

**ELEKTROKİMYASAL YÖNTEMLE ŞEKER FABRİKASI ATIKSULARININ
ARITIMI**

Hande CANIGÜROĞLU

Yüksek Lisans Tezi

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Bilimleri Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ümran TEZCAN ÜN

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Aralık 2021

ÖZET
ELEKTROKİMYASAL YÖNTEMLE ŞEKER FABRİKASI ATIKSULARININ
ARITIMI

Hande CANIGÜROĞLU

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Bilimleri Bilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Aralık 2021

Danışman: Prof. Dr. Ümran TEZCAN ÜN

Bu çalışmada, son zamanlarda kullanılan ileri arıtım tekniklerinden pek çok avantajla ön plana çıkan elektrokoagülasyon yöntemiyle şeker endüstrisi atıksuyunun arıtılması araştırılmıştır. Bu araştırma özel olarak tasarlanmış alüminyum ve demir reaktörler ile gerçekleştirilmiştir. Akım yoğunluğu, pH, destek elektrolit derişimi (NaCl) ve karıştırma hızı gibi çeşitli işletme parametrelerinin KOİ giderim verimi üzerine etkileri incelenmiştir. Çalışmada ayrıca enerji tüketimi hesaplamaları da yapılarak en uygun arıtım şartları belirlenmeye çalışılmıştır. Şeker fabrikası atıksuyunun elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımı, 50 mA/cm² akım yoğunluğu, pH: 6, destek elektrolit derişimi (NaCl): 0,15mol/L ve işletim süresi: 10 dk olduğu koşullarda %94 KOİ giderim verimi ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma sonucunda 4850 mg / L olan ilk KOİ konsantrasyonu, şeker endüstrisi için Türkiye Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'nin doğrudan deşarj limitlerinin altında olan 280 mg / L'ye düşürülmüştür. Yüksek kirlilik oranına sahip şeker fabrikası atıksuyu, literatürden farklı şekilde tasarlanmış elektrotlar kullanılarak yüksek arıtım verimliliği ile doğrudan deşarj koşulları sağlanarak arıtılabilir olduğu görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Şeker fabrikası, Elektrokoagülasyon, KOİ Giderimi, Elektrot.

ABSTRACT

TREATMENT OF SUGAR FACTORY WASTEWATER WITH ELECTROCHEMICAL METHOD

Hande CANIGÜROĞLU

Department of Environmental Engineering

Programme in Environmental Science

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, December 2021

Supervisor: Prof. Dr. Ümran TEZCAN ÜN

In this study, the treatment of sugar industry wastewater was investigated using electrocoagulation method, which stands out with many advantages among the advanced treatment techniques used recently. This research was carried out with a specially designed aluminum and iron reactors. The effects of various operating parameters such as current density, pH, support electrolyte concentration (NaCl) and mixing speed on COD removal efficiency were investigated. Electrical energy consumptions were also calculated for the determining suitable treatment conditions. Treatment of the real sugar factory wastewater by electrocoagulation method was performed with the removal efficiency of 94% at 50 mA/cm² current density, pH: 6, 0,15 M NaCl, 65 rpm mixing rate. The initial COD concentration of 4850 mg/L was reduced to 280 mg/L which is below the direct discharge limits of Turkish Water Pollution Control Regulation for the sugar factory as a result of the this study, it can be said that highly polluted sugar factory wastewater can be treated with a high removal efficiencies which meets the regulation requirements for the direct discharge using electrodes designed differently from the literature.

Keywords: Sugar factory, Electrocoagulation, COD removal, Electrode.

TEŞEKKÜR

Çalışmam sırasında bilgi ve deneyimini benden esirgemeyen, her zaman yanımda olan, kolaylık sağlayan, yol gösteren saygıdeğer tez danışmanım Prof. Dr. Ümran TEZCAN ÜN'e çok teşekkür ederim.

Tezimin her aşamasında yorum, öneri ve bilhassa dostluğunu esirgemeyen çok kıymetli arkadaşlarım Ayşe GÜL ve Kad Masoud DERA KHSHANDEH'e en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Hayatım boyunca gösterdikleri sabır ve verdikleri her türlü destek ile beni bugünlerime ulaştıran değerli aileme minnettarım. Tercihlerimde beni destekleyen, hedeflerime ulaşırken beni yüreklendiren, sevgisini ve desteğini her daim yakından hissettiğim çok kıymetli annem Hatice CANIGÜROĞLU'na, babam Hasan CANIGÜROĞLU'na, canım kardeşim Hale ÇETİNTAŞ'a ve en kıymetlim canım yeğenim Beyza Ebrar ÇETİNTAŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hande CANIGÜROĞLU

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Hande CANIGÜROĞLU

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
TABLolar DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
GÖRSELLER DİZİNİ	HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	2
2.1. Şeker Endüstrisi, Kullanılan Hammaddeler ve Türkiye' deki Durumu	2
2.2. Şeker Üretim Prosesi	3
2.3. Şeker Üretiminde Su Kullanımı ve Atık Suların Tanımlanması	4
2.4.Kullanılacak Suların Nitelikleri.....	4
2.4.1. Suların Kirlenmesi	4
2.5. Atıksu Kaynaklarının Sınıflandırılması.....	5
2.5.1. Pancar yüzdürme ve yıkama suları	5
2.5.2. Difüzyon ve pres suları.....	5
2.5.3. Yoğuşturucu soğutma suyu	5
2.5.4. Artık kirli sular.....	6
2.5.5. Yıkama suları.....	6
2.5.6. Gaz yıkama atıksuları.....	6
2.5.7. Kazan blöf suları	6

2.5.8. Çamur sevk suları	6
2.5.9. İyon değıştirici tesislerin rejenerasyon suları	6
2.5.10. Kireçsizlendirme tesisinden çıkan atıksular	7
2.5.11. Şerbetin tuzsuzlaştırılmasından çıkan atıksular	7
2.5.12. Kireç çökeltme tankları drenajı ve kok-kireç çamuru	8
2.5.13. Evsel atık niteliğindeki kullanma suları	8
2.5.14. Meydan ve yağmur suları	8
2.6. Şeker Fabrikası Atıksularının Karakterizasyonu.....	9
2.7. Şeker Fabrikası Atıksularının Genel Değerlendirilmesi	13
2.8. Kaynakta Kirlenmeyi Önleyici Düzenlemeler ve Geri Kazanım Uygulamaları	18
2.8.1. Pancar yüzdürme ve yıkama sularının geri döngüsü.....	18
2.8.2. Yoğuşturucu soğutma suyunun geri döngüsü.....	19
2.8.3. Süreç atıksuyunun geri kazanımı	19
2.9. Atıksu Arıtım Yöntemleri.....	19
2.9.1. Başlıca kontrol parametreleri	19
2.9.2. Kontrol ve arıtma teknolojisi	19
2.9.3. Arıtma süreçleri.....	20
2.10. Şeker Endüstri Atıksularının Arıtım Sistemleri	20
2.10.1. Fiziksel arıtım	21
2.10.2. Kimyasal arıtım	21
2.10.3. Biyolojik arıtım.....	22
2.10.4. Doğal arıtım	22
2.11. Elektrokimyasal Arıtım Yöntemleri.....	22
2.11.1. Elektrooksidasyon prosesi	23
2.11.2. Elektroflotasyon prosesi.....	24
2.11.3. Elektrokimyasal membran prosesleri	25
2.12. Elektrokoagülasyon Prosesi	25
2.13. Elektrokimyanın Temeli.....	27
2.13.1. Elektrokimyada bahsi geçen başlıca kavramların tanımları	28
2.14. Elektrokoagülasyon Teorisi	29
2.14.1. Ana reaksiyonlar	30
2.14.2. Yan reaksiyonlar	35

2.15. Elektrokoagülasyonla Arıtım Prosesine Etki Eden Parametreler	
Teorisi.....	36
2.15.1. Akım yoğunluğu	36
2.15.2. Elektrolit türü ve konsantrasyonu	37
2.15.3. pH'ın etkisi.....	37
2.15.4. Elektrot malzemesi	38
2.15.5. Elektrotlararası mesafe.....	39
2.15.6. Sıcaklık	39
2.15.7. Destek elektrolit ve ortamdaki anyon konsantrasyonu	40
2.15.8. Güç kaynağı	40
2.15.9. Reaksiyon Süresi.....	40
2.16. Konuyla İlgili Önceden Yapılmış Çalışmalar.....	42
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	47
3.1. Deneylerde Kullanılan Kimyasallar ve Cihazlar	48
3.2. Dizayn Expert Programı ile Deney Tasarımı	48
3.3. Deneysel Yöntem	51
3.3.1. Deneysel hesaplamalarda kullanılan eşitlikler	52
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	53
4.1. Demir Elektrot ile Yapılan Deneyler.....	55
4.1.1. Akım yoğunluğu ve destek elektrolit derişiminin KOİ giderimi ve enerji sarfiyatı üzerindeki hesaplamalarda kullanılan eşitlikler	55
4.1.2. Akım yoğunluğu ve pH'ın KOİ giderim verimi ve enerji sarfiyatı üzerine etkileri	57
4.1.3. Akım yoğunluğu ve karıştırma hızının KOİ giderim verimi ve enerji sarfiyatı üzerine etkileri.....	58
4.1.4. pH ve destek elektrolit derişimin KOİ giderim verimi ve enerji sarfiyatı üzerine etkileri.....	59
4.2. Alüminyum Elektrot ile Yapılan Deneyler	60
4.2.1. Destek elektrolit derişimi ve pH'ın KOİ giderim verimi ve enerji sarfiyatı üzerine etkileri.....	60
4.2.2. pH ve akım yoğunluğunun KOİ giderim verimi ve enerji sarfiyatı üzerine etkileri	61

4.2.3. Destek elektrolit derişimi ve akım yoğunluğunun KOİ giderim verimi ve enerji sarfiyatı üzerine etkileri	62
4.2.4. Akım yoğunluğu ve karıştırma hızının KOİ giderim verimi ve enerji sarfiyatı üzerine etkileri	63
4.3. ANOVA analizi.....	64
5. SONUÇ VE TARTIşMA	67
KAYNAKÇA.....	69
EKLER	HATA! YER İşARETİ TANIMLANMAMIş.
ÖZGEÇMİş	

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. Şeker üretiminde suyun kullanıldığı yerler ve miktarlar	4
Tablo 2.2. Bir kireçsizlendirme tesisinde oluşan atıksular ve kirlilik yükleri	7
Tablo 2.3. Tuzsuzlaştırma ünitesinden çıkan atıksuyun karakteristik özellikleri	8
Tablo 2.4. Şeker endüstrisi atıksularının kaynakları ve BOİ5 bilgileri	9
Tablo 2.5. Türkiye genelindeki şeker endüstrisi atıksuyunun karakteristik değerleri (Taşıma, Yıkama ve Proses Suları)	10
Tablo 2.6. Tablo 2.5. devamı	11
Tablo 2.7. Türkiye genelindeki şeker endüstrisi atıksuyunun karakteristik değerleri (İşlenen 1000 ton pancar için çıkan atıksu hacmi ve kirlilik yükleri)	11
Tablo 2.8. Yurtdışındaki bazı fabrikalar için atıksu karakteristik değerleri	12
Tablo 2.9. Tablo 2.8. devamı	12
Tablo 2.10. İşlenen 1 ton Pancar için oluşan atıksuların Tablo 2.9'a göre değerlendirilmesi	13
Tablo 2.11. İşlenen her 1000 pancar başına çıkan atıksu miktarı ve kirlilik yükü bilgileri	15
Tablo 2.12. Ülkemizdeki şeker fabrikaların çıkan evsel nitelikli atıksu miktarı ve kirlilik yükü	16
Tablo 2.13. Kampanya boyunca çıkan atıksu miktarı ve kirlilik yükü	17
Tablo 2.14. Fabrikaların ortalama günlük ve kampanya sonu toplam çıkan atıksu debisi ve kirlilik yükleri	18
Tablo 2.15. Kondenzasyon suları ile seyrelmenin olmadığı şeker fabrikalarında deşarj standartları	20
Tablo 2.16. Kondenzasyon suları ile seyrelme yapılan şeker fabrikalarındadeşarj standartları	20
Tablo 2.17. İşletme sürelerine göre KOİ giderim verimleri.....	41
Tablo 3.1. Ham atıksu için yapılan karakterizasyon çalışmasında ölçülen parametrelere ilişkin değerler.	47
Tablo 3.2. Deneylerde kullanılan kimyasal malzemeler, özellikleri ve kullanım amaçları.....	48
Tablo 3.3. Deneylerde kullanılan cihazlar ve kullanım amaçları.....	48

Tablo 3.4. Dizayn-Expert deney modeli çıktıları.....	49
Tablo 3.5. Deneylerde incelenen parametrelerin çalışma aralıkları.....	51
Tablo 4.1. Deney sonuçları	54
Tablo 4.2. 10. dakikada elektrik sarfıyatı için seçilen ikinci dereceden modele ait ANOVA testi sonuçlar.....	64
Tablo 4.3. 10.dakikada %KOİ giderimi için seçilen ikinci dereceden modele ait ANOVA testi sonuçları.....	65



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Türkiye’de tipik şeker üretim proses akım şeması	3
Şekil 2.2. Tipik bir Şeker üretim prosesi için atıksu çıkış noktaları ve yaklaşık miktarları	14
Şekil 2.3. Tipik bir elektrokoagülasyon hücresi	28
Şekil 2.4. Elektrokoagülasyon prosesi sırasında oluşan tipik reaksiyonların şematik gösterimi	31
Şekil 2.5. 25 °C, 1 bar ve 10-6 M’de (A) demir ve (B) alüminyumun E-pH diyagramları	33
Şekil 2.6. Sıfır iyonik kuvvet ve 25 ° C’de amorf hidroksitlerle denge halindeki Fe (III) ve Al (III) çözünür monomerik hidroliz ürünlerinin konsantrasyonları	34
Şekil 3.1. Deney düzeneği	52
Şekil 4.1. Destek elektrolit derişimi (mol/L) ve Akım Yoğunluğunun %KOİ Giderimi üzerindeki etkileri	56
Şekil 4.2. Akım yoğunluğu ve Destek elektrolit derişiminin enerji sarfıyatı üzerindeki etkileri, pH=6, Karıştırma hızı=65 (rpm), Zaman: 10. Dk, (Demir elektrot).	56
Şekil 4.3. pH ve Akım Yoğunluğunun %KOİ Giderimi üzerindeki etkileri (Destek elektrolit derişimi (mol/L)=0,15, Karıştırma hızı=65(rpm), (Demir elektrot).	57
Şekil 4.4. Akım yoğunluğu ve pH’nın enerji sarfıyatı üzerine etkileri (Destek elektrolit derişimi 0,15 mol/L , Karıştırma hızı=65 (rpm), Zaman: 10. Dk, (Demir elektrot).	57
Şekil 4.5. Akım yoğunluğu ve karıştırma hızının %KOİ Giderimi üzerindeki etkiler.	58
Şekil 4.6. Akım yoğunluğu ve karıştırma hızının enerji sarfıyatı üzerine etkileri (Destek elektrolit derişimi 0,15 mol/L , pH:6, Zaman: 10. Dk, (Demir elektrot).	58
Şekil 4.7. Destek elektrolit derişimi (mol/L) ve pH’ın %KOİ Giderimi üzerindeki etkileri	59

Şekil 4.8. pH ve destek elektrolit derişimin enerji sarfıyatı üzerine etkileri (Akım yoğunluğu= 0,03 (mA/cm ²), Karıştırma hızı=65(rpm), Zaman: 10. Dk, (Demir elektrot).....	59
Şekil 4.9. Destek elektrolit derişimi (mol/L) ve pH'ın %KOİ Giderimi üzerindeki etkileri Akım yoğunluğu= 0,03 (mA/cm ²), Karıştırma hızı=65 (rpm), (Alüminyum elektrot).	60
Şekil 4.10. Destek elektrolit derişimi (mol/L) ve pH'ın enerji sarfıyatı üzerine etkileri (Akım yoğunluğu= 0,03 (mA/cm ²), Karıştırma hızı=65 (rpm), (Alüminyum elektrot).	60
Şekil 4.11. pH ve Akım Yoğunluğunun %KOİ Giderimi üzerindeki etkileri.	61
Şekil 4.12. pH ve Akım Yoğunluğunun enerji sarfıyatı üzerine etkileri (Destek elektrolit derişimi (mol/L)=0,15, Karıştırma hızı=65(rpm), (Alüminyum elektrot).	61
Şekil 4.13. Destek elektrolit derişimi (mol/L) ve Akım Yoğunluğunun %KOİ Giderimi üzerindeki etkileri.	62
Şekil 4.14. Destek elektrolit derişimi (mol/L) ve Akım Yoğunluğunun enerji sarfıyatı üzerine etkileri, pH=6, Karıştırma hızı=65 (rpm), (Alüminyum elektrot).	62
Şekil 4.15. Akım yoğunluğu ve Karıştırma hızının %KOİ Giderimi üzerindeki etkiler.	63
Şekil 4.16. Akım yoğunluğu ve Karıştırma hızının enerji sarfıyatı üzerine etkileri (Destek elektrolit derişimi (mol/L)=0,15, pH=6, (Alüminyum elektrot).	63
Şekil 4.17. a)10. Dakikadaki enerji sarfıyatı için normal dağılım grafiği, b) 10. Dakikadaki %KOİ giderimi için normal dağılım grafiği, c) 10. Dakikadaki enerji sarfıyatı için beklenen değere karşı elde edilen değer grafiği, d) 10. Dakikadaki %KOİ giderimi için beklenen değere karşı elde edilen değer grafiği, e) 10. Dakikadaki enerji sarfıyatı için deney yapılış sırasına göre hataların dağılımı, f) 10. Dakikadaki %KOİ giderimi için deney yapılış sırasına göre hataların dağılımı.....	66

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Amper
Al	: Alüminyum
As	: Aktif elektrot yüzey alanı (cm ²)
C _e	: t Anında Çözeltideki Kimyasal Oksijen İhtiyacı
C ₀	: Başlangıçta Çözeltideki Kimyasal Oksijen İhtiyacı
E	: Enerji Sarfıyatı (kW.saat/m ³)
Fe	: Demir
I	: Akım Şiddeti (Amper)
J	: Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)
KW	: Kilowatt
mA	: Miliamper
Mmol	: Milimol
pH _i	: Çözeltinin başlangıç pH'sı
T	: Zaman (saniye)
v _r	: Reaktördeki Toplam Çözelti Hacmi (m ³)
V	: Uygulanan Potansiyel Fark (Volt)
W	: Enerji Sarfıyatı (kW.saat/m ³)

Kısaltmalar

dak	: Dakika
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
BOİ ₅	: Biyolojik Oksijen İhtiyacı (5 Günlük)
AKM	: Askıda Katı Madde
TAKM	: Toplam Askıda Katı Madde
TOK	: Toplam Organik Karbon
EC	: Elektrokoagülasyon
EO	: Elektrooksidasyon
ECP	: Elektrokimyasal Peroksidasyon

1. GİRİŞ

Gelişmekte olan ülkelerde hızlı nüfus artışı ve endüstrileşme, doğal kaynakların kullanımını ve dolayısıyla beraberinde çevre kirliliğini getirmiştir. Endüstriyel faaliyetlerde en çok tüketilen doğal kaynaklardan birisi de su olmaktadır. Günümüzde yaşanan su sıkıntılarının gelecekte daha büyük felaketlere yol açmaması için mühendislik yaklaşımları ve gelişen teknoloji marifetiyle bu sorun ele alınmalıdır. Öncelikli hedef olarak proseste atık su oluşumunu en aza indirgeyecek iyileştirmelerin yapılması sonrasında ise oluşan atık suların daha az enerji ve kaynak harcayan alternatif arıtım yöntemleri ile geri kazanılması gerekmektedir. Son yıllarda alternatif atıksu arıtım yöntemlerinden olan elektrokimyasal işlemler bilhassa biyolojik arıtıma cevap vermeyen bazı organik maddelerin giderimi için ön plana çıkmaktadır.

Bu çalışmada, Türkiye’de şeker pancarından toz şeker üretiminde oluşan atık suların (Şeker ve Alkol fabrikaları) oluştuğu süreçler, çıkan atık suların özellikleri ve oluşan atık suların mevcut arıtım yöntemlerinden farklı olarak elektrokoagülasyon tekniği ile arıtılmasında sistem parametrelerinin KOİ giderim verimi üzerine etkisi araştırılmıştır. Dizayn-Expert programında oluşturulan model doğrultusunda, demir ve alüminyum elektrotlar kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Şeker Endüstrisi, Kullanılan Hammaddeler ve Türkiye' deki Durumu

Yunanlı tarihçi ve düşünür Dioskorides M.Ö. 50 yılında kaleme aldığı “De Materia Medica” isimli yapıtında, Hindistan ve Arabistan’da balın bir çeşidinin olduğunu gibi ve bundan tıpkı tuz benzeri bir madde elde edildiğini ve adının “Saccharan” olarak ifade edildiğini aktarmıştır. Bu isim daha sonra Romalı tarihçi Plinius’un bir kitabında “Saccharum” şeklinde bahsedilmiş ve Latince’ye bu haliyle girmiştir. Dünya üzerinde konuşulan belli başlı dillerde İngilizce’de “sugar”, Fransızca’da “sucre”, Almanca’da “zucker” olarak geçen bu maddenin adı dilimize ise Arapça’daki “sukkar” kelimesinden adapte olmuştur [1]. Arap ülkeleri ve Hindistan tropikal ve yarı tropikal bölgeler olduğu için şeker kamışı yetiştiriciliğinin anavatanı olarak bilinmektedir [2]. Şeker kamışının bünyesinde yaklaşık olarak %12-16 şeker bulunur ve dünyada üretilen şekerin %60 kadarı şeker kamışından elde edilmektedir [3].

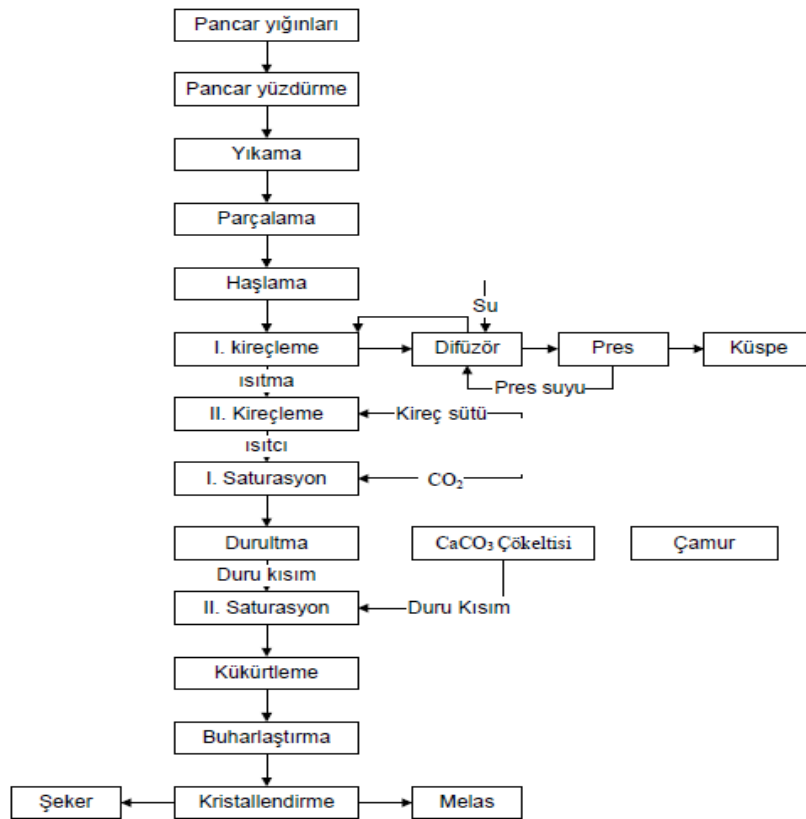
Türkiye’de iklim koşullarının uygun olmaması sebebiyle şeker kamışı yetiştirilmemektedir [3]. Buna karşılık Türkiye’nin orta kuşakta yer almasından dolayı sahip olduğu ılıman iklim şartlarında bir diğer şeker üretim hammaddesi olan şeker pancarı yetiştirilebilmektedir [4]. Şeker pancarı tarımıyla bir hektardan karşılanan beyaz şekerin besin değeri, bir kampanya süresince, 50.000 kalori/gün olmaktadır. Ülkemizde birçok bölgede kolay yetiştirilebilmesi nedeniyle şeker pancarı şeker verim ve miktarını büyük oranda karşılamının yanı sıra şeker kamışı dışında, diğer tarla bitkilerine de büyük oranda besin sağlar [5].

Bitkiler atmosferden karbondioksit ve toprakta bulunan kökleriyle emdikleri suyu birleştirerek kimyadaki formülü ($C_{12}H_{22}O_{11}$) ve adı sakkaroz olan şeker olan karbonhidrat üretirler. Üretilen bu şeker, yeni dokuların veya tohumların yapımında harcanırken aynı zamanda değin bitki yapısında depolanır. Kimi meyvelerde fruktoz; kimi tahıl, meyveler ve sebzelerde glikoz; şeker pancarı ve kamışında sofr şeker olarak anılan sakkaroz sentezlenmektedir. Sakkaroz ihtiva eden bu bitkiler işlenerek tüketime sunulmaktadır [6].

Şeker endüstrisi, şeker kamışı ve şeker pancarından zincirleme olarak geçirilen birtakım işlemler sonucunda ham şeker, beyaz şeker, pudra şekeri, esmer kandis, beyaz kandis, sıvı şeker, yemek ve imalat şurubu, şekerli şurup, yapma bal, melas, ispirto gibi ürünlerin elde edildiği üretim sistemi olarak tanımlanabilecek olan bir endüstri dalıdır [7].

2.2. Şeker Üretim Prosesi

Şeker pancarı üretimi yıl içerisinde bir dönemlik (kampanya) olup yaklaşık 3-4 ay sürmektedir. Türkiye’de standart bir şeker pancarından şeker üretim prosesi Şekil 2.1. ‘de gösterilmiştir [7]. Şeker pancarından şeker eldesi kısacası şu şekilde sıralanabilir; Meydan işleri pancarın kabulü ve depolanması pancarın taşınması, yüzdürülmesi (yıkama), pancarın üretime uygunluğuna göre ayıklanması ve temizlenmesi ve pancarın üretim için hazır hale getirilmesidir, Ham fabrika bölümünde ise; pancarların kıyılması [4], Difüzyon işlemi; yüksek basınçla sıcak suyun pancar dilimleri arasından geçirilmesi ile özütlenerek oluşan şerbetin kireç sütü ile temizlenip ve şeker içermeyen kısımların CO₂ vasıtasıyla ortamdaki kirecin fazlasının çöktürülmesi ve şerbetin SO₂ gazına doyurularak daha iyi temizlenmesi ve renk gideriminin sağlanmasıyla daha sonra şerbet buharlaştırıcı ve vakum kaplarında yoğunlaştırılmasıdır. Son işlem olarak; kristallendirme, santrifüjleme ve kurutma proseslerinden geçirilir [8]. Bir kampanya döneminde üretilen şeker, çuval veya kâğıt torba gibi ambalajlarla paketlenerek tüketiciye ulaştırılmak üzere ambarlarda depolanır [9].



Şekil 2.1. Türkiye’de tipik şeker üretim proses akım şeması [7]

2.3. Şeker Üretiminde Su Kullanımı ve Atık Suların Tanımlanması

Şeker fabrikalarında, suyun kullanılmadığı basamak yok gibidir [3]. Günümüzde suyun fazla olarak harcanması sonucu fabrika için gerekli ham su miktarı (proses suyu) 100 miktar pancar girişi için 50-100 miktar arasında değişiklik göstermektedir [10]. Bir şeker fabrikasında suyun kullanıldığı yerler ve miktarları Tablo 2.1.'de verilmiştir [3].

Tablo 2.1. Şeker üretiminde suyun kullanıldığı yerler ve miktarlar [3]

YER	MİKTAR
Pancar yüzdürme suları	%500-800
Pancar yıkama suyu	%150-200
Kondense soğutma suyu	%400-600
Şerbet üretiminde kullanılan taze su	%30-40
Soğutma suları	%20-100

2.4.Kullanılacak Suların Nitelikleri

Proseste kullanılacak temiz sularda organik madde ve tuzun fazla miktarda olması istenilmez [11]. Soğutma sularında demir ve mangan fazlalaşması, demir-mangan bakterilerinin çoğalarak depo ve borularda çamur oluşumu ve korozyona sebebiyet vermektedir. Temiz su rafineri kısmına ulaşana kadar birçok işlemde tabi tutulduğu için suyun ilk giriş noktasında içerisinde bulunan çeşitli yabancı maddelerin rafineri kısmına girmesi engellenmiş olur. Rafineriden çıkan soğutma suyu şerbetle temas etmez. Diğer bir taraftan bilhassa buhar yoğunlaştırıcı suyu tüketilen kısımlarda, su buharlarının yoğunlaşmasından elde edildiğinden steril olmaktadır [3].

2.4.1. Suların Kirlenmesi

Kirlilik, işlem gören 1 ton pancar başına “g BOİ₅” olarak ifade edilmektedir. Şeker fabrikaları endüstriyel ve evsel nitelikli atık sularının kıyaslanması özgül kirlilik (B) değeri hesaplanılarak yapılır. B değerinin hesaplanması için kullanılan (2.1) eşitliği verilmiştir [3].

$$B = \frac{g \text{ BOİ}_5 \text{ ton işlenen pancar}}{E} \quad (2.1)$$

E: Kişi eşdeğeri (1 kişinin 24 saatte neden olduğu kirlilik)

2.5. Atıksu Kaynaklarının Sınıflandırılması

2.5.1. Pancar yüzdürme ve yıkama suları

Pancarların üzerindeki toprak ve arasındaki taşlar, pancarların yüzdürülmesi (taşıma) ve yıkama (temizlenmesi) esnasında suda kalır ve bazı yerlerde çökerler. Çöken taş ve toprağın miktarı nicel olarak hesaplanabilir. Bu çöküntü miktarı işlemin yapıldığı mevsime göre değişiklik arz eder. Oluşan çöküntü yaklaşık olarak %10-20 kirlilik içerir [11]. Ayrıca toprağın muhteviyatında bulunan azot, fosfat gibi elementleri içeren bileşikler, suda çözünabilen diğer organik ve inorganik bileşikler ve bilhassa şeker suya geçer. Şekerin suya geçişini daha aza indirebilmek için soğuk su kullanılmalı pancarların bir zedelenmemesine özen gösterilmelidir. Proseste kullanılan suların geri döngülü olması, eşdeğer kirlilik yükünü %45-65'e indirgediğinden dünya genelinde uygulanmaktadır [4].

2.5.2. Difüzyon ve pres suları

Şeker özütleme işlemi, şerbet üretiminin yapıldığı cihazlarında su kullanılarak yapılmaktadır. İçerisinde şeker olmayan kısım yani küspenin sıkılmasıyla pres suyu oluşur. Difüzyon hücrelerin yıkanması sonucu yaklaşık $1,5 \text{ m}^3/\text{ton-gün}$, küspe presleme işlemi için ise yaklaşık $0,5 \text{ m}^3/\text{ton gün}$ atık su oluşmaktadır [3]. Batarya difüzörü sisteminin kullanılması sonucunda, sisteme giren 100 birim pancara karşılık 200 birim su harcanır. Difüzyon suyu olarak adlandırılan atık su ise %100-110 kadardır. Ayrıca batarya kazanlarının temizliği için harcanan yıkama suyu ve yaklaşık olarak %60 pres suyu da bu kısımdan çıkan atık su hesabına eklenmelidir. Difüzyon ve presleme kısımlarından oluşan kirlilik, işlenen 1000 ton pancar başına difüzyon suyu için 2000 kg BOİ_5 ve pres suyu için de 3600 kg BOİ_5 kirlilik derecesine eşdeğerdir [2].

2.5.3. Yoğuşturucu soğutma suyu

Bründe'nin yoğunlaşması sonucu oluşan yoğuşturucu suyu 100 birim pancar başına 400-600 birimdir. Bründe'nin yoğunlaşması işleminde su miktarı da artmaktadır. Organik madde içeriği az olan bu suların sıcaklığı genellikle $40-50^\circ\text{C}$ 'dir [3].

Bründedeki azot miktarı yaklaşık $50-80 \text{ mg/L}$ olup pH'ı ise 8-9 aralığındadır. Bu kısımda sıçrayan şerbetin şeker oranı yüksek olduğundan, yoğuşturucu suyunun organik maddelerle kirlenmesine sebebiyet verir. Bu sebeptendir ki rafinerideki şerbetin, geri tutulması için şerbet tutucuların kullanılması mecburidir [11].

2.5.4. Artık kirli sular

Fabrikada; iyon değiştirici tesislerin rejenerasyon ve çamur sevk, kazan blöf suları ve bezlerin ve torba filtrelerinin yıkanmasıyla oluşan, temizlik, yıkama ve evsel atıksular artık kirli su kategorisinde hesaplanır [11].

2.5.5. Yıkama suları

Filtre torbalarının yıkanması için çoğunlukla bez yıkama tamburu tercih edilmektedir. Eğer ki bu bezlerdeki kirliliği karbonatlaştırma çamuru oluşturuyorsa çıkan atıksuların kirliliği çok yüksek olmaktadır. Bu bezlerin kirlenme oranı ve/veya değiştirilme sıklığı arıtılan şerbete ve pancarın kalitesiyle alakalıdır. Bu durumların haricinde birinci karbonatlaştırmadan sonra kullanılan çamur filtrelerinin cinsi de çok önemlidir [3].

2.5.6. Gaz yıkama atıksuları

Gaz yıkama işlemi sonucunda 1 ton pancarın işlenmesi için yaklaşık olarak 0,15 m³ atıksu çıkmaktadır [3].

2.5.7. Kazan blöf suları

Son teknolojiyle kullanılan işletmelerde kazan dairesinden çıkan blöf sularının miktarı %0,5-3'tür. [3]. Yapılan araştırmalara göre blöf sularındaki KMnO₄ tüketimi 20-300 mg/L'dir [11].

2.5.8. Çamur sevk suları

1 ton pancarın işlenmesi için çıkan atıksu miktarı; küşpe çukurundan 0,1 m³ ve çamur sahasından 0,16 m³'tür [2].

2.5.9. İyon değiştirici tesislerin rejenerasyon suları

şeker sanayinde kullanılan iyon değiştiricilerin rejenerasyonu için; yıkama, ters yıkama, tuzsuzlaştırma yıkaması ve şerbet doldurma işlemleri uygulanır [4]. İlk adım olarak, iyon değiştiricideki çözelti temiz su (yoğunlaşmış buhar) kullanılarak uzaklaştırılır. ıkan yıkama suyu geri döngülü olarak kullanılmaktadır [5]. Ters yıkama işlemiyle sıkışmış iyon değiştiricileri gevşetilir ve böylece çökelmiş katı maddeler su kullanılarak uzaklaştırılır [11]. Daha sonra iyon değiştiricinin rejenere edilir. Rejenerasyon işleminde iyon değiştiricinin cinsine göre; NaCl, MgCl₂ seyreltilmiş asit veya bazdan biri tercih edilir. Ardından tuzsuzlaştırma (yıkama) işlemi uygulanır.

Tuzsuzlaştırma işlemini amacı rejenerasyon işleminde kullanılan maddelerin ortamdaki uzaklaştırılmasıdır [4].

2.5.10. Kireçsizlendirme tesisinden çıkan atıksular

Araştırmalar kireçsizlendirme tesislerinde yapılan rejenerasyon işlemi sonucunda çıkan atıksuyun yaklaşık %5 olduğunu göstermektedir. İyon değiştirici reçinelerin çeşit ve noksanlığına göre B değeri 1-3,5 aralığındadır. Tablo 2.2.'de kireçsizlendirme ünitesinde oluşan atıksu ve kirlilikle ilgili bilgiler verilmiştir [3].

Tablo 2.2. Bir kireçsizlendirme tesisinde oluşan atıksular ve kirlilik yükleri [3]

		KMnO₄ Tüketim	BOI₅	
Yapılan İşlem	Kirli Su Miktarı m³	g/t işlenen Pancar	g/t işlenen Pancar	B Değer
Ters Yıkama	1,99	87,1	22,6	0,42
Rejenerasyon	0,43	3,3	1,2	0,02
Tuzsuzlaştırma	1,58	21,2	9,4	0,17
Yıkama	0,69	94,7	30,2	0,56
TOPLAM	4,7	206,3	63,4	1,17

2.5.11. Şerbetin tuzsuzlaştırılmasından çıkan atıksular

Tuzsuzlaştırma işlemiyle şerbette bulunan şeker haricindeki tüm maddeleri iyon değiştiriciler vasıtasıyla ortamdaki uzaklaştırmak amaçlanır. İyon değiştiricilerin geri yıkanmasıyla tutulan bu diğer maddeler atıksuya karışır [11]. Bu sebeple çıkan rejenerasyon atıksuyu yüksek oranda organik madde ihtiva eder. Bahsedilen bu durumların dışında, nötrleştirme işlemi için de büyük miktarda asit ve baz harcanmaktadır. Dolayısıyla iyon değiştiricilerden çıkan atıksuyun pH'ı çok yüksek veya düşük olabilmektedir. Bu suların direk alıcı ortama (akarsu gibi) veya durultma tesisine verilmesi halinde ortam pH'ı ani bir şekilde değişecek ve biyolojik açıdan zarara yol açacaktır [4]. Tuzlaştırma işlemi sonucu oluşan atıksuların karakteristik özellikleri hakkında bilgiler Tablo 2.3.'te verilmiştir [3].

Tablo 2.3. *Tuzsuzlaştırma ünitesinden çıkan atıksuyun karakteristik özellikleri [3]*

Tuzsuzlaştırma Tesisinden Çıkan Kirlı Su	Miktar
Kuru Madde Miktarı	%1,36
Kızdırma Bakiyesi	%0,82
Organik Madde	%0,54
Polarizasyon	%0,015
Sülfat	%0,47
Klorür	%0,2
Azot	%0,01
BOİ ₅	2650 mg/L
Potasyum Permanganat Tüketimi	9000 mg/L

2.5.12. Kireç çökeltme tankları drenajı ve kok-kireç çamuru

Prosele alınan 1 ton pancar için; yaklaşık 0,12 m³ çökeltme tankı drenaj atıksuyu ve yaklaşık 0,12 m³ de atık çamur oluştuğu bilinmