II) adsorpsiyon çalışmalarında elde edilen % nikel(II) giderim verimlerinin karşılaştırılması .....	91
<b>Şekil E.1.1.</b> Krom(VI) çalışma doğrusu .....	102



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

- $b_1$  : İki bileşenli Langmuir adsorpsiyon eşitliğinde birinci bileşene ait Langmuir adsorpsiyon sabiti (L/mg)
- $b_2$  : İki bileşenli Langmuir adsorpsiyon eşitliğinde ikinci bileşene ait Langmuir adsorpsiyon sabiti (L/mg)
- $b_i$  :  $i$  bileşenine ait Langmuir adsorpsiyon sabiti (L/mg)
- $b_j$  :  $j$  bileşenine ait Langmuir adsorpsiyon sabiti (L/mg)
- $C$  : Herhangi bir anda, adsorpsiyon ortamında adsorplanmadan kalan bileşen derişimi (mg/L)
- $C_{ad,i}$  : Kesikli/sürekli dolgulu kolon sistemde tekli ya da ikili karışımında herhangi bir anda adsorpsiyon ortamında adsorplanan her bir bileşenin derişimi (mg/L)
- $C_{ad,den}$  : Dengede adsorplanan bileşen derişimi (mg/L)
- $C_{ad,den,i}$  : İkili karışımında dengede adsorplanan her bir bileşen derişimi (mg/L)
- $C_{den}$  : Adsorpsiyon ortamında dengede adsorplanmadan kalan bileşen derişimi (mg/L)
- $C_{den,i}$  : Kesikli/sürekli dolgulu kolon sistemde tekli ya da ikili karışımında dengede adsorpsiyon ortamında adsorplanmadan kalan her bir bileşenin derişimi (mg/L)
- $C_i$  : Tekli yada ikili karışımında herhangi bir anda adsorpsiyon ortamında adsorplanmadan kalan her bir bileşenin derişimi (mg/L)
- $C_{den1}$  : İki bileşenli Langmuir adsorpsiyon eşitliğinde birinci bileşenin dengede adsorplanmadan çözeltide kalan derişimi (mg/L)
- $C_{den2}$  : İki bileşenli Langmuir adsorpsiyon eşitliğinde ikinci bileşenin dengede adsorplanmadan çözeltide kalan derişimi (mg/L)
- $C_{denj}$  : İki bileşenli Langmuir adsorpsiyon eşitliğinde her bir bileşenin dengede adsorplanmadan çözeltide kalan derişimi (mg/L)
- $C_{ij}$  : Adsorplanan  $j$ 'nin başlangıç derişimi (mg/L)
- $C_{o,i}$  : Tekli ya da ikili karışımında her bir bileşenin başlangıç derişimi (mg/L)

- $C_{o,1}$  : Birinci bileşenin başlangıç derişimi (mg/L)
- $C_{o,2}$  : İkinci bileşenin başlangıç derişimi (mg/L)
- $C_{o,top}$  : İkili karışımlardaki her bir bileşenin başlangıç derişimleri toplamı (mg/L)
- $K_{ij}$  : Adsorplanan j için bir modifikasyon katsayısı
- $K_1$  : Adsorplanan 1 bileşeni için bir modifikasyon katsayısı
- $K_2$  : Adsorplanan 2 bileşeni için bir modifikasyon katsayısı
- $K_F$  : Freundlich adsorpsiyon sabiti (  $L^{1/n} mg^{1-1/n} /g$ )
- n : Freundlich adsorpsiyon modelindeki adsorpsiyon derecesini gösteren sabit
- $\eta_1$  : Antagonistik Langmuir modeline göre bulunan birinci bileşene ait adsorpsiyon sabiti
- $\eta_2$  : Antagonistik Langmuir modeline göre bulunan ikinci bileşene ait adsorpsiyon sabiti
- $q_i$  : Tekli ya da ikili karışımda herhangi bir zamanda birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan her bir bileşen miktarı (mg/g)
- $q_{den}$  : Dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan bileşen miktarı (mg/g)
- $q_{deni}$  : Her bir bileşenin, dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan miktarı (mg/g)
- $q_{den1}$  : Birinci bileşenin, dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan miktarı (mg/g)
- $q_{den2}$  : İkinci bileşenin, dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan miktarı (mg/g)
- $q_{den,den}$  : Deneysel olarak bulunan, bileşenin dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan miktarı (mg/g)
- $q_{den,teo,L}$  : Langmuir modeli kullanılarak bulunan, bileşenin dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan miktarı (mg/g)
- $q_{den,teo,F}$  : Freundlich modeli kullanılarak bulunan, bileşenin dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan miktarı (mg/g)
- $q_{top}$  : Toplam adsorplanan bileşen miktarı (mg)

- $Q^{\circ}_1$  : Birinci bileşene ait Langmuir adsorpsiyon sabiti (mg/g)  
 $Q^{\circ}_2$  : İkinci bileşene ait Langmuir adsorpsiyon sabiti (mg/g)  
 $Q^{\circ}_j$  : Her bir bileşene ait Langmuir adsorpsiyon sabiti (mg/g)  
 $r$  : Adsorpsiyon hızı (mg/L.dk)  
 $R^2$  : Korelasyon Katsayısı  
 $t$  : Zaman (dk)  
 $T$  : Sıcaklık ( $^{\circ}C$ )  
 $X$  : Adsorbentin çözeltideki derişimi (g/L)

### **Kısaltmalar**

- Cr :Krom  
Ni :Nikel  
K.H. :Karıştırma hızı

## 1. GİRİŞ

Hızla artan nüfus, plansız kentleşme ve endüstrileşmeye bağlı olarak doğal kaynakların kirletilmesi, insan sağlığını ve çevreyi ciddi bir şekilde tehdit etmekte ve bu durum, çevre kirliliğini küresel bir sorun haline dönüştürmektedir. Şüphesiz kirletilen doğal kaynakların en başında yaşam kaynağımız “su” gelmektedir. Endüstrileşme arttıkça, atıksulardaki kirlilik türleri daha karmaşık hale gelmektedir.

Çoğu endüstride hem üretim proseslerinde hem de yardımcı proseslerde sıkça kullanılan ağır metal iyonları, mikro kirleticiler olarak bilinir; bunlar çok düşük konsantrasyonlarda bile toksik etkilere sahip ve birikim gösterme eğilimindedir. Kurşun, kadmiyum, civa, krom, nikel, gümüş gibi elementler, çeşitli ağır metallere bazılarınıdır. Bu gibi ağır metalleri içeren atıksuların, kullanım amacına uygun şekilde içerdikleri kirliliğin gereken seviyelere indirilmesi ve yasal standartlara göre izlenmesi son derece kritiktir. Bu tür atıksuların arıtılmasında, ağır metal iyonunun türü, suyun özellikleri ve miktarına bağlı olarak kimyasal çöktürme, kimyasal yükseltgeme ve indirgeme, iyon değişimi, filtrasyon, elektro-kimyasal arıtım gibi yöntemleri mevcuttur. Ancak bu yöntemler için maliyetler yüksek olabildiğinden işletimi kolay, yatırımı ucuz olan alternatif ve yeşil kimyaya uygun yeni yöntemlerin geliştirilmesi önem kazanmıştır.

Adsorpsiyon/biyosorpsiyon, verimi yüksek, maliyeti düşük çevre dostu yöntemler arasında öne çıkabilir. Günümüzde, tarımsal atıklardan elde edilen doğal malzemeler adsorbent olarak kullanıldığı sistemlerin hız ve verimliliği üzerine araştırmalar devam etmektedir. Bu malzemeler düşük maliyetli olmalarının yanı sıra doğada bozunma özellikleri ve yüksek adsorpsiyon kapasiteleri ile bu alandaki çalışmaların hızını artırmaktadır.

Bu tez kapsamında şeker fabrikası atığı şeker pancarı küspesi adsorbent olarak kullanılarak, özellikle demir-çelik endüstrisi atıksularında olduğu gibi istenmeyen derişimlerde bulunan krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının tekli adsorpsiyonu ve ikili karışımlarının eşanlı ve ardışık adsorpsiyonu kesikli sistemde incelenmiştir. Tez çalışmasının ilk kısmında her bir metal iyonunun tekli adsorpsiyonu incelenerek, başlangıç pH'ının, adsorbent tanecik boyut aralığının ve başlangıç metal iyon

derişiminin adsorpsiyon hızı ve kapasitesi üzerine etkileri araştırılmıştır. Çalışmada her bir metal iyonunun en iyi adsorplandığı pH değerinde, krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının ikili karışımlarının eşanlı veya ardışık olarak adsorpsiyonunda, sabit metal iyon derişiminde diğer metal iyonunun derişimindeki değişimin her bir metal iyonunun adsorpsiyon hız ve kapasitesine ortak etkileri ve ayrıca başlangıç pH'ına ve metal iyonunun diğerine eşanlı ve ardışık olarak eklenmesine bağlı adsorbentin metal iyon seçiciliği incelenmiştir. Her bir adsorpsiyon sistemi için adsorpsiyon dengesinin matematiksel tanımlanmasında tekli ve iki bileşenli sistemler için türetilmiş Langmuir ve Freundlich adsorpsiyon modelleri kullanılarak model sabitleri saptanmış ve adsorpsiyon dengesinin hangi modele en iyi uyduğu belirlenmiştir [1].

## 2. TEMEL BİLGİLER

### 2.1.1. Su Kirliliği ve Kaynakları

Ülkemizde ve dünya genelinde hızla artan nüfus, plansız şehirleşme, artan enerji ve gıda gereksinimi ile aşırı tüketim gibi faktörler, çeşitli çevresel problemlerin ortaya çıkmasına yol açmakta ve giderek daha zor bir hale gelen çevre kirliliğine de neden olmaktadır. Bu kirliliğin önemli unsurlarından biri de su kirliliğidir. Su kirliliği; su kaynağının kimyasal, fiziksel, bakteriyolojik, radyoaktif ve ekolojik yönden negatif bir biçimde değişmesiyle birlikte, suyun kullanılmamasına sebep olacak madde veya enerji atıklarının suya salınması şeklinde ifade edilmektedir. [2].

Sular, çeşitli şekillerde kirlenebilir. Örneğin, suyun fiziksel özellikleri değiştiğinde bu durum fiziksel kirliliğe işaret eder. Ağır metaller ve inorganik atıkların suya karışması kimyasal kirliliğe yol açar. Organik atıkların varlığıyla birlikte algler, küfler ve bakteriler gibi organizmaların üremesi ise suyun biyolojik olarak kirlenmesine neden olur [3].

Suyun doğal döngüsü sırasında insan kaynaklı kullanımlardan kaynaklanan farklı maddelerin karışması veya doğal olarak bulunan maddelerin sularda artması, önemli kirlilik sorunlarına yol açar. İnsanlar, barajlar, kapalı su sistemleri, kanallar ve göletler gibi yapay su yapılarıyla doğal su döngüsüne yapay etkiler yaratır. Özellikle yerleşim ve endüstri bölgelerinde su kullanımıyla birlikte ortaya çıkan kirli sular, büyük miktarda atık yükü taşır. Bu suların belirli seviyelerde arıtılmaması veya atık yüklerinin azaltılmaması durumunda, doğal su kaynaklarına bırakıldıklarında, sistemlerin kendini yenileme kapasitesini aşacak kadar fazla atık maddeyle suyun kirlenmesine ve su yaşamının zarar görmesine neden olabilir.

Su kirliliğine neden olan kaynaklar oldukça çeşitli olup, insan kaynaklı nedenlerle suların kirlenmesinde ağır metaller önemli bir etkiye sahiptir. Metal iyon kirliliği içeren sular, alıcı ortamlara deşarj edilmeden önce, farklı arıtım yöntemleriyle içerdikleri metal kirleticilerin derişimini en aza indirmek için işlemde geçirilir [4].

### **2.1.2. Ağır Metaller**

Periyodik tablonun geçiş metalleri grubundaki yüksek atom ağırlıkları (20'den fazla) olan metaller, ağır metaller olarak bilinir. Yoğunluğu genellikle 5 g/cm<sup>3</sup>'ten fazla olan elementlerdir. Bu gruptaki yaklaşık 70 elementten ancak 20'si ekolojik olarak oldukça önemli ağır metallerdir. Arsenik (As), demir (Fe), bakır (Cu), kobalt (Co), kadmiyum (Cd), gümüş (Ag), civa (Hg), mangan (Mn), krom (Cr), kalay (Sn), kurşun (Pb), nikel (Ni), uranyum (U) ve çinko (Zn) bunlardan bazılarıdır. en önemlileri. Doğal ortamlarda biriken bu metaller daha yüksek toksisiteye sahiptir [5].

### **2.2. Ağır Metallerin Çevresel ve Biyolojik Etkileri**

Ağır metaller, çevreye iki temel kaynaktan yayılabilir. Birincisi, doğal süreçlerden kaynaklanan yayılım, ikincisi ise insan faaliyetlerinin etkisiyle ortaya çıkan antropojenik kaynaklardır. İnsan kaynaklı etkiler arasında endüstriyel ve tarımsal faaliyetler bulunurken, doğal kaynaklar arasında ise toprak erozyonu ve volkanik aktiviteler sonucu mineral ayrışmasıyla ortaya çıkan metal yayılımı öne çıkar [6,7].

Ağır metaller, toksik özellikleri nedeniyle su kirliliğinde önemli bir faktördür. Organik kirleticiler sucul ortamda biyolojik olarak parçalanabilirken, ağır metal iyonları bu şekilde zararsız hale dönüşmezler. Ağır metal iyonları, suda çözülmüş haldeyken noktasal veya yaygın deşarjlar sonucu yüzey sularına karışarak içme ve kullanma sularına kolayca geçebilirler. Suyu karışarak yayılım gösteren bu metal iyonları, bitki ve hayvanlar aracılığıyla besin zincirine katılarak insan sağlığı üzerinde etkili olabilirler [8,9]. Metal tozlarının solunması, kirlenmiş suların içilmesi, su ürünlerinin tüketilmesi, toprak teması, hayvansal ve bitkisel gıdaların tüketilmesi ve besin zincirinden kaynaklanan ağır metal iyonlarının insan vücuduna alınmasının birkaç örneğidir. Ağır metal iyonlarının vücuda girmesinin en yaygın yolu, besin zinciri yoluyla bulaşmadır. Ağır metal içeren gıdalar, insan vücudundaki ağır metal seviyelerini önemli ölçüde artırabilir. Karaciğer, ağır metallerin çoğunlukla kan yoluyla biriktiği yerdir. Bu noktada proteinlere bağlanırlar ve daha sonra böbreklere taşınırlar. Böbreklerde biriken ağır metal iyonları, böbrek filtrasyon sistemini tehlikeye atabilir. Bu durum böbreklere ileri düzeyde zarar verebilir ve proteinlerin ve şekerlerin idrar yoluyla atılmasına neden olabilir. Ağır metal iyonlarının vücutta birikmesi ve böbreklerden atılması arasındaki süre

oldukça uzundur [10]. Vücutta biriken ağır metal iyonları, özellikle yağ dokuları, kemikler gibi çeşitli dokularda toplanır. Bu metal iyonlarının birikimi belirli bir seviyeyi aştığında ciddi etkiler görülmeye başlanır. Bu etkiler, metal iyonunun derişimi, organizmanın maruz kaldığı miktar ve süre ve metal iyonlarının özellikleri (çözünürlük, kimyasal yapısı, kompleks ve redoks oluşturma yetenekleri) gibi faktörlere bağlı olarak değişir [8].

Bu sebeplerden dolayı ağır metal iyonlarının evsel ve endüstriyel atıksulardan arındırılması, çevresel sürdürülebilirlik, su kalitesinin korunması ve insan sağlığının korunması açısından hayati önem taşır. Bu tür kirliliğin önlenmesi veya azaltılması için etkili arıtma teknolojileri ve düzenlemeler geliştirilmiştir.

Önemli ağır metal iyonları ve insan sağlığına olan etkileri Çizelge 2.1'de sunulmuştur [11].

### Çizelge 2.1. Ağır metal iyonlarının insan sağlığına etkileri

Ağır Metal	EPA Limiti (ppm)	Toksik Etkisi
Gümüş	0.10	Cilt ve diğer vücut dokularının gri rengini almasına, solunum problemlerine, akciğer ve boğaz tahrişine ve mide ağrısına neden olabilir.
Arsenik	0.01	Oksidatif fosforilasyon ve ATP sentezi gibi temel hücresel süreçleri etkiler.
Kadmiyum	5.0	Kansere ve mutasyona sebep olur , akciğeri ve kalsiyum regülasyonunu etkiler.
Krom	0.1	Saç dökülmesine sebep olur.
Bakır	1.3	Beyin ve böbrek hasarına, karaciğer sirozuna, kronik anemi ve mide ve bağırsak tahrişine sebep olur.
Cıva	2.0	Otoimmün hastalıklar, saç dökülmesi, depresyon, uyuşukluk, hafıza kaybı, uykusuzluk, beyin hasarı, akciğer ve böbrek yetmezliği şikayetlerine sebebiyet verir.
Nikel	0.2	Alerji temelli cilt hastalıklarına , akciğer kanserine, saç kaybına neden olur.
Kurşun	15	Çocuklarda gelişimin baskılanmasına, zeka geriliğine kısa süreli hafıza kaybına, öğrenme ve koordinasyonda yetersizliğe ve kalp damar rahatsızlıklarına sebep olur.
Çinko	0.5	Kronik yorgunluk ve vertigoya neden olur.
Baryum	2.0	Kalp rahatsızlıklarına, solunum yetmezliğine, kas seğirmesi ve yüksek tansiyona sebep olur.
Selenyum	0.6	Sindirim sistemi rahatsızlıklarına ve karaciğer hastalıklarına sebep olur.

#### 2.2.1.1. Krom, Özellikleri ve Kullanım Alanları

"Krom", birçok renkli mineral içerdiği için "chroma" (Yunanca "renk" anlamına gelen "chroma") adı verilen sert yapıya sahip ancak kolayca işlenebilen bir metaldir. Fransız kimyacı Louis-Nicolas Vauquelin, 1797'de keşfettiği kromun atom numarası 24, atom ağırlığı 51,9961 g/mol ve kaynama sıcaklığı 2665°C ve yoğunluğu 7,17 gram/cm<sup>3</sup>tür. Krom, periyodik cetvelde VI B grubunda yer alır. Cr(II), Cr(III) ve Cr(VI) krom formları vardır. Cr(III) iyonu, en yaygın ve en kararlı



iyondur. Krom, yüksek sertliği ve 1857°C'lik erime noktası nedeniyle metali sertleştirme amaçlı kullanılmaktadır.

Günlük dozlarda alınan Cr(III) bileşiklerinin insanlar veya hayvanlar üzerinde zararlı etkileri gözlenmemiştir. Ancak, yüksek miktarda Cr(VI) bileşiklerinin tüketimi, ciddi ve sık ölümlle sonuçlanabilen patolojik değişikliklere neden olabilir. Cr(VI) bileşikleri, deri, sindirim sistemi ve akciğerlerle temas ettiğinde alerjik etki ve korozif özellik gösterebilir. Özellikle kromik asit (CrO<sub>3</sub>) olarak bilinen Cr(VI) bileşiği, laboratuvar cam malzemelerinin temizliğinde kullanıldığında ciddi riskler oluşturabilir. Deneysel alışmalar, Cr(VI) iyonunun kanserojen olduğunu ve bu etkisinin özellikle bronş sistemini etkilediğini göstermektedir. Cr(VI) iyonuyla uzun süreli temas, kansere neden olabilir. Özellikle krom üretiminde ve kromatla işlem yapılmasında çalışan kişilerde bronş kanserinin arttığı gözlenmiştir. Kanseri oluşum mekanizması tam olarak bilinmemekle birlikte, Cr(VI) bileşiğinin DNA ile etkileşime girerek gen kopyalama, onarım ve çoğalma süreçlerini değiştirdiği düşünölmektedir [8].

Kromun en yaygın kullanım alanları aşağıda verilmiştir:

**Paslanmaz elik Üretimi:** Mutfak gereçleri, yapı materyalleri, otomotiv sektörü gibi alanlarda sıklıkla kullanılan krom paslanmaz çeliğin korozyona dayanıklılığını artırmak amacıyla bu alanda sıklıkla kullanılan metaldir [12].

**Metal Kaplama ve Kaplama Endüstrisi:** Metallerin korozyona karşı direncini artırmak amacıyla krom metal kaplama ve kaplama endüstrisinde de sıklıkla kullanılmaktadır.

**Krom Pigmentleri Üretimi:** Vernik ve boya sanayiinde, sarı ve yeşil renkleri elde etmek amacıyla krom kullanılmaktadır.

**Otomotiv Endüstrisi:** Özellikle araçların dış aksamalarının kaplamalarında krom tercih edilmektedir.

**Elektrokaplama Endüstrisi:** Krom, dekoratif amaçla ve oksitlenmeye karşı direnci nedeniyle korozyona karşı koruma sağlamak amacıyla metal yüzeylerinin elektroliz yoluyla kaplanmasında da kullanılmaktadır.

Kimya Endüstrisi: Kromun kimyasal reaksiyonlarda katalizör olarak, elektroliz işlemleri için ya da farklı kimyasal sentezlerde doğrudan kullanımı mevcuttur [13].

Krom ayrıca bu endüstrilerin yanı sıra uçak, gemi, madencilik ve cevher işleme gibi çeşitli sektörlerde de geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ayrıca toz halindeki krom, deri tabaklamada yaygın bir şekilde kullanılır ve derinin uzun süre dayanmasını sağlar [14].

#### **2.2.1.2. Nikel, Özellikleri ve Kullanım Alanları**

Nikel, gümüş-beyaz bir metaldir ve çok serttir. Periyodik cetvelde geçiş metalleri arasında yer alır. Atom numarası 28, atomu ağırlığı 58,6934 g/mol ve kaynama sıcaklığı 2913°C ve yoğunluğu 8,908 g/cm<sup>3</sup>'tür. Nikelin oksitlenmiş hali genellikle +2 değerlikli olsa da, +0, +1, +3 ve +4 değerleri de görülebilir. Nikelin +6 değerlikli olması da mümkündür. Nikel ayrıca manyetik bir alanda boyut değiştirme gibi doğal bir özelliğe sahiptir. Ancak bu değişim genellikle negatif yönde olur.

Nikelin bilinen biyolojik bir işlevi yoktur, fakat orta derecede zehirleyici özelliklere sahiptir. Hem doğal olarak ortamda bulunabilir hem de insan faaliyetleri sonucu doğada var olabilir. Nikelin organik formu, inorganik formuna göre daha fazla zehirlilik gösterir. Nikel, ciltte tahrişe neden olmasının yanı sıra kalp-damar sistemine zarar verebilen ve kanserojen özellikleri olan bir metaldir [15,16].

Nikel, öncelikle bir alaşım metalidir ve bu özelliğiyle birçok farklı kullanım alanına sahiptir. Bu alaşımlar, bakır, kurşun, kobalt, gümüş, krom, alüminyum ve altın gibi metallerle birleştirilerek oluşturulur [5].

Nikelin en yaygın kullanım alanları aşağıda verilmiştir:

**Paslanmaz Çelik Üretimi:** Nikel, oksitlenmeye karşı direnç artırımı, mukavemet ve sıcaklık dayanımı gibi özelliklerin artırılması için çelik alaşımlara eklenir. Örneğin, %18-20 krom, %8-10 nikel, %1-2 manganez ve demir içeren 18/8 paslanmaz çelik gibi alaşımlar, yaygın bir şekilde kullanılan alaşımlardandır [5].

**Kimya Endüstrisi:** Nikel çeşitli kimyasal reaksiyonlarda katalizör olarak sıklıkla kullanılmaktadır.

**Pil Endüstrisi:** Nikel, özellikle kadmiyum-nikel pillerinin üretiminde kullanılan bileşenlerden biridir.

Hava ve Uzay Endüstrisi: Nikel ayrıca yüksek sıcaklık ve basınca dayanıklılığı nedeniyle uçak aksamalarının kaplanması için kullanılmaktadır.

Elektrik Dirençli Alaşımların Üretimi: Nikel, özellikle ısıtıcı ekipmanların ve elektrikli rezistanslar gibi aletlerin üretiminde kullanılmaktadır.

Yüzey Kaplama Endüstrisi: Nikel, ayrıca dekoratif amaçlar için yüzey kaplama bileşeni olarak kullanılmaktadır [17].

Ayrıca uçak, kamyon, lokomotif, vagon gibi taşıtların yapımında da tercih edilen nikel, yeşil renkli cam üretiminde de kullanılmaktadır.

### **2.2.1.3. Krom ve Nikelin Birlikte Kullanıldığı Endüstriler**

Krom ve nikelin birlikte kullanıldığı endüstriyel süreçler aşağıda verilmiştir:

#### **Paslanmaz Çelik Üretimi**

Krom ve nikel, paslanmaz çelik üretiminde birlikte kullanılan en önemli elementlerdir. Paslanmaz çelik, biyomalzemeler arasında ilk kullanılan metalik alaşımdır. Bu malzeme, günümüzde ortopedik cerrahide plaklar, vidalar, kalça çivileri gibi kullanımlarda, düşük maliyeti, daha kolay işlenebilmesi ve daha rahat temin edilebilmesi nedeniyle tercih edilmektedir. Paslanmaz çelikte karbon, mangan, fosfor, sülfür, silikon, krom, nikel ve molibden bulunur. Paslanmaz çelikteki krom, karbon, nikel ve molibden oranları değiştirilerek dayanıklılık ve korozyon direnci artırılır. Korozyon direncini sağlayan temel bileşen kromdur ve bileşimde en az %12 oranında bulunmalıdır. Yüksek krom içeriği, korozyona dayanıklı, kendini yenileyebilen ve güçlü yapışkan özelliklere sahip krom oksit ( $Cr_2O_3$ ) tabakası oluşturur. Çelikte ayrıca, nikel oranı %10 civarında tutularak korozyon daha da azaltılmaya çalışılır. Genellikle paslanmaz çelik üretiminde krom oranı %18-20 arasında ve nikel oranı ise %8-10 arasında değişmektedir [18].

#### **Elektrokimya Endüstrisi**

Bu endüstride de özellikle yüzeylerin korunması ve dayanıklılığının artırılması için krom ve nikelin birlikte kullanıldığı yüzey kaplamalar sıkça kullanılmaktadır. Krom ve nikel kaplama, genellikle havacılık, otomotiv ve petrokimya alanlarında sıkça tercih edilen bir elektro kaplama yöntemidir [19].

## **Madencilik ve Cevher İşleme Endüstrisi**

Madencilik ve cevher işleme endüstrisinde krom ve nikel içeren cevherlerin işlenmesi ve elde edilmesi önemli rol oynamaktadır. Türkiye'de yaklaşık bin cevher hazırlama tesisi vardır. Bu fabrikalar, endüstriyel hammaddeler (kuvars, bor, feldispat, olivin, kaolen, bentonit, perlit, kalsit, barit, gümüş, nikel, çinko, krom, manganez ve demir gibi) ve metalik cevherler (altın, bakır, gümüş, nikel, krom, manganez ve demir gibi) işlemektedir [20].

## **Kimya Endüstrisi**

Bazı kimyasal süreçlerde, katalizör olarak ya da tepkiyen olarak krom ve nikel tekli ya da birlikte kullanılmaktadır [21,22].

### **2.3. Ağır Metal Kirliliği İçeren Atıksular**

"Atıksu" terimi, genel olarak evler, endüstriyel tesisler, tarım alanları ve diğer insan aktivitelerinden kaynaklanan ve canlı sağlığına zararlı fiziksel, kimyasal ve biyolojik kirlilikler barındıran sular şeklinde tanımlanır.

Ağır metal kirliliği içeren atıksular, düşük biyolojik oksijen ihtiyacı (BOI) değerine sahiptir ve sıklıkla asidiktir. Bu inorganik sular, içinde yaşayan ve suyu kullanan canlıları zehirleyebilir ve kendi kendine temizlenme ve arıtılma süreçlerinde rol alan mikroorganizmaları öldürebilir. Kurşun, krom, civa, kadmiyum, bakır, demir, nikel, çinko ve diğer ağır metal iyonları içeren birçok işletme, atıksuları, denizleri, gölleri ve akarsuları kirleten en önemli kaynaklardır [5].

Ağır metaller, genellikle atıksularda metal tuzu, katyonik ve kısmen anyonik şekilde bulunur. Bu durum, kirlenmiş suların doğal olarak temizlenmesini engelleyebilir ve ayrıca, bu sulardan arıtılmış suyun sulama için kullanılmasını ve arıtma çamurlarının gübre olarak kullanılmasını kısıtlayabilir. Ancak yine de kimyasal yapısı nedeniyle ağır metaller günlük hayatta ve endüstride kullanımı geniş yer tutmaktadır. Bu metaller genellikle metal temizleme, kaplama, elektro kaplama, demir-çelik, otomotiv sektörü, boya, baskı, tekstil, petrokimya ve deri endüstrilerinden kaynaklanan atıksularda diğer kirleticilerle bir arada bulunabilirler. Farklı endüstrilerin atıksularında yer alan ağır metal iyonları Çizelge 2.2'de listelenmiştir [5].

## Çizelge 2.2. Çeşitli endüstrilerin atıksularında yer alan ağır metal iyonları

Endüstri Dalı	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Pb	Ni	Sn	Zn
Karton, Kağıt ve Selüloz Sanayi		x	x		x		x	x	x	x
Organik Kimyasallar ve Petrokimya	x	x		x	x		x		x	x
Alkaliler, Klor, İnorganik Kimyasal	x	x		x	x		x		x	x
Kimyasal Gübreler	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Petrol Rafinerileri	x	x	x	x	x		x	x	x	x
Demir Çelik Dökümhaneleri	x	x	x	x	x		x	x	x	x
Demir Çelik Dışındaki Metal Sanayi	x	x	x		x		x		x	x
Motorlu Taşıt, Uçak Kaplaması	x	x	x		x			x		
Cam, Çimento ve Asbest Üretimi		x								
Tekstil Sanayi		x								
Deri Tabaklanması		x								

Her ne kadar ağır metal iyonları mikro ölçekte bile zehirli etkiler gösterebilen ve zamanla birikim sağlayan kimyasallar olsa da, bazı ağır metallerin belirli oranları insanlar ve diğer canlılar için gereklidir. Bu nedenle, birçok ülke içme suyu standartları ve atıksulardaki limit metal iyon derişimlerini belirleyen çeşitli yönetmelikler geliştirmiştir. Ülkemizde, içme suyu kalitesini belirleyen İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik (TS 266) ve sulama suyu için izin verilen ağır metal seviyelerini belirleyen Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği (AATTUT) adlı yönetmelikler bulunmaktadır. İTSHY 2005'e göre içme sularında izin verilen en yüksek metal iyon derişimleri Çizelge 2.3'te, AATTUT 2010'a göre sulama suyu için ağır metal iyon değerleri ise Çizelge 2.4'te listelenmiştir [6].

**Çizelge 2.3.** İçme suyunda izin verilen ağır metal iyon derişimlerine ait sınır değerleri (İTSHY 2005)

Ağır Metal İyonu	Derişim
Kurşun	10 µg/L
Selenyum	10 µg/L
Arsenik	10 µg/L
Krom(VI)	5 µg/L
Siyanür	50 µg/L
Kadmiyum	5 µg/L
Bakır	2000 µg/L
Nikel	20 µg/L

**Çizelge 2.4.** Sulama suyunda izin verilen ağır metal iyon derişimlerinin sınır değerleri (AATTUT 2010)

<b>Ağır Metal İyonu</b>	<b>Birim alana verilebilecek en yüksek derişimler (kg/ha)</b>	<b>Her türlü zeminde sürekli sulama yapılması durumunda sınır değerler (mg/L)</b>
Alüminyum	4600	5,00
Arsenik	90	0,10
Kadmiyum	9	0,01
Krom	90	0,10
Kobalt	45	0,05
Bakır	190	0,20
Demir	4600	5,00
Kurşun	4600	5,00
Manganez	920	0,20
Nikel	920	0,20
Selenyum	16	0,02
Çinko	1840	2,00

#### 2.3.1.1. Krom(VI) Kirliliği İçeren Atıksular

Endüstriyel atıksulardaki krom(VI) iyonlarını düşük pH'larda kromat ( $Cr_2O_4^{2-}$ ) ve dikromat ( $Cr_2O_7^{2-}$ ) anyonları oluşturur. Bazı işletmelerin atıksularında yer alan krom(VI) iyon derişimleri Çizelge 2.5'te verilmiştir [23].

**Çizelge 2.5.** Bazı işletmelerin atıksu çıkışı krom(VI) iyon derişimleri

<b>Atıksu Kaynağı</b>	<b>Krom(VI) Derişimi (mg/L)</b>
Soğutma Kuleleri	10-60
Anot Durulama	30-100
Deri Tabakalama	40-45
Elektrokaplama	145-150
Kaplama	10.000-270.000
Anot Banyosu	15.000-52.000
Parlatma-Daldırma Banyosu	20.000-75.000

#### 2.3.1.2. Nikel(II) Kirliliği İçeren Atıksular

Endüstriyel atıksularda nikel iyonları pH 2-6 aralığında, nikel(II) katyonları şeklinde bulunur. Bazı işletmelerin atıksularında yer alan nikel(II) derişimleri Çizelge 2.6'da verilmiştir [24,25,26,27].

**Çizelge 2.6.** Bazı işletmelerin atıksu çıkışı nikel(II) iyon derişimleri

<b>Atıksu Kaynağı</b>	<b>Nikel(II) Derişimi (mg/L)</b>
Çelik Endüstrisi Atıksuyu	890
Nikel(II) Kaplama Endüstrisi Atıksuyu	2900
Pil Endüstrisi Atıksuyu	21

### 2.3.1.3. Krom(VI) ve Nikel(II) Kirliliğini Birlikte İçeren Atıksular

Çizelge 2.7’de krom(VI) ve nikel(II) kirliliğini birlikte içeren atıksularda yer alan krom(VI) ve nikel(II) iyon derişimleri sunulmuştur [28].

**Çizelge 2.7.** Krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının birlikte kullanıldığı işletmelerin atıksularında yer alan krom(VI) ve nikel(II) derişimleri

<b>Krom(VI) ve Nikel(II) iyonlarının Birlikte Kullanıldıkları İşletmelerin Atıksuları</b>	<b>Krom(VI) (mg/L)</b>	<b>Nikel(II) (mg/L)</b>
<b>Deri Sanayii Atıksuyu</b>	27	1231
<b>Tekstil Sanayii Atıksuyu</b>	24	23
<b>Kaplama Sanayii Atıksuyu</b>	3771	5685
<b>Otomotiv Yan Sanayii Atıksuyu</b>	31	115

### 2.4. Atıksulardan Ağır Metal İyonlarının Giderim Yöntemleri

Ağır metal iyonlarının atıksulardan arıtımında birçok giderim yöntemi kullanılmaktadır. Ancak hangi yöntemin seçileceği, ağır metal iyonunun türü, atıksu içindeki dağılımı, derişimi, diğer iyonların etkisi gibi parametrelere bağlıdır. Bu yöntemlerden biri veya birkaçı seçilerek atıksulardaki ağır metal derişimi, çevreye zarar verme riskini en aza indirecek seviyelere düşürülebilir.

#### **Kimyasal Çöktürme**

Kimyasal çöktürme yöntemiyle atıksulardan ağır metal iyonlarının giderilmesinde çözeltiye eklenen çöktürücü ajanlarla (kireç (CaO), kostik soda (NaOH), magnezyum oksit (MgO) ve sönmüş kireç (Ca(OH)<sub>2</sub>) gibi) metal iyonlarının çözünmez bir forma dönüşmesi sağlanır. Genellikle çoğu metal iyonu, uygun

çökme pH seviyelerinde hidroksitleri şeklinde çöker, ek olarak sülfür ve karbonat çöktürme gibi alternatif yöntemler de geniş bir şekilde kullanılmaktadır [29,30,31].

Kimyasal çöktürme yöntemi, düşük derişimli metal iyonlarının uzaklaştırılması ve düşük maliyetli olmasıyla avantajlı gibi görünse de, büyük miktarda toksik çamur üretme ve yüksek derişimli metal iyonları için yetersiz kalma gibi bazı olumsuz yönleri bulunmaktadır [29].

### **İyon Değişirme**

Farklı özelliklere sahip iyonların, katı bir yüzeyde bulunan iyonlarla yer değiştirmesini sağlayarak, atıksu içinde bulunan ve arıtmak istenen iyonların değiştirilmesine olanak tanıyan basit ve etkili bir teknolojik yöntemdir. Hareketli iyonlar, dış çözülden katı matrisin içerdiği özel gruplarla elektrostatik olarak bağlanarak iyon değişimine yol açar. Bu yöntem, oldukça büyük hacimlerdeki suyu işlerken ppb düzeyindeki iyonları bile uzaklaştırabilir. Hem katyonların hem de anyonların giderimi konusunda son derece etkili bir yöntemdir.

İyon değişimi, çok az enerji gerektirir. Bu nedenle, düşük derişimlerde organik ve inorganik bileşenlerin uzaklaştırılmasında etkili bir şekilde kullanılabilir. İçme suyu ve endüstriyel atıksuların temizlenmesi, suyun yumuşatılması ve deiyonizasyonu gibi birçok alanda iyon değişirme yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, krom iyonlarının endüstriyel atıksulardan çıkarılması tercih edilmektedir. Yine de, iyon değiştirici reçineler, yağ, gres, silika, organik madde birikimleri ve mikroorganizmalardan kaynaklanan kirleticilerden kaynaklanan istenmeyen kirlenme nedeniyle zaman zaman tercih edilmeyebilir [29].

### **Ters Osmoz**

Bu yöntem genellikle endüstriyel atıksuların arıtılması için kullanılır. Membran, çözülmüş organik ve inorganik maddeleri sudan ayırır ya da geri kazanır. Bu sistemler yüksek basınç altında çalışır ve selüloz, polieter veya poliamid gibi membranlar kullanılır. Serbest enerji, basınç, pH ve işlem süresi bu süreçte çok önemlidir. Su, ters osmozda membrandaki gözeneklerden yüksek basınçla geçer. Su molekülleri ve bazı inorganik moleküller bu gözeneklerden geçebilir, ancak çoğu diğer madde geçemez ve bu nedenle konsantre bir şekilde dışarı atılır. Bu prosedür, gerekli miktarda yüksek kaliteli su elde etmek için kullanılır [32].



## **Membran Filtrasyonu**

Membran filtrasyonu, atıksu arıtımında yaygın olarak kullanılan, filtrasyon, saflaştırma, arıtma, fraksiyonel ayırım gibi birçok işlemde de tercih edilen alternatif bir ayırma yöntemidir. Membran yapılar, polimerik, cam, metal veya sıvı malzemelerden oluşabilir ve gözenekli-gözeneksiz, simetrik-asimetrik veya kompozit yapıda olabilirler. Membran filtrasyon yöntemi krom içeren çamurlardan kromun geri kazanımı için kullanılabilir. Ancak, çamurun oksijenli ortamda yakılması hava kirliliğine ve krom oksidasyonuna yol açtığı için bu yöntem uygun değildir. Ayrıca, sistemin işletilmesi için gerekli ekipman, sistem kurulumu, testler ve mühendislik hizmetleri yüksek maliyetler getirebilir, bu da sistemin uygulanabilirliğini azaltabilir [33].

## **Elektrokoagülasyon**

Elektrokoagülasyon, atıksu arıtımında çeşitli kirleticilerin (organik madde, ağır metaller, yağlar, süspansiyonlar) uzaklaştırılmasında etkili bir yöntem olarak kullanılır. Elektrokoagülasyon, elektroliz prensibine dayalı bir arıtma yöntemidir. Bu yöntemde, bir elektrot çifti (genellikle metal iyonu) kullanılır ve atıksuyun içinden geçirilir. Elektrotlara uygulanan düşük gerilimle (genellikle doğru akım) suyun içindeki kirleticilerin çökmesini veya koagülasyonunu hızlandırmak için elektrotlardan birine elektrik akımı verilir. Demir ve alüminyum, teminleri kolay ve maliyeti düşük olduğu için elektrokoagülasyonda en çok tercih edilen elektrot malzemeleridir. Ayrıca, atıksuyun içeriğine bağlı olarak farklı elektrot türleri de kullanılabilir. Bu yöntemde, pıhtılaşma ve çökme mekanizmaları, elektrokimyasal reaktördeki elektrotlar yardımıyla kimyasal ilaveye ihtiyaç duymadan oluşturulur. Bu durum, pahalı kimyasal maddelerin kullanımına ihtiyaç duyulmadan uygulanabilmesini sağlar ve elektrokoagülasyonu daha ekonomik bir seçenek haline getirir. Bu yöntem, düşük işletme maliyetleri ve kimyasal kullanımının azalması gibi avantajlar sunabilir [34].

## **Adsorpsiyon**

Adsorpsiyon, atıksudaki çeşitli ağır metal iyonlarının belirli bir katı adsorbent yüzeyindeki aktif gruplara çeşitli fiziksel ve kimyasal bağlarla tutulmasını sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntem, metal iyonlarının adsorbent yüzeyindeki aktif bölgelere

çeşitli kimyasal ve fiziksel etkileşimlerle bağlanmasıyla gerçekleşir. Atıksulardan ağır metal iyonlarının adsorpsiyonla gideriminde en sık kullanılan adsorbentler aktif karbon, kil, zeolit vb. leridir [10].

#### **2.4.1.1. Atıksulardan Krom(VI) İyonlarının Giderim Yöntemleri**

Atıksulardan krom(VI) iyonlarının gideriminde koagülasyon-flokülasyon, kimyasal çöktürme, adsorpsiyon ve iyon değiştirme gibi yöntemler kullanılmaktadır.

##### **Koagülasyon-flokülasyon**

Atıksulardaki krom(VI) iyonlarının çöktürülmesi için genellikle  $Al_2(SO_4)_3$  (alüminyum sülfat-alüminyum tuzları) ve/veya  $FeCl_3$  (demir klorür-demir tuzları) koagülant olarak kullanılır. Bu ajanlar uygun pH'larda krom(VI) iyonlarının farklı formlarını oluşturarak çözünürlüğünün azalmasını ve çökmesini sağlarlar [35].

##### **Kimyasal Çöktürme**

**Doğrudan Çöktürme:** Krom(VI) iyonlarını içeren atıksuya kireç soda ve/veya sodyum hidroksit eklenebilir. Bu, krom(VI) iyonlarının hidroksitleri şeklinde çöktürülmesiyle atıksudan çıkarılmasını sağlar.

**İndirgeme ile Çöktürme:** Atık suyun pH'ı 2'ye düşürüldükten sonra krom(VI) iyonları kükürt dioksit, sodyum bisülfid veya demir sülfat iyonlarına indirgenir. İndirgeme tamamlandıktan sonra krom(III), krom-3-hidroksit olarak çökeltilir.

##### **Adsorpsiyon**

Özellikle çoğu ağır metal iyonuna uygulanabilir olması ve düşük derişimlerde de etkili olması nedeniyle, atıksulardan krom(VI) iyonlarının gideriminde adsorpsiyon da oldukça sık tercih edilen giderim yöntemlerindedir. Aktif karbon, bentonit (kil minerali) , çeşitli organik atıklardan elde edilen adsorbentler (şeker pancarı küspesi, kahve telvesi, çay atığı, narenciye kabuğu, pirinç kabuğu vb.) kullanılarak uygun pH'larda krom(VI) iyonlarının bu adsorbentlerin yüzeyine tutunmasıyla adsorpsiyon gerçekleştirilir ve atıksulardan krom(VI) iyon giderimi sağlanır [36].

##### **İyon Değişirme**

İyon değiştirme, yüksek verimi nedeniyle atıksulardan krom(VI) iyonlarının gideriminde oldukça sık tercih edilen giderim yöntemlerindedir. Anyon değiştirici

reçineler kullanılarak atıksulardaki krom(VI) iyonlarının aynı yüklü iyonlarla yer değiştirmesi sağlanır ve krom(VI) giderimi gerçekleştirilir [37].

#### **2.4.1.2. Atıksulardan Nikel(II) İyonlarının Giderim Yöntemleri**

Nikel(II) iyonlarının atıksulardan gideriminde kimyasal çöktürme, adsorpsiyon ve iyon değiştirme gibi yöntemler kullanılmaktadır.

##### **Kimyasal Çöktürme**

Atıksulardan nikel(II) iyonlarının kimyasal çöktürme ile gideriminde, kalsiyum hidroksit  $[Ca(OH)_2]$ , sodyum hidroksit (NaOH) gibi hidroksit tuzları ya da sülfür reaktifi ( $Na_2S$ ) gibi ajanlar çöktürücü olarak kullanılmaktadır. Bu ajanlar, nikel(II) iyonlarını nikel hidroksit  $[Ni(OH)_2]$  veya nikel karbonata  $[NiCO_3]$  dönüştürerek çöktürülmesini sağlar [38].

##### **Adsorpsiyon**

Atıksulardan nikel(II) gideriminde aktif karbon, çeşitli kil mineralleri, organik atıklardan elde edilen adsorbentler (şeker pancarı posası, portakal kabuğu, vb.) kullanılmaktadır [39].

##### **İyon Değiştirme**

Atıksulardan nikel(II) iyonlarının iyon değiştiricilerle gideriminde katyonik doğal zeolit ajanlar kullanılmaktadır [37].

#### **2.4.1.3. Krom(VI) ve Nikel(II) İyonlarının Atıksulardan Birlikte Giderim Yöntemleri**

Çeşitli endüstrilerde birlikte yer alan krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının atıksulardan gideriminde giderim yöntemi belirlenirken atıksuyun özellikleri, kirlilik derecesi ya da yönetmelik şartları dikkate alınmalıdır. Bu iyonların birlikte gideriminde kullanılan yöntemler aşağıda sıralanmıştır:

##### **Koagülasyon-Flokülasyon**

Atıksulardaki krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının koagülasyon-flokülasyon yöntemiyle birlikte giderimi için  $Al_2(SO_4)_3$  (alüminyum sülfat-alüminyum tuzları) ve/veya  $FeCl_3$  (demir klorür-demir tuzları) koagülant olarak kullanılır. Bu koagülantlar yardımıyla

uygun pH'larda iyonların farklı formlarının oluşmasıyla çözünürlükleri azalır ve çökerler [35].

### **Adsorpsiyon**

Atıksulardan krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının birlikte gideriminde düşük maliyet, uygulanabilirlik, verimlilik ve etkinlik gibi avantajları nedeniyle adsorpsiyon tercih edilen bir yöntemdir. Adsorplanacak olan her iki ağır metal iyonunun özelliklerine göre uygun adsorbentler seçilerek, metal iyonlarının yüzeye tutunarak atıksulardan giderimi sağlanır. Krom(VI) ve nikel(II) iyonlarını adsorplayacak uygun aktif gruplara sahip adsorbentler arasında aktif karbon, tarımsal atıklardan elde edilen adsorbentler, killeri ve bentonit gibi malzemeler sayılabilir [40].

### **İyon Değişirme**

Krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının birlikte giderim yöntemleri arasında iyon değişirme de yüksek verimi sayesinde sık tercih edilen bir yöntemdir. Ardışık kolonlarla anyon değiştirici reçine ve katyon değiştirici reçine kullanılarak sırasıyla krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının atıksulardan giderimi sağlanır [37].

#### **2.4.2. Adsorpsiyon**

Adsorpsiyon, bir sıvı ya da gaz karışımında bulunan bileşenin/bileşenlerin ilgisi oldukları katı yüzeye tutunması olayı olarak tanımlanabilir. Böylece karışım içindeki bileşen/bileşenlerin ayrılması sağlanır. Katı yüzeyde tutulan bileşene "adsorplanan veya adsorbat", adsorplayan katıya ise "adsorban veya adsorbent" denir [41].

Adsorpsiyonun temelini, katı ile gaz ya da katı ile sıvı faz arasındaki moleküllerin etkileşimleri oluşturmaktadır. Bu süreçte, yüzeydeki moleküller/iyonlar/kompleks yapılar/vb. gaz ya da sıvıdaki diğer moleküllerle etkileşime girerek ortamdaki dengesiz kuvvetleri dengeleyerek adsorbent yüzeyine tutunurlar. Bu sayede, moleküller adsorbent yüzeyinde sabitlenmiş olur [5].

Adsorpsiyon tipik olarak dört aşamada gerçekleşir. Bir sıvı fazdan katı yüzeyine adsorpsiyon sürecinde, ilk adım bulk difüzyon olarak bilinen sıvı-katı ara yüzeyine difüzyondur. İkinci aşama olan film difüzyonunda, adsorplanan madde molekülleri sıvı-katı ara yüzeyine ulaşır. Bu sabit alan, adsorbentin gözeneklerine doğru

hareket eder. Üçüncü aşama olan gözenek difüzyonu, adsorplanacak materyalleri farklı boyutlardaki gözeneklerde taşır. Son olarak, adsorpsiyon olarak bilinen dördüncü aşamada, uygun boyuttaki gözeneklerde adsorplanacak maddenin moleküllerinin tutulması gerçekleşir [42,43].

## **2.5. Biyosorpsiyon**

Biyolojik sistemlerin, metal iyonları, boyar maddeler, fenolikler gibi çeşitli bileşenlerin ortamdaki uzaklaştırılması için kullanıldığı sürece biyosorpsiyon veya biyolojik uzaklaştırma denir. Mikroorganizma, tarımsal atık gibi çeşitli biyokütlelerin biyosorbent olarak kullanılması, yüksek performansları ve düşük maliyetleri nedeniyle çekici bir alternatif olarak kabul edilir. Biyosorpsiyon yönteminde biyokütlenin yaş veya kurutulmuş formda kullanılması mümkündür. Metal iyonlarının biyosorpsiyonu genellikle adsorpsiyon, iyon değişimi, kompleks oluşturma, mikro çökeltme, indirgeme, metilasyon, çözünürlük ve/veya biyoakümülyasyon gibi mekanizmaları içerir. Bu süreç hızlıdır ve genellikle tersine döndürülebilir niteliktedir [5,44].

## **2.6. Adsorpsiyon Çeşitleri**

Adsorpsiyon sürecinde rol oynayan kuvvetler dikkate alındığında dört tür adsorpsiyondan söz edilebilir:

### **Fiziksel Adsorpsiyon**

Katı bir adsorbentin yüzeyindeki zayıf Van der Waals kuvvetlerinin bir sonucu olarak fiziksel adsorpsiyon meydana gelir. Bu tür adsorpsiyon, adsorplanan maddenin molekülleri ile katı adsorbent yüzeyi arasındaki çekim etkileşimlerinin bir sonucudur. Katı adsorbentin kristal yapısına girmemesine rağmen, genellikle adsorplanan bileşenin yüzeyini tamamen kaplar. Bu tür adsorpsiyon, düşük sıcaklıklarda meydana gelebileceği gibi çok katmanlıdır ve geri dönüşümü zor olabilir. Ekzotermik olarak, adsorpsiyon sürecinde yoğunlaşma enerjisinden daha fazla ısı oluşturulurken ısı üretilir. Aktivasyon enerjisi az ve oluşan bağlar sıklıkla zayıf ve tersine dönüşebilir [45].

## Kimyasal Adsorpsiyon

Kimyasal adsorpsiyon, adsorplanan madde ile katı adsorbent yüzeyi arasında kimyasal bağların oluştuğu bir adsorpsiyon türüdür. Bu süreç, genellikle tersinmez ve tek tabakalıdır; çoğunlukla yüksek sıcaklıklarda gerçekleşir. Kimyasal adsorpsiyonun rejenerasyonu oldukça güçtür. Adsorpsiyon esnasında açığa çıkan ısı, reaksiyonun oluşması için gereken ısıdan daha fazladır [45]. Fiziksel ve kimyasal adsorpsiyonun farkları Çizelge 2.8'de verilmiştir [46].

**Çizelge 2.8.** Fiziksel ve kimyasal adsorpsiyon arasındaki farklar

<b>Fiziksel Adsorpsiyon</b>	<b>Kimyasal Adsorpsiyon</b>
Zayıf Van der Waals kuvvetleri etkindir	Daha kuvvetli kimyasal bağlar etkilidir
Tersinirdir	Tersinmezdir
Adsorbe olan moleküller, yüzey üzerinde hareketli konumdadır	Adsorbe olan moleküller, yüzey üzerinde hareket etmezler
Aktivasyon enerjisi gerekmez	Aktivasyon enerjisi gereklidir
Sıcaklık ile azalır	Sıcaklık ile artar

## İyonik Adsorpsiyon

İyonik adsorpsiyon, elektrostatik çekim kuvvetlerinin etkisiyle iyonların adsorbent yüzeyindeki ters yüklü bölgelere yapışması prensibine dayanır. Bu tür adsorpsiyonda, adsorbent ve adsorplanan madde molekülleri arasındaki iyon yükleri ve adsorbentin gözenek yapısı çok önemlidir. Küçük çaplı ve yüklü iyonlar, adsorbent ile zıt elektrik yüklerine sahip iyonlara göre daha iyi adsorplanır [5].

### 2.7. Adsorpsiyonun Hız ve Verimini Etkileyen Faktörler

Adsorpsiyon, oldukça karmaşık bir süreçtir ve bu süreçte birçok değişken etkilidir. Hem laboratuvar araştırmalarında hem de endüstriyel kullanımlarda optimal çalışma koşullarının belirlenmesinde hangi faktörlerin ne şekilde etkili olduğunu bilmek son derece kritiktir. Bu bilgi, adsorpsiyon sürecinin doğru şekilde anlaşılmasını ve yönetilmesini sağlar. Adsorpsiyon hız ve verimi etkileyen parametreleri 3 ana başlık altında toplamak mümkündür:

### **2.7.1.1. Çözeltinin Özellikleri**

#### **Çözeltinin pH'ı**

Çözeltinin pH değeri adsorpsiyon hız ve verimini etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Ortam pH'ının değişmesiyle adsorpsiyon hız ve veriminin değişmesi adsorbent yüzeyinde pH değişikliğiyle yeni iyonların oluşmasıyla açıklanabilir. pH değişimiyle adsorplanan bileşen iyonları da kompleks iyonlara dönüşebilir ve adsorbent yüzeyinde yeni oluşan iyonlarla etkileşebilir.

#### **Çözeltinin Sıcaklığı**

Adsorpsiyon ekzotermikse sıcaklığın artmasıyla adsorplanan bileşen miktarı azalabilir, endotermik bir adsorpsiyon söz konusuysa sıcaklığın artması adsorplanan madde miktarını artırabilir.

#### **Çözeltinin Karıştırma Hızı**

Karıştırma hızının artmasıyla adsorbent ile adsorplananın daha iyi temas etmesi dolayısıyla adsorpsiyon hız ve kapasitesinin artması sağlanabilir [47].

#### **Çözelti Bileşimi**

Çözeltide birden fazla adsorplanacak bileşenin aynı anda bulunması ya da adsorplanacak bileşenin ardışık olarak çözelti içeriğine dahil olması adsorpsiyon hız ve verimini etkileyen faktörler arasındadır.

### **2.7.1.2. Adsorplanan Bileşenin Özellikleri**

Adsorpsiyon sürecini etkileyen faktörlerden biri de adsorplanan bileşenin özellikleridir. Adsorplanacak olan bileşenin anyonik veya katyonik yapıda oluşu, adsorbentin yükleme özelliğini, aralarındaki elektrostatik etkileşimleri ve dolayısıyla adsorbent seçimini etkilemektedir. Adsorbent yüzeyi pozitifse anyonik özellikteki iyonlar adsorbe edilmeye eğilimliken, adsorbent yüzeyi negatifse katyonik özellikteki iyonlar adsorbe edilmeye eğilimlidir.

Adsorplanacak bileşenin anyonik ya da katyonik özellikte olması adsorbentin seçiciliği üzerinde de etkilidir. Adsorbent yüzeyi anyonik ve katyonik bileşenler arasında spesifik iyonlar için daha fazla seçicilik gösterme eğiliminde olacağından belirli iyonların giderilmesi veya saflaştırılması için tercih sebebidir.

Yine anyonik veya katyonik yapıdaki adsorplanan bileşenlerin bu kimyasal özellikleri adsorbentin rejenerasyonu ve geri kazanımı sürecinde de etkili olmaktadır.

Adsorplanan bileşenin liyofobik-hidrofobik (çözücüden-sudan hoşlanmama) karakteri adsorbent yüzeyine tutunma eğilimini etkileyen başka bir faktördür. Adsorbentler, genellikle hidrofobik özellikteki molekülleri daha fazla adsorplama eğilimindedir. Bunun nedeni hidrofobik moleküller (organik bileşenler gibi), su ile zayıf etkileşime girerler ve bu nedenle başka bir yüzeye bağlanmaya ihtiyaç duyarlar.

Adsorplanan bileşenin moleküler yapısı, molekül büyüklüğü ve molekül şekli de adsorpsiyon sürecini etkileyen faktörlerdendir. Büyük moleküller, adsorbent yüzeyine daha az erişebilir ve dolayısıyla daha az adsorplanabilirken, küçük moleküller daha kolay adsorplanma eğilimindedir.

Yine adsorplanan bileşenin iyon çapı da adsorpsiyonu etkileyen faktörlerdendir. Adsorplanacak bileşenin iyon çapının, adsorbent gözenek yapısına uygun olması gerekmektedir. Örneğin, küçük iyonlar daha küçük gözeneklere sahip adsorbentlere adsorplanabilirken, büyük iyonlar daha geniş gözeneklere sahip adsorbentlere ihtiyaç duyabilirler.

### **2.7.1.3. Adsorbentin Özellikleri**

#### **Yüzey Alanı**

Adsorpsiyon, genellikle bir yüzey olayıdır, bu yüzden daha geniş bir yüzeye sahip olan adsorbent, uygun koşullar altında daha fazla bileşeni yüzeyinde tutabilir ve bu da adsorpsiyon kapasitesinin artmasına neden olur.

#### **Gözenek Yapısı**

Adsorpsiyon mekanizmasını etkileyen önemli bir faktör de adsorbentin gözenek yapısıdır. Bu yapı, gözenek boyut dağılımı, gözenek büyüklüğü ve toplam adsorbent hacmi içindeki gözenek oranı tarafından belirlenir. IUPAC, adsorbentlerin gözenek boyutlarına göre dört kategori belirlemiştir. Bunlar; yarıçap 25 nm'den büyük olanlar makro gözenek, 1 ile 25 nm arasındakiler mezo gözenek, 0.4 ile 1 nm arasındakiler mikro gözenek ve 0.4 nm'den daha küçük olanlar



submikro gözenek şeklinde isimlendirilir. Makro gözenekler, adsorplanan maddenin moleküllerinin adsorbent içine girmesine izin verirken, mezo gözenekler daha iç bölgelere ilerlemelerini sağlar. Öte yandan, genellikle mikro gözeneklerde moleküllerin tutulması gerçekleşir. Bu gözenek yapıları, adsorpsiyon sürecinde moleküllerin hareketini, tutulumunu ve dağılımını belirlemede önemli bir rol oynar.

### **Tanecik Boyut Aralığı**

Adsorpsiyonda, en az diğer faktörler kadar etkili olan bir özellik de adsorbent tanecik boyut aralığıdır. Belirli bir miktar adsorbent daha küçük tanecik boyut aralığına getirilmesi durumunda, birim adsorbent yüzeyinde tutulan molekül sayısı artar. Ticari olarak, pelet, toz ya da granül şeklinde farklı biçimlerde üretilen adsorbentler, farklı amaçlar için kullanılmaktadır. Bu farklı biçimler, adsorpsiyon prosesinde moleküllerin yakalanması ve depolanmasında çeşitli performanslar sunar [5,48].

### **Adsorpsiyon Süresi**

Adsorbent ile adsorplanacak bileşeni içeren çözeltinin ilk etkileştiği anlarda, adsorpsiyon hızı en yüksektir çünkü başlangıçta hem adsorplananın çözeltideki ve yüzeydeki derişimlerinin farkı olan itici güç en yüksektir, hem de adsorplanmamış yüzey alanı en büyüktür. Ancak zamanla hem adsorplanmamış yüzey alanının azalması hem de adsorplanan bileşen miktarının azalmasıyla birlikte adsorpsiyon hızı düşer. Adsorpsiyon sürecinde adsorpsiyonun dengeye ulaşma süresinin belirlemek, özellikle atıksuların adsorpsiyonla arıtılmasında kritik bir parametredir.

#### **2.7.2. Adsorbentler**

Adsorbent seçimi adsorpsiyonun hız ve verimliliğinin arttırılmasında önemli bir parametredir. Her katı madde teorik olarak adsorbent olabilir, fakat ideal adsorbent, atıksudaki adsorplanacak bileşeni en etkili şekilde uzaklaştırabilecek yüksek seçicilik ve kapasitede ve tekrarlanabilir kullanımlı işletme ömrüne sahip olmalıdır. Adsorbent adsorpsiyon kapasitesi, adsorbent, adsorplanan bileşenin ve ortam koşullarına bağlı olarak değişebilir.

Birim ağırlık başına geniş bir yüzeye sahip olmak, ideal bir adsorbent temel özelliğidir. Adsorbent yüzey alanını doğru bir şekilde belirlemek zor olduğundan, adsorbent birim ağırlığı başına adsorbe edilen bileşen miktarının dikkate

alınması yaygın bir uygulamadır. Ağır metallerin giderilmesi için yaygın olarak kullanılan doğal ve yapay adsorbentler, aktifleştirilmiş kil, alümina, sentetik polimerik reçine, silikajel, lignin, linyit, turba, kitosan ve zeolit ile endüstriyel ve tarımsal atıklardan oluşur. [5,10].

Adsorbentlerin adsorpsiyon kapasitelerini artırmak için adsorbentlere çeşitli fiziksel ve/veya kimyasal bir ya da birden fazla ön işlem uygulanmaktadır. Fiziksel ön işlemler vakumlama ve kurutma, boyutlarına ayırma, otoklavlama gibi prosesleri kapsarken, kimyasal ön işlemler ise yüzey aktif maddeler ile muamele ve inorganik maddeler ile muamele ( $H_2SO_4$ ,  $HNO_2$ ,  $NaCl_2$ ) gibi prosesleri kapsamaktadır [23, 49,50]. Literatürde çeşitli fiziksel ve kimyasal ön işlemler uygulanmış adsorbentlerle ağır metal iyonlarının giderimine ait çalışmalar özetlenmiştir:

Liu ve arkadaşları (2018), HCl ve  $H_2O_2$  ile modifiye edilmiş hindistan cevizi kabuğundan elde edilen aktif karbonu adsorbent olarak kullanarak sulu çözeltilerden Co(III) iyonlarının kesikli sistemde giderimini incelemiştir. Farklı adsorpsiyon sıcaklıklarında ( $25^{\circ}C-75^{\circ}C$ ), farklı adsorbent derişimlerinde (0,01-0,04 mol/L) ve 1-8 saat süren adsorpsiyon sürelerinde  $H_2O_2$  ile modifiye edilmiş aktif karbon adsorbentinin Co(III) giderim verimini en yüksek %86, HCl ile modifiye edilmiş aktif karbon adsorbentinin Co(III) giderim verimini en yüksek %79 olarak tespit etmişlerdir [51].

N. Azouaou ve arkadaşları (2010) kurutulmuş kahve telvesini adsorbent olarak kullanarak atıksulardan Cd(II) iyonunun giderimini incelemiştir. Deneysel çalışmaları kesikli sistemde, pH 2.5-7.5 aralığında, adsorpsiyon süresi 240 dk. ve sıcaklık  $20-50^{\circ}C$  aralığında olacak şekilde gerçekleştirmiş ve en yüksek adsorpsiyon kapasitesi 15,65 mg/g olarak elde etmişlerdir [52].

R. Lavecchia ve arkadaşları (2010) kurutulmuş siyah ve yeşil çay yapraklarını adsorbent olarak kullanarak sulu çözeltilerden Pb(II) giderimi üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Kesikli sistemde, pH 5.5'de, 20 saat adsorpsiyon süresinde ve  $5-40^{\circ}C$  sıcaklık aralığında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda Pb(II) giderim verimini en yüksek %95 olarak tespit etmişlerdir [53].

N. Abdel-Jabbar ve arkadaşları (2009), yıkanıp etüvde kurutulmuş beyaz tavuk yumurtası kabuklarını adsorbent olarak kullanarak Cu(II) iyonlarının sulu çözeltilerden giderimini incelemişlerdir. Dolgulu kolonda, pH 3-5 aralığında yapılan deneysel çalışmalarda Cu(II) giderim verimini en yüksek %96 olarak tespit etmişlerdir [54].

Argun ve Dursun (2008) yaptıkları bir çalışmada endüstriyel atıksulardaki Cd(II) iyonlarını, Fenton reaktifi ile modifiye edilmiş çam kabuğu adsorbenti kullanarak kesikli sistemde, 90 dakikalık adsorpsiyon süresinde ve pH 7.0'de en yüksek %97 verimlilikle gidermişlerdir [55].

Argun ve arkadaşlarının yaptıkları başka bir çalışmada (2007), HCl ile modifiye edilmiş meşe talaşı adsorbentini kullanarak, kesikli sistemde atıksulardan Cu(II), Ni(II) ve Cr(VI) ağır metal iyonlarının giderimini incelemişler ve pH 4.0'de Cu(II) giderimini %93 verimle, pH 4.0'de Ni(II) giderimini %82 verimle ve pH 3.0'de Cr(VI) giderimini %84 verimle sağlamışlardır [56].

## 2.8. Şeker Pancarı Küspesi ve Özellikleri

Şeker pancarı, ıspanakgiller ailesinden iki yıllık bir bitkidir. Bitki, ilk yıl sadece kalın kök ve yapraklarını, ikinci yıl da ise çiçekler ve tohumlarını üretmektedir. Yoğunluğu 0,65 – 0,82 g/cm<sup>3</sup> aralığında değişen şeker pancarının %75'ini su, geri kalan %25'ini organik maddeler içermektedir. Bu organik kısmın %17,5'ünü ise sakaroz oluşturur. Çizelge 2.9'da şeker pancarının bileşenleri ve ortalama ağırlık yüzdeleri sunulmuştur [23].

**Çizelge 2.9.** Şeker pancarı bileşenleri ve ortalama yüzdeleri

Bileşenin Adı	Taze pancardaki miktarı (%)	Kuru maddedeki miktarı (%)
Su	76,5	-
Toplam Kuru Madde	23,5	100,0
Sakkaroz	16,5	70,2
Pektin	2,5	10,7
Selüloz	1,2	5,1
Azotlu Maddeler	1,1	4,6
Madensel Maddeler	1,7	7,2
Lipidler	0,1	0,4
Diğerleri	0,4	1,8

Şeker pancarı küspesi, şeker pancarının öğütülmesi ve şekerin çıkarılmasından sonra geriye kalan posa parçasıdır ve şeker üretim endüstrisinin bir yan ürünüdür. Küspe, suda çözünmeyen karbonhidratlardan oluşur; bunlar pektin, selüloz ve hemiselülozdur. Şeker pancarı küspesi, doğal bir polisakkarittir ve üretildiği yere göre farklı bileşimlere sahiptir. Şeker pancarı küspesinin yaklaşık %20'si selülozdan oluşur, ancak %40'tan fazlası karmaşık heteropolisakkarit peptik yapıları oluşturan bileşenlerden oluşur [57].

Şeker pancarı küspesi kimyasal yapısı bakımından istenilen adsorbent niteliklerine sahip tarımsal atıklardandır. Öncelikle sürdürülebilir ve çevre dostu olması, kolay ulaşılabilirliği ve düşük maliyeti adsorbent seçiminde şeker pancarı küspesine öncelikli yer edindirmiştir. Ayrıca şeker pancarı küspesi, kimyasal olarak kararlı olması ve geniş bir pH aralığında çalışılabilirliği gibi özelliklerinden dolayı da ideal adsorbent niteliklerine sahiptir. Tez çalışmasında şeker pancarı küspesi kurutma ön işlemine tabii tutularak adsorbent olarak kullanılmıştır. Literatürde şeker pancarı küspesiyle ağır metal iyonlarının giderimiyle ilgili yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir:

Sadat (2019), çalışmasında şeker pancarı küspesi ve  $Fe_3O_4$ 'ten oluşan manyetik kompozit adsorbenti kullanarak atıksulardan Ni(II) giderimini incelemiştir. Sadat, 25 mg/L başlangıç nikel(II) derişiminde, 40 dk temas süresinde, 200 rpm karıştırma hızında, 5 g/L adsorbent derişiminde ve pH 6,6'da adsorbentin Ni(II) adsorplama kapasitesini 9,4 mg/g olarak belirlemiştir [58].

Karslı (2019), kesikli karıştırmalı ve sürekli düzende çalışan dolgulu kolon sistemlerinde kurutulmuş şeker pancarı küspesi ve CTAB ile modifiye edilmiş şeker pancarı küspesi adsorbentlere krom(VI) iyonlarının adsorpsiyonunu incelemiştir [34]. Karslı'nın, kesikli karıştırmalı kapta yaptığı çalışmalar sonucunda kurutulmuş ve CTAB ile modifiye edilmiş şeker pancarı küspesi adsorbentleriyle, pH 2'de sırasıyla 66,8 mg/g ve 84,2 mg/g adsorpsiyon kapasitesi, sürekli çalışan dolgulu kolon sisteminde ise 0,7 mL/dk akış hızında sırasıyla 32,0 mg/g ve 37,2 mg/g adsorpsiyon kapasitesi elde ettiği gözlenmiştir [23].

Pehlivan ve arkadaşları (2006), şeker pancarı küspesi ve uçucu kül adsorbentlerini kullanarak, sulu çözeltilerden bakır(II) ve çinko(II) giderimini incelemiştir. Oda

sıcaklığında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda şeker pancarı küspesi adsorbentine pH 5.5'de 30,9 mg/g bakır(II) ve pH 6'da 35,6 mg/g çinko(II) adsorpsiyonu sağlandığı gözlenmiştir. Uçucu kül adsorbentine ise pH 5.0'da 7,0 mg/g bakır(II) ve pH 4.0'da 7,84 mg/g çinko(II) adsorpsiyonu sağlandığı saptanmıştır [59].

Aksu ve İšođlu (2005), kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentini kullanarak bakır(II) iyonlarının sulu çözeltilerden kesikli sistemde giderimini araştırmışlardır. 25°C ve 4.0 başlangıç pH'ında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda küspenin 28,5 mg/g bakır(II) giderimini sağladığını gözlemişlerdir [60].

Altundogan (2005) tarafından, demir(III) hidroksit yüklenerek modifiye edilmiş şeker pancarı küspesi adsorbent olarak kullanılarak atıksulardan krom(VI) iyonlarının giderimi incelenmiştir. 10 mg/L krom(VI) derişiminde, 120 dk adsorpsiyon süresinde ve 25°C adsorpsiyon sıcaklığında %83,1 verimle krom(VI) giderimi elde edildiği gözlenmiştir [61].

Özer ve arkadaşları (1998), şeker pancarı küspesinden elde edilen aktif karbonu adsorbent olarak kullanarak sulu çözeltilerden kadmiyum(II) giderimini incelemiştir. 20°C'da, pH 6.3'te, 2,5 g/L adsorbent derişiminde ve 120 dk'lık adsorpsiyon süresi sonunda, 100, 250 ve 500 mg/L kadmiyum başlangıç derişimlerinde sırasıyla %99,0 %78,2 ve %57,0 verimle kadmiyum gideriminin sağlandığı gözlenmiştir [62].

Bu tez çalışmasında ise ağır metal iyonlarını yüksek kapasitede adsorplama yeteneği olan kurutulmuş şeker pancarı küspesi, tekli krom(VI), tekli nikel(II) ve krom(VI)-nikel(II) karışımlarının eşanlı ve ardışık adsorpsiyonunda kullanılmıştır.

### 3. DENEY SİSTEMİNİN MATEMATİKSEL TANIMLANMASI

Deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği kesikli karıştırılmalı kap, belirli bir karıştırma hızında ve sabit sıcaklıkta çalışan adsorpsiyon hız ve dengesinin zamanla değişiminin incelendiği, giriş ve çıkışın olmadığı kapalı bir sistemdir. Bu sistemde, adsorplanan bileşenin derişiminin zamanla nasıl değiştiği ölçülerek adsorpsiyon denge ve kinetik sabitlerinin belirlenmesi sağlanır.

#### 3.1.1. Tek ve İki Bileşenli Sistemlerde Adsorpsiyon ve Denge Adsorpsiyon Kapasiteleri

Bir tek veya iki bileşenli karışımda adsorpsiyon kapasitesi, herhangi bir t zamanında birim adsorbent kütlesi başına adsorbe edilen her bileşenin miktarı  $q_i$  (mg/g), Eşitlik 3.1 ile ifade edilmiştir.

$$q_i = \frac{(C_{0,i} - C_i)}{X} = C_{ad,i}/X \quad (3.1)$$

Burada;

$C_{0,i}$ : Tek veya iki bileşenli karışımda, her bir bileşenin başlangıç derişimi (mg/L)

$C_i$ : Tek veya iki bileşenli karışımda adsorpsiyon ortamında herhangi bir anda adsorplanmadan kalan her bir bileşenin derişimi (mg/L)

$C_{ad,i}$ : Tek veya iki bileşenli karışımda adsorpsiyon ortamında herhangi bir anda adsorplanan her bir bileşenin derişimi (mg/L)

X: Çözeltideki adsorbentin derişimi (g/L)'dir.

Sistem dengeye ulaştığı anda eşitlik 3.1'de yer alan  $C_i$  değeri  $C_{den,i}$ ,  $q_i$  değeri ise  $q_{den,i}$  olarak değiştirilerek  $q_{den,i}$  (denge adsorpsiyon kapasitesi) değeri bulunur.

#### Adsorpsiyon Hızı

Adsorpsiyon hızı, birim adsorbent kütlesi tarafından adsorplanan metal iyonu derişimine ( $q_i$ ) karşı zaman (t) grafiğine, t=0 anında çizilen teğetin eğimi olarak ifade edilir ve Eşitlik 3.2 ile tanımlanır.

$$r_{ad} = \frac{\Delta q}{\Delta t} \Big|_{t \rightarrow 0} \quad (3.2)$$

Bu eşitlikte;

$r_{ad}$  : Başlangıç adsorpsiyon hızını (mg/g.dk) ifade eder.

$t$  : Zamanı (dak) ifade eder.

### 3.1.2. Tek ve İki Bileşenli Sistemlerde Adsorpsiyon ve Toplam Adsorpsiyon Verimi

Tekli bileşen adsorpsiyonunda, adsorpsiyon verimi, denge durumunda adsorplanan bileşen derişiminin başlangıç bileşen derişimine oranı olarak hesaplanır ve yüzde şeklinde eşitlik 3.3'deki gibi ifade edilir.

$$\%Ad = \frac{C_{ad,den}}{C_0} \times 100 \quad (3.3)$$

Burada;

$C_{ad,den}$  : Denge durumunda adsorplanan bileşen derişimi (mg/L)'dir.

İki bileşenli adsorpsiyonda, toplam adsorpsiyon verimi, denge durumunda adsorplanan bileşenlerin toplam derişimlerinin başlangıç bileşenlerinin toplam derişimlerine oranı olarak hesaplanır ve yüzde şeklinde eşitlik 3.4'teki gibi ifade edilir.

$$\%Ad_{top} = \frac{\sum_{i=1}^2 C_{ad,den,i}}{\sum_{i=1}^2 C_{o,i}} \quad (3.4)$$

Burada;

$C_{ad,den,i}$  : İki bileşenli karışımda denge durumunda adsorplanan her bir bileşenin derişimi (mg/L)'dir.

$C_{o,i}$  : İki bileşenli karışımda her bir bileşenin başlangıç derişimi (mg/L)'dir.

### 3.1.3. Adsorpsiyon Dengesinin Modellenmesi

Adsorpsiyon, çözültide adsorplanmadan kalan bileşen derişimi ile adsorbent yüzeyinde biriken bileşen derişimi arasında bir denge sağlanana kadar devam eder. Bu denge, matematiksel olarak adsorpsiyon izotermleriyle açıklanır. İzoterm, sabit bir sıcaklık ve basınç altında adsorbentin birim kütlesi başına adsorplanan bileşen miktarının ( $q_{den,i}$ ), adsorplanmadan kalan bileşenin denge derişimine ( $C_{den,i}$ ) karşı ilişkisini gösteren bir eğridir. Gazlar için derişim genellikle mol yüzdesi veya kısmi basınç olarak ifade edilirken, çözültülerde derişim mg/L, ppm gibi derişim birimleriyle belirtilir [63].

Belirli koşullardaki izoterm, belirli bir modele uyum sağlarken diğer koşullarda bu modele uymayabilir. Bu sebeple, genellikle tek bir genel uygulanabilir denge modeli bulunmaz. Langmuir ve Freundlich izoterm modelleri yaygın olarak kullanılan denge modelleridir, ancak farklı koşullarda farklı modellerin daha uygun olabileceği durumlar da mevcuttur.

### 3.2. Tek Bileşenli Sistemlerde Adsorpsiyon Denge Modelleri

#### Langmuir Modeli

Bu model, Irving Langmuir tarafından tasarlanan bir model olup katı bir yüzey üzerindeki adsorpsiyonu incelemek için temel bir yöntem sağlar. Langmuir modeline göre, adsorbent yüzeyinde sabit sayıda aktif adsorpsiyon bölgesi vardır ve bu bölgelerin enerji seviyeleri eşittir. Bu modele göre adsorbent yüzeyinde oluşan tek bir moleköl tabakası vardır ve adsorbe olan maddeler bu tabaka üzerine rastgele bir şekilde yerleşmiştir. Langmuir modeli genellikle denge koşullarında tek tabakalı adsorpsiyon süreçlerini açıklamak için kullanılır. Langmuir modeli eşitlik 3.5'teki şekilde tanımlanır.

$$q_{den} = \frac{Q^o b C_{den}}{1 + b C_{den}} \quad (3.5)$$

Burada;

$q_{den}$  : Denge durumunda, birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan bileşen miktarı (mg/g),



$C_{den}$  : Denge durumunda, adsorplanmadan çözültide kalan bileşen derişimi (mg/L),

$b$  : Adsorpsiyon entalpisi ile ilgili olarak, adsorplanan bileşenin adsorbente olan eğilimi ve aralarındaki bağın kuvvetini gösteren bir sabit (L/mg),

$Q^o$  : Adsorbent yüzeyinde tam bir tek tabaka oluşturabilmek için, adsorbentin her bir birim kütlesine adsorplanan bileşen miktarıdır (mg/g)'dır ve ayrıca adsorbentin en yüksek adsorpsiyon kapasitesini de ifade etmektedir.

Eşitlik 3.5'in doğrusallaştırılması sonucunda Eşitlik 3.6 elde edilir.

$$\frac{C_{den}}{q_{den}} = \frac{1}{bQ^o} + \frac{C_{den}}{Q^o} \quad (3.6)$$

$C_{den}/q_{den}$ 'e karşı  $C_{den}$  grafiğinin eğimi  $1/Q^o$ 'ı, y eksenini kesim noktası ise  $1/bQ^o$ 'ı verir.  $Q_o$  ve  $b$ 'nin büyüklüğü adsorpsiyon kapasitesinin yüksek olduğunu gösterir.  $bC_{den} \ll 1$  şeklinde, yani adsorpsiyon çok az ise, denge durumunda birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan bileşen miktarı ile çözültide adsorplanmadan kalan bileşen derişimi birbiriyle orantılıdır. Bu durumda:

$$q_{den} = Q^o b C_{den} \quad (3.7)$$

dir. Adsorpsiyon yüksek ise  $bC_{den} \gg 1$  olup, denge durumunda birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan bileşen miktarı sabit olarak kalır ve Eşitlik 3.5, Eşitlik 3.8'e dönüşür [10,64].

$$q_{den} = Q^o \quad (3.8)$$

### **Freudlich Modeli**

Freundlich modeline göre, çok tabakalı, ideal olmayan ve tersinir adsorpsiyon heterojen olmayan bir yüzeyde tek bir tabaka oluşumu ile sınırlı değildir [34]. Freundlich izotermine, denge durumunda birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan bileşen ile adsorplanmadan çözültide kalan bileşen arasında üstel bir ilişki vardır. Bu modelde adsorpsiyon dengesi Eşitlik 3.9 ile tanımlanır.

$$q_{den} = K_F C_{den}^{1/n} \quad (3.9)$$

Burada;

$K_F$  : Sıcaklığa, adsorbente ve adsorplanan bileşene göre değişen, adsorpsiyon kapasitesinin büyüklüğünü gösteren adsorpsiyon sabiti ( $L^{1/n} mg^{1-1/n}/g$ ),

$n$  : Adsorpsiyonun şiddetini gösteren adsorpsiyon derecesidir.

Eşitlik 3.9'un doğrusallaştırılmış şekli Eşitlik 3.10'daki gibi ifade edilir.

$$\ln q_{den} = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_{den} \quad (3.10)$$

$\ln q_{den}$ 'e karşı  $\ln C_{den}$  grafiğinin y eksenini kesim noktası  $\ln K_F$ 'yi verirken eğimi ise  $1/n$ 'i verir.  $K_F$  ve  $n$  değerlerinin büyük olması, adsorbentin, adsorpsiyona yatkın ve adsorplama kapasitesinin yüksek olduğunu gösterir.

Hem Langmuir hem de Freundlich adsorpsiyon modeli, seyreltik çözeltilerden adsorpsiyonu matematiksel olarak tanımlar. Freundlich modeli, heterojen yüzeylerde farklı aktif bağlanma merkezlerini içerdiği için Langmuir modelinden daha gerçekçi bir yaklaşım sunar [10,65].

### 3.3. İki Bileşenli Sistemlerde Adsorpsiyon Denge Modelleri

Çok bileşenli sistemler için oluşturulan denklemlerin iki bileşenli sistemlere adapte edilmiş formları, iki bileşenli sistemler için adsorpsiyon dengesini matematiksel olarak tanımlamak için kullanılır. Çoğu zaman, çok bileşenli sistemlerde bileşenler arasında etkileşimler mevcuttur. Bu etkileşimler, bileşenlerin birbirlerinin adsorpsiyonunu azaltması (antagonistik), artırması (sinerjistik) veya etkilememesi (non-interaktif) şeklinde gerçekleşebilir. İkili karışımlarda, sinerjistik ve antagonistik etkileşimleri içeren Langmuir modelleri en yaygın olarak kullanılan modellerdir.

#### ***-Bileşenlerin Birbirlerinin Adsorpsiyonunu Arttırdığı (Sinerjistik) Sistemler için Türetilmiş Langmuir Modeli***

Tek bileşenli Langmuir adsorpsiyon modeli, çok bileşenli sinerjistik sistemler için Eşitlik 3.11'deki denkleme dönüştürülerek kullanılmaktadır.

$$q_{den,i} = \frac{Q^0 b_i C_{den,i}}{1 + b_i C_{den,i}} [1 + F_i(C)]_i \quad (3.11)$$

Burada; “i” adsorplananı için tek bileşenli Langmuir izoterminden çok bileşenli adsorpsiyon izotermine olan değişim  $F_i(C)$  terimi ile ifade edilir.  $(1+F_i(C))_i$  terimi ise Eşitlik 3.12’deki gibi tanımlanabilir.

$$F_i(C) = \frac{\sum_{j=1}^N K_{ij} C_{ij}}{\sum_{j=1}^N K_{ij} C_{ij}} \quad (3.12)$$

Burada;

$C_{ij}$  : adsorplanan j’nin başlangıç derişimi (mg/L).

$K_{ij}$  : adsorplanan j için bir modifikasyon katsayısıdır.

Modelin iki bileşenli sistem için türetilen eşitlikleri Eşitlik 3.13 ve 3.14 ile ifade edilmektedir.

$$q_{den,1} = \frac{Q_1^0 b_1 C_{den,1}}{1 + b_1 C_{den,1}} \left[ 1 + \frac{K_2 C_{02}}{K_1 C_{01} + K_2 C_{02}} \right] \quad (3.13)$$

$$q_{den,2} = \frac{Q_2^0 b_2 C_{den,2}}{1 + b_2 C_{den,2}} \left[ 1 + \frac{K_1 C_{01}}{K_1 C_{01} + K_2 C_{02}} \right] \quad (3.14)$$

Burada;

$q_{den,1}$  : Denge durumunda, birinci bileşen için birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan bileşen miktarı (mg/g)

$C_{den,1}$  : Denge durumunda, birinci bileşen için adsorplanmadan çözeltide kalan bileşen derişimi (mg/L)

$q_{den,2}$  : Denge durumunda, ikinci bileşen için birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan bileşen miktarı (mg/g)

$C_{den,2}$  : Denge durumunda ikinci bileşen için adsorplanmadan çözeltide kalan bileşen derişimi (mg/L)

$Q_1^0$  : Birinci bileşen için adsorbentin birim kütlesi başına adsorplanan en yüksek bileşen miktarı (mg/g)

$Q_2^0$  : İkinci bileşen için adsorbentin birim kütlesi başına adsorplanan en yüksek bileşen miktarı (mg/g)

$b_1$  : Birinci bileşen için Langmuir adsorpsiyon sabiti (L/mg)

$b_2$  : İkinci bileşen için Langmuir adsorpsiyon sabitidir (L/mg).

$Q_i^0$  ve  $b_i$  tek bileşenli sistem adsorpsiyon izotermelerinin çözümlenmesiyle,  $K_{ij}$  değerleri iki bileşenli sistem adsorpsiyon verilerinin çözümlenmesiyle elde edilir.

### ***-Bileşenlerin Birbirlerinin Adsorpsiyonunu Azalttığı (Antagonistik) Sistemler için Türetilmiş Langmuir Modeli***

Tek bileşenli Langmuir adsorpsiyon modeli, çok bileşenli antagonistik sistemler için Eşitlik 3.15'teki denkleme dönüştürülerek kullanılmaktadır.

$$q_{den,i} = \frac{Q_i^0 b_i \left(\frac{C_{den,i}}{\eta_i}\right)}{1 + \sum_{j=1}^N b_j \left(\frac{C_{den,j}}{\eta_j}\right)} \quad (3.15)$$

Modelin iki bileşenli sistem için türetilen eşitlikleri Eşitlik 3.16 ve 3.17 ile ifade edilmektedir.

$$q_{den,1} = \frac{Q_1^0 b_1 \left(\frac{C_{den,1}}{\eta_1}\right)}{1 + b_1 \left(\frac{C_{den,1}}{\eta_1}\right) + b_2 \left(\frac{C_{den,2}}{\eta_2}\right)} \quad (3.16)$$

$$q_{den,2} = \frac{Q_2^0 b_2 \left(\frac{C_{den,2}}{\eta_2}\right)}{1 + b_1 \left(\frac{C_{den,1}}{\eta_1}\right) + b_2 \left(\frac{C_{den,2}}{\eta_2}\right)} \quad (3.16)$$

Burada;  $\eta_1$  ve  $\eta_2$  birinci ve ikinci bileşenlere ait Langmuir düzeltme sabitleridir.

## 4. DENEY SİSTEMİ VE YÖNTEMLERİ

### 4.1. Adsorbentin Deneysel Çalışmalar için Hazırlanması

Bu çalışmada adsorbent olarak kullanılan şeker pancarı küspesi Ankara Şeker Fabrikasından temin edilmiş, saf su ile birkaç defa yıkanmış, preslenerek fazla suyu alınmış ve 85°C'deki etüvde sabit tartıma gelinceye kadar kurutulmuştur. Kurutulmuş küspe değirmende öğütülmüş ve elek analizi yapılarak boyutlandırılmıştır. Farklı boyut aralıklarında elde edilen şeker pancarı küspesi nem almayacak şekilde ağzı kapaklı kaplara konularak deneyler için muhafaza edilmiştir.

### 4.2. Adsorpsiyon Çözeltilerinin Hazırlanması

#### 4.2.1. Krom(VI) Çözeltilerinin Hazırlanması

Stok krom(VI) çözeltisi, analitik saflıktaki  $K_2Cr_2O_7$ 'dan 2,829 g tartılarak 1g/L (1000 ppm) derişiminde olacak şekilde saf suyla seyreltilerek hazırlanmış ve saklanmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan krom(VI) çözeltileri istenilen derişimlerde stok çözeltiden seyreltilerek hazırlanmıştır.

#### 4.2.2. Nikel(II) Çözeltilerinin Hazırlanması

Stok nikel(II) çözeltisi, analitik saflıktaki  $NiSO_4 \cdot 6H_2O$ 'dan 4,479 g tartılarak 1g/L (1000 ppm) derişiminde olacak şekilde saf su ile seyreltilerek hazırlanmış ve saklanmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan nikel(II) çözeltileri istenilen derişimlerde stok çözeltiden seyreltilerek hazırlanmıştır.

#### 4.2.3. Krom(VI) ve Nikel(II) İyonlarını Birlikte İçeren Karışım Çözeltilerinin Hazırlanması

Krom(VI) ve nikel(II) iyonlarını birlikte içeren ikili sistem adsorpsiyon çalışmalarında her iki bileşen için istenilen derişimlerini içeren karışımlar, her bir bileşene ait stok çözeltilisinden gerekli seyreltmeler yapılarak elde edilmiştir.

### 4.3. Deney Düzenegi

Adsorpsiyon çalışmaları, 100 ml çalışma hacmine sahip 250 ml'lik erlenler kullanılarak 25°C sabit sıcaklıkta ve 120 rpm sabit karıştırma hızında çalışan inkübatörde (Medline SI-600 R) kesikli olarak gerçekleştirilmiştir. Erlenlerin

ağızları, adsorpsiyon çözeltilerinin buharlaşmasını engellemek amacıyla parafilm kullanılarak sıkı bir şekilde kapatılmış ve inkübatöre yerleştirilmiştir.

#### **4.4. Adsorpsiyon Çalışmaları**

Tek ve iki bileşenli adsorpsiyon çalışmalarında belli derişimlerde hazırlanmış ve pH'ı ayarlanmış tekli ve ikili metal iyon çözeltilerine şeker pancarı küspesi adsorbenti 1,0 g/L derişiminde eklenmiştir. Adsorbentin çözeltiliye eklenme zamanı  $t=0$  olarak kabul edilmiştir. Adsorpsiyon başladıktan sonra belirli zaman aralıklarında adsorpsiyon çözeltilerinden alınan örnekler santrifüjlenmiş ve sıvı kısımdaki çözeltide adsorplanmadan kalan krom(VI) veya nikel(II) iyonları derişimleri tayin edilmiştir.

Tek bileşenli adsorpsiyon çalışmalarında öncelikle başlangıç pH'ının adsorpsiyon hız ve kapasitesine etkileri araştırılmış ve her bir metal iyonu için en uygun çalışma pH'ı belirlenmiştir. Her bir metal iyonu için belirlenen en uygun pH değerinde başlangıç metal iyonu derişiminin adsorpsiyon hız ve kapasitesine etkileri araştırılmıştır.

İki bileşenli adsorpsiyon çalışmaları eşanlı ve ardışık olarak gerçekleştirilmiştir.

Eşanlı adsorpsiyonda karışımdaki metal iyonlarının adsorbent yüzeyine eş zamanlı bağlanmaları, her bir metal iyonu için belirlenen en uygun pH değerinde birinci metal iyonunun sabit başlangıç derişiminde diğer metal iyonunun başlangıç derişimi değiştirilerek incelenmiştir. Her bir pH değerinde ve birinci ve ikinci metal iyonlarının çalışılan derişimlerinde, adsorbentin metal iyon seçiciliği ve bileşenlerin birbirlerinin adsorpsiyon hız ve kapasitelerini nasıl etkiledikleri araştırılmıştır.

Ardışık adsorpsiyonda ise her bir metal iyonu için belirlenen en uygun pH değerinde, karışımdaki birinci metal iyonunun aynı başlangıç derişiminde tekli adsorpsiyonu dengeye ulaştığında, ikinci metal iyonunun farklı başlangıç iyon derişimleri çözeltiliye eklenerek ve bu durumda adsorbentin yine metal iyon seçiciliği ve karışım içindeki bileşenlerin birbirlerinin adsorpsiyon hız ve kapasitelerini nasıl etkiledikleri incelenmiştir.

Ayrıca her bir adsorpsiyon sistemi için adsorpsiyon dengesi matematiksel olarak tanımlanmış ve model sabitleri bulunmuştur.

#### **4.5. Krom(VI) ve Nikel(II) Analizleri**

Tekli ve ikili krom(VI) ve nikel(II) iyon karışımlarının adsorpsiyon çalışmalarında; belirlenen zaman aralıklarında alınan örneklerden, adsorpsiyon ortamında adsorplanmadan kalan krom(VI) iyon derişimi, krom(VI) iyonlarının difenil karbazit ile verdiği mor renkli kompleksin 542 nm'de absorpsiyonunun okunmasıyla spektrofotometrik olarak tayin edilmiştir [EK 1]. Adsorpsiyon ortamında adsorplanmadan kalan nikel(II) iyon derişimi atomik absorpsiyon spektrofotometresi ile 232 nm'de absorpsiyon okunarak belirlenmiştir.

## 5. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu tez kapsamında şeker endüstrisi yan ürünü şeker pancarı küspesi kurutulup adsorbent olarak kullanılarak, özellikle demir-çelik endüstrisi, kaplama sanayii atıksuları gibi sularda istenmeyen derişimlerde bulunan krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının tekli adsorpsiyonu ve ikili karışımlarının eşanlı ve ardışık adsorpsiyonu kesikli sistemde incelenmiştir.

Tez çalışmasının ilk kısmında her bir metal iyonunun tekli adsorpsiyonu, başlangıç pH'ının, adsorbent tanecik boyut aralığının ve başlangıç metal iyon derişiminin fonksiyonu olarak incelenmiş ve belirlenen tanecik boyut aralığında her bir metal iyonu için en uygun çalışma pH'ı saptanmıştır.

Çalışmaların daha sonraki aşamasında krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının eşanlı ve ardışık adsorpsiyonları gerçekleştirilmiştir. Eşanlı adsorpsiyonda her bir metal iyonu için belirlenen en uygun pH değerinde karışımdaki birinci metal iyonunun sabit başlangıç iyon derişiminde diğer metal iyonunun başlangıç derişimi değiştirilerek adsorbentin metal iyon seçiciliği ve karışımdaki bileşenlerin birbirlerinin adsorpsiyon hız ve kapasitelerini nasıl etkiledikleri araştırılmıştır.

Ardışık adsorpsiyonda ise her bir metal iyonu için belirlenen en uygun pH değerinde, karışımdaki birinci metal iyonunun aynı başlangıç iyon derişiminde tekli adsorpsiyonu dengeye ulaştığında, ikinci metal iyonunun farklı başlangıç iyon derişimleri çözeltiye eklenerek bu durumda adsorbentin yine metal iyon seçiciliği ve karışım içindeki bileşenlerin birbirlerinin adsorpsiyon hız ve kapasitelerini nasıl etkiledikleri incelenmiştir.

Çalışmaların son kısmında ise her bir tekli ve ikili adsorpsiyon sistemi için adsorpsiyon dengesi matematiksel olarak tanımlanmış ve model sabitleri bulunmuştur.

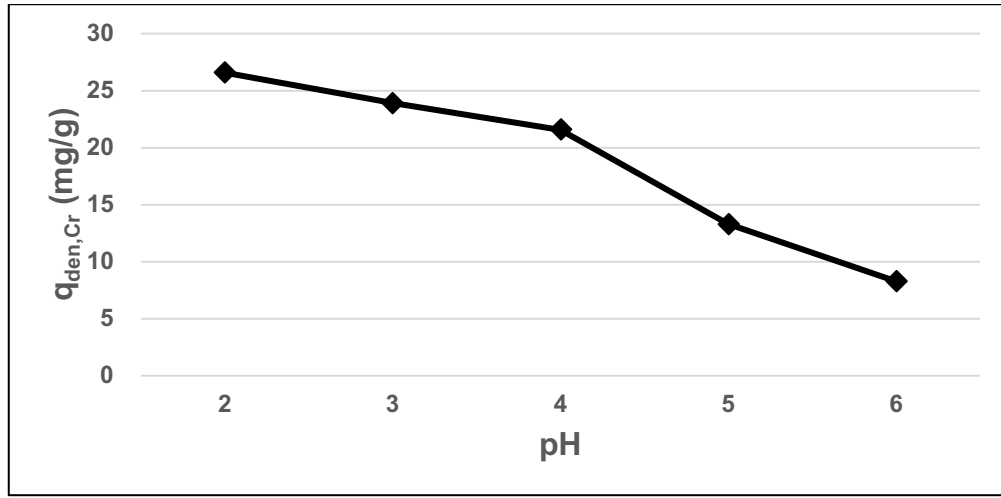
### 5.1.1. Tek Bileşenli Sistem Çalışmaları

## 5.2. Krom(VI) İyonlarının Adsorpsiyonu

### 5.2.1.1. Başlangıç pH'ının etkisi



Çözeltinin başlangıç pH'ı adsorpsiyon dengesini ve verimini etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine tekli krom(VI) iyonlarının adsorpsiyonunda, başlangıç pH'nın krom(VI) iyonlarının dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarına etkisi, 100 mg/L başlangıç krom(VI) derişiminde, 500-710 µm tanecik boyut aralığında ve pH 2 ila 6 arasında değiştirilerek incelenmiştir. Şekil 5.1'den pH 2'de adsorbentin en yüksek krom(VI) adsorpsiyon kapasitesine ulaştığı gözlenmektedir. Krom(VI) iyonlarının adsorpsiyonunda en uygun çalışma pH'ı 2 olarak seçilmiştir.



**Şekil 5.1.** Kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine tekli krom(VI) adsorpsiyonunda başlangıç pH'ının dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarına etkisi ( $C_o=100$  mg/L,  $T=25^\circ\text{C}$ ,  $X=1,0$  g/L, K.H.= 120 rpm).

#### 5.2.1.2. Adsorbent Tanecik Boyut Aralığının Etkisi

Kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine krom(VI) adsorpsiyonunda 100 mg/L başlangıç krom(VI) iyon derişiminde ve pH 2'de, tanecik boyutu aralığının adsorpsiyon hız ve verimine etkisi farklı tanecik boyut aralıklarında incelenmiştir. Elde edilen adsorpsiyon hızları, dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarları ve % giderim değerleri Çizelge 5.1'de sunulmuştur. Çizelgeden 710-850 µm tanecik boyut aralığında en yüksek hız ve kapasite değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Bundan sonraki tüm adsorpsiyon çalışmalarında bu boyut aralığındaki adsorbent kullanılmıştır.

**Çizelge 5.1.** Kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine krom(VI) adsorpsiyonunda farklı tanecik boyut aralıklarında elde edilen adsorpsiyon hızları, dengede adsorplanan krom(VI) miktarları ve % giderim değerleri (pH=2,  $C_o=100$  mg/L,  $T=25^\circ\text{C}$ ,  $X=1,0$  g/L, K.H.=120 rpm)

Tanecik Boyut Aralığı ( $\mu\text{m}$ )	$r_{ad}$ (mg/g.dak)	$q_{den}$ (mg/g)	% Giderim
500-710	0,146	28,6	28,8
710-850	0,198	35,0	35,6
850-1000	0,156	30,5	30,8
1000-1400	0,177	27,8	28,1
1400-2000	0,125	11,9	12,0

### 5.2.1.3. Başlangıç Krom(VI) İyon Derişiminin Etkisi

Kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine, krom(VI) adsorpsiyonunda başlangıç metal iyon derişiminin etkisi, pH2'de 25-250 mg/L krom(VI) iyon derişim aralığında incelenmiştir. Farklı başlangıç metal iyon derişimlerinde elde edilen adsorpsiyon hızları, dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarları ve % giderim değerleri Çizelge 5.2'de sunulmuştur. Çizelgeden başlangıç krom(VI) iyon derişimi arttıkça, adsorpsiyon hız ve kapasitesinin arttığı, % giderim değerlerinin ise azaldığı görülmektedir. En yüksek krom(VI) iyon giderimi 250,8 mg/L başlangıç metal iyon derişiminde 64,8 mg/g olarak bulunmuştur.

**Çizelge 5.2.** Kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine krom(VI) adsorpsiyonunda farklı başlangıç krom(VI) derişimlerinde elde edilen adsorpsiyon hızları, birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) miktarları ve % giderim değerleri (pH=2,  $T=25^\circ\text{C}$ ,  $X=1,0$  g/L, K.H.=120 rpm)

$C_o$ (mg/L)	$r_{ad}$ (mg/g.dak)	$q_{den}$ (mg/g)	% Giderim
25,2	0,057	15,0	59,6
49,8	0,151	29,0	58,2
99,2	0,287	39,2	39,5

150,0	0,427	53,4	35,6
199,7	0,594	62,3	31,2
250,8	0,745	64,8	25,9

#### 5.2.1.4. Adsorpsiyon Dengesinin Modellenmesi ve Adsorpsiyon Denge Sabitlerinin Bulunması

Kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine krom(VI) adsorpsiyonunda, dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarıyla ( $q_{den}$ ) çözültide adsorplanmadan kalan krom(VI) iyon derişimi ( $C_{den}$ ) arasındaki dengeyi matematiksel olarak tanımlamak için Langmuir ve Freundlich denge modelleri kullanılmıştır. Adsorpsiyon sisteminin bu modellerden hangisine en iyi uyduğunu belirlemek için Microsoft Office Excel 2010 programının “çözücü” eklentili non-linear regresion yöntemi kullanılarak bulunan model sabitleri Çizelge 5.3'te sunulmuştur.

**Çizelge 5.3.** Kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine krom(VI) adsorpsiyonunda Langmuir ve Freundlich adsorpsiyon modellerinden bulunan adsorpsiyon sabitleri (pH=2, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm)

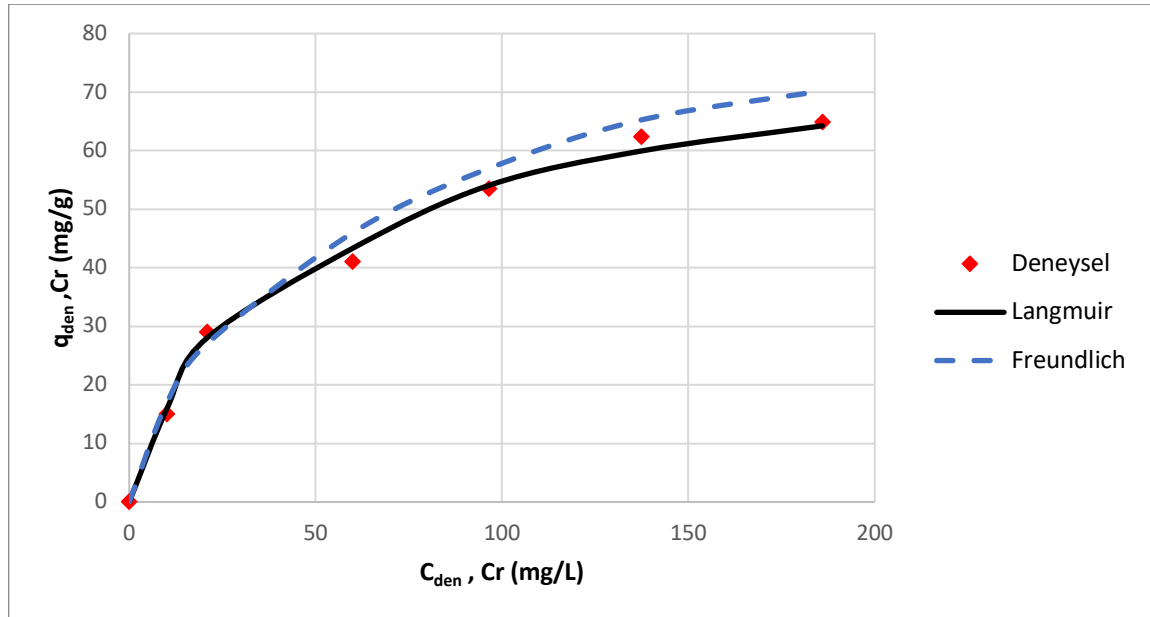
Langmuir Modeli			Freundlich Modeli		
$Q^o$ (mg/g)	$b$ (L/mg)	$R^2$	$K_F$ (mg/g(L/mg) <sup>1/n</sup> )	$n$	$R^2$
80,6	0,021	0,998	5,07	1,98	0,969

Kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine krom(VI) iyonlarının adsorpsiyonunda elde edilen deneysel  $q_{den}$  değerleri, Langmuir ve Freundlich model sabitleri kullanılarak hesaplanan teorik  $q_{den}$  değerleri ile % hata ve % ortalama hata değerleriyle birlikte Çizelge 5.4'te karşılaştırılmıştır. Çizelgeden, krom(VI) adsorpsiyonunun Langmuir modeline daha iyi uyduğu görülmektedir.

**Çizelge 5.4.** Kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine krom(VI) iyonlarının adsorpsiyonunda elde edilen deneysel  $q_{den}$  değerlerinin, Langmuir ve Freundlich adsorpsiyon modellerinden hesaplanan teorik  $q_{den}$  değerleri ile % hata değerleri verilerek karşılaştırılması

$q_{den,den}$ (mg/g)	$q_{den,teo,L}$ (mg/g)	% hata	$q_{den,teo,F}$ (mg/g)	% hata
15,0	14,2	5,3	16,3	8,2
29,0	29,3	1,1	28,3	2,3
39,2	43,4	9,5	40,0	2,0
53,4	54,1	1,2	50,9	5,0
62,3	59,9	3,9	65,3	4,5
64,8	64,2	0,9	70,2	7,7
<b>Ortalama % hata</b>		<b>3,7</b>		<b>5,0</b>

Her bir model için elde edilen teorik izoterm deneyisel denge değerleri ile aynı grafik üzerinde Şekil 5.2'de karşılaştırılmıştır. Şekilden yine krom(VI) adsorpsiyonunun Langmuir modeline daha iyi uyduğu görülmektedir.

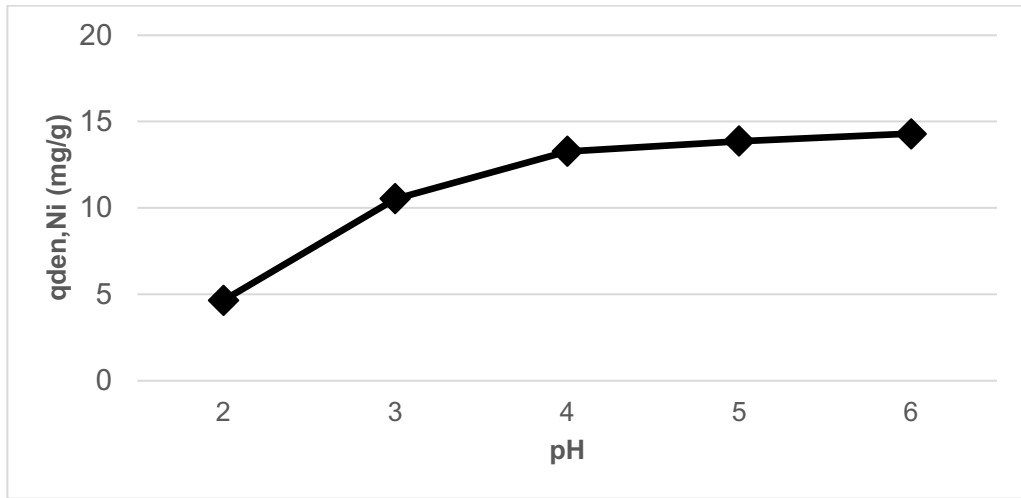


**Şekil 5.2.** Kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine krom(VI) iyonlarının adsorpsiyonunda elde edilen deneysel denge verilerinin Langmuir ve Freundlich adsorpsiyon modellerinden bulunan teorik adsorpsiyon izotermiyle karşılaştırılması (pH=2, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm)

### 5.3. Nikel(II) İyonlarının Adsorpsiyonu

### 5.3.1.1. Başlangıç pH'ının Etkisi

Kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine tekli nikel(II) iyonlarının adsorpsiyonunda, başlangıç pH'nın nikel(II) iyonlarının dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarına etkisi, 100 mg/L başlangıç nikel(II) derişiminde, 710-850 µm tanecik boyut aralığında ve pH 2 ila 6 arasında değiştirilerek incelenmiştir. Şekil 5.3'ten pH 6'da adsorbentin en yüksek nikel(II) adsorpsiyon kapasitesine ulaştığı gözlenmektedir. Nikel(II) iyonlarının adsorpsiyonunda en uygun çalışma pH'ı 6 olarak seçilmiştir.



**Şekil 5.3.** Kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine tekli nikel(II) adsorpsiyonunda başlangıç pH'ının dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarına etkisi ( $C_0=100$  mg/L,  $T=25^\circ\text{C}$ ,  $X=1,0$  g/L, K.H.=120 rpm).

### 5.3.1.2. Başlangıç Nikel(II) İyon Derişiminin Etkisi

Kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine, nikel(II) adsorpsiyonunda başlangıç metal iyon derişiminin etkisi, pH 6'da 25-250 mg/L nikel(II) iyon derişim aralığında incelenmiştir. Farklı başlangıç metal iyon derişimlerinde elde edilen adsorpsiyon hızları, dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarları ve % giderim değerleri Çizelge 5.5'te sunulmuştur. Çizelgeden başlangıç nikel(II) iyon derişimi arttıkça, adsorpsiyon hız ve kapasitesinin arttığı, % giderim değerlerinin ise azaldığı görülmektedir. En yüksek nikel(II) iyon giderimi 255,5 mg/L başlangıç metal iyon derişiminde 18,6 mg/g olarak bulunmuştur.

**Çizelge 5.5.** Kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine nikel(II) adsorpsiyonunda farklı başlangıç nikel(II) derişimlerinde elde edilen adsorpsiyon hızları, birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) miktarları ve % giderim değerleri (pH=6, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm)

$C_o$ (mg/L)	$r_{ad}$ (mg/g.dak)	$q_{den}$ (mg/g)	% Giderim
27,5	0,284	12,6	45,9
53,0	0,352	14,3	26,9
104,3	0,393	15,2	14,6
154,0	0,399	16,5	10,7
207,3	0,411	18,0	8,7
255,5	0,421	18,6	7,3

### 5.3.1.3. Adsorpsiyon Dengesinin Modellenmesi ve Adsorpsiyon Denge Sabitlerinin Bulunması

Kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine nikel(II) adsorpsiyonunda, dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarıyla ( $q_{den}$ ) çözültide adsorplanmadan kalan nikel(II) iyon derişimi ( $C_{den}$ ) arasındaki dengeyi matematiksel olarak tanımlamak için Langmuir ve Freundlich denge modelleri kullanılmıştır. Adsorpsiyon sisteminin bu modellerden hangisine en iyi uyduğunu belirlemek için Microsoft Office Excel 2010 programının “çözücü” eklentili non-linear regresion yöntemi kullanılarak bulunan model sabitleri Çizelge 5.6'da sunulmuştur.

**Çizelge 5.6.** Kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine nikel(II) adsorpsiyonunda Langmuir ve Freundlich adsorpsiyon modellerinden bulunan adsorpsiyon sabitleri (pH=6, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm)

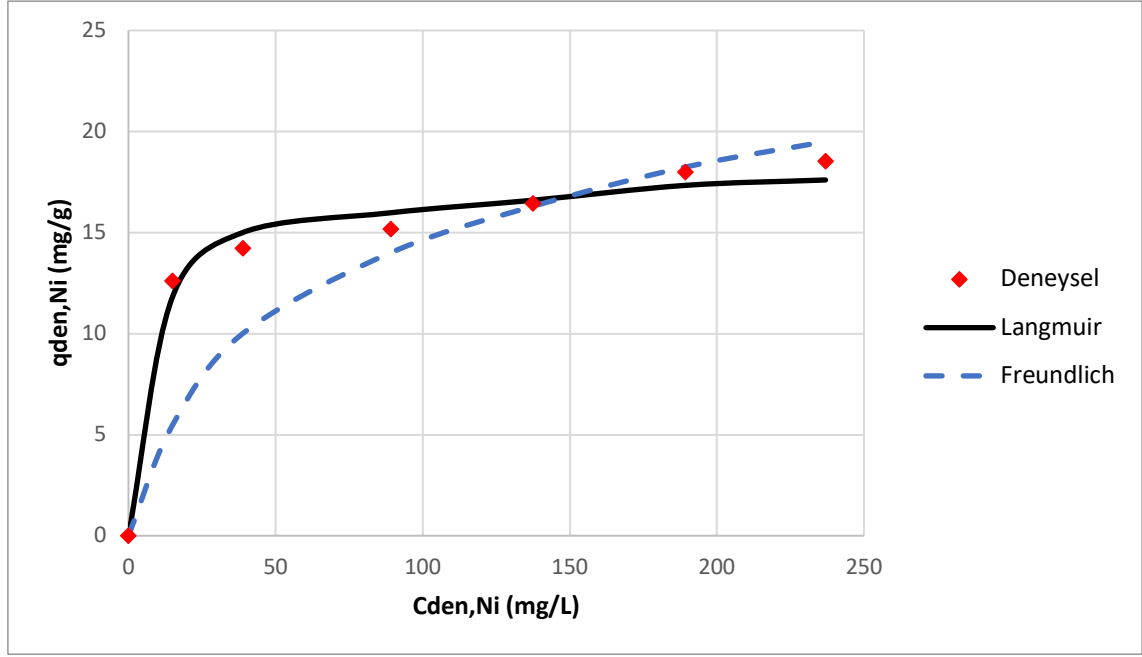
Langmuir Modeli			Freundlich Modeli		
$Q^o$ (mg/g)	$b$ (L/mg)	$R^2$	$K_F$ (mg/g(L/mg) <sup>1/n</sup> )	$n$	$R^2$
18,8	0,065	0,998	1,51	2,11	0,935

Kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine nikel(II) iyonlarının adsorpsiyonunda elde edilen deneysel  $q_{den}$  değerleri, Langmuir ve Freundlich model sabitleri kullanılarak hesaplanan teorik  $q_{den}$  değerleri ile % hata ve % ortalama hata değerleriyle birlikte Çizelge 5.7'de karşılaştırılmıştır. Çizelgeden, nikel(II) adsorpsiyonunun Langmuir modeline daha iyi uyduğu görülmektedir.

**Çizelge 5.7.** Kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine nikel(II) iyonlarının adsorpsiyonunda elde edilen deneysel  $q_{den}$  değerlerinin, Langmuir ve Freundlich adsorpsiyon modellerinden hesaplanan teorik  $q_{den}$  değerleri ile % hata değerleri verilerek karşılaştırılması

$q_{den,den}$ (mg/g)	$q_{den,teo,L}$ (mg/g)	% hata	$q_{den,teo,F}$ (mg/g)	% hata
12,6	11,8	7,1	5,5	131,6
14,3	15,0	5,0	10,0	42,5
15,2	16,0	5,0	12,8	19,1
16,5	16,9	2,3	15,7	5,1
18,0	17,3	3,9	18,2	1,3
18,6	17,6	5,4	19,5	4,9
<b>Ortalama % hata</b>		<b>4,8</b>		<b>34,1</b>

Her bir model için elde edilen teorik izoterm deneyel denge değerleri ile aynı grafik üzerinde Şekil 5.4'te karşılaştırılmıştır. Şekilden yine nikel(II) adsorpsiyonunun Langmuir modeline daha iyi uyduğu görülmektedir.



**Şekil 5.4.** Kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine nikel(II) iyonlarının adsorpsiyonunda elde edilen deneysel denge verilerinin Langmuir ve Freundlich adsorpsiyon modellerinden bulunan teorik adsorpsiyon izotermiyle karşılaştırılması (pH=6, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm)

### 5.3.2. İki Bileşenli Sistem Çalışmaları

Atıksularda tekli metal iyon kirliliğinden ziyade iki ya da daha fazla metal iyonunu bir arada içeren metal kirliliği bulunmaktadır. İki bileşenli sistemlerde adsorpsiyon, tek bileşenli sistemlere kıyasla daha karmaşıktır ve bileşenler arasında karşılıklı etkileşimler söz konusudur. Bu etkileşimler, bir bileşenin diğerinin adsorpsiyonunu artırması, azaltması veya etkilememesi şeklinde olabilir. Tez çalışmasının bu kısmında, krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının ikili karışımlarının kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine eşanlı ve ardışık adsorpsiyonu incelenmiştir.

### 5.4. Krom(VI) ve Nikel(II) İyonlarının Eşanlı Adsorpsiyon Çalışmaları

#### 5.4.1.1. Krom(VI) İyonları için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 2) ve Sabit Tutulan Her Bir Farklı Nikel(II) İyon Derişiminde, Başlangıç Krom(VI) İyon Derişiminin Krom(VI) ve Nikel(II) İyonlarının Adsorpsiyon Hız ve Kapasitesine Ortak Etkisi

Krom(VI) iyonları için en uygun çalışma pH'ı olarak saptanan pH 2'de, her bir deney seti için nikel(II) iyon derişimi 25, 50, 100, 150, 200 ve 250 mg/L değerinde



sabit tutulurken, başlangıç krom(VI) iyon derişimi 25-250 mg/L aralığında değiştirilerek, başlangıç krom(VI) iyon derişiminin krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının adsorpsiyon hız ve kapasitesine ortak etkileri araştırılmıştır. Elde edilen dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarları, krom(VI) adsorpsiyon hızı ve % giderim değerleri, birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarları ve % giderim değerleri ile birim adsorbent kütlesi başına toplam adsorplanan krom(VI)+nikel(II) iyon miktarları ve toplam % krom(VI)+nikel(II) giderim değerleri Çizelge 5.8'de detaylı olarak sunulmuştur.

Çizelgeden, sabit tutulan her bir farklı nikel(II) derişiminde krom(VI) derişiminin artmasıyla dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarının ve adsorpsiyon hızının arttığı, ancak % giderim değerlerinin azaldığı gözlenmektedir. Ayrıca karışımdaki nikel(II) iyon derişimindeki artışın krom(VI) iyon adsorpsiyon hız ve verimini dramatik olarak azalttığı da aynı çizelgeden görülmektedir. Örneğin, adsorpsiyon ortamında nikel(II) iyonları bulunmadığı durumda, 100 mg/L başlangıç krom(VI) derişimi için dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) miktarı 39,2 mg/g, adsorpsiyon hızı 0,287 mg/g.dk ve % krom(VI) iyon giderimi % 39,5 olarak saptanmışken, aynı krom(VI) iyon derişiminde, ortamda 100 mg/L nikel(II) bulunduğunda dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarı 18,5 mg/g, adsorpsiyon hızı 0,132 mg/g.dk ve % krom(VI) iyon giderim değeri % 18,4 olarak saptanmıştır. Bu durumda 100 mg/L krom(VI) için dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarı ve % krom(VI) iyon giderimi iki katından fazla azalarak sırasıyla 39,2 mg/g'dan 18,5 mg/g'a ve % 39,5'ten % 18,4'e düşmüştür.

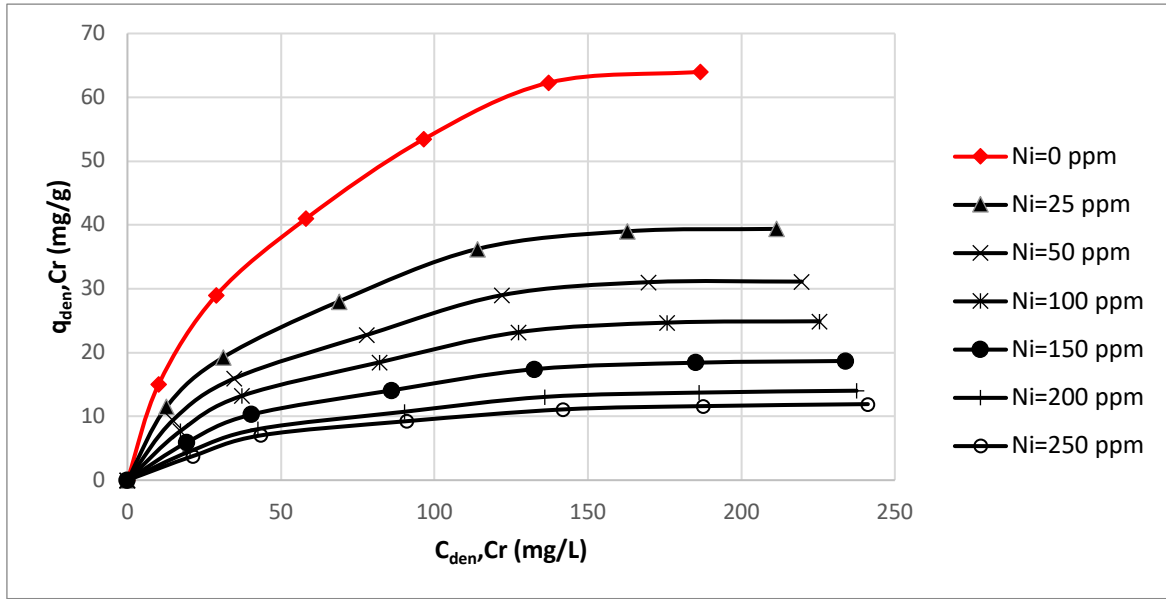
**Çizelge 5.8.** pH 2'de ve sabit tutulan her bir farklı nikel(II) iyon derişiminde başlangıç krom(VI) iyon derişiminin değiştirilmesiyle elde edilen dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarları, krom(VI) adsorpsiyon hızı ve % giderim değerleri, birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarları ve % giderim değerleri ile birim adsorbent kütlesi başına toplam adsorplanan krom(VI)+nikel(II) iyon miktarları ve toplam % krom(VI)+nikel(II) giderim değerleri (pH=2, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm)

<b>C<sub>o,Cr</sub></b> <b>(mg/L)</b>	<b>C<sub>o,Ni</sub></b> <b>(mg/L)</b>	<b>q<sub>den,cr</sub></b> <b>(mg/g)</b>	<b>r<sub>ad,Cr</sub></b> <b>(mg/g.dak)</b>	<b>%Cr(VI)</b> <b>Giderim</b>	<b>q<sub>den,Ni</sub></b> <b>(mg/g)</b>	<b>%Ni(II)</b> <b>Giderim</b>	<b>q<sub>den,top</sub></b> <b>(mg/g)</b>	<b>% Top</b> <b>Giderim</b>
25,2	0,0	15,0	0,057	59,6	0,0	0,0	15,0	59,6
49,8	0,0	29,0	0,151	58,2	0,0	0,0	29,0	58,2
99,2	0,0	39,2	0,287	39,5	0,0	0,0	39,2	39,5
150,0	0,0	53,4	0,427	35,6	0,0	0,0	53,4	35,6
199,7	0,0	62,3	0,594	31,2	0,0	0,0	62,3	31,2
250,8	0,0	64,8	0,745	25,9	0,0	0,0	64,8	25,9
24,4	24,7	11,6	0,042	47,4	2,1	8,6	13,7	27,9
50,7	25,1	19,3	0,110	38,1	2,5	10,0	21,8	28,8
103,1	24,8	28,0	0,213	27,2	3,0	12,1	31,0	24,3
150,4	24,6	36,3	0,312	24,1	3,8	15,6	40,1	22,9
201,9	25,3	39,0	0,438	19,3	4,3	17,0	43,3	19,1
250,9	25,1	39,4	0,549	15,7	5,0	19,9	44,4	16,1
24,4	49,5	9,5	0,035	38,8	3,7	7,5	13,2	17,8
50,9	50,9	16,0	0,091	31,4	4,4	8,7	20,4	20,0
100,8	50,4	22,8	0,173	22,6	5,0	9,9	27,8	18,4
151,0	50,4	29,0	0,249	19,2	6,0	11,9	35,0	17,4
200,9	50,7	31,0	0,349	15,4	7,0	13,8	38,0	15,1
250,8	49,8	31,1	0,439	12,4	8,0	16,1	39,1	13,0
25,1	100,2	7,7	0,027	30,8	5,7	5,7	13,4	10,7
50,6	100,6	13,2	0,071	26,2	6,5	6,5	19,7	13,1
100,7	100,7	18,5	0,132	18,4	7,5	7,4	25,9	12,9
150,8	100,3	23,2	0,187	15,4	8,5	8,5	31,7	12,6
200,5	100,8	24,7	0,260	12,3	10,0	10,0	34,7	11,5
250,4	100,5	24,9	0,330	9,9	12,0	11,9	36,9	10,5
25,4	150,9	5,9	0,021	23,4	7,3	4,8	13,3	7,5
50,8	150,8	10,3	0,055	20,3	8,0	5,3	18,3	9,1
100,3	150,2	14,1	0,100	14,0	9,4	6,2	23,5	9,4
150,1	149,9	17,4	0,140	11,6	10,7	7,1	28,1	9,4
203,8	151,0	18,4	0,194	9,0	13,1	8,6	31,5	8,9

252,8	150,3	18,7	0,247	7,4	15,1	10,1	33,8	8,4
25,1	200,6	4,6	0,017	18,1	8,5	4,2	13,0	5,8
50,6	200,4	8,0	0,048	15,8	9,2	4,6	17,3	6,9
101,1	201,2	10,7	0,087	10,6	10,9	5,4	21,6	7,2
149,0	201,0	13,1	0,119	8,8	12,4	6,2	25,5	7,3
200,0	200,1	13,7	0,164	6,9	15,2	7,6	28,9	7,2
251,6	200,7	14,0	0,210	5,6	17,7	8,8	31,7	7,0
25,1	250,5	3,8	0,014	15,0	8,7	3,5	12,5	4,5
50,6	250,6	7,0	0,042	13,9	9,7	3,9	16,7	5,6
100,3	252,0	9,2	0,074	9,2	11,4	4,5	20,6	5,8
153,1	250,4	11,1	0,101	7,2	13,0	5,2	24,1	6,0
199,3	250,2	11,6	0,139	5,8	15,9	6,4	27,5	6,1
253,1	251,9	11,9	0,178	4,7	18,5	7,3	30,4	6,0

#### **5.4.1.2. Krom(VI) İyonları için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 2) ve Sabit Tutulan Her Bir Farklı Nikel(II) İyon Derişiminde, Krom(VI) Adsorpsiyon İzotermilerinin Elde Edilmesi**

pH 2'de sabit tutulan her bir farklı nikel(II) iyon derişiminde elde edilen krom(VI) adsorpsiyon izotermileri Şekil 5.5'te sunulmuştur. Şekilden ortamdaki nikel(II) iyon derişiminin artmasıyla dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarının önemli ölçüde azaldığı gözlenmektedir.



**Şekil 5.5.** Krom(VI)+nikel(II) iyon karışımlarının kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine eşanlı adsorpsiyonunda, sabit tutulan her bir farklı nikel(II) iyon derişiminde elde edilen krom(VI) adsorpsiyon izotermi (pH=2, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm)

#### 5.4.1.3. Krom(VI) İyonları için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 2) ve Sabit Tutulan Her Bir Farklı Krom(VI) İyon Derişiminde, Başlangıç Nikel(II) İyon Derişiminin Nikel(II) ve Krom(VI) İyonlarının Adsorpsiyon Hız ve Kapasitesine Ortak Etkisi

Krom(VI) iyonları için en uygun çalışma pH'ı olarak saptanan pH 2'de, bu sefer her bir deney seti için krom(VI) iyon derişimi 25, 50, 100, 150, 200 ve 250 mg/L değerinde sabit tutulurken, başlangıç nikel(II) iyon derişimi 25-250 mg/L aralığında değiştirilerek, başlangıç nikel(II) iyon derişiminin nikel(II) ve krom(VI) iyonlarının adsorpsiyon hız ve kapasitesine ortak etkileri araştırılmıştır. Elde edilen dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarları, nikel(II) adsorpsiyon hızı ve % giderim değerleri, birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarları ve % giderim değerleri ile birim adsorbent kütlesi başına toplam adsorplanan nikel(II)+krom(VI) iyon miktarları ve toplam % nikel(II)+krom(VI) giderim değerleri Çizelge 5.9'da detaylı olarak sunulmuştur.

Çizelgeden, sabit tutulan her bir farklı krom(VI) derişiminde nikel(II) derişiminin artmasıyla dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarının ve adsorpsiyon hızının arttığı, ancak % giderim değerinin azaldığı

gözlenmektedir. Ayrıca karışımdaki krom(VI) iyon derişimindeki artışın nikel(II) iyon adsorpsiyon hız ve verimini dramatik olarak arttırdığı da aynı çizelgeden görülmektedir. Örneğin, adsorpsiyon ortamında krom(VI) iyonları bulunmadığı durumda, 100 mg/L başlangıç nikel(II) derişimi için dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) miktarı 4,4 mg/g, adsorpsiyon hızı 0,062 mg/g.dk ve % nikel(II) iyon giderimi % 4,3 olarak saptanmışken, aynı nikel(II) iyon derişiminde, ortamda 100 mg/L krom(VI) bulunduğunda dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarı 7,5 mg/g, adsorpsiyon hızı 0,132 mg/g.dk ve % nikel(II) iyon giderim değeri % 7,4 olarak saptanmıştır. Bu durumda 100 mg/L nikel(II) için dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarı ve % nikel(II) iyon giderimi yaklaşık iki katı kadar artarak sırasıyla 4,4 mg/g'dan 7,5 mg/g'a ve % 4,3'ten % 7,4'e çıkmıştır.

**Çizelge 5.9.** pH 2'de ve sabit tutulan her bir farklı krom(VI) iyon derişiminde başlangıç nikel(II) iyon derişiminin değıştirilmesiyle elde edilen dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarları, nikel(II) adsorpsiyon hızı ve % giderim değeri, birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarları ve % giderim değeri ile birim adsorbent kütlesi başına toplam adsorplanan nikel(II)+krom(VI) iyon miktarları ve toplam % nikel(II)+krom(VI) giderim değeri (pH=2, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm)

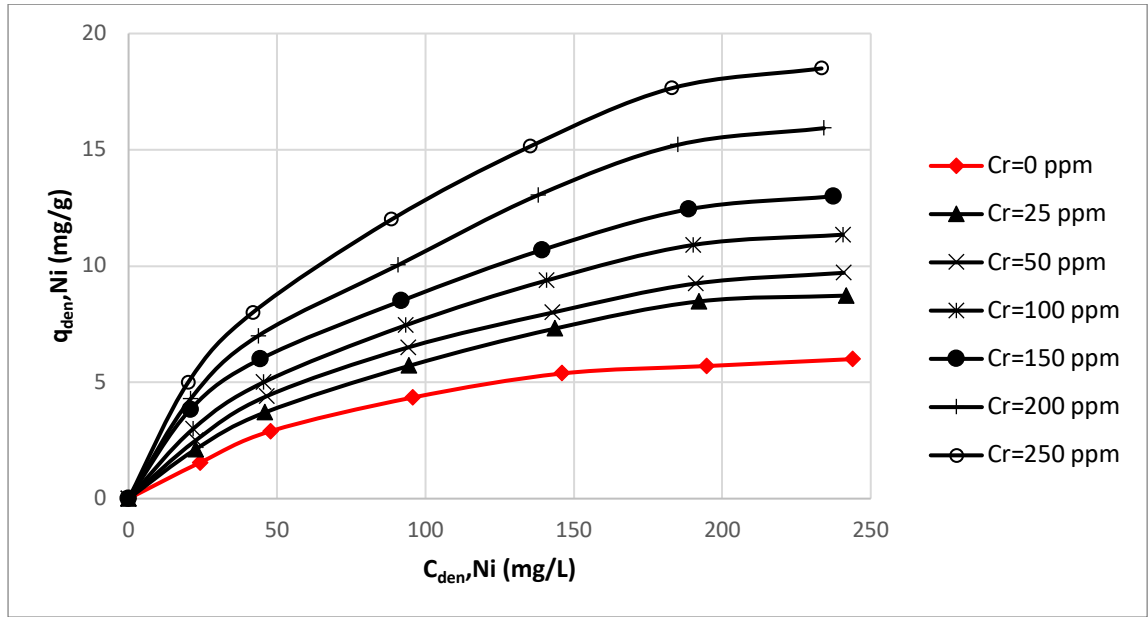
<b>C<sub>o,Ni</sub></b> <b>(mg/L)</b>	<b>C<sub>o,Cr</sub></b> <b>(mg/L)</b>	<b>q<sub>den,Ni</sub></b> <b>(mg/g)</b>	<b>r<sub>ad,Ni</sub></b> <b>(mg/g.dak)</b>	<b>%Ni(VI)</b> <b>Giderim</b>	<b>q<sub>den,Cr</sub></b> <b>(mg/g)</b>	<b>%Cr(VI)</b> <b>Giderim</b>	<b>q<sub>den,top</sub></b> <b>(mg/g)</b>	<b>% Top</b> <b>Giderim</b>
25,6	0,0	1,6	0,026	6,0	0,0	0,0	1,6	6,0
50,7	0,0	2,9	0,039	5,7	0,0	0,0	2,9	5,7
100,1	0,0	4,4	0,062	4,3	0,0	0,0	4,4	4,3
151,3	0,0	5,4	0,076	3,6	0,0	0,0	5,4	3,6
200,4	0,0	5,7	0,098	2,8	0,0	0,0	5,7	2,8
250,0	0,0	6,0	0,099	2,4	0,0	0,0	6,0	2,4
24,7	24,4	2,1	0,034	8,6	11,6	47,4	13,7	27,9
49,5	24,4	3,7	0,052	7,5	9,5	38,8	13,2	17,8
100,2	25,1	5,7	0,079	5,7	7,7	30,8	13,4	10,7
150,9	25,4	7,3	0,097	4,8	5,9	23,4	13,3	7,5
200,6	25,1	8,5	0,128	4,2	4,6	18,1	13,0	5,8

250,5	25,1	8,7	0,132	3,5	3,8	15,0	12,5	4,5
25,1	50,7	2,5	0,046	10,0	19,3	38,1	21,8	28,8
50,9	50,9	4,4	0,071	8,7	16,0	31,4	20,4	20,0
100,6	50,6	6,5	0,105	6,5	13,2	26,2	19,7	13,1
150,8	50,8	8,0	0,132	5,3	10,3	20,3	18,3	9,1
200,4	50,6	9,3	0,176	4,6	8,0	15,8	17,3	6,9
250,6	50,6	9,7	0,180	3,9	7,0	13,9	16,7	5,6
24,8	103,1	3,0	0,059	12,1	28,0	27,2	31,0	24,3
50,4	100,8	5,0	0,093	9,9	22,8	22,6	27,8	18,4
100,7	100,7	7,5	0,132	7,4	18,5	18,4	25,9	12,9
150,2	100,3	9,4	0,172	6,2	14,1	14,0	23,5	9,4
201,2	101,1	10,9	0,229	5,4	10,7	10,6	21,6	7,2
252,0	100,3	11,4	0,234	4,5	9,2	9,2	20,6	5,8
24,6	150,4	3,8	0,068	15,6	36,3	24,1	40,1	22,9
50,4	151,0	6,0	0,109	11,9	31,0	20,5	37,0	18,4
100,3	150,8	8,5	0,154	8,5	23,2	15,4	31,7	12,6
149,9	150,1	10,7	0,200	7,1	17,4	11,6	28,1	9,4
201,0	149,0	12,4	0,266	6,2	13,1	8,8	25,5	7,3
250,4	153,1	13,0	0,273	5,2	11,1	7,2	24,1	6,0
25,3	201,9	4,3	0,070	17,0	39,0	19,3	43,3	19,1
50,7	200,9	7,0	0,115	13,8	31,0	15,4	38,0	15,1
100,8	200,5	10,0	0,160	10,0	24,7	12,3	34,7	11,5
151,0	203,8	13,1	0,209	8,6	18,4	9,0	31,5	8,9
200,1	200,0	15,2	0,279	7,6	13,7	6,9	28,9	7,2
250,2	199,3	15,9	0,286	6,4	11,6	5,8	27,5	6,1
25,1	250,9	5,0	0,072	19,9	39,4	15,7	44,4	16,1
49,8	250,8	8,0	0,121	16,1	31,1	12,4	39,1	13,0
100,5	250,4	12,0	0,167	11,9	24,9	9,9	36,9	10,5
150,3	252,8	15,1	0,219	10,1	18,7	7,4	33,8	8,4
200,7	251,6	17,7	0,292	8,8	14,0	5,6	31,7	7,0

251,9	253,1	18,5	0,300	7,3	11,9	4,7	30,4	6,0
-------	-------	------	-------	-----	------	-----	------	-----

#### 5.4.1.4. Krom(VI) İyonları için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 2) ve Sabit Tutulan Her Bir Farklı Krom(VI) İyon Derişiminde, Nikel(II) Adsorpsiyon İzotermelerinin Elde Edilmesi

pH 2'de sabit tutulan her bir farklı krom(VI) iyon derişiminde elde edilen nikel(II) adsorpsiyon izotermeleri Şekil 5.6'da sunulmuştur. Şekilden ortamdaki krom(VI) iyon derişiminin artmasıyla dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarının önemli ölçüde arttığı gözlenmektedir.



**Şekil 5.6.** Nikel(II)+krom(VI) iyon karışımlarının kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine eşanlı adsorpsiyonunda, sabit tutulan her bir farklı krom(VI) iyon derişiminde elde edilen nikel(II) adsorpsiyon izotermeleri (pH=2, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm)

#### 5.4.1.5. Krom(VI) İyonları için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 2), Krom(VI)+Nikel(II) İyonlarının Eşanlı Adsorpsiyonunun Denge Modellemesi ve Denge Model Sabitlerinin Bulunması

Krom(VI) iyonları için saptanan en uygun çalışma pH'ı 2'de kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine krom(VI) ve nikel(II) iyon karışımlarının eşanlı adsorpsiyonunda, krom(VI) iyonlarının karışımdaki nikel(II) iyonlarının

adsorpsiyonunu arttırdığı (sinerjistik etki), nikel(II) iyonlarının ise krom(VI) iyon adsorpsiyonunu azalttığı (antagonistik etki) gözlenmiştir. Bu bağlamda, krom(VI) iyonları için antagonistik etkileşime göre türetilen Langmuir Modeli (Eşitlik 3.16) ve nikel(II) iyonları için sinerjistik etkileşime göre türetilen Langmuir Modeli (Eşitlik 3.13) kullanılarak ikili karışımın denge modellemesi yapılmış ve denge model sabitleri nonlineer regresyon yöntemiyle belirlenmiştir. Bulunan denge model sabitleri ve % ortalama hata değerleri Çizelge 5.10'da sunulmuştur. Çizelgede verilen % ortalama hata değerlerine bakıldığında sinerjistik ve antagonistik etkileşimler için türetilen Langmuir modellerinin krom(VI)+nikel(II) iyon karışımlarının adsorpsiyon dengesini oldukça iyi tanımladığı söylenebilir.

**Çizelge 5.10.** Krom(VI) iyonları için saptanan en uygun çalışma pH'ı 2'de kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının ikili karışımlarının eşanlı adsorpsiyonunda kullanılan antagonistik ve sinerjistik Langmuir modellerinden elde edilen denge model sabitleri ve % ortalama hata değerleri (pH=2, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm)

<b>Krom(VI) varlığında nikel(II) iyonlarının adsorpsiyonunda kullanılan sinerjistik Langmuir Modeli</b>		<b>Nikel(II) varlığında krom(VI) iyonlarının adsorpsiyonunda kullanılan antagonistik Langmuir Modeli</b>	
Nikel(II)	Krom(VI)	Krom(VI)	Nikel(II)
K <sub>1</sub> : 0,955	K <sub>2</sub> : 0,001	η <sub>1</sub> :1,022	η <sub>2</sub> :0,747
%Ort. Hata: 14,5		%Ort. Hata: 16,1	

#### **5.4.1.6. Nikel(II) İyonları için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 6) ve Sabit Tutulan Her Bir Farklı Nikel(II) İyon Derişiminde, Başlangıç Krom(VI) İyon Derişiminin Krom(VI) ve Nikel(II) İyonlarının Adsorpsiyon Hız ve Kapasitesine Ortak Etkisi**

Nikel(II) iyonları için en uygun çalışma pH'ı olarak saptanan pH 6'da, her bir deney seti için nikel(II) iyon derişimi 25, 50, 100, 150, 200 ve 250 mg/L değerinde sabit tutulurken, başlangıç krom(VI) iyon derişimi 25-250 mg/L aralığında değiştirilerek, başlangıç krom(VI) iyon derişiminin krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının adsorpsiyon



hız ve kapasitesine ortak etkileri araştırılmıştır. Elde edilen dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarları, krom(VI) adsorpsiyon hızı ve % giderim değerleri, birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarları ve % giderim değerleri ile birim adsorbent kütlesi başına toplam adsorplanan krom(VI)+nikel(II) iyon miktarları ve toplam % krom(VI)+nikel(II) giderim değerleri Çizelge 5.11'de detaylı olarak sunulmuştur.

Çizelgeden, sabit tutulan her bir farklı nikel(II) derişiminde krom(VI) derişiminin artmasıyla dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarının ve adsorpsiyon hızının arttığı, ancak % giderim değerlerinin azaldığı gözlenmektedir. Ayrıca karışımdaki nikel(II) iyon derişimindeki artışın krom(VI) iyon adsorpsiyon hız ve verimini belirgin olarak azalttığı da aynı çizelgeden görülmektedir. Örneğin, adsorpsiyon ortamında nikel(II) iyonları bulunmadığı durumda, 100 mg/L başlangıç krom(VI) derişimi için dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) miktarı 9,4 mg/g, adsorpsiyon hızı 0,061 mg/g.dk ve % krom(VI) iyon giderimi % 9,4 olarak saptanmışken, aynı krom(VI) iyon derişiminde, ortamda 100 mg/L nikel(II) bulunduğunda dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarı 7,6 mg/g, adsorpsiyon hızı 0,049 mg/g.dk ve % krom(VI) iyon giderim değeri % 7,6 olarak saptanmıştır. Bu durumda 100 mg/L krom(VI) için dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarı ve % krom(VI) iyon giderimi azalarak sırasıyla 9,4 mg/g'dan 7,6 mg/g'a ve % 9,4'ten % 7,6'ya düşmüştür.

**Çizelge 5.11.** pH 6'da ve sabit tutulan her bir farklı nikel(II) iyon derişiminde başlangıç krom(VI) iyon derişiminin değiştirilmesiyle elde edilen dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarları, krom(VI) adsorpsiyon hızı ve % giderim değerleri, birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarları ve % giderim değerleri ile birim adsorbent kütlesi başına toplam adsorplanan krom(VI)+nikel(II) iyon miktarları ve toplam % krom(VI)+nikel(II) giderim değerleri (pH=6, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm)

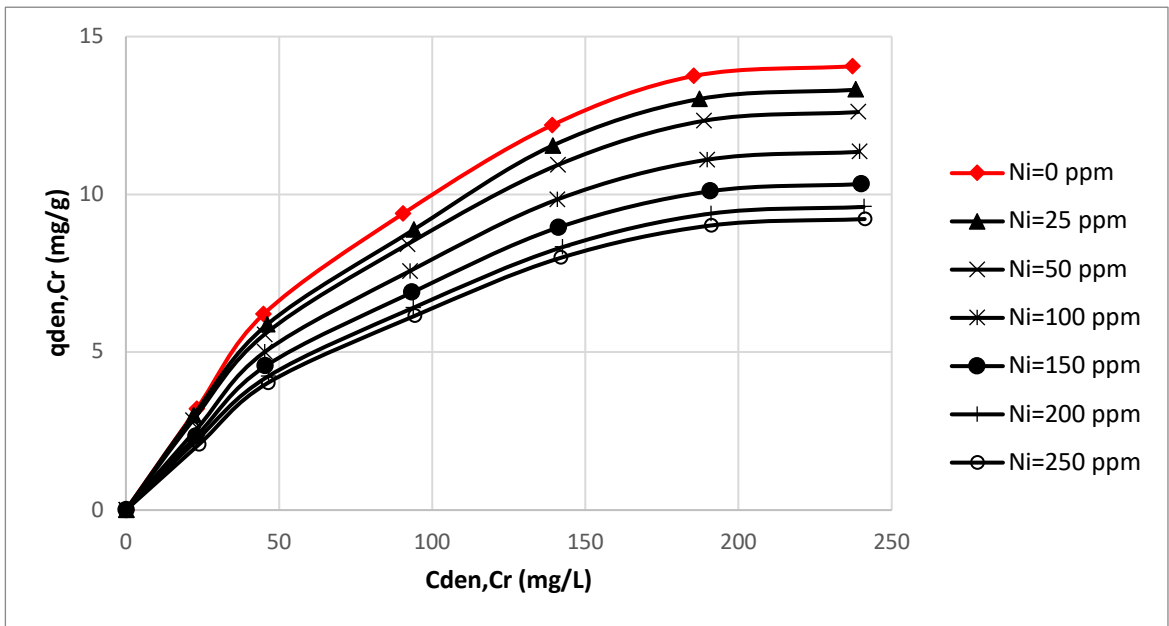
<b>C<sub>o,Cr</sub></b> <b>(mg/L)</b>	<b>C<sub>o,Ni</sub></b> <b>(mg/L)</b>	<b>q<sub>den,cr</sub></b> <b>(mg/g)</b>	<b>r<sub>ad,Cr</sub></b> <b>(mg/g.dak)</b>	<b>%Cr(VI)</b> <b>Giderim</b>	<b>q<sub>den,Ni</sub></b> <b>(mg/g)</b>	<b>%Ni(II)</b> <b>Giderim</b>	<b>q<sub>den,top</sub></b> <b>(mg/g)</b>	<b>% Top</b> <b>Giderim</b>
26,3	0,0	3,2	0,021	12,2	0,0	0,0	3,2	12,2
51,1	0,0	6,2	0,035	12,1	0,0	0,0	6,2	12,1

99,7	0,0	9,4	0,061	9,4	0,0	0,0	9,4	9,4
151,3	0,0	12,2	0,104	8,1	0,0	0,0	12,2	8,1
199,1	0,0	13,8	0,135	6,9	0,0	0,0	13,8	6,9
251,3	0,0	14,1	0,176	5,6	0,0	0,0	14,1	5,6
25,0	25,2	3,0	0,019	12,0	14,2	56,6	17,2	34,4
51,9	25,7	5,9	0,033	11,3	15,1	58,9	21,0	27,1
102,8	25,7	8,9	0,057	8,6	15,7	60,8	24,5	19,1
150,8	25,5	11,5	0,098	7,7	16,0	62,7	27,5	15,6
200,1	25,2	13,0	0,127	6,5	16,8	66,6	29,8	13,2
251,6	25,1	13,3	0,165	5,3	17,4	69,2	30,7	11,1
24,7	49,2	2,8	0,018	11,5	21,0	42,7	23,9	32,3
50,8	50,2	5,6	0,031	11,0	21,7	43,3	27,3	27,0
100,2	50,4	8,4	0,053	8,4	22,7	45,0	31,1	20,6
151,9	50,0	10,9	0,092	7,2	23,3	46,7	34,3	17,0
200,9	50,1	12,3	0,119	6,1	24,0	47,9	36,3	14,5
251,6	50,9	12,6	0,155	5,0	24,8	48,8	37,4	12,4
25,9	100,9	2,6	0,017	10,0	27,9	27,7	30,5	24,1
50,3	100,1	5,0	0,028	10,0	28,9	28,8	33,9	22,5
100,3	100,7	7,6	0,049	7,6	30,1	29,9	37,7	18,8
150,6	100,3	9,8	0,085	6,5	31,0	31,0	40,9	16,3
200,8	100,4	11,1	0,110	5,5	31,9	31,8	43,0	14,3
250,7	100,1	11,3	0,144	4,5	33,0	32,9	44,3	12,6
25,2	151,8	2,3	0,016	9,2	33,5	22,1	35,9	20,3
50,0	150,1	4,6	0,026	9,1	34,6	23,1	39,2	19,6
100,2	150,2	6,9	0,046	6,9	36,1	24,1	43,0	17,2
150,1	150,9	9,0	0,079	6,0	37,3	24,7	46,2	15,4
200,8	150,4	10,1	0,102	5,0	38,3	25,5	48,4	13,8
250,3	150,7	10,3	0,134	4,1	39,6	26,3	49,9	12,4
24,7	200,3	2,2	0,015	8,7	35,2	17,6	37,4	16,6
50,6	200,8	4,2	0,025	8,4	36,4	18,1	40,6	16,2

100,2	200,6	6,4	0,043	6,4	38,0	18,9	44,4	14,8
150,8	200,6	8,3	0,074	5,5	39,1	19,5	47,4	13,5
200,3	200,3	9,4	0,095	4,7	40,2	20,1	49,6	12,4
250,4	200,9	9,6	0,125	3,8	41,2	20,5	50,8	11,2
25,9	250,3	2,1	0,014	8,0	35,9	14,3	38,0	13,8
50,4	250,9	4,0	0,024	8,0	37,1	14,8	41,1	13,6
100,4	250,9	6,2	0,041	6,1	38,7	15,4	44,9	12,8
150,0	250,8	8,0	0,070	5,3	39,9	15,9	47,9	11,9
200,0	250,9	9,0	0,091	4,5	41,0	16,3	50,0	11,1
250,4	250,9	9,2	0,119	3,7	42,0	16,7	51,2	10,2

#### 5.4.1.7. Nikel(II) İyonları için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 6) ve Sabit Tutulan Her Bir Farklı Nikel(II) İyon Derişiminde, Krom(VI) Adsorpsiyon İzotermelerinin Elde Edilmesi

pH 6'da sabit tutulan her bir farklı nikel(II) iyon derişiminde elde edilen krom(VI) adsorpsiyon izotermeleri Şekil 5.7'de sunulmuştur. Şekilden ortamdaki nikel(II) iyon derişiminin artmasıyla dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarını belirgin olarak azaldığı gözlenmektedir.



**Şekil 5.7.** Krom(VI)+nikel(II) iyon karışımlarının kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine eşanlı adsorpsiyonunda, sabit tutulan her bir farklı nikel(II) iyon derişiminde elde edilen krom(VI) adsorpsiyon izotermi (pH=6, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm)

#### **5.4.1.8. Nikel(II) İyonu için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 6) ve Sabit Tutulan Her Bir Farklı Krom(VI) İyon Derişiminde, Başlangıç Nikel(II) İyon Derişiminin Nikel(II) ve Krom(VI) İyonlarının Adsorpsiyon Hız ve Kapasitesine Ortak Etkisi**

Nikel(II) iyonları için en uygun çalışma pH'ı olarak saptanan pH 6'da, bu sefer her bir deney seti için krom(VI) iyon derişimi 25, 50, 100, 150, 200 ve 250 mg/L değerinde sabit tutulurken, başlangıç nikel(II) iyon derişimi 25-250 mg/L aralığında değiştirilerek, başlangıç nikel(II) iyon derişiminin nikel(II) ve krom(VI) iyonlarının adsorpsiyon hız ve kapasitesine ortak etkileri araştırılmıştır. Elde edilen dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarları, nikel(II) adsorpsiyon hızı ve % giderim değerleri, birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarları ve % giderim değerleri ile birim adsorbent kütlesi başına toplam adsorplanan nikel(II)+krom(VI) iyon miktarları ve toplam % nikel(II)+krom(VI) giderim değerleri Çizelge 5.12'de detaylı olarak sunulmuştur.

Çizelgeden, sabit tutulan her bir farklı krom(VI) derişiminde nikel(II) derişiminin artmasıyla dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarının ve adsorpsiyon hızının arttığı, ancak % giderim değerinin azaldığı gözlenmektedir. Ayrıca karışımdaki krom(VI) iyon derişimindeki artışın nikel(II) iyon adsorpsiyon hız ve verimini dramatik olarak arttırdığı da aynı çizelgeden görülmektedir. Örneğin, adsorpsiyon ortamında krom(VI) iyonları bulunmadığı durumda, 100 mg/L başlangıç nikel(II) derişimi için dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) miktarı 16,0 mg/g, adsorpsiyon hızı 0,393 mg/g.dk ve % nikel(II) iyon giderimi % 15,3 olarak saptanmışken, aynı nikel(II) iyon derişiminde, ortamda 100 mg/L krom(VI) bulunduğunda dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarı 30,1 mg/g, adsorpsiyon hızı 0,536 mg/g.dk ve % nikel(II) iyon giderim değeri % 29,9 olarak saptanmıştır. Bu durumda 100 mg/L nikel(II) için dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II)

iyon miktarı ve % nikel(II) iyon giderimi yaklaşık iki katı kadar artarak sırasıyla 16,0 mg/g'dan 30,1 mg/g'a ve % 15,3'ten % 29,9'a çıkmıştır.

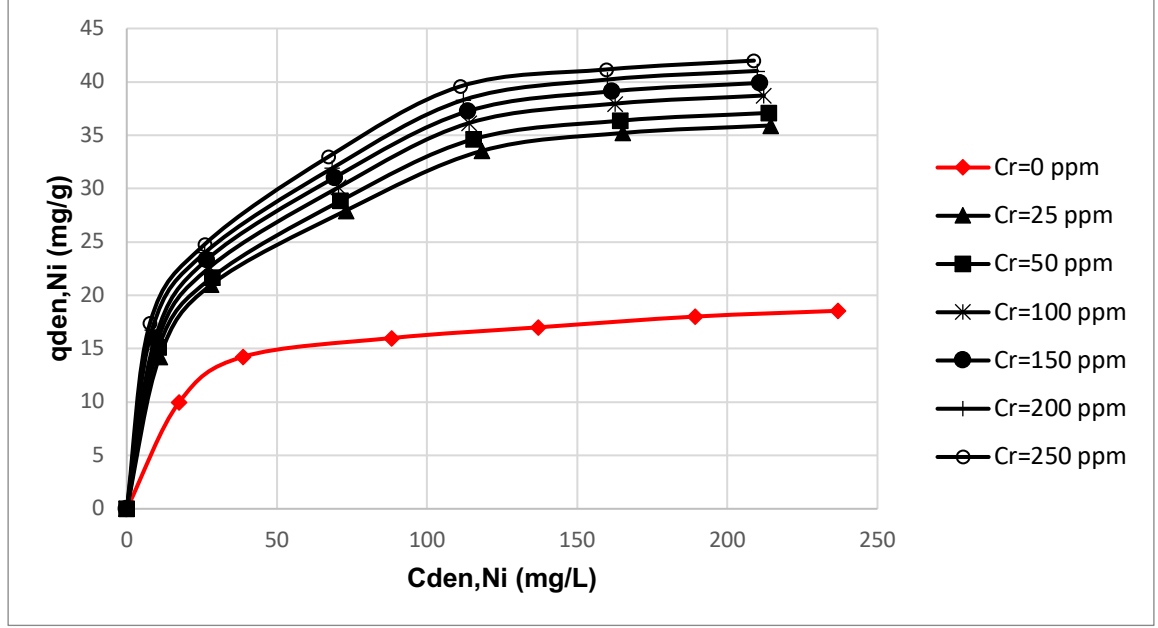
**Çizelge 5.12.** pH 2'de ve sabit tutulan her bir farklı krom(VI) iyon derişiminde başlangıç nikel(II) iyon derişiminin değiştirilmesiyle elde edilen dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarları, nikel(II) adsorpsiyon hızı ve % giderim değerleri, birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarları ve % giderim değerleri ile birim adsorbent kütlesi başına toplam adsorplanan nikel(II)+krom(VI) iyon miktarları ve toplam % nikel(II)+krom(VI) giderim değerleri (pH=2, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm)

<b>C<sub>o,Ni</sub></b> <b>(mg/L)</b>	<b>C<sub>o,Cr</sub></b> <b>(mg/L)</b>	<b>q<sub>den,Ni</sub></b> <b>(mg/g)</b>	<b>r<sub>ad,Ni</sub></b> <b>(mg/g.dak)</b>	<b>%Ni(II)</b> <b>Giderim</b>	<b>q<sub>den,Cr</sub></b> <b>(mg/g)</b>	<b>%Cr(VI)</b> <b>Giderim</b>	<b>q<sub>den,top</sub></b> <b>(mg/g)</b>	<b>% Top</b> <b>Giderim</b>
27,5	0,0	10,0	0,284	36,4	0,0	0,0	10,0	36,4
53,0	0,0	14,3	0,352	26,9	0,0	0,0	14,3	26,9
104,3	0,0	16,0	0,393	15,3	0,0	0,0	16,0	15,3
154,0	0,0	17,0	0,399	11,0	0,0	0,0	17,0	11,0
207,3	0,0	18,0	0,411	8,7	0,0	0,0	18,0	8,7
255,5	0,0	18,6	0,421	7,3	0,0	0,0	18,6	7,3
25,2	25,0	14,2	0,321	56,6	2,5	10,0	16,7	33,4
49,2	24,7	21,0	0,398	42,7	2,4	9,6	23,4	31,6
100,9	25,9	27,9	0,446	27,7	2,1	8,2	30,1	23,7
151,8	25,2	33,5	0,455	22,1	1,9	7,7	35,5	20,0
200,3	24,7	35,2	0,469	17,6	1,8	7,3	37,0	16,5
250,3	25,9	35,9	0,484	14,3	1,7	6,7	37,6	13,6
25,7	51,9	15,1	0,356	58,9	5,9	11,3	21,0	27,1
50,2	50,8	21,7	0,446	43,3	5,6	11,0	27,3	27,0
100,1	50,3	28,9	0,495	28,8	5,0	10,0	33,9	22,5
150,1	50,0	34,6	0,510	23,1	4,6	9,1	39,2	19,6
200,8	50,6	36,4	0,522	18,1	4,2	8,4	40,6	16,1
250,9	50,4	37,1	0,542	14,8	4,1	8,1	41,2	13,7
25,7	102,8	15,7	0,381	60,8	8,9	8,6	24,5	19,1
50,4	100,2	22,7	0,483	45,0	8,4	8,4	31,1	20,6

100,7	100,3	30,1	0,536	29,9	7,6	7,6	37,7	18,8
150,2	100,2	36,2	0,554	24,1	6,9	6,9	43,0	17,2
200,6	100,2	38,0	0,569	18,9	6,4	6,4	44,4	14,8
250,9	100,4	38,7	0,591	15,4	6,2	6,1	44,9	12,8
25,5	150,8	16,0	0,496	62,7	11,5	7,7	27,5	15,6
50,0	151,9	23,3	0,613	46,7	10,9	7,2	34,3	17,0
100,3	150,6	31,0	0,686	31,0	9,8	6,5	40,9	16,3
150,9	150,1	37,3	0,715	24,7	9,0	6,0	46,2	15,4
200,6	150,8	39,1	0,729	19,5	8,3	5,5	47,4	13,5
250,8	150,0	39,9	0,751	15,9	8,0	5,3	47,9	11,9
25,2	200,1	16,8	0,649	66,6	13,0	6,5	29,8	13,2
50,1	200,9	24,0	0,767	47,9	12,3	6,1	36,3	14,5
100,4	200,8	31,9	0,872	31,8	11,1	5,5	43,0	14,3
150,4	200,8	38,3	0,915	25,5	10,1	5,0	48,4	13,8
200,3	200,3	40,2	0,926	20,1	9,4	4,7	49,6	12,4
250,9	200,0	41,0	0,961	16,3	9,0	4,5	50,0	11,1
25,1	251,6	17,4	0,831	69,2	13,3	5,3	30,7	11,1
50,9	251,6	24,8	0,943	48,8	12,6	5,0	37,4	12,4
100,1	250,7	33,0	1,066	32,9	11,3	4,5	44,3	12,6
150,7	250,3	39,6	1,135	26,3	10,3	4,1	49,9	12,4
200,9	250,4	41,2	1,129	20,5	9,6	3,8	50,8	11,2
250,9	250,4	42,0	1,182	16,7	9,2	3,7	51,2	10,2

#### 5.4.1.9. Nikel(II) İyonu için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 6) ve Sabit Tutulan Her Bir Farklı Krom(VI) İyon Derişiminde, Nikel(II) Adsorpsiyon İzotermelerinin Elde Edilmesi

pH 6'da sabit tutulan her bir farklı krom(VI) iyon derişiminde elde edilen nikel(II) adsorpsiyon izotermeleri Şekil 5.8'de sunulmuştur. Şekilden ortamdaki krom(VI) iyon varlığının dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarını önemli ölçüde arttırdığı, ancak krom(VI) iyon derişimindeki artışla nikel(II) adsorpsiyon hız ve kapasitesindeki artışın daha az olduğu gözlenmektedir.



**Şekil 5.8.** Nikel(II)+krom(VI) iyon karışımlarının kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine eşanlı adsorpsiyonunda, sabit tutulan her bir farklı krom(VI) iyon derişiminde elde edilen nikel(II) adsorpsiyon izotermi (pH=6, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm)

#### 5.4.1.10. Nikel(II) İyonu için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 6), Krom(VI)+Nikel(II) İyonlarının Eşanlı Adsorpsiyonunun Denge Modellemesi ve Denge Model Sabitlerinin Bulunması

Nikel(II) iyonları için saptanan en uygun çalışma pH'ı 6'da kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine krom(VI) ve nikel(II) iyon karışımlarının eşanlı adsorpsiyonunda, krom(VI) iyonlarının karışımdaki nikel(II) iyonlarının adsorpsiyonunu arttırdığı (sinerjistik etki), nikel(II) iyonlarının ise krom(VI) iyon adsorpsiyonunu azalttığı (antagonistik etki) gözlenmiştir. Bu bağlamda, krom(VI) iyonları için antagonistik etkileşime göre türetilen Langmuir Modeli (Eşitlik 3.16) ve nikel(II) iyonları için sinerjistik etkileşime göre türetilen Langmuir Modeli (Eşitlik 3.13) kullanılarak ikili karışımın denge modellemesi yapılmış ve denge model sabitleri nonlineer regresyon yöntemiyle belirlenmiştir. Bulunan denge model sabitleri ve % ortalama hata değerleri Çizelge 5.13'te sunulmuştur. Çizelgede verilen % ortalama hata değerlerine bakıldığında sinerjistik ve antagonistik etkileşimler için türetilen Langmuir modellerinin krom(VI)+nikel(II) iyon karışımlarının adsorpsiyon dengesini oldukça iyi tanımladığı söylenebilir.

**Çizelge 5.13.** Nikel(II) iyonları için saptanan en uygun çalışma pH'ı 6'da kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının ikili karışımlarının eşanlı adsorpsiyonunda kullanılan antagonistik ve sinerjistik Langmuir modellerinden elde edilen denge model sabitleri ve % ortalama hata değerleri (pH=6, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm)

<b>Krom(VI) varlığında nikel(II) iyonlarının adsorpsiyonunda kullanılan sinerjistik Langmuir Modeli</b>		<b>Nikel(II) varlığında krom(VI) iyonlarının adsorpsiyonunda kullanılan antagonistik Langmuir Modeli</b>	
Nikel(II)	Krom(VI)	Krom(VI)	Nikel(II)
K <sub>1</sub> : 0,003	K <sub>2</sub> : 0,985	η <sub>1</sub> :19,565	η <sub>2</sub> :19,614
%Ort. Hata: 5,2		%Ort. Hata: 15,9	

## 5.5. Krom(VI) ve Nikel(II) İyonlarının Ardışık Adsorpsiyon Çalışmaları

### 5.5.1.1. Krom(VI) İyonları için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 2) ve Sabit Nikel(II) Derişiminde Tekli Nikel(II) Adsorpsiyon Dengesinde Ortama Ardışık Eklenen Krom(VI) İyon Derişimindeki Değişimin Krom(VI) ve Nikel(II) İyonlarının Adsorpsiyon Hız ve Kapasitesine Ortak Etkisi

pH 2'de önce tekli nikel(II) iyonlarının adsorplandığı, sonra adsorpsiyon dengesinde ortama krom(VI) iyonlarının eklenmesiyle gerçekleştirilen ardışık adsorpsiyon çalışmalarında, nikel(II) iyon derişimi 50, 100 ve 200 mg/L değerlerinde sabit tutulurken, krom(VI) derişimi 50,100 ve 200 mg/L değerlerinde değiştirilerek başlangıç krom(VI) iyon derişiminin karışımdaki krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının adsorpsiyon hız ve kapasitesine ortak etkileri araştırılmıştır.

Elde edilen dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarları, krom(VI) adsorpsiyon hızı ve % giderim değerleri, birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarları ve % giderim değerleri ile birim adsorbent kütlesi başına toplam adsorplanan krom(VI)+nikel(II) iyon miktarları ve toplam % krom(VI)+nikel(II) giderim değerleri Çizelge 5.14'te detaylı olarak sunulmuştur.



Çizelgeden, sabit tutulan her bir farklı nikel(II) derişiminde krom(VI) derişiminin artmasıyla dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarının ve adsorpsiyon hızının arttığı, ancak % giderim değerlerinin azaldığı gözlenmektedir. Ayrıca karışımdaki nikel(II) iyon derişimindeki artışın krom(VI) iyon adsorpsiyon hız ve verimini önemli ölçüde azalttığı da aynı çizelgeden görülmektedir. Örneğin, adsorpsiyon ortamında nikel(II) iyonları bulunmadığı durumda, 100 mg/L başlangıç krom(VI) derişimi için dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) miktarı 39,2 mg/g, adsorpsiyon hızı 0,287 mg/g.dk ve % krom(VI) iyon giderimi % 39,5 olarak saptanmışken, 100 mg/L tekli nikel(II) adsorpsiyonunda dengede ortama 100 mg/L krom(VI) eklendiğinde, birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarı 13,8 mg/g, adsorpsiyon hızı 0,099 mg/g.dk ve % krom(VI) iyon giderim değeri % 14,0 olarak saptanmıştır. Bu durumda 100 mg/L krom(VI) için dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarı ve % krom(VI) iyon giderimi azalarak sırasıyla 32,2 mg/g'dan 13,8 mg/g'a ve % 39,5'ten % 14,0'e düşmüştür.

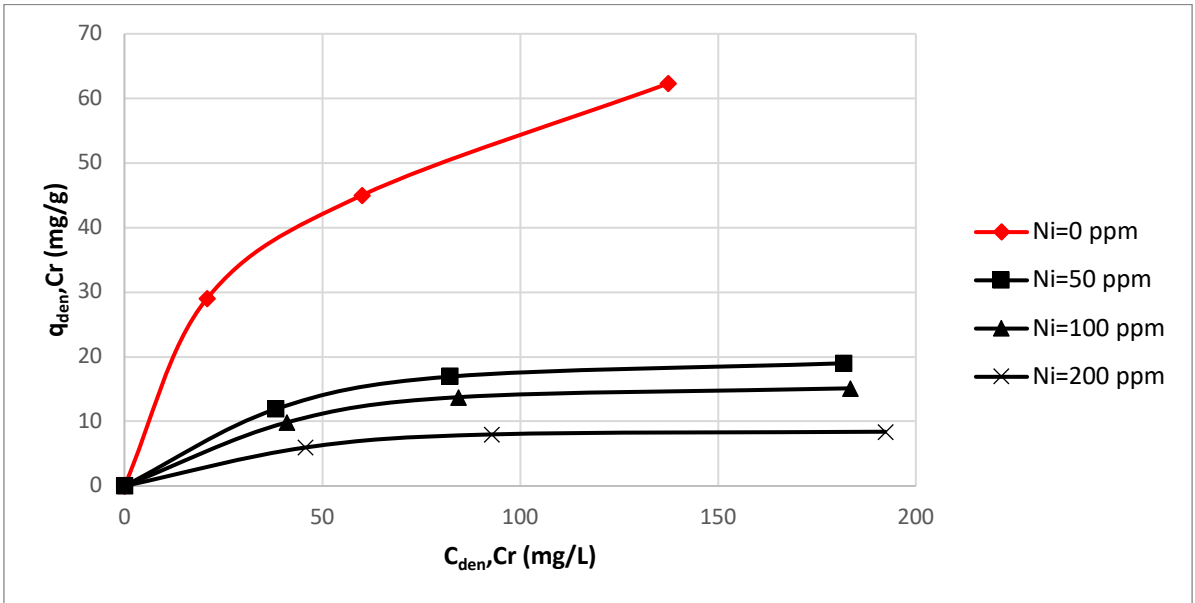
**Çizelge 5.14.** pH 2'de ve sabit tutulan her bir farklı nikel(II) iyon derişiminde tekli nikel(II) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde adsorpsiyon ortamına farklı derişimlerde ardışık eklenen krom(VI) iyonlarının adsorpsiyonunda elde edilen birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarları, krom(VI) adsorpsiyon hızı ve % giderim değerleri, birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarları ve % giderim değerleri ile birim adsorbent kütlesi başına toplam adsorplanan krom(VI)+nikel(II) iyon miktarları ve toplam % krom(VI)+nikel(II) giderim değerleri (pH=2, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm)

<b>C<sub>o,Ni</sub></b> <b>(mg/L)</b>	<b>C<sub>o,Cr</sub></b> <b>(mg/L)</b>	<b>q<sub>den,cr</sub></b> <b>(mg/g)</b>	<b>r<sub>ad,Cr</sub></b> <b>(mg/g.dak)</b>	<b>%Cr(VI)</b> <b>Giderim</b>	<b>q<sub>den,Ni</sub></b> <b>(mg/g)</b>	<b>%Ni(II)</b> <b>Giderim</b>	<b>q<sub>den,top</sub></b> <b>(mg/g)</b>	<b>% Top</b> <b>Giderim</b>
0,0	49,8	29,0	0,151	58,2	0,0	0,0	29,0	58,2
0,0	99,2	39,2	0,287	39,5	0,0	0,0	39,2	39,5
0,0	199,7	62,3	0,594	31,2	0,0	0,0	62,3	31,2
50,2	50,1	11,9	0,068	23,7	3,5	7,0	15,4	15,3
50,4	99,2	16,9	0,130	17,1	5,6	11,1	22,5	15,1
50,1	200,8	19,0	0,262	9,5	7,3	14,6	26,3	10,5

100,3	50,9	9,8	0,053	19,3	4,8	4,8	14,6	9,7
100,2	98,1	13,8	0,099	14,0	7,5	7,4	21,2	10,7
99,8	198,4	15,1	0,195	7,6	10,0	10,1	25,2	8,4
201,9	51,7	6,0	0,036	11,5	9,3	4,6	15,2	6,0
199,4	100,8	8,0	0,065	7,9	10,9	5,5	18,9	6,3
199,0	200,6	8,4	0,123	4,2	15,2	7,6	23,6	5,9

### 5.5.1.2. Krom(VI) İyonları için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 2) Sabit Tutulan Her Bir Farklı Nikel(II) İyon Derişiminde Krom(VI) Adsorpsiyon İzotermelerinin Elde Edilmesi ve Sabit Tutulan Her Bir Farklı Nikel(II) İyon Derişimi için, Nikel(II) Adsorpsiyon Dengesindeki Değişimin İncelenmesi

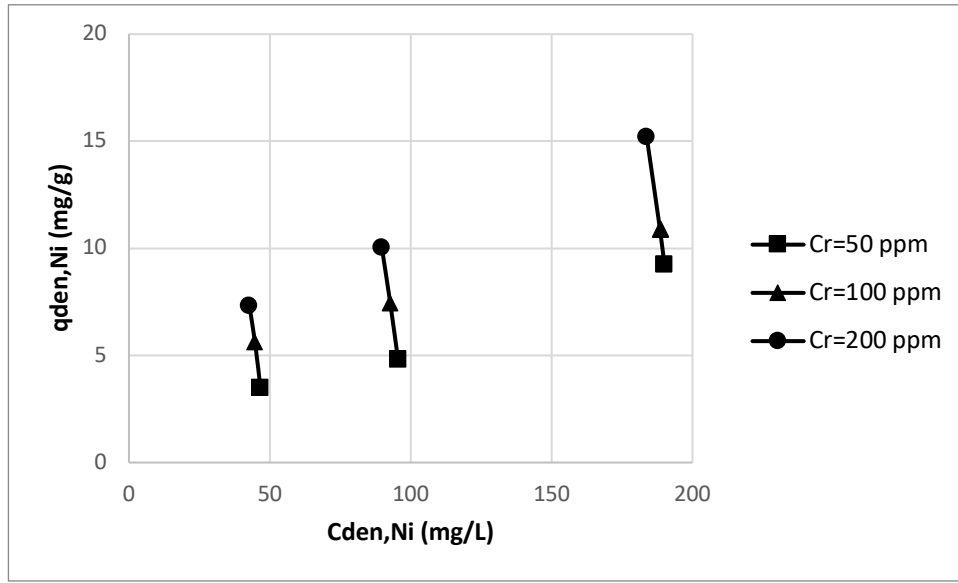
pH 2'de sabit tutulan her bir farklı nikel(II) iyon derişiminde tekli nikel(II) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde adsorpsiyon ortamına farklı derişimlerde ardışık eklenen krom(VI) iyonlarının adsorpsiyonunda elde edilen krom(VI) adsorpsiyon izotermeleri Şekil 5.9'da sunulmuştur. Şekilden nikel(II) iyon derişiminin artmasıyla dengede birim adsorbent başına adsorplanan krom(VI) iyon derişimlerinin belirgin olarak azaldığı gözlenmektedir.



**Şekil 5.9.** Sabit tutulan her bir farklı nikel(II) iyon derişiminde tekli nikel(II) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde adsorpsiyon ortamına farklı derişimlerde

ardışık eklenen krom(VI) iyonlarının adsorpsiyonunda elde edilen krom(VI) adsorpsiyon izotermi (pH=2, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm)

pH 2'de sabit tutulan her bir farklı nikel(II) iyon derişiminde tekli nikel(II) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde adsorpsiyon ortamına farklı derişimlerde ardışık eklenen krom(VI) iyonlarının nikel(II) adsorpsiyon dengesine etkisi Şekil 5.10'da sunulmuştur. Şekilden her bir sabit nikel(II) iyon derişiminde ardışık eklenen krom(VI) iyon derişimindeki artışın nikel(II) adsorpsiyon dengesini pozitif yönde değiştirdiği ve dengede birim adsorbent başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarını arttırdığı gözlenmektedir.



**Şekil 5.10.** Sabit tutulan her bir farklı nikel(II) iyon derişiminde tekli nikel(II) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde adsorpsiyon ortamına farklı derişimlerde ardışık eklenen krom(VI) iyonlarının nikel(II) adsorpsiyon dengesine etkisi (pH=2, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm)

### 5.5.1.3. Krom(VI) İyonları için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 2) Krom(VI)+Nikel(II) İyonlarının Ardışık Adsorpsiyonunun Denge Modellemesi ve Denge Model Sabitlerinin Bulunması

Krom(VI) iyonları için saptanan en uygun çalışma pH'ı 2'de kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine önce tekli nikel(II) iyonlarının adsorplandığı, sonra adsorpsiyon dengesinde ortama krom(VI) iyonlarının eklenmesiyle gerçekleştirilen

krom(VI) ve nikel(II) iyon karışımlarının ardışık adsorpsiyonunda, krom(VI) iyonlarının karışımdaki nikel(II) iyonlarının adsorpsiyonunu arttırdığı (sinerjistik etki), nikel(II) iyonlarının ise krom(VI) iyon adsorpsiyonunu azalttığı (antagonistik etki) gözlenmiştir. Bu bağlamda, krom(VI) iyonları için antagonistik etkileşime göre türetilen Langmuir Modeli (Eşitlik 3.16) ve nikel(II) iyonları için sinerjistik etkileşime göre türetilen Langmuir Modeli (Eşitlik 3.13) kullanılarak ikili karışımın adsorpsiyon denge modellemesi yapılmış ve denge model sabitleri nonlineer regresyon yöntemiyle belirlenmiştir. Bulunan denge model sabitleri ve % ortalama hata değerleri Çizelge 5.15'te sunulmuştur. Çizelgede verilen % ortalama hata değerlerine bakıldığında sinerjistik ve antagonistik etkileşimler için türetilen Langmuir modellerinin krom(VI)+nikel(II) iyon karışımlarının ardışık adsorpsiyonunda hem krom(VI) hem de nikel(II) iyonlarının adsorpsiyon dengesini oldukça iyi tanımladığı söylenebilir.

**Çizelge 5.15.** Krom(VI) iyonları için saptanan en uygun çalışma pH'ı 2'de kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine önce tekli nikel(II) iyonlarının adsorplandığı, sonra adsorpsiyon dengesinde ortama krom(VI) iyonlarının eklenmesiyle gerçekleştirilen krom(VI) ve nikel(II) iyon karışımlarının ardışık adsorpsiyonunda kullanılan antagonistik ve sinerjistik Langmuir modellerinden elde edilen denge model sabitleri ve % ortalama hata değerleri (pH=2, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm)

Tekli nikel(II) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde ortama krom(VI) iyonlarının eklenmesiyle gerçekleştirilen krom(VI) ve nikel(II) iyon karışımlarının ardışık adsorpsiyonunda nikel(II) iyonları için kullanılan sinerjistik Langmuir Modeli		Tekli nikel(II) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde ortama krom(VI) iyonlarının eklenmesiyle gerçekleştirilen krom(VI) ve nikel(II) iyon karışımlarının ardışık adsorpsiyonunda krom(VI) iyonları için kullanılan antagonistik Langmuir Modeli	
Nikel(II)	Krom(VI)	Krom(VI)	Nikel(II)
K <sub>1</sub> : 9,799	K <sub>2</sub> : 1,068	η <sub>1</sub> : 4,874	η <sub>2</sub> : 3,241
%Ort. Hata: 14,9		%Ort. Hata: 3,0	

#### **5.5.1.4. Krom(VI) İyonları için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 2) ve Sabit Krom(VI) Derişiminde Tekli Krom(VI) Adsorpsiyon Dengesinde Ortama Ardışık Eklenen Nikel(II) İyon Derişimindeki Değişimin Nikel(II) ve Krom(VI) İyonlarının Adsorpsiyon Hız ve Kapasitesine Ortak Etkisi**

pH 2'de önce tekli krom(VI) iyonlarının adsorplandığı, sonra adsorpsiyon dengesinde ortama nikel(II) iyonlarının eklenmesiyle gerçekleştirilen ardışık adsorpsiyon çalışmalarında, krom(VI) iyon derişimi 50, 100 ve 200 mg/L değerlerinde sabit tutulurken, nikel(II) derişimi 50,100 ve 200 mg/L değerlerinde değiştirilerek başlangıç nikel(II) iyon derişiminin karışımdaki nikel(II) ve krom(VI) iyonlarının adsorpsiyon hız ve kapasitesine ortak etkileri araştırılmıştır.

Elde edilen dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarları, nikel(II) adsorpsiyon hızı ve % giderim değerleri, birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarları ve % giderim değerleri ile birim adsorbent kütlesi başına toplam adsorplanan nikel(II)+krom(VI) iyon miktarları ve toplam % nikel(II)+krom(VI) giderim değerleri Çizelge 5.16'da detaylı olarak sunulmuştur.

Çizelgeden, sabit tutulan her bir farklı krom(VI) derişiminde nikel(II) derişiminin artmasıyla dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarının ve adsorpsiyon hızının arttığı, ancak % giderim değerlerinin azaldığı gözlenmektedir. Ayrıca karışımdaki krom(VI) iyon derişimindeki artışın nikel(II) iyon adsorpsiyon hız ve verimini önemli ölçüde arttırdığı da aynı çizelgeden gözlenmektedir. Örneğin, adsorpsiyon ortamında krom(VI) iyonları bulunmadığı durumda, 100 mg/L başlangıç nikel(II) derişimi için dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) miktarı 4,4 mg/g, adsorpsiyon hızı 0,062 mg/g.dk ve % nikel(II) iyon giderimi % 4,3 olarak saptanmışken, 100 mg/L tekli krom(VI) adsorpsiyonunda dengede ortama 100 mg/L nikel(II) eklendiğinde, birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarı 6,9 mg/g, adsorpsiyon hızı 0,124 mg/g.dk ve % nikel(II) iyon giderim değeri % 6,8 olarak saptanmıştır. Bu durumda 100 mg/L nikel(II) için dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarı ve % nikel(II) iyon giderimi artarak sırasıyla 4,4 mg/g'dan 6,9 mg/g'a ve % 4,3'ten % 6,8'e çıkmıştır.

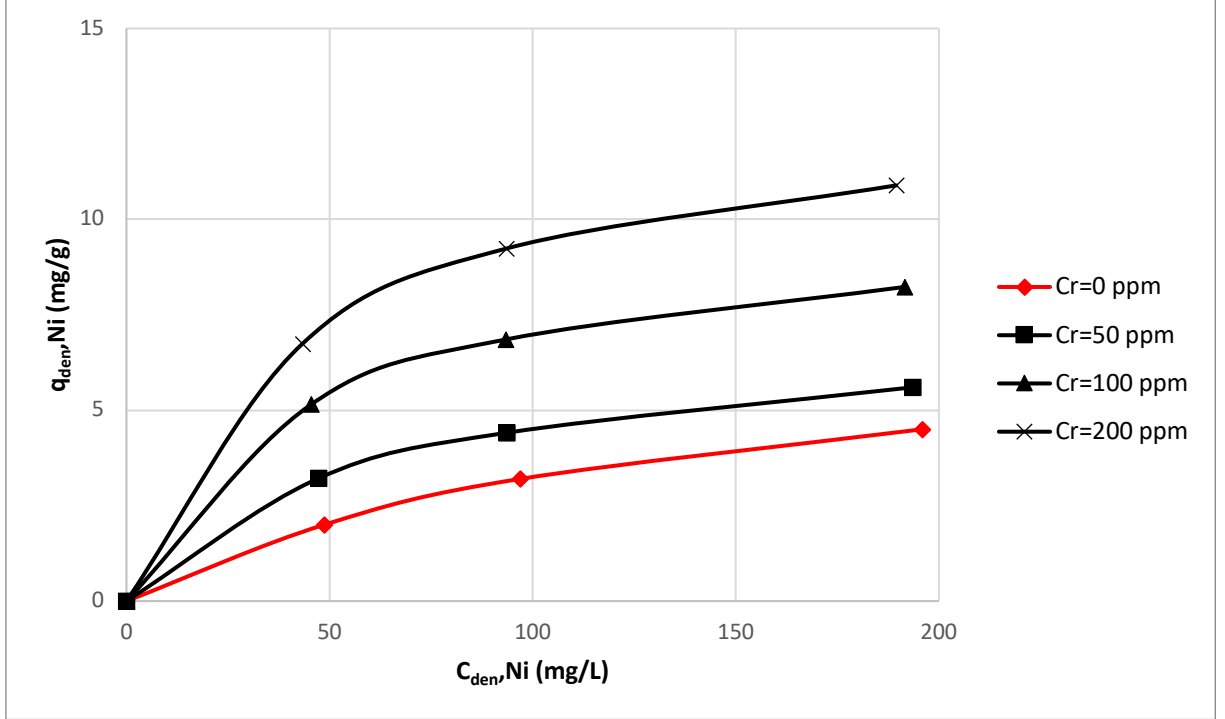
**Çizelge 5.16.** pH 2'de ve sabit tutulan her bir farklı krom(VI) iyon derişiminde tekli krom(VI) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde adsorpsiyon ortamına farklı derişimlerde ardışık eklenen nikel(II) iyonlarının adsorpsiyonunda elde edilen birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarları, nikel(II) adsorpsiyon hızı ve % giderim değerleri, birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarları ve % giderim değerleri ile birim adsorbent kütlesi başına toplam adsorplanan nikel(II)+krom(VI) iyon miktarları ve toplam % nikel(II)+krom(VI) giderim değerleri (pH=2, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm)

<b>C<sub>o,Cr</sub></b> <b>(mg/L)</b>	<b>C<sub>o,Ni</sub></b> <b>(mg/L)</b>	<b>q<sub>den,Ni</sub></b> <b>(mg/g)</b>	<b>r<sub>ad,Ni</sub></b> <b>(mg/g.dak)</b>	<b>%Ni(II)</b> <b>Giderim</b>	<b>q<sub>den,Cr</sub></b> <b>(mg/g)</b>	<b>%Cr(VI)</b> <b>Giderim</b>	<b>q<sub>den,top</sub></b> <b>(mg/g)</b>	<b>% Top</b> <b>Giderim</b>
0,0	50,7	2,9	0,039	5,7	0,0	0,0	2,9	5,7
0,0	100,1	4,4	0,062	4,3	0,0	0,0	4,4	4,3
0,0	200,4	5,7	0,098	2,8	0,0	0,0	5,7	2,8
51,3	50,6	3,2	0,057	6,4	13,2	25,8	16,5	16,2
50,0	98,1	4,4	0,099	4,5	10,8	21,7	15,3	10,3
51,1	199,2	5,6	0,164	2,8	6,6	12,8	12,2	4,9
100,6	50,6	5,2	0,072	10,2	18,6	18,5	23,8	15,7
100,8	100,3	6,9	0,124	6,8	15,1	15,0	22,0	10,9
100,1	199,8	8,2	0,214	4,1	8,8	8,8	17,0	5,7
200,8	50,1	6,7	0,086	13,5	20,9	10,4	27,6	11,0
200,1	102,8	9,2	0,154	9,0	16,7	8,3	25,9	8,5
200,9	200,4	10,9	0,265	5,4	9,3	4,6	20,1	5,0

#### **5.5.1.5. Krom(VI) İyonları için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 2) Sabit Tutulan Her Bir Farklı Krom(VI) İyon Derişiminde Nikel(II) Adsorpsiyon İzotermelerinin Elde Edilmesi ve Sabit Tutulan Her Bir Farklı Krom(VI) İyon Derişimi için, Krom(VI) Adsorpsiyon Dengesindeki Değişimin İncelenmesi**

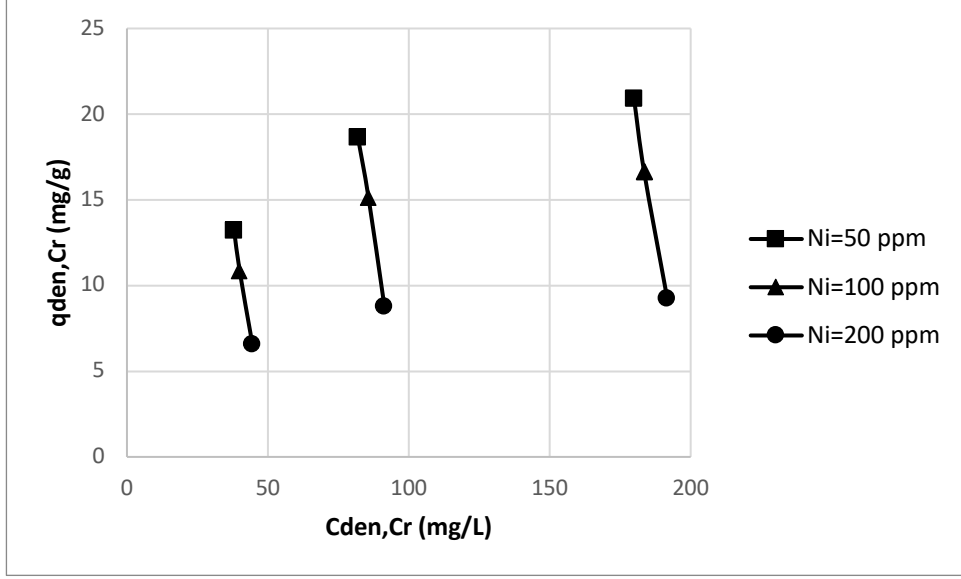
pH 2'de sabit tutulan her bir farklı krom(VI) iyon derişiminde tekli krom(VI) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde adsorpsiyon ortamına farklı derişimlerde ardışık eklenen nikel(II) iyonlarının adsorpsiyonunda elde edilen nikel(II)

adsorpsiyon izotermi Şekil 5.11'de sunulmuştur. Şekilden krom(VI) iyon derişiminin artmasıyla dengede birim adsorbent başına adsorplanan nikel(II) iyon derişimlerinin belirgin olarak arttığı gözlenmektedir.



**Şekil 5.11.** Sabit Tutulan Her bir farklı krom(VI) iyon derişiminde tekli krom(VI) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde adsorpsiyon ortamına farklı derişimlerde ardışık eklenen nikel(II) iyonlarının adsorpsiyonunda elde edilen nikel(II) adsorpsiyon izotermi

pH 2'de sabit tutulan her bir farklı krom(VI) iyon derişiminde tekli krom(VI) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde adsorpsiyon ortamına farklı derişimlerde ardışık eklenen nikel(II) iyonlarının krom(VI) adsorpsiyon dengesine etkisi şekil 5.12'de sunulmuştur. Şekilden her bir sabit krom(VI) iyon derişiminde ardışık eklenen nikel(II) iyon derişimindeki artışın krom(VI) adsorpsiyon dengelerini negatif yönde değiştirdiği ve dengede birim adsorbent başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarını azalttığı gözlenmektedir.



**Şekil 5.12.** Sabit tutulan her bir farklı krom(VI) iyon derişiminde tekli krom(VI) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde adsorpsiyon ortamına farklı derişimlerde ardışık eklenen nikel(II) iyonlarının krom(VI) adsorpsiyon dengesine etkisi (pH=2, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm)

#### 5.5.1.6. Krom(VI) İyonları için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 2) Nikel(II)+Krom(VI) İyonlarının Ardışık Adsorpsiyonunun Denge Modellemesi ve Denge Model Sabitlerinin Bulunması

Krom(VI) iyonları için saptanan en uygun çalışma pH'ı 2'de kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine önce tekli krom(VI) iyonlarının adsorplandığı, sonra adsorpsiyon dengesinde ortama nikel(II) iyonlarının eklenmesiyle gerçekleştirilen nikel(II) ve krom(VI) iyon karışımlarının ardışık adsorpsiyonunda, krom(VI) iyonlarının karışımdaki nikel(II) iyonlarının adsorpsiyonunu arttırdığı (sinerjistik etki), nikel(II) iyonlarının ise krom(VI) iyon adsorpsiyonunu azalttığı (antagonistik etki) gözlenmiştir. Bu bağlamda, krom(VI) iyonları için antagonistik etkileşime göre türetilen Langmuir Modeli (Eşitlik 3.16) ve nikel(II) iyonları için sinerjistik etkileşime göre türetilen Langmuir Modeli (Eşitlik 3.13) kullanılarak ikili karışımın adsorpsiyon denge modellemesi yapılmış ve denge model sabitleri nonlineer regresyon yöntemiyle belirlenmiştir. Bulunan denge model sabitleri ve % ortalama hata değerleri Çizelge 5.17'de sunulmuştur. Çizelgede verilen % ortalama hata değerlerine bakıldığında sinerjistik ve antagonistik etkileşimler için türetilen Langmuir modellerinin nikel(II)+krom(VI) iyon karışımlarının ardışık



adsorpsiyonunda hem krom(VI) hem de nikel(II) iyonlarının adsorpsiyon dengesini oldukça iyi tanımladığı söylenebilir.

**Çizelge 5.17.** Krom(VI) iyonları için saptanan en uygun çalışma pH'ı 2'de kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine önce tekli krom(VI) iyonlarının adsorplandığı, sonra adsorpsiyon dengesinde ortama nikel(II) iyonlarının eklenmesiyle gerçekleştirilen nikel(II) ve krom(VI) iyon karışımlarının ardışık adsorpsiyonunda kullanılan antagonistik ve sinerjistik Langmuir modellerinden elde edilen denge model sabitleri ve % ortalama hata değerleri (pH=2, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm)

Tekli krom(VI) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde ortama nikel(II) iyonlarının eklenmesiyle gerçekleştirilen nikel(II) ve krom(VI) iyon karışımlarının ardışık adsorpsiyonunda nikel(II) iyonları için kullanılan sinerjistik Langmuir Modeli		Tekli krom(VI) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde ortama nikel(II) iyonlarının eklenmesiyle gerçekleştirilen nikel(II) ve krom(VI) iyon karışımlarının ardışık adsorpsiyonunda krom(VI) iyonları için kullanılan antagonistik Langmuir Modeli	
Nikel(II)	Krom(VI)	Krom(VI)	Nikel(II)
K <sub>1</sub> : 4,223	K <sub>2</sub> : 1,045	η <sub>1</sub> : 3,973	η <sub>2</sub> : 2,966
%Ort. Hata: 16,9		%Ort. Hata: 15,1	

#### 5.5.1.7. Nikel(II) İyonu için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 6) ve Sabit Nikel(II) Derişiminde Tekli Nikel(II) Adsorpsiyon Dengesinde Ortama Ardışık Eklenen Krom(VI) İyon Derişimindeki Değişimin Krom(VI) ve Nikel(II) İyonlarının Adsorpsiyon Hız ve Kapasitesine Ortak Etkisi

pH 6'da önce tekli nikel(II) iyonlarının adsorplandığı, sonra adsorpsiyon dengesinde ortama krom(VI) iyonlarının eklenmesiyle gerçekleştirilen ardışık adsorpsiyon çalışmalarında, nikel(II) iyon derişimi 50, 100 ve 200 mg/L değerlerinde sabit tutulurken, krom(VI) derişimi 50,100 ve 200 mg/L değerlerinde değiştirilerek başlangıç krom(VI) iyon derişiminin karışımdaki krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının adsorpsiyon hız ve kapasitesine ortak etkileri araştırılmıştır.

Elde edilen dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarları, krom(VI) adsorpsiyon hızı ve % giderim değerleri, birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarları ve % giderim değerleri ile birim adsorbent kütlesi başına toplam adsorplanan krom(VI)+nikel(II) iyon miktarları ve toplam % krom(VI)+nikel(II) giderim değerleri Çizelge 5.18'de detaylı olarak sunulmuştur.

Çizelgeden, sabit tutulan her bir farklı nikel(II) derişiminde krom(VI) derişiminin artmasıyla dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarının ve adsorpsiyon hızının arttığı, ancak % giderim değerlerinin azaldığı gözlenmektedir. Ayrıca karışımdaki nikel(II) iyon derişimindeki artışın krom(VI) iyon adsorpsiyon hız ve verimini önemli ölçüde azalttığı da aynı çizelgeden görülmektedir. Örneğin, adsorpsiyon ortamında nikel(II) iyonları bulunmadığı durumda, 100 mg/L başlangıç krom(VI) derişimi için dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) miktarı 9,4 mg/g, adsorpsiyon hızı 0,061 mg/g.dk ve % krom(VI) iyon giderimi % 9,4 olarak saptanmışken, 100 mg/L tekli nikel(II) adsorpsiyonunda dengede ortama 100 mg/L krom(VI) eklendiğinde, birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarı 5,7 mg/g, adsorpsiyon hızı 0,039 mg/g.dk ve % krom(VI) iyon giderim değeri % 5,7 olarak saptanmıştır. Bu durumda 100 mg/L krom(VI) için dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarı ve % krom(VI) iyon giderimi azalarak sırasıyla 9,4 mg/g'dan 5,7 mg/g'a ve % 9,4'ten % 5,7'ye düşmüştür.

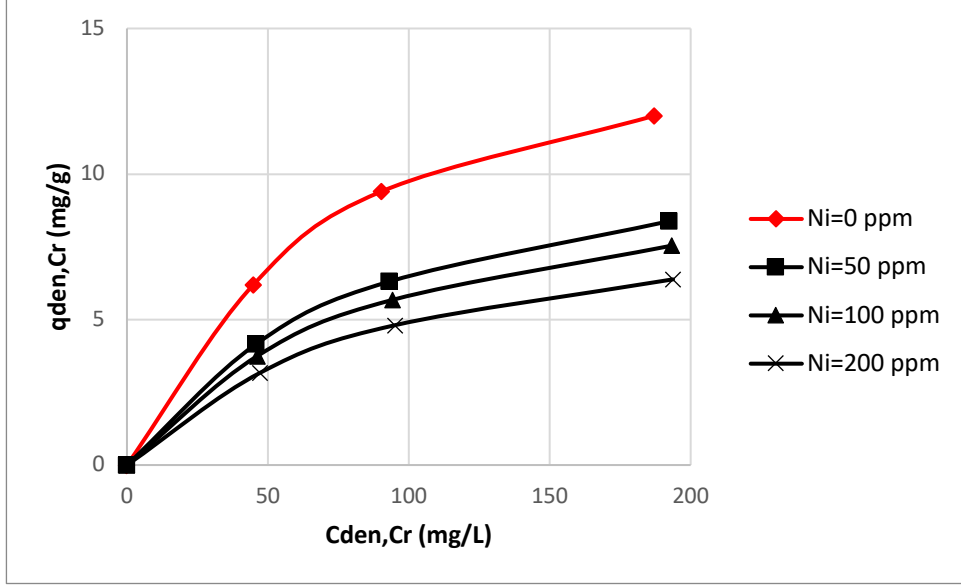
**Çizelge 5.18.** pH 6'da ve sabit tutulan her bir farklı nikel(II) iyon derişiminde tekli nikel(II) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde adsorpsiyon ortamına farklı derişimlerde ardışık eklenen krom(VI) iyonlarının adsorpsiyonunda elde edilen birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarları, krom(VI) adsorpsiyon hızı ve % giderim değerleri, birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarları ve % giderim değerleri ile birim adsorbent kütlesi başına toplam adsorplanan krom(VI)+nikel(II) iyon miktarları ve toplam % krom(VI)+nikel(II) giderim değerleri (pH=6, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm)

<b>C<sub>o,Ni</sub></b> <b>(mg/L)</b>	<b>C<sub>o,Cr</sub></b> <b>(mg/L)</b>	<b>q<sub>den,cr</sub></b> <b>(mg/g)</b>	<b>r<sub>ad,Cr</sub></b> <b>(mg/g.dak)</b>	<b>%Cr(VI)</b> <b>Giderim</b>	<b>q<sub>den,Ni</sub></b> <b>(mg/g)</b>	<b>%Ni(II)</b> <b>Giderim</b>	<b>q<sub>den,top</sub></b> <b>(mg/g)</b>	<b>% Top</b> <b>Giderim</b>
0,0	51,1	6,2	0,035	12,1	0	0	6,2	12,1

0,0	99,7	9,4	0,061	9,4	0	0	9,4	9,4
0,0	199,1	13,8	0,135	6,9	0	0	13,8	6,9
50,2	50,2	4,2	0,023	8,3	20,1	40,1	24,3	24,2
49,2	99,5	6,3	0,042	6,3	21,0	42,7	27,3	18,4
50,1	200,9	8,4	0,096	4,2	22,3	44,4	30,6	12,2
100,8	50,1	3,8	0,021	7,5	26,8	26,5	30,5	20,2
100,4	100,0	5,7	0,039	5,7	27,9	27,8	33,6	16,8
98,4	200,9	7,5	0,090	3,8	29,6	30,1	37,1	12,4
201,7	50,5	3,2	0,019	6,3	33,7	16,7	36,9	14,6
199,7	100,0	4,8	0,034	4,8	35,2	17,6	40,0	13,3
200,6	200,1	6,4	0,077	3,2	37,3	18,6	43,7	10,9

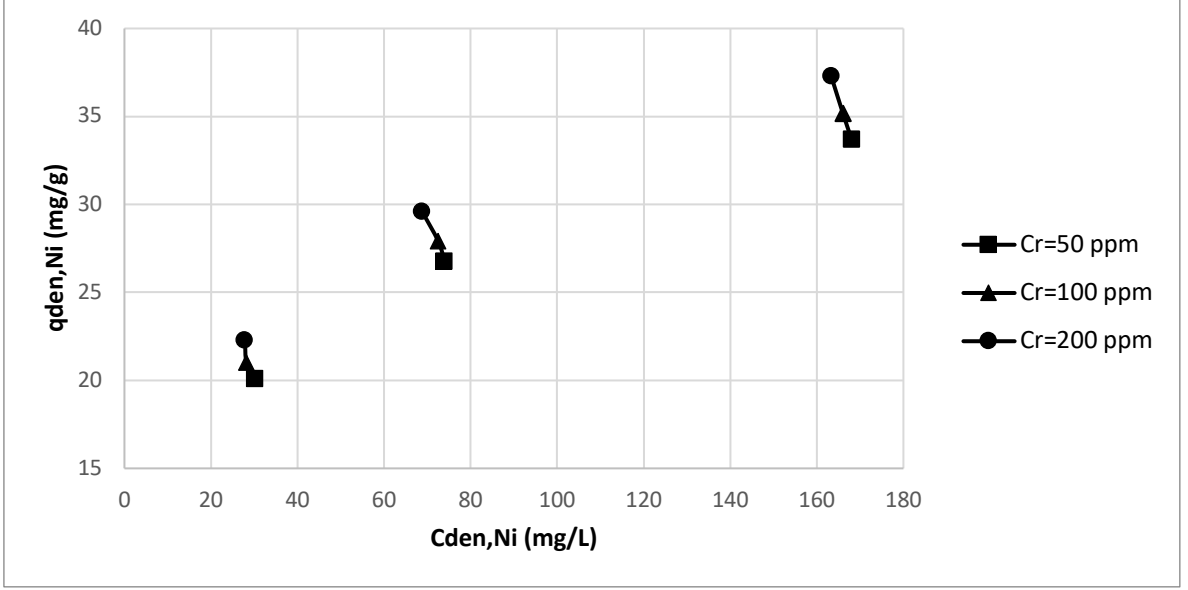
**5.5.1.8. Nikel(II) İyonu için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 6) Sabit Tutulan Her Bir Farklı Nikel(II) İyon Derişiminde Krom(VI) Adsorpsiyon İzotermelerinin Elde Edilmesi ve Sabit Tutulan Her Bir Farklı Nikel(II) İyon Derişimi için, Nikel(II) Adsorpsiyon Dengesindeki Değişimin İncelenmesi**

pH 6'da sabit tutulan her bir farklı nikel(II) iyon derişiminde tekli nikel(II) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde adsorpsiyon ortamına farklı derişimlerde ardışık eklenen krom(VI) iyonlarının adsorpsiyonunda elde edilen krom(VI) adsorpsiyon izotermeleri Şekil 5.13'te sunulmuştur. Şekilden nikel(II) iyon derişiminin artmasıyla dengede birim adsorbent başına adsorplanan krom(VI) iyon derişimlerinin azaldığı gözlenmektedir.



**Şekil 5.13.** Sabit Tutulan Her bir farklı nikel(II) iyon derişiminde tekli nikel(II) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde adsorpsiyon ortamına farklı derişimlerde ardışık eklenen krom(VI) iyonlarının adsorpsiyonunda elde edilen krom(VI) adsorpsiyon izotermi (pH=6, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm)

pH 6'da sabit tutulan her bir farklı nikel(II) iyon derişiminde tekli nikel(II) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde adsorpsiyon ortamına farklı derişimlerde ardışık eklenen krom(VI) iyonlarının nikel(II) adsorpsiyon dengesine etkisi şekil 5.14'te sunulmuştur. Şekilden her bir sabit nikel(II) iyon derişiminde ardışık eklenen krom(VI) iyon derişimindeki artışın nikel(II) adsorpsiyon dengesini pozitif yönde değiştirdiği ve dengede birim adsorbent başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarını arttırdığı gözlenmektedir.



**Şekil 5.14.** Sabit tutulan her bir farklı nikel(II) iyon derişiminde tekli nikel(II) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde adsorpsiyon ortamına farklı derişimlerde ardışık eklenen krom(VI) iyonlarının nikel(II) adsorpsiyon dengesine etkisi (pH=6, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm)

#### 5.5.1.9. Nikel(II) İyonu için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 6) Krom(VI)+Nikel(II) İyonlarının Ardışık Adsorpsiyonunun Denge Modellemesi ve Denge Model Sabitlerinin Bulunması

Nikel(II) iyonları için saptanan en uygun çalışma pH'ı 6'da kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine önce tekli nikel(II) iyonlarının adsorplandığı, sonra adsorpsiyon dengesinde ortama krom(VI) iyonlarının eklenmesiyle gerçekleştirilen krom(VI) ve nikel(II) iyon karışımlarının ardışık adsorpsiyonunda, krom(VI) iyonlarının karışımdaki nikel(II) iyonlarının adsorpsiyonunu arttırdığı (sinerjistik etki), nikel(II) iyonlarının ise krom(VI) iyon adsorpsiyonunu azalttığı (antagonistik etki) gözlenmiştir. Bu bağlamda, krom(VI) iyonları için antagonistik etkileşime göre türetilen Langmuir Modeli (Eşitlik 3.16) ve nikel(II) iyonları için sinerjistik etkileşime göre türetilen Langmuir Modeli (Eşitlik 3.13) kullanılarak ikili karışımın adsorpsiyon denge modellemesi yapılmış ve denge model sabitleri nonlineer regresyon yöntemiyle belirlenmiştir. Bulunan denge model sabitleri ve % ortalama hata değerleri Çizelge 5.19'da sunulmuştur. Çizelgede verilen % ortalama hata değerlerine bakıldığında sinerjistik ve antagonistik etkileşimler için türetilen Langmuir modellerinin krom(VI)+nikel(II) iyon karışımlarının ardışık

adsorpsiyonunda hem krom(VI) hem de nikel(II) iyonlarının adsorpsiyon dengesini oldukça iyi tanımladığı söylenebilir.

**Çizelge 5.19.** Nikel(II) iyonları için saptanan en uygun çalışma pH'ı 6'da kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine önce tekli nikel(II) iyonlarının adsorplandığı, sonra adsorpsiyon dengesinde ortama krom(VI) iyonlarının eklenmesiyle gerçekleştirilen krom(VI) ve nikel(II) iyon karışımlarının ardışık adsorpsiyonunda kullanılan antagonistik ve sinerjistik Langmuir modellerinden elde edilen denge model sabitleri ve % ortalama hata değerleri (pH=6, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm)

Tekli nikel(II) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde ortama krom(VI) iyonlarının eklenmesiyle gerçekleştirilen krom(VI) ve nikel(II) iyon karışımlarının ardışık adsorpsiyonunda nikel(II) iyonları için kullanılan sinerjistik Langmuir Modeli		Tekli nikel(II) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde ortama krom(VI) iyonlarının eklenmesiyle gerçekleştirilen krom(VI) ve nikel(II) iyon karışımlarının ardışık adsorpsiyonunda krom(VI) iyonları için kullanılan antagonistik Langmuir Modeli	
Nikel(II)	Krom(VI)	Krom(VI)	Nikel(II)
K <sub>1</sub> : 0,0783	K <sub>2</sub> : 2,136	η <sub>1</sub> : 28,064	η <sub>2</sub> : 23,509
%Ort. Hata: 9,7		%Ort. Hata: 15,7	

#### 5.5.1.10. Nikel(II) İyonu için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 6) ve Sabit Krom(VI) Derişiminde Tekli Krom(VI) Adsorpsiyon Dengesinde Ortama Ardışık Eklenen Nikel(II) İyon Derişimindeki Değişimin Nikel(II) ve Krom(VI) İyonlarının Adsorpsiyon Hız ve Kapasitesine Ortak Etkisi

pH 6'da önce tekli krom(VI) iyonlarının adsorplandığı, sonra adsorpsiyon dengesinde ortama nikel(II) iyonlarının eklenmesiyle gerçekleştirilen ardışık adsorpsiyon çalışmalarında, krom(VI) iyon derişimi 50, 100 ve 200 mg/L değerlerinde sabit tutulurken, nikel(II) derişimi 50,100 ve 200 mg/L değerlerinde değiştirilerek başlangıç nikel(II) iyon derişiminin karışımdaki nikel(II) ve krom(VI) iyonlarının adsorpsiyon hız ve kapasitesine ortak etkileri araştırılmıştır.

Elde edilen dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarları, nikel(II) adsorpsiyon hızı ve % giderim değerleri, birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarları ve % giderim değerleri ile birim adsorbent kütlesi başına toplam adsorplanan nikel(II)+krom(VI) iyon miktarları ve toplam % nikel(II)+krom(VI) giderim değerleri Çizelge 5.20'de detaylı olarak sunulmuştur.

Çizelgeden, sabit tutulan her bir farklı krom(VI) derişiminde nikel(II) derişiminin artmasıyla dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarının ve adsorpsiyon hızının arttığı, ancak % giderim değerlerinin azaldığı gözlenmektedir. Ayrıca karışımdaki krom(VI) iyon derişimindeki artışın nikel(II) iyon adsorpsiyon hız ve verimini önemli ölçüde arttırdığı da aynı çizelgeden gözlenmektedir. Örneğin, adsorpsiyon ortamında krom(VI) iyonları bulunmadığı durumda, 100 mg/L başlangıç nikel(II) derişimi için dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) miktarı 16,0 mg/g, adsorpsiyon hızı 0,393 mg/g.dk ve % nikel(II) iyon giderimi % 15,3 olarak saptanmışken, 100 mg/L tekli krom(VI) adsorpsiyonunda dengede ortama 100 mg/L nikel(II) eklendiğinde, birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarı 25,1 mg/g, adsorpsiyon hızı 0,466 mg/g.dk ve % nikel(II) iyon giderim değeri % 25,1 olarak saptanmıştır. Bu durumda 100 mg/L nikel(II) için dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarı ve % nikel(II) iyon giderimi artarak sırasıyla 16,0 mg/g'dan 25,1 mg/g'a ve % 15,3'ten % 25,1'e çıkmıştır.

**Çizelge 5.20.** pH 6'da ve sabit tutulan her bir farklı krom(VI) iyon derişiminde tekli krom(VI) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde adsorpsiyon ortamına farklı derişimlerde ardışık eklenen nikel(II) iyonlarının adsorpsiyonunda elde edilen birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) iyon miktarları, nikel(II) adsorpsiyon hızı ve % giderim değerleri, birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarları ve % giderim değerleri ile birim adsorbent kütlesi başına toplam adsorplanan nikel(II)+krom(VI) iyon miktarları ve toplam % nikel(II)+krom(VI) giderim değerleri (pH=6, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm)

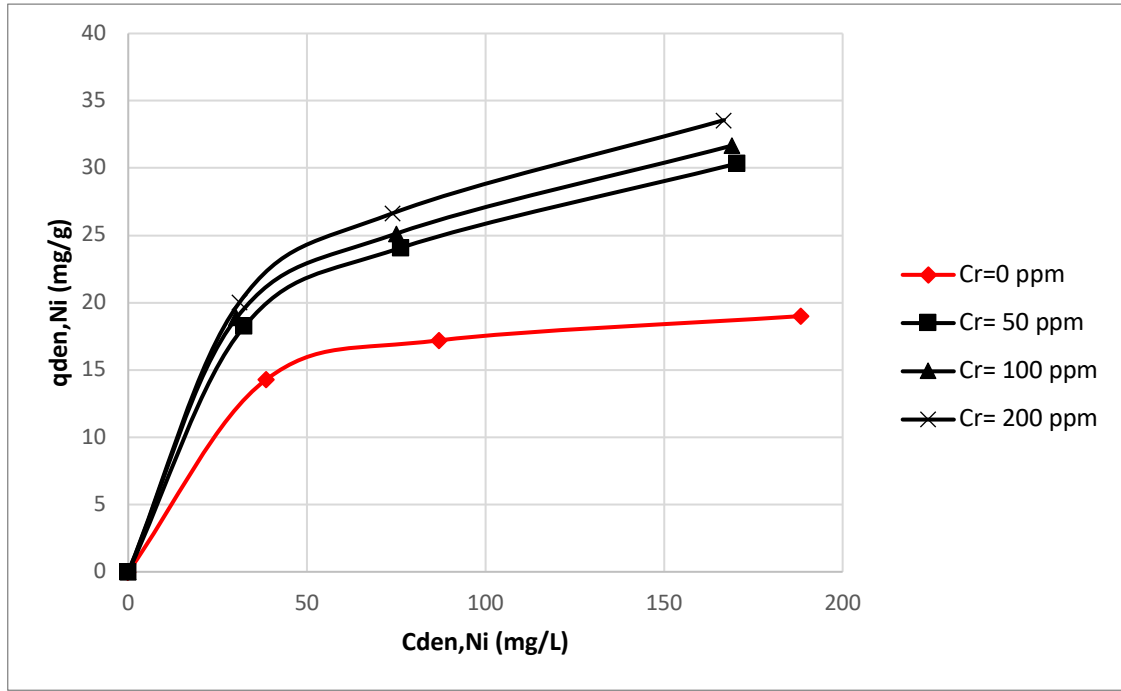
<b>C<sub>o,Cr</sub></b> <b>(mg/L)</b>	<b>C<sub>o,Ni</sub></b> <b>(mg/L)</b>	<b>q<sub>den,Ni</sub></b> <b>(mg/g)</b>	<b>r<sub>ad,Ni</sub></b> <b>(mg/g.dak)</b>	<b>%Ni(II)</b> <b>Giderim</b>	<b>q<sub>den,Cr</sub></b> <b>(mg/g)</b>	<b>%Cr(VI)</b> <b>Giderim</b>	<b>q<sub>den,top</sub></b> <b>(mg/g)</b>	<b>% Top</b> <b>Giderim</b>
0,0	53,0	14,3	0,352	26,9	0,0	0,0	14,3	26,9

0,0	104,3	16,0	0,393	15,3	0,0	0,0	16,0	15,3
0,0	207,3	18,0	0,411	8,7	0,0	0,0	18,0	8,7
51,0	50,8	18,3	0,401	35,9	4,8	9,4	23,1	22,7
50,1	100,5	24,1	0,436	24,0	4,2	8,5	28,3	18,8
50,7	200,9	30,3	0,468	15,1	3,6	7,1	33,9	13,5
100,3	49,3	18,9	0,430	38,3	7,1	7,1	26,0	17,4
100,1	100,2	25,1	0,466	25,1	6,4	6,4	31,6	15,8
100,7	200,8	31,7	0,508	15,8	5,4	5,4	37,1	12,3
200,1	51,2	20,0	0,690	39,1	9,5	4,7	29,5	11,7
200,5	100,6	26,6	0,765	26,5	8,5	4,3	35,2	11,7
200,8	200,3	33,6	0,822	16,8	7,2	3,6	40,8	10,2

**5.5.1.11. Nikel(II) İyonu için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 6) Sabit Tutulan Her Bir Farklı Krom(VI) İyon Derişiminde Nikel(II) Adsorpsiyon İzotermelerinin Elde Edilmesi ve Sabit Tutulan Her Bir Farklı Krom(VI) İyon Derişimi için, Krom(VI) Adsorpsiyon Dengesindeki Değişimin İncelenmesi**

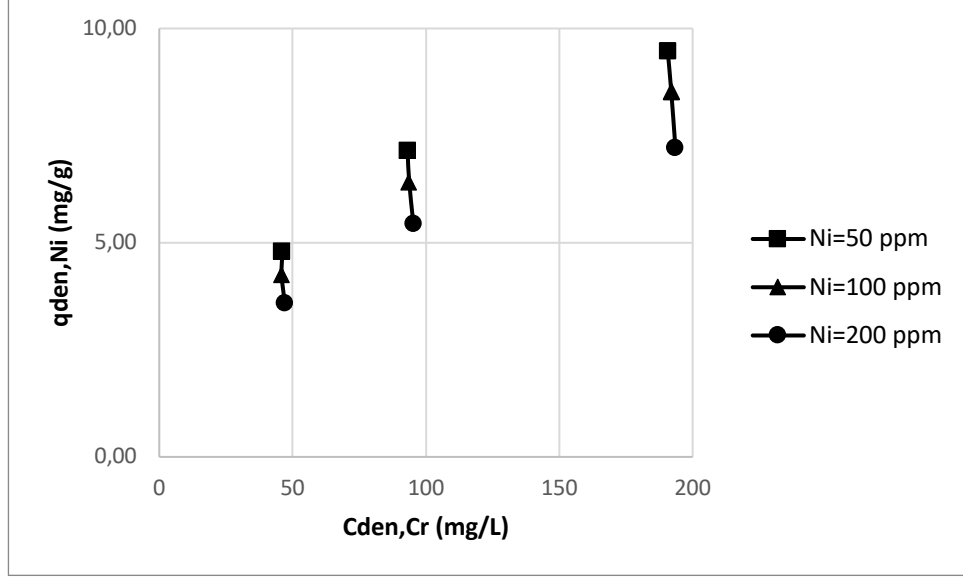
Farklı düzeylerde sabit krom(VI) derişimleri kullanılarak yapılan deneylerde, adsorpsiyon sonunda farklı derişimlerde nikel(II) iyonunun sonradan eklenmesi suretiyle elde edilen denge durumunda birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan nikel(II) miktarı ( $q_{den}$ ) ile dengede adsorplanmadan kalan nikel(II) derişimleri ( $C_{den}$ ) arasındaki ilişkiyi gösteren grafik, Şekil 5.15'te sunulmuştur. Bu grafikten de anlaşıldığı üzere, başlangıçta çözelti içerisinde mevcut bulunan krom(VI) derişimindeki artışın, sonradan farklı derişimlerde eklenmiş olan nikel(II) miktarını, adsorpsiyonun denge durumunda arttırdığı tespit edilmiştir.





**Şekil 5.15.** Sabit tutulan Her bir farklı krom(VI) iyon derişiminde tekli krom(VI) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde adsorpsiyon ortamına farklı derişimlerde ardışık eklenen nikel(II) iyonlarının adsorpsiyonunda elde edilen nikel(II) adsorpsiyon izotermi

pH 6'da sabit tutulan her bir farklı krom(VI) iyon derişiminde tekli krom(VI) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde adsorpsiyon ortamına farklı derişimlerde ardışık eklenen nikel(II) iyonlarının krom(VI) adsorpsiyon dengesine etkisi şekil 5.16'da sunulmuştur. Şekilden her bir sabit krom(VI) iyon derişiminde ardışık eklenen nikel(II) iyon derişimindeki artışın krom(VI) adsorpsiyon dengesini negatif yönde değiştirdiği ve dengede birim adsorbent başına adsorplanan krom(VI) iyon miktarını azalttığı gözlenmektedir.



**Şekil 5.16.** Sabit tutulan her bir farklı krom(VI) iyon derişiminde tekli krom(VI) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde adsorpsiyon ortamına farklı derişimlerde ardışık eklenen nikel(II) iyonlarının krom(VI) adsorpsiyon dengesine etkisi (pH=2, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm)

#### 5.5.1.12. Nikel(II) İyonu için Elde Edilen En Uygun Çalışma pH'ında (pH 6) Nikel(II)+Krom(VI) İyonlarının Ardışık Adsorpsiyonunun Denge Modellemesi ve Denge Model Sabitlerinin Bulunması

Nikel(II) iyonları için saptanan en uygun çalışma pH'ı 6'da kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine önce tekli krom(VI) iyonlarının adsorplandığı, sonra adsorpsiyon dengesinde ortama nikel(II) iyonlarının eklenmesiyle gerçekleştirilen nikel(II) ve krom(VI) iyon karışımlarının ardışık adsorpsiyonunda, krom(VI) iyonlarının karışımdaki nikel(II) iyonlarının adsorpsiyonunu arttırdığı (sinerjistik etki), nikel(II) iyonlarının ise krom(VI) iyon adsorpsiyonunu azalttığı (antagonistik etki) gözlenmiştir. Bu bağlamda, krom(VI) iyonları için antagonistik etkileşime göre türetilen Langmuir Modeli (Eşitlik 3.16) ve nikel(II) iyonları için sinerjistik etkileşime göre türetilen Langmuir Modeli (Eşitlik 3.13) kullanılarak ikili karışımın adsorpsiyon denge modellemesi yapılmış ve denge model sabitleri nonlineer regresyon yöntemiyle belirlenmiştir. Bulunan denge model sabitleri ve % ortalama hata değerleri Çizelge 5.21'de sunulmuştur. Çizelgede verilen % ortalama hata değerlerine bakıldığında sinerjistik ve antagonistik etkileşimler için türetilen Langmuir modellerinin nikel(II)+krom(VI) iyon karışımlarının ardışık

adsorpsiyonunda hem krom(VI) hem de nikel(II) iyonlarının adsorpsiyon dengesini oldukça iyi tanımladığı söylenebilir.

**Çizelge 5.21.** Nikel(II) iyonları için saptanan en uygun çalışma pH'ı 6'da kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine önce tekli krom(VI) iyonlarının adsorplandığı, sonra adsorpsiyon dengesinde ortama nikel(II) iyonlarının eklenmesiyle gerçekleştirilen nikel(II) ve krom(VI) iyon karışımlarının ardışık adsorpsiyonunda kullanılan antagonistik ve sinerjistik Langmuir modellerinden elde edilen denge model sabitleri ve % ortalama hata değerleri (pH=6, T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm)

<b>Tekli krom(VI) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde ortama nikel(II) iyonlarının eklenmesiyle gerçekleştirilen nikel(II) ve krom(VI) iyon karışımlarının ardışık adsorpsiyonunda nikel(II) iyonları için kullanılan sinerjistik Langmuir Modeli</b>		<b>Tekli krom(VI) iyonlarının adsorpsiyon dengesinde ortama nikel(II) iyonlarının eklenmesiyle gerçekleştirilen nikel(II) ve krom(VI) iyon karışımlarının ardışık adsorpsiyonunda krom(VI) iyonları için kullanılan antagonistik Langmuir Modeli</b>	
Nikel(II)	Krom(VI)	Krom(VI)	Nikel(II)
K <sub>1</sub> : 0,513	K <sub>2</sub> : 2,136	η <sub>1</sub> : 23,670	η <sub>2</sub> : 21,473
%Ort. Hata: 14,9		%Ort. Hata: 17,8	

## 6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu tez kapsamında kesikli sistemde kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının tekli adsorpsiyonu ve ikili karışımlarının eşanlı ve ardışık adsorpsiyonları incelenmiştir.

Tez çalışmasının ilk kısmında her bir metal iyonunun tekli adsorpsiyonu, başlangıç pH'ının, adsorbent tanecik boyut aralığının ve başlangıç metal iyon derişiminin fonksiyonu olarak incelenmiştir. Çalışmaların daha sonraki aşamasında krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının eşanlı ve ardışık adsorpsiyonları gerçekleştirilmiştir. Eşanlı adsorpsiyonda her bir metal iyonu için belirlenen en uygun pH değerinde karışımdaki birinci metal iyonunun sabit başlangıç iyon derişiminde diğer metal iyonunun başlangıç derişimi değiştirilerek adsorbentin metal iyon seçiciliği ve karışımdaki bileşenlerin birbirlerinin adsorpsiyon hız ve kapasitelerini nasıl etkiledikleri araştırılmıştır. Ardışık adsorpsiyonda ise her bir metal iyonu için belirlenen en uygun pH değerinde, karışımdaki birinci metal iyonunun aynı başlangıç derişiminde tekli adsorpsiyonu dengeye ulaştığında, ikinci metal iyonunun farklı başlangıç derişimleri çözeltiye eklenerek bu durumda adsorbentin yine metal iyon seçiciliği ve karışım içindeki bileşenlerin birbirlerinin adsorpsiyon hız ve kapasitelerini nasıl etkiledikleri incelenmiştir.

Çalışmaların son kısmında ise her bir tekli ve ikili adsorpsiyon sistemi için adsorpsiyon dengesi matematiksel olarak tanımlanmış ve model sabitleri bulunmuştur.

Başlangıç pH'ının adsorpsiyon hız ve kapasitesi üzerine etkileri incelendiğinde, krom(VI) iyonu için en yüksek adsorpsiyon kapasitesine pH 2'de ulaşıldığı gözlenmiştir. Sulu çözeltilerde, kromun altı değerlikli formu olan krom(VI), kromik asit ( $H_2Cr_2O_7$ ) ve bu asidin tuzlarından biri olan dikromat ( $Cr_2O_7^{2-}$ ) şeklinde bulunmaktadır. pH 1-6 arasındaki asidik koşullarda,  $Cr_2O_7^{2-}$  iyonları daha baskındır. Ortamın asitliği arttıkça,  $H^+$  iyonları biyokütlenin negatif yüklü adsorpsiyon merkezlerine bağlanarak biyokütleyi pozitif yüklü hale getirir. Bu nedenle, ortamda bulunan krom(VI) iyonları ( $Cr_2O_7^{2-}$ ) biyokütlenin pozitif yüklü adsorpsiyon merkezlerine kolayca adsorplanır. pH arttıkça,  $OH^-$  iyonlarının artması, krom(VI) iyonlarının adsorpsiyonunu engeller ve toplam krom(VI)

adsorpsiyonunu azaltır [66]. pH 2'de kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine en yüksek krom(VI) adsorpsiyon kapasitesi 64,8 mg/g olarak bulunmuştur.

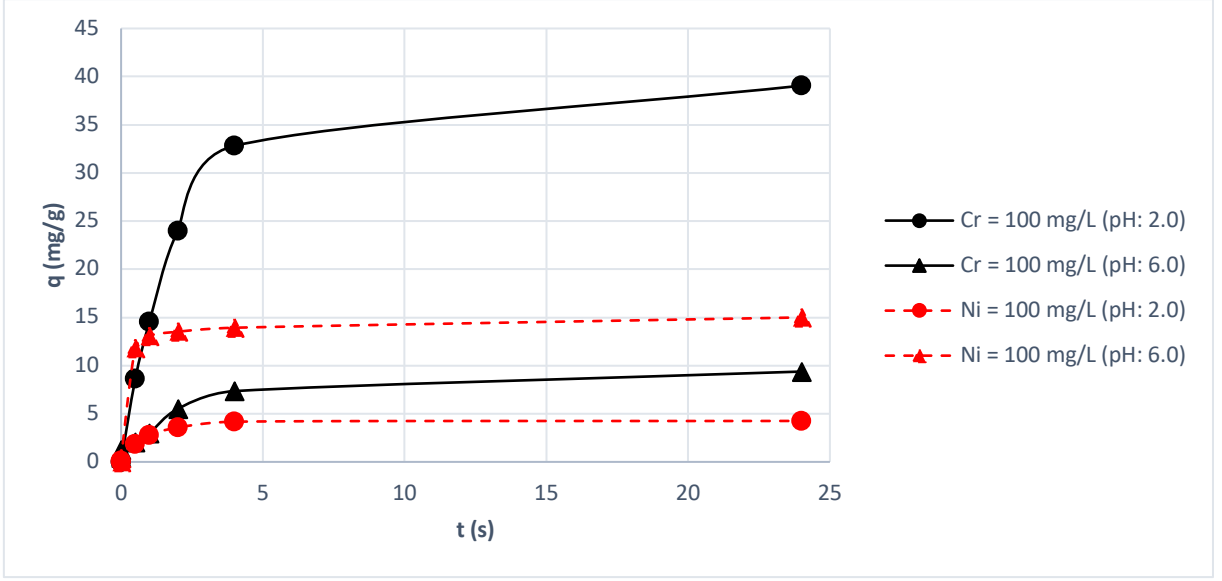
Nikel(II) iyonlarının adsorpsiyonunda başlangıç pH'ının küspenin adsorpsiyon hız ve kapasitesine etkileri araştırıldığında ise, en yüksek adsorpsiyon kapasitesine pH 6'da ulaşıldığı gözlenmiştir. Bu durum çok düşük pH değerlerinde, adsorpsiyon ortamında artan H<sup>+</sup> iyonlarının nikel(II) gibi katyonik metal iyonlarıyla rekabet etmesi ve bunun nikel(II) adsorpsiyonunu azaltmasıyla açıklanabilir. Yüksek pH'larda ise, pozitif yüklü nikel(II) iyonları negatif yüklü adsorbent yüzeyine elektrostatik olarak bağlanarak metal iyonu adsorpsiyonu artar. Ancak pH'ın daha da artmasıyla nikel(II) iyonları hidroksitleri şeklinde çökeler [67]. pH 6'da kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine en yüksek nikel(II) adsorpsiyon kapasitesi 18,6 mg/g olarak saptanmıştır.

En uygun tanecik boyut aralığı olarak saptanan 710-850 µm boyut aralığında, kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine tekli krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının hem pH 2'deki hem de pH 6'daki adsorpsiyonunda başlangıç metal iyon derişiminin adsorpsiyon hızı ve kapasitesi üzerine etkileri incelendiğinde, her iki metal iyonu için de başlangıç derişiminin 250 mg/L'ye artmasıyla adsorpsiyon hız ve kapasitelerinin arttığı gözlenmiştir. pH 2 ve 6'da farklı başlangıç metal iyon derişimlerinde her bir metal iyonu için dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan metal iyon miktarları ve % giderim değerleri, Çizelge 6.1'de karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. Çizelgeden krom(VI) iyonları için en uygun çalışma pH değeri olarak tespit edilen 2'de küspe adsorbentin en yüksek krom(VI) adsorpsiyon kapasitesi 64,8 mg/g saptanmışken, nikel(II) iyonları için en uygun çalışma pH değeri olarak tespit edilen 6'da küspe adsorbentin en yüksek nikel(II) adsorpsiyon kapasitesi 18,6 mg/g bulunmuştur. Yine aynı çizelgeden, pH 6'da küspe adsorbentin en yüksek krom(VI) adsorpsiyon kapasitesinin 14,1 mg/g'a, pH 2'de küspe adsorbentin en yüksek nikel(II) adsorpsiyon kapasitesinin 6,0 mg/g'a düştüğü de görülmektedir. Deneysel sonuçlar pH 2'de küspe adsorbentin tekli krom(VI) adsorpsiyon kapasitesinin tekli nikel(II) adsorpsiyon kapasitesinden 3,5 katı kadar yüksek olduğunu göstermektedir.

**Çizelge 6.1.** pH 2 ve 6'da, kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine tekli krom(VI) ve nikel(II) adsorpsiyonunda farklı başlangıç krom(VI) ve nikel(II) derişimlerinde dengede elde edilen birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) ve nikel(II) miktarları ve % giderim değerleri (T=25°C, X=1,0 g/L, K.H=120 rpm)

Krom(VI)						Nikel(II)					
pH: 2			pH: 6			pH: 2			pH: 6		
C <sub>o</sub> (mg/L)	q <sub>den</sub> (mg/g)	% Giderim	C <sub>o</sub> (mg/L)	q <sub>den</sub> (mg/g)	% Giderim	C <sub>o</sub> (mg/L)	q <sub>den</sub> (mg/g)	% Giderim	C <sub>o</sub> (mg/L)	q <sub>den</sub> (mg/g)	% Giderim
25,2	15,0	59,6	26,3	2,6	9,9	25,6	1,6	6,1	27,5	12,6	45,9
49,8	29,0	58,2	51,1	5,0	9,8	50,7	2,9	5,7	53,0	14,3	26,9
99,2	39,2	39,5	99,7	9,4	9,4	100,1	4,4	4,3	104,3	15,2	14,6
150,0	53,4	35,6	151,3	12,2	8,1	151,3	5,4	3,6	154,0	16,5	10,7
199,7	62,3	31,2	199,1	13,8	6,9	200,4	5,7	2,9	207,3	18,0	8,7
250,8	64,8	25,9	251,3	14,1	5,6	250,0	6,0	2,4	255,5	18,6	7,3

pH 2 ve 6'da krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine tekli adsorpsiyonunda 100 mg/L başlangıç krom(VI) ve 100 mg/L başlangıç nikel(II) derişimlerinde elde edilen birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) ve nikel(II) miktarlarının zamanla değişim eğrileri, Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Şekilden nikel(II) adsorpsiyonunun krom(VI) adsorpsiyonuna göre daha hızlı gerçekleştiği, adsorpsiyonun dengeye ulaşma süresinin nikel(II) iyonları için yaklaşık 4 saat, krom(VI) iyonları için ise yaklaşık 24 saat olduğu gözlenmektedir. Yine aynı şekilden nikel(II) iyonlarının adsorpsiyonunun adsorbent yüzeyinde gerçekleşirken, krom(VI) iyonlarının adsorpsiyonunda iç difüzyon etkilerinin de önemli olduğu görülmektedir.



**Şekil 6.1.** pH 2 ve 6'da krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine tekli adsorpsiyonunda 100 mg/L başlangıç krom(VI) ve 100 mg/L başlangıç nikel(II) derişimlerinde elde edilen birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan krom(VI) ve nikel(II) miktarlarının zamanla değişim eğrileri

Langmuir ve Freundlich denge modelleri, adsorpsiyon sürecini analiz etmek ve adsorpsiyon izotermlerini açıklamak için yaygın olarak kullanılan matematiksel modellerdir. Kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının tekli adsorpsiyonunda, adsorpsiyon dengesinin matematiksel tanımlanmasında kullanılan bu modellere ait pH 2 ve 6'da hem krom(VI) hem de nikel(II) için bulunan model sabitleri Çizelge 6.2'de sunulmuştur. Çizelgeden Langmuir modelinin her iki metal iyonunun adsorpsiyonunu daha iyi tanımladığı görülmektedir. Adsorbentin 80,6 mg/g olarak tayin edilen en yüksek adsorpsiyon kapasitesini pH 2'de krom(VI) iyonlarının adsorpsiyonunda gösterdiği saptanmıştır.

**Çizelge 6.2.** pH 2 ve 6'da, kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının adsorpsiyonunda Langmuir ve Freundlich modellerinden elde edilen denge sabitleri (T=25°C, X=1,0 g/L, K.H.=120 rpm)

Krom(VI)			
pH: 2		pH: 6	
Langmuir Modeli	Freundlich Modeli	Langmuir Modeli	Freundlich Modeli

Q°	b	R <sup>2</sup>	K <sub>F</sub>	n	R <sup>2</sup>	Q°	b	R <sup>2</sup>	K <sub>F</sub>	n	R <sup>2</sup>
80,6	0,021	0,998	5,070	1,981	0,969	19,3	0,052	0,845	1,228	1,935	0,835
<b>Nikel(II)</b>											
<b>pH: 2</b>						<b>pH: 6</b>					
<b>Langmuir Modeli</b>			<b>Freundlich Modeli</b>			<b>Langmuir Modeli</b>			<b>Freundlich Modeli</b>		
Q°	b	R <sup>2</sup>	K <sub>F</sub>	n	R <sup>2</sup>	Q°	b	R <sup>2</sup>	K <sub>F</sub>	n	R <sup>2</sup>
7,1	0,271	0,872	1,420	5,03	0,859	18,8	0,065	0,998	1,510	2,105	0,935

pH 2 ve 6'da kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının eşanlı adsorpsiyonunda sabit tutulan birinci metal iyon derişiminde ikinci metal iyon derişiminin değiştirilmesiyle karışım içindeki her bir metal iyonu için elde edilen dengede birim adsorbent kütle başına adsorplanan metal iyon miktarları Çizelge 6.3'te, karışım içindeki her bir metal iyonuna ait verim değerleri ise Şekil 6.2 ve 6.3'te sütun grafiklerle karşılaştırılmıştır. Çizelgeden, çalışılan pH 2 ve 6 değerlerinde ve tüm başlangıç krom(VI) iyon derişimlerinde nikel(II) iyonlarının varlığının ve nikel(II) iyon derişimindeki artışın küspe adsorbente artan derişimlerdeki krom(VI) adsorpsiyonunu önemli derecede azalttığı görülmektedir. Krom(VI) iyonlarının en yüksek adsorplandığı pH 2'de, ortamda nikel(II) iyonları bulunmadığı durumda, 250 mg/L başlangıç krom(VI) derişiminde küspe adsorbentin en yüksek krom(VI) adsorpsiyon kapasitesi 64,8 mg/g iken, yine aynı krom(VI) başlangıç derişiminde ortamda 250 mg/L nikel(II) iyonu bulunduğunda bu değer yaklaşık 5 katı azalarak 11,9 mg/g'a düşmüştür. Yine aynı çizelgeden pH 2'de ortamda krom(VI) iyonları bulunmadığı durumda, 250 mg/L başlangıç nikel(II) iyon derişiminde küspe adsorbentin en yüksek nikel(II) adsorpsiyon kapasitesi 6,0 mg/g iken, yine aynı başlangıç nikel(II) iyon derişiminde ortamda 250 mg/L krom(VI) iyonu bulunduğunda bu değer yaklaşık 3 katı artarak 18,5 mg/g'a çıkmıştır.

Nikel(II) iyonlarının en yüksek adsorplandığı pH 6'da krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının eşanlı adsorpsiyonunda da benzer sonuçlarla karşılaşılmış ve tekli krom(VI) adsorpsiyonunda elde edilen en yüksek 14,1 mg/g adsorpsiyon



kapasitesi 250 mg/L nikel(II) varlığında 9,2 mg/g'a düşmüştür. Aynı şekilde tekli nikel(II) adsorpsiyonunda elde edilen en yüksek 18,6 mg/g adsorpsiyon kapasitesi 250 mg/L krom(VI) varlığında 42,0 mg/g'a çıkmıştır.

Çizelge 6.3'ten başlangıç pH'ının karışım içindeki her bir metal iyonunun adsorpsiyonuna etkisi incelendiğinde, hem pH 2'de hem de nikel(II) iyonlarının en iyi adsorplandığı pH 6'da karışım içindeki nikel(II) iyonlarının adsorpsiyon kapasitesinin tekli nikel(II) adsorpsiyon kapasitesine göre 2,5-3 katı arttığı gözlenmektedir. Yine aynı çizelgeden karışım içindeki krom(VI) iyonlarının adsorpsiyonunda ise pH 2'de krom(VI) adsorpsiyon kapasitesinin tekli krom(VI) adsorpsiyon kapasitesine göre 5 katı azaldığı, pH 6'da ise krom(VI) adsorpsiyon kapasitesindeki azalmanın tekli krom(VI) adsorpsiyon kapasitesine göre 1,5 katı olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak çalışılan her iki pH değerinde de nikel(II) iyon varlığının krom(VI) adsorpsiyonunu antagonistik, krom(VI) iyon varlığının ise nikel(II) iyon adsorpsiyonunu sinerjistik olarak etkilediği söylenebilir. Karışım içindeki krom(VI) iyonlarının adsorpsiyonundaki azalma, nikel(II) iyonlarının adsorbent yüzeyine daha hızlı adsorpsiyonuyla nikel(II) iyonlarının adsorbentin yüzeyindeki aktif bölgeleri tutarak krom(VI) iyonlarının adsorbent yüzeyine ve iç bölgelere difüzyonunu engellemesiyle açıklanabilir. Ayrıca karışım çözeltisinde düşük pH'larda krom(VI) iyonlarının kromat anyonları şeklinde bulunması ve bu anyonların adsorbent yüzeyine adsorplandığında negatif yük oluşturarak katyonik nikel(II) iyonlarıyla elektrostatik etkileşimiyle nikel(II) iyonlarının adsorpsiyonunu arttırdığı da söylenebilir.

pH 2 ve 6'da kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının ardışık adsorpsiyonunda, sabit tutulan birinci metal iyon derişiminde adsorpsiyon dengesine ulaşıldığında adsorpsiyon ortamına eklenen ikinci metal iyonunun derişiminin değiştirilmesiyle karışım içindeki her bir metal iyonu için elde edilen dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan metal iyon miktarları yine Çizelge 6.3'te karşılaştırılmıştır. Çizelgeden, çalışılan pH 2 ve 6 değerlerinde ve tüm başlangıç krom(VI) iyon derişimlerinde önce eklenen nikel(II) iyonlarının varlığının ve nikel(II) iyon derişimindeki artışın küspe adsorbente artan derişimlerde ardışık eklenen krom(VI) adsorpsiyonunu eşanlı krom(VI) iyon

adsorpsiyonundan daha da çok azalttığı görülmektedir. Krom(VI) iyonlarının en yüksek adsorplandığı pH 2'de, ortamda nikel(II) iyonları bulunmadığı durumda, 200 mg/L başlangıç krom(VI) derişiminde küspe adsorbentin en yüksek krom(VI) adsorpsiyon kapasitesi 62,3 mg/g iken, adsorpsiyon ortamında önce 200 mg/L nikel(II) iyonlarının adsorpsiyonu gerçekleştirilip dengeye ulaşıldığında ortama 200 mg/L krom(VI) eklendiğinde küспенin krom(VI) adsorpsiyon kapasitesi yaklaşık 7,5 kat azalarak 8,4 mg/g'a düşmüştür. Yine aynı çizelgeden pH 2'de ortama krom(VI) iyonları ardışık eklenmeden, tekli 200 mg/L başlangıç nikel(II) iyon derişiminde küspe adsorbentin en yüksek denge nikel(II) adsorpsiyon kapasitesi 5,7 mg/g iken, ortama 200 mg/L krom(VI) eklendiğinde nikel(II) iyonlarının denge adsorpsiyon kapasite değeri artarak 15,2 mg/g'a ulaştığı görülmektedir.

Yine aynı çizelgeden krom(VI) iyonlarının en yüksek adsorplandığı pH 2'de, bu sefer ortamda krom(VI) iyonları bulunmadığı durumda, 200 mg/L başlangıç nikel(II) derişiminde küspe adsorbentin en yüksek nikel(II) adsorpsiyon kapasitesi 5,7 mg/g iken, adsorpsiyon ortamında önce 200 mg/L krom(VI) adsorpsiyonu gerçekleştirilip dengeye ulaşıldığında ortama 200 mg/L nikel(II) eklendiğinde küспенin nikel(II) adsorpsiyon kapasitesi yaklaşık 2 kat artarak 10,9 mg/g'a çıkmıştır. Yine aynı çizelgeden pH 2'de ortama nikel(II) iyonları ardışık eklenmeden, tekli 200 mg/L başlangıç krom(VI) iyon derişiminde küspe adsorbentin denge en yüksek krom(VI) adsorpsiyon kapasitesi 62,3 mg/g iken, ortama 200 mg/L nikel(II) eklendiğinde krom(VI) iyonlarının denge adsorpsiyon kapasite değerinin azalarak 9,3 mg/g'a düştüğü görülmektedir.

Nikel(II) iyonlarının en iyi adsorplandığı pH 6'da nikel(II) iyonlarının tekli adsorpsiyon kapasitesi pH 2'deki tekli adsorpsiyon kapasitesinden oldukça yüksek olup, ortama ardışık krom(VI) iyonlarının eklenmesiyle karışım içindeki nikel(II) adsorpsiyon kapasitesi pH 2'deki karışım içindeki nikel(II) adsorpsiyon kapasitesinden daha yüksek bulunmuştur. pH 2'de 200 mg/L nikel(II) + 200 mg/L krom(VI) iyon karışımında nikel(II) adsorpsiyon kapasitesi 15,2 mg/g iken pH 6'da aynı karışımında nikel(II) adsorpsiyon kapasitesi 37,3 mg/g'a çıkmıştır. pH 6'da da karışım içindeki krom(VI) adsorpsiyonu nikel(II) iyonlarının varlığında ve nikel(II) iyon derişiminin artmasıyla azalmıştır. pH 2'de 200 mg/L nikel(II) + 200 mg/L

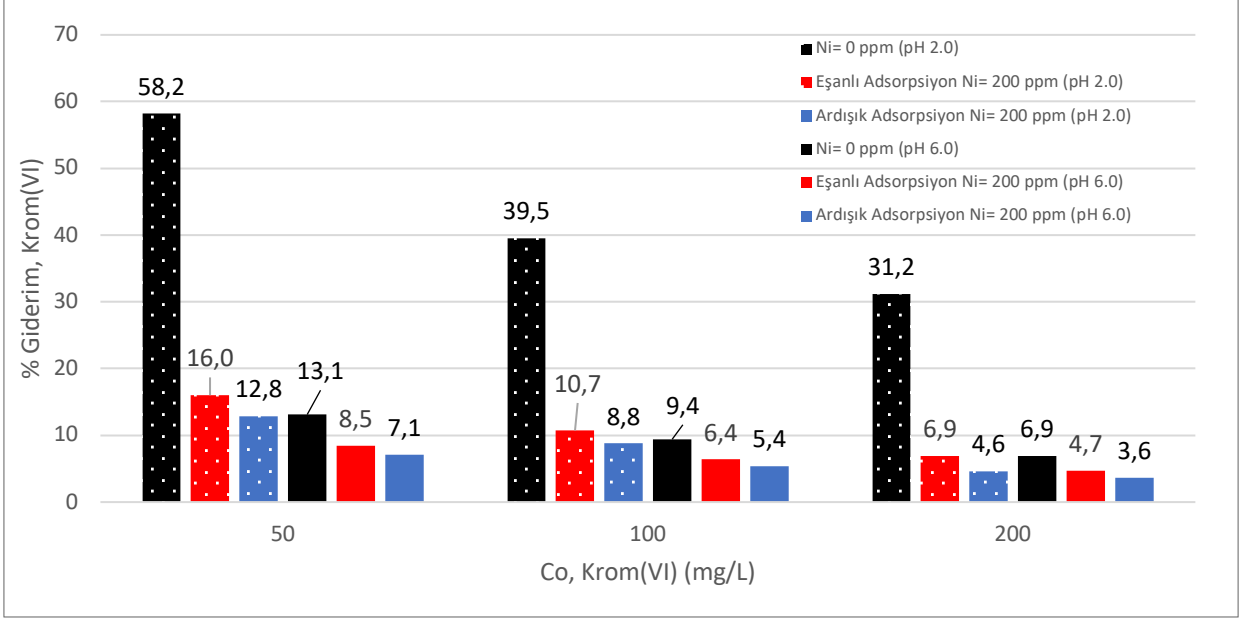
krom(VI) iyon karışımında krom(VI) adsorpsiyon kapasitesi 8,4 mg/g iken pH 6'da aynı karışımda krom(VI) adsorpsiyon kapasitesi 6,4 mg/g'a düşmüştür.

Krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının ardışık adsorpsiyonunda önce eklenen metal iyonunun karışımdaki her bir metal iyonunun adsorpsiyon kapasitesine etkisi yine aynı çizelgen görülmektedir. Deneysel sonuçlar önce eklenen metal iyonunun tekli adsorpsiyonuna bağlı olarak karışım içinde de kendi adsorpsiyonunu az da olsa artırdığını göstermiştir.

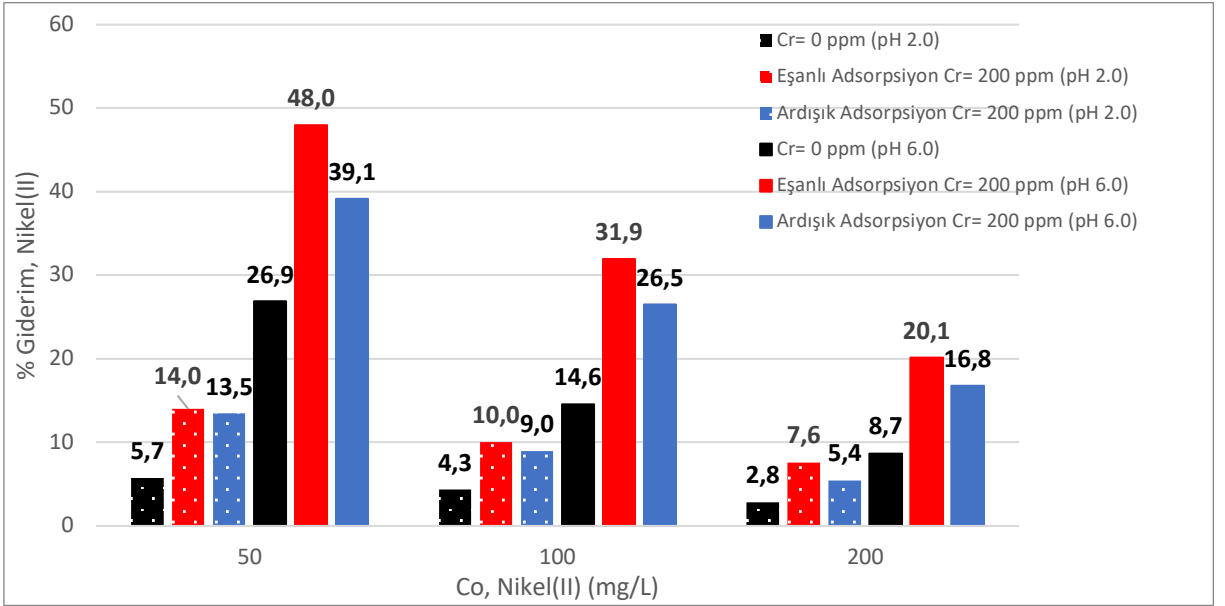
**Çizelge 6.3.** pH 2 ve 6'da kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentine krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının tekli adsorpsiyonunda her bir metal iyonu için başlangıç metal iyon derişiminin değişimiyle elde edilen, krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının eşanlı adsorpsiyonunda sabit tutulan birinci metal iyon derişiminde ikinci metal iyon derişiminin değiştirilmesiyle karışım içindeki her bir metal iyonu için elde edilen ve krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının ardışık adsorpsiyonunda karışımındaki birinci metal iyonunun aynı başlangıç iyon derişimindeki dengede, ikinci metal iyonunun farklı derişimlerinde karışım içindeki her bir metal iyonu için elde edilen dengede birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan metal iyon miktarlarının karşılaştırılması

Tekli Adsorpsiyon				Eşanlı Adsorpsiyon										Ardışık Adsorpsiyon										
pH 2				pH 2					pH 6					pH 2										
Krom(VI)		Nikel(II)		Krom(VI)		Nikel(II)			Krom(VI)		Nikel(II)			Önce Nikel(II) Ardışık Krom(VI)				Önce Krom(VI) Ardışık Krom(VI)						
C <sub>o</sub> (mg/L).cr	q <sub>den</sub> (mg/g).cr	C <sub>o</sub> (mg/L).ni	q <sub>den</sub> (mg/g).ni	C <sub>o</sub> (mg/L).cr	C <sub>o</sub> (mg/L).ni	q <sub>den</sub> (mg/g).cr	C <sub>o</sub> (mg/L).ni	C <sub>o</sub> (mg/L).cr	q <sub>den</sub> (mg/g).ni	C <sub>o</sub> (mg/L).cr	C <sub>o</sub> (mg/L).ni	q <sub>den</sub> (mg/g).cr	C <sub>o</sub> (mg/L).ni	q <sub>den</sub> (mg/g).ni	C <sub>o</sub> (mg/L).cr	q <sub>den</sub> (mg/g).cr	C <sub>o</sub> (mg/L).ni	q <sub>den</sub> (mg/g).ni	C <sub>o</sub> (mg/L).cr	q <sub>den</sub> (mg/g).cr	C <sub>o</sub> (mg/L).ni	q <sub>den</sub> (mg/g).ni		
25.2	15.0	25.6	1.6	24.4	24.7	11.6	24.7	24.4	2.1	25.0	25.2	3.0	25.2	25.0	14.2	50.2	3.5	50.1	11.9	51.3	13.2	50.6	3.2	
49.8	29.0	50.7	2.9	50.7	25.1	19.3	49.5	24.4	3.7	51.9	25.7	5.9	49.2	24.7	21.0	50.4	5.6	99.2	16.9	50.0	10.8	98.1	4.4	
99.2	39.2	100.1	4.4	103.1	24.8	28.0	100.2	25.1	5.7	102.8	25.7	8.9	100.9	25.9	27.9	50.1	7.3	200.8	19.0	51.1	6.6	199.2	5.6	
150.0	53.4	151.3	5.4	150.4	24.6	36.3	150.9	25.4	7.3	150.8	25.5	11.5	151.8	25.2	35.5									
199.7	62.3	200.4	5.7	201.9	25.3	39.0	200.6	25.1	8.5	200.1	25.2	13.0	200.3	24.7	35.2	100.3	4.8	50.9	9.8	100.6	18.6	50.6	5.2	
250.8	64.8	250.0	6.0	250.9	25.1	39.4	250.5	25.1	8.7	251.6	25.1	13.3	250.3	25.9	35.9	100.2	7.5	98.1	13.8	100.8	15.1	100.3	6.9	
																99.8	10.0	198.4	15.1	100.1	8.8	199.8	8.2	
				24.4	49.5	9.5	25.1	50.7	2.5	24.7	49.2	2.8	25.7	51.9	15.1									
				50.9	50.9	16.0	50.9	50.9	4.4	50.8	50.2	5.6	50.2	50.8	21.7	201.9	9.3	51.7	6.0	200.8	20.9	50.1	6.7	
				100.8	50.4	22.8	100.6	50.6	6.5	100.2	50.4	8.4	100.1	50.3	28.9	199.4	10.9	100.8	8.0	200.1	16.7	102.8	9.2	
				26.3	3.2	27.5	12.6	151.0	50.4	29.0	150.8	50.8	8.0	151.9	50.0	34.6	199.0	15.2	200.6	8.4	200.9	9.3	200.4	10.9
				51.1	6.2	53.0	14.3	200.9	50.7	31.0	200.4	50.6	9.3	200.9	50.1	12.3								
				99.7	9.4	104.3	15.2	250.8	49.8	31.1	250.6	50.6	9.7	251.6	50.9	12.6								
				151.3	12.2	154.0	16.5																	
				199.1	13.8	207.3	18.0	25.1	100.2	7.7	24.8	103.1	3.0	25.9	100.9	2.6	25.7	102.8	15.7					
				251.3	14.1	255.5	18.6	50.6	100.6	13.2	50.4	100.8	5.0	50.3	100.1	5.0	50.4	100.2	22.7					
				100.7	100.7	18.5	100.7	100.7	7.5	100.3	100.7	7.6	100.7	100.3	30.1	50.2	20.1	50.2	4.2	51.0	4.8	50.8	18.3	
				150.8	100.3	23.2	150.2	100.3	9.4	150.6	100.3	9.8	150.2	100.2	36.2	49.2	21.0	99.5	6.3	50.1	4.2	100.5	24.1	
				200.5	100.8	24.7	201.2	101.1	10.9	200.8	100.4	11.1	200.6	100.2	38.0	50.1	22.3	200.9	8.4	50.7	3.6	200.9	30.3	
				250.4	100.5	24.9	252.0	100.3	11.4	250.7	100.1	11.3	250.9	100.4	38.7									
				25.4	150.9	5.9	24.6	150.4	3.8	25.2	151.8	2.3	25.5	150.8	16.0	100.8	26.8	50.1	3.8	100.3	7.1	49.3	18.9	
				50.8	150.8	10.3	50.4	151.0	6.0	50.0	150.1	4.6	50.0	151.9	23.3	100.4	27.9	100.0	5.7	100.1	6.4	100.2	25.1	
				100.3	150.2	14.1	100.3	150.8	8.5	100.2	150.2	6.9	100.3	150.6	31.0	98.4	29.6	200.9	7.5	100.7	5.4	200.8	31.7	
				150.1	149.9	17.4	149.9	150.1	10.7	150.1	150.9	9.0	150.9	150.1	37.3									
				203.8	151.0	18.4	201.0	149.0	12.4	200.8	150.4	10.1	200.6	150.8	39.1	201.7	33.7	50.5	3.2	200.1	9.5	51.2	20.0	
				252.8	150.3	18.7	250.4	153.1	13.0	250.3	150.7	10.3	250.8	150.0	39.9	199.7	35.2	100.0	4.8	200.5	8.5	100.6	26.6	
																200.6	37.3	200.1	6.4	200.8	7.2	200.3	33.6	
				25.1	200.6	4.6	25.3	201.9	4.3	24.7	200.3	2.2	25.2	200.1	16.8									
				50.6	200.4	8.0	50.7	200.9	7.0	50.6	200.8	4.2	50.1	200.9	24.0									
				101.1	201.2	10.7	100.8	200.5	10.0	100.2	200.6	6.4	100.4	200.8	31.9									
				149.0	201.0	13.1	151.0	203.8	13.1	150.8	200.6	8.3	150.4	200.8	38.3									
				200.0	200.1	13.7	200.1	200.0	15.2	200.3	200.3	9.4	200.3	200.3	40.2									
				251.6	200.7	14.0	250.2	199.3	15.9	250.4	200.9	9.6	250.9	200.0	41.0									
				25.1	250.5	3.8	25.1	250.9	5.0	25.9	250.3	2.1	25.1	251.6	17.4									
				50.6	250.6	7.0	49.8	250.8	8.0	50.4	250.9	4.0	50.9	251.6	24.8									
				100.3	252.0	9.2	100.5	250.4	12.0	100.4	250.9	6.2	100.1	250.7	33.0									
				153.1	250.4	11.1	150.3	252.8	15.1	150.0	250.8	8.0	150.7	250.3	39.6									
				199.3	250.2	11.6	200.7	251.6	17.7	200.0	250.9	9.0	200.9	250.4	41.2									
				253.1	251.9	11.9	251.9	253.1	18.5	250.4	250.9	9.2	250.9	250.4	42.0									

pH 2 ve 6'da nikel(II) içermeyen ve 200 mg/L nikel(II) içeren adsorpsiyon ortamında farklı krom(VI) iyon derişimlerinde, tekli, eşanlı ve önce nikel(II) ardından krom(VI) adsorpsiyon çalışmalarında elde edilen % krom(VI) giderim verimleri Şekil 6.2'de ve aynı pH'larda krom(VI) içermeyen ve 200 mg/L krom(VI) içeren adsorpsiyon ortamında farklı nikel(II) iyon derişimlerinde, tekli, eşanlı ve önce krom(VI) ardından nikel(II) adsorpsiyon çalışmalarında elde edilen % nikel(II) giderim verimleri Şekil 6.3'te sütun grafiklerle karşılaştırılmıştır. Her iki şekilden pH 2'deki tekli krom(VI) adsorpsiyonunun, pH 6'da tekli nikel(II) adsorpsiyonunun en yüksek verimlerle gerçekleştiği, krom(VI)+nikel(II) eşanlı adsorpsiyonunda hem pH 2 de hem de pH 6'da karışımdaki nikel(II) adsorpsiyon veriminin önemli derece arttığı, tersine her iki pH değerinde de karışımdaki krom(VI) adsorpsiyonun belirgin olarak azaldığı, yine her iki pH değerinde de önce nikel(II) ya da krom(VI) ardından nikel(II)+krom(VI) adsorpsiyonunda krom(VI) adsorpsiyonun daha da azaldığı, nikel(II) adsorpsiyonundaki artışın ise eşanlıya göre daha az olduğu gözlenmektedir.



**Şekil 6.2.** pH 2 ve 6'da nikel(II) içermeyen ve 200 mg/L nikel(II) içeren adsorpsiyon ortamında farklı krom(VI) iyon derişimlerinde, tekli, eşanlı ve önce nikel(II) ardışık krom(VI) adsorpsiyon çalışmalarında elde edilen % krom(VI) giderim verimlerinin karşılaştırılması



**Şekil 6.3.** pH 2 ve 6'da krom(VI) içermeyen ve 200 mg/L krom(VI) içeren adsorpsiyon ortamında farklı nikel(II) iyon derişimlerinde, tekli, eşanlı ve önce krom(VI) ardışık nikel(II) adsorpsiyon çalışmalarında elde edilen % nikel(II) giderim verimlerinin karşılaştırılması

Ağır metal kirliliği içeren endüstriyel atıksuların ağır metal iyon içeriklerinin azaltılması suyun geri kazanılması ve evre kirliliğinin önlenmesi açısından önemlidir. Bu tür atıksular genel olarak birden fazla metal iyonunu içermektedir. Demir-elik endüstrisi, kaplama endüstrisi atıksuları gibi atıksularda istenmeyen derişimlerde krom(VI) ve nikel(II) iyonları birlikte bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında kurutulmuş şeker pancarı adsorbente nikel(II) ve krom(VI) iyonlarının tekli, eşanlı ve ardışık adsorpsiyonu kesikli sistemde araştırılmıştır. Literatürde çeşitli adsorbentlere tekli metal iyonlarının ve ikili metal iyonlarının eşanlı adsorpsiyon çalışmaları mevcuttur. Bu çalışmada ilk defa olarak küspe adsorbente krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının tekli ve eşanlı adsorpsiyonlarının yanı sıra ardışık adsorpsiyonu da incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda metal iyonunun türünün, metal iyon derişiminin, başlangıç pH'nın ve metal iyonlarının eşanlı ya da ardışık eklenmesinin her bir metal iyonunun adsorpsiyon hız ve kapasitesine ve seçiciliğine etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar krom(VI) iyonlarının nikel(II) iyonlarının varlığındaki adsorpsiyonunun ve seçiciliğinin çalışılan her bir metal iyonunun derişimine bağlı olarak önemli derecede azaldığını, pH 2'de karışımdaki krom(VI) adsorpsiyonunun çok daha fazla azaldığını, pH 6'da ise krom(VI) adsorpsiyonundaki azalmanın daha az olduğunu, krom(VI) iyonlarının karışıma eşanlı ya da ardışık eklenmesinin ise adsorpsiyon verimini çok fazla etkilemediğini göstermiştir. Yine deneysel sonuçlar nikel(II) iyonlarının krom(VI) iyonlarının varlığındaki adsorpsiyonunun ve seçiciliğinin çalışılan her bir metal iyonunun derişimine bağlı olarak önemli derecede arttığını, başlangıç pH'nın bu artışta çok etkili olmadığını, nikel(II) iyonlarının karışıma eşanlı ya da ardışık eklenmesinin ise adsorpsiyon verimini çok fazla etkilemediğini göstermiştir.

Literatürde çeşitli adsorbentlerle tekli ve ikili metal iyonlarının adsorpsiyonunda farklı deneysel koşullarda elde edilen adsorpsiyon kapasitesi değerleri, bu tez çalışmasında küspe adsorbente krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının tekli, eşanlı ve ardışık adsorpsiyonunda elde edilen kapasite değerleri ile izelge 6.4'te karışılaştırılmıştır. Çizelgeden literatürde kullanılan adsorbentlerin çok geniş bir adsorpsiyon kapasitesi aralığında krom(VI) ve nikel(II) iyonlarını adsorpladığı görülmektedir. Tez çalışmasında kullanılan kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentin tekli krom(VI) ve tekli nikel(II) adsorpsiyon kapasitesinin olduğu ya da olduğu, adsorbentin krom(VI) ve nikel(II) karışımındaki nikel(II) iyonlarını

ise seçici olarak yüksek kapasiteyle adsorpladığı yine aynı çizelgeden gözlenmektedir.

**Çizelge 6.4.** Literatürde çeşitli adsorbentlerle tekli ve ikili metal iyonlarının adsorpsiyonunda farklı deneysel koşullarda elde edilen adsorpsiyon kapasite değerleri ile bu tez çalışmasında küspe adsorbente krom(VI) ve nikel(II) iyonlarının tekli, eşanlı ve ardışık adsorpsiyonunda elde edilen kapasite değerlerinin karşılaştırılması.



Referans	Adsorbent	Ağır Metal İyonu/yonları	Yöntem	q <sub>max</sub> (mg/g)
Zhao vd. [68]	Şeker pancarı kalıntısından KOH kimyasal aktivasyonunu ile elde edilen mikro-gözenekli aktif karbon	Cr(VI)	Kesikli sistem (pH: 4,5)	163,7
Altundoğan vd. [69]	Şeker pancarı küspesinin sülfürik asit ve karbonizasyon işlemi sırasında oluşan gazla reaksiyonundan elde edilen aktif karbon	Cr(VI)	Kesikli sistem (pH: 2,3)	24,0
Konya [70]	Fındık kabuğundan elde edilen aktif karbon	Cr(VI)	Kesikli sistem (pH: 1)	170,0
Bhattacharyya ve Gupta [71]	Asitle aktifleştirilmiş kaolinit	Cr(VI)	Kesikli sistem (pH: 4,6)	8,0
Karslı [23]	CTAB ile modifiye edilmiş şeker pancarı küspesi	Cr(VI)	Kesikli sistem (pH: 2)	84,2
			Sürekli dolgulu kolon (pH: 2)	37,3
Pujol vd. [72]	Kahve artığı	Cr(VI)-Cu(II) ikili karışımı	Kesikli sistem (pH: 3)	Cu(II): 42,4
		Cr(VI)-Ni(II) ikili karışımı		Ni(II): 50,23
Erdoğan vd. [73]	Kayırsı atığından elde edilen aktif karbon	Ni(II)	Kesikli sistem (pH: 5)	101,0
Argun [56]	HCl ile modifiye edilmiş çam kozalağı	Ni(II)	Kesikli sistem (pH: 8)	20,6
	HCl ile modifiye edilmiş çam kabuğu			1,7
Sezer [10]	Kitosan-Kil kompoziti	Ni(II)-Cd(II) ikili karışımı	Kesikli sistem (pH: 6)	Ni(II): 33,93
		Ni(II)-Cd(II) ikili karışımı		Cd(II): 22,77
Liu ve Zhou [74]	Sodyum bentonit	Ni(II)-Cu(II) ikili karışımı	Kesikli sistem (pH: 9)	Cu(II): 15,7
		Ni(II)-Cu(II) ikili karışımı		Ni(II): 10,9
Tez Çalışması	Kurutulmuş şeker pancarı küspesi	Tekli adsorpsiyon Cr(VI)	Kesikli sistem (pH: 2)	64,8
		Tekli adsorpsiyon Ni(II)	Kesikli sistem (pH: 6)	18,6
		Cr(VI)-Ni(II) ikili karışım eşanlı adsorpsiyon	Kesikli sistem (pH: 2)	Cr(VI): 11,9 Ni(II): 18,5
		Cr(VI)-Ni(II) ikili karışım eşanlı adsorpsiyon	Kesikli sistem (pH: 6)	Cr(VI): 9,2 Ni(II): 42,0
		Cr(VI)-Ni(II) ikili karışım ardışık adsorpsiyon	Kesikli sistem (pH: 2)	Cr(VI): 9,3 Ni(II): 10,9
		Cr(VI)-Ni(II) ikili karışım ardışık adsorpsiyon	Kesikli sistem (pH: 6)	Cr(VI): 7,2 Ni(II): 37,3

Bu tez çalışmasında elde edilen deneysel sonuçlar kurutulmuş şeker pancarı küspesi adsorbentin tekli krom(VI) ve tekli nikel(II) iyonlarının adsorpsiyonunda başarıyla kullanılabileceğini, krom(VI) ve nikel(II) karışımlarının adsorpsiyonunda ise nikel(II) iyonlarını seçici olarak yüksek kapasiteyle adsorplama yeteneğinin olduğunu göstermiştir. Daha ileriki çalışmalarda, kesikli sistem adsorpsiyon verileri sürekli düzende çalışan sistemlerde kullanılmak üzere değerlendirilebilir.

## 7. KAYNAKÇA

- [1] M.Z.L. Göksu, Su kirliliği, Çukurova Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi Yayınları (2003) 232.
- [2] Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, T.C. Resmi Gazete, 25687, **31 Aralık 2004**.
- [3] Öztekin, B., Deri Sanayi Atık Sularından Krom (VI) İyonunun Adsorpsiyonu, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, **2009**.
- [4] Z. Zeybek, Sulardaki Metal Kirliliğinin Doğal Adsorbanlar İle Giderimi, Doktora Tezi, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya, **2019**.
- [5] C. Deniz, Ağır Metal ve Renk İçeren Atıksuların Gideriminin Adsorpsiyon/Bisorpsiyon Yöntemleriyle Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas, **2010**.
- [6] S. Güneş, Artık Materyal Kullanılarak Adsorpsiyon Yöntemi İle Atıksulardan Kurşun Giderimi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, (2018).
- [7] H. Ali, E. Khan, M.A. Sajad, Phytoremediation Of Heavy Metals—Concepts And Applications, Chemosphere 91 (2013) 869-881.
- [8] Ö. Kahvecioğlu, G. Kartal, A. Güven, S. Timur, Metallerin Çevresel Etkileri-I, Metalurji Dergisi 136 (2003) 47-53.
- [9] Bakar, C., Baba, A., “Metaller ve İnsan Sağlığı: Yirminci Yüzyıldan Bugüne ve Geleceğe Miras Kalan Çevre Sağlığı Sorunu”, 1.Tıbbi Jeoloji Çalıştayı, Ürgüp/ Nevşehir, **2009**.
- [10] K. Sezer, Atıksulardaki Kadmiyum(II) ve Nikel(II) İyonlarının Tekli ve İkili Karışımlarının Kitosana, Kile ve Kitosan-Kil Kompozitine Adsorpsiyonunun Kesikli ve Sürekli Sistemlerde İncelenmesi, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara **2015**.
- [11] R. Dixit, Wasiullah, D. Malaviya, K. Pandiyan, U.B. Singh, A. Sahu, R. Shukla, B.P. Singh, J.P. Rai, P.K. Sharma, H. Lade, D. Paul, Bioremediation Of Heavy Metals From Soil And Aquatic Environment: An Overview Of Principles And Criteria Of Fundamental Processes, Sustainability 7, (2015) 2189-2212.
- [12] N. Kahraman, B. Gülenç, A. Hüseyin, Ark Kaynak Yöntemi ile Birleştirilen Ostenitik Paslanmaz Çelik ile Düşük Karbonlu Çeliğin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 17 (2002).

- [13] J.O. Nriagu, E. Nieboer, Production and Uses Of Chromium, Chromium in the Natural and Human Environments 20 (1988) 81-104.
- [14] E. Kalıpcı, Ultrasonik Aktifleştirilmiş Aktif Karbon İle Krom (VI) Adsorpsiyonu, Nevşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2 (2013).
- [15] M.K. Uddin, A Review On The Adsorption Of Heavy Metals By Clay Minerals, With Special Focus On The Past Decade, Chemical Engineering Journal 308 (2017) 438-462.
- [16] Oğuz, T., İçme Suyu Arıtımında Yaygın Olarak Karşılaşılan Su Kalite Problemleri ve Arıtımı İçin Çözüm Önerileri, Uzmanlık Tezi, Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Ankara, 2015.
- [17] G. Hughson, K. Galea, K. Heim, Characterization and Assessment of Dermal and Inhalable Nickel Exposures in Nickel Production and Primary User Industries, Annals of Occupational Hygiene 54 (2010) 8-22.
- [18] B. Özkurt, A.Y. Tabak, Metalik Biyomateryaller ve Metallozis, Totbid Dergisi 10 (2011) 83-86.
- [19] E.N. Atabay, Havacılık Uygulamalarında Krom Kaplama Alternatiflerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2011.
- [20] H. Hacıfazlıoğlu, H. Şahin, Cevher Hazırlama Tesislerinden Çıkan Atıklar ve Yönetimi, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 35 (2023) 119-133.
- [21] A. Bayatlı, Elektrolitik Krom Kaplamada Organik Katalizör İlavésinin ve Akım Yoğunluğunun Kaplama Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya, 2022.
- [22] M. Doğan, S. Çetinyokuş, E. Kırıcı, İzobütan Dehidrojenasyonunun Crox/Ac Katalizörler Üzerinde İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 33 (2017) 459-472.
- [23] U. Karanlı, Yüzey Modifiyeli Şeker Pancarı Küspesi Adsorbentle Cr(VI) İyon Adsorpsiyonunun Kesikli ve Sürekli Sistemlerde İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2019.
- [24] A.W. Lothongkum, Y. Khemglad, N. Usomboon, U. Pancharoen, Selective Recovery of Nickel Ions from Wastewater of Stainless Steel Industry via HFSLM, Journal of Alloys and Compounds 476 (2009) 940-949.
- [25] N. Ain Zainuddin, T. Azwan Raja Mamat, H. Imam Maarof, S. Wahidah Puasa, S. Rohana Mohd Yatim, Removal of Nickel, Zinc and Copper from Plating Process Industrial Raw Effluent via Hydroxide Precipitation Versus Sulphide Precipitation, IOP Conference Series: Materials Science And Engineering, IOP Publishing, 2019, pp. 012122.
- [26] E. Rudnik, M. Nikiel, Hydrometallurgical Recovery of Cadmium and Nickel from Spent Ni–Cd Batteries, Hydrometallurgy 89 (2007) 61-71.

- [27] M.A. Hanif, R. Nadeem, M.N. Zafar, K. Akhtar, H.N. Bhatti, Kinetic Studies for Ni (II) Biosorption From Industrial Wastewater By Cassia Fistula (Golden Shower) Biomass, Journal Of Hazardous Materials 145 (2007) 501-505.
- [28] M.Ş. Dündar, H. Altundağ, S. Kaygaldurak, V. Şar, A. Acar, Çeşitli Endüstriyel Atık Sularda Ağır Metal Düzeylerinin Belirlenmesi, Sakarya University Journal of Science 16 (2012) 6-12.
- [29] Beyazıt, N., Peker, İ., Atık Sularda Ağır Metal Kirliliği ve Giderim Yöntemleri, I. Atık Su Sempozyumu, Kayseri, 209-215, 1998.
- [30] [M.M. Brbootı, B.A. Abid, N.M. Al-Shuwaiki, Removal Of Heavy Metals Using Chemicals Precipitation, Eng. Technol. J 29 (2011) 595-612.
- [31] N. Meunier, P. Drogui, C. Montané, R. Hausler, J.-F. Blais, G. Mercier, Heavy Metals Removal From Acidic and Saline Soil Leachate Using Either Electrochemical Coagulation or Chemical Precipitation, Journal of Environmental Engineering 132 (2006) 545-554.
- [32] V.K. Gupta, I. Ali, T.A. Saleh, A. Nayak, S. Agarwal, Chemical Treatment Technologies For Waste-Water Recycling—An Overview, Rsc Advances 2 (2012) 6380-6388.
- [33] S. Yıldız, O.Ö. Namal, M. Çekim, Atık Su Aritma Teknolojilerindeki Tarihsel Gelişimler, Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi 1 (2013) 55-67.
- [34] G. Gürbüz, Deri Endüstri Atıksularının Elektrokargülasyon ve Elektrofenton Yöntemleri ile Arıtımında Rsm Kullanılarak Proses Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2015.
- [35] Z. Song, C. Williams, R. Edyvean, Treatment of Tannery Wastewater by Chemical Coagulation, Desalination 164 (2004) 249-259.
- [36] B. Alyüz, S. Veli, Low-Cost Adsorbents Used in Heavy Metal Contaminated Waste Water Treatment, Sigma 3, Journal of Engineering and Natural Sciences (2005).
- [37] A. Başak, Alüminyum Mamül Üretim Prosesi Atıksuyunda İyon Değiştirme Prosesi ile Ağır Metal Giderimi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2017.
- [38] A. Şen, Endüstriyel Atık Sularda Bakır Nikel Çinko Sülfür Selektif Çöktürme Şartlarının Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2015.
- [39] G. Altınay, M. Levent, Endüstriyel Atıksulardan Adsorpsiyon Yöntemi ile Ni (II) Giderimi ve Seçilen Adsorbanların Karakterizasyonu, Uşak Üniversitesi Fen ve Doğa Bilimleri Dergisi 7 (2023) 1-13.
- [40] B.Ç. Acar, M.B. Acar, Kimyasal Yöntemlerle Atık Sulardan Ağır Metal Giderimi, Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi Dergisi 3 (2022) 1-13.

- [41] W. Weber, Physicochemical Process For Water Quality, Willey, Interscience, New York, **1972**.
- [42] Sarıkaya, Y., Fizikokimya, Gazi Kitapevi, Ankara, **2000**.
- [43] Kayman, E., Sulu Çözeltilerdeki Kurşun İyonlarının Kestane Kabuğu ve Kayısı Çekirdeğinden Üretilen Aktif Karbonlar İle Adsorpsiyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul **2009**.
- [44] Doğan, N., Ağır Metal Gideriminde Tarımsal Atık Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, **2005**.
- [45] B. Firat, Atık Sulardan Kurşun (II) ve Bakır (II) İyonlarının Yumurta Kabuğu İle Uzaklaştırılması ve En uygun Koşulların Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara **2007**.
- [46] Kızılkaya, B., Balık Kemikleri Kullanılarak Sulu Ortamdan Ağır Metal Giderimi, Doktora Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çanakkale, **2011**
- [47] Tekir, O., Fındık Zurufundan Aktif Karbon Eldesi ve Bazı Ağır Metal İyonlarının Adsorpsiyonu, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya **2006**.
- [48] Othmer, K., Seperation Technology, John Wiley & Sons Inc, 2nd Ed, Vol.1 **2008**.
- [49] S. Hokkanen, A. Bhatnagar, M. Sillanpää, A Review on Modification Methods to Cellulose-Based Adsorbents to Improve Adsorption Capacity, Water research 91 (**2016**) 156-173.
- [50] E. Demir, H. Yalçın, Adsorbentler: Sınıflandırma, Özellikler, Kullanım Ve Öngörüler, Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi (**2014**) 70-79.
- [51] Z. Liu, Y.-G. Zhang, B. Han, Z.-C. Tan, Q.-H. Li, Adsorption of Cobalt (III) by HCl and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Modified Activated Carbon, International Journal of Environment and Pollution 63 (**2018**) 192-205.
- [52] N. Azouaou, Z. Sadaoui, A. Djaafri, H. Mokaddem, Adsorption of Cadmium from Aqueous Solution Onto Untreated Coffee Grounds: Equilibrium, Kinetics and Thermodynamics, Journal of Hazardous Materials 184 (**2010**) 126-134.
- [53] R. Lavecchia, A. Pugliese, A. Zorro, Removal of Lead from Aqueous Solutions by Spent Tea Leaves, Chemical Engineering Transactions 19 (**2010**) 73-78.
- [54] N. Abdel-Jabbar, S. Al-Asheh, Factorial Design For The Analysis of Packed-Bed Sorption of Copper Using Eggshell As a Biosorbent, Journal of environmental protection science 3 (**2009**) 133-139.

- [55] M.E. Argun, S. Dursun, A New Approach to Modification of Natural Adsorbent For Heavy Metal Adsorption, *Bioresource Technology* 99 (2008) 2516-2527.
- [56] M. Argun, S. Dursun, K. Gur, C. Ozdemir, M. Karatas, S. Dogan, Nickel Adsorption On The Modified Pine Tree Materials, *Environmental Technology* 26 (2005) 479-488.
- [57] K. Sezer, Şeker Pancarı Küspesinden Elde Edilen Aktif Karbonun Atıksulardaki 2, 4-D ve Metribuzin Pestisitlerinin Adsorpsiyonunda Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010.
- [58] S.M.O. Sadat, Şeker Pancarı Küspesine Emprenye Edilmiş Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ile Sucul Ortamlardan Nikel Giderimi, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya, 2019.
- [59] E. Pehlivan, S. Cetin, B. Yanık, Equilibrium Studies For The Sorption of Zinc and Copper From Aqueous Solutions Using Sugar Beet Pulp and Fly Ash, *Journal of Hazardous Materials* 135 (2006) 193-199.
- [60] Z. Aksu, İ.A. Işoğlu, Removal of copper (II) ions From Aqueous Solution By Biosorption Onto Agricultural Waste Sugar Beet Pulp, *Process Biochemistry* 40 (2005) 3031-3044.
- [61] H.S. Altundogan, Cr (VI) Removal From Aqueous Solution By Iron (III) Hydroxide-Loaded Sugar Beet Pulp, *Process Biochemistry* 40 (2005) 1443-1452.
- [62] A. Özer, M. Tanyildizi, F. Tümen, Study of Cadmium Adsorption From Aqueous Solution On Activated Carbon From Sugar Beet Pulp, *Environmental Technology* 19 (1998) 1119-1125
- [63] İ. Hatay, Bazı Organik Maddelerin İnorganik Destekler Üzerine İmmobilizasyonu ve Adsorban Olarak Uygulamaları, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Konya, 2006.
- [64] I. Langmuir, The Adsorption Of Gases On Plane Surfaces Of Glass, Mica and Platinum, *Journal Of The American Chemical Society* 40 (1918) 1361-1403.
- [65] Z. Aksu, S. Tezer, Equilibrium And Kinetic Modelling Of Biosorption Of Remazol Black B By *Rhizopus Arrhizus* İn A Batch Environment: Effect Of Temperature, *Process Biochemistry* 36 (2000) 431-439.
- [66] E. Korngold, N. Belayev, L. Aronov, Removal of Chromates From Drinking Water By Anion Exchangers, *Separation and Purification Technology* 33 (2003) 179-187.
- [67] E. Aras, Sularda Nikel Adsorpsiyonu, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa 2010.

- [68] J. Zhao, L. Yu, F. Zhou, H. Ma, K. Yang, G. Wu, Synthesis And Characterization of Activated Carbon From Sugar Beet Residue For The Adsorption of Hexavalent Chromium In Aqueous Solutions, *Rsc Advances* 11 (2021) 8025-8032.
- [69] H.S. Altundogan, N. Bahar, B. Mujde, F. Tumen, The Use of Sulphuric Acid-Carbonization Products of Sugar Beet Pulp In Cr (VI) Removal, *Journal of Hazardous Materials* 144 (2007) 255-264.
- [70] M. Kobya, Removal Of Cr (VI) From Aqueous Solutions By Adsorption Onto Hazelnut Shell Activated Carbon: Kinetic and Equilibrium Studies, *Bioresource Technology* 91 (2004) 317-321.
- [71] K.G. Bhattacharyya, S. Sen Gupta, Adsorption of Chromium (VI) From Water By Clays, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 45 (2006) 7232-7240.
- [72] D. Pujol, M. Bartrolí, N. Fiol, F. De La Torre, I. Villaescusa, J. Poch, Modelling Synergistic Sorption of Cr (VI), Cu (II) And Ni (II) Onto Exhausted Coffee Wastes From Binary Mixtures Cr (VI)-Cu (II) And Cr (VI)-Ni (II), *Chemical Engineering Journal* 230 (2013) 396-405.
- [73] S. Erdoğan, Y. Önal, C. Akmil-Başar, S. Bilmez-Erdemoğlu, Ç. Sarıcı-Özdemir, E. Köseoğlu, G. Icduygu, Optimization of Nickel Adsorption From Aqueous Solution By Using Activated Carbon Prepared From Waste Apricot By Chemical Activation, *Applied Surface Science* 252 (2005) 1324-1331.
- [74] Z.-R. Liu, S.-Q. Zhou, Adsorption of Copper and Nickel On Na-Bentonite, *Process Safety and Environmental Protection* 88 (2010) 62-66.

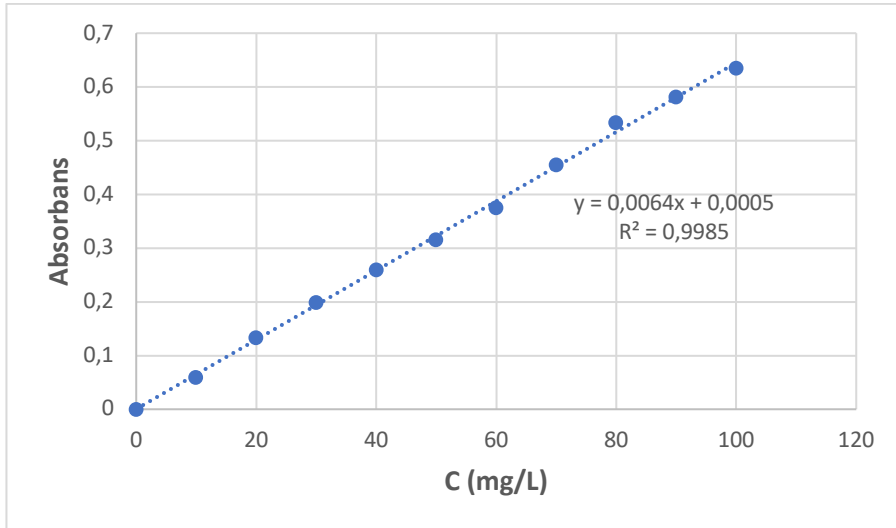


## EKLER

### EK 1. Krom(VI) Tayini

Krom(VI) iyonları spektrofotometrik olarak krom(VI) iyonlarının asidik ortamda difenil karbazit ile verdiği mor renkli kompleksin absorbansının ölçülmesiyle tayin edilmiştir. Bu amaçla stok krom(VI) iyon çözeltisinden 10-100 mg/L aralığında değişen derişimlerde hazırlanan krom(VI) iyon çözeltilerinden 1'er ml örnek alınarak üzerlerine 1 ml difenil karbazit çözeltisi (0,2 g difenil karbazit % 95'lik etanol çözeltisinde çözülür) ve 1 ml sülfürik asit çözeltisi (1V/5V) eklenip 100 ml'ye saf su ile seyreltilmiştir. 15 dakika bekledikten sonra oluşan mor renkli çözeltilerin Thermo marka UV spektrofotometrede 542 nm dalga boyunda absorbansları ölçülmüş ve Şekil E.1.1'de sunulan çalışma doğrusu hazırlanmıştır.

Adsorpsiyon esnasında çözeltilerde adsorplanmadan kalan krom(VI) iyon derişimi, adsorpsiyondan önce, adsorpsiyonun başlangıcında ve belirli zaman aralıklarında alınan örnekler santrifüjlenerek sıvı kısımlarının gerektiğinde seyreltilmesiyle yukarıda belirtilen yöntemle hazırlanan numunelerin absorbans değerleri okunarak çalışma doğrusu yardımıyla tayin edilmiştir.



Şekil E.1.1. Krom(VI) çalışma doğrusu

## **EK 2. Nikel(II) Tayini**

Stok nikel(II) iyon çözeltilerinden 1-5 mg/L aralığında değişen derişimlerde hazırlanan standart nikel(II) iyon çözeltilerinin Thermo marka atomik absorpsiyon spektrofotometresinde 232 nm'de ölçülen absorbans değerlerinden çalışma doğrusu hazırlanmıştır.

Adsorpsiyon esnasında çözeltide adsorplanmadan kalan nikel(II) iyon derişimi adsorpsiyondan önce, adsorpsiyonun başlangıcında ve belirli zaman aralıklarında alınan örnekler santrifüjlenerek sıvı kısımlarının seyreltilmesiyle hazırlanan numunelerin absorbans değerleri okunarak çalışma doğrusu yardımıyla tayin edilmiştir.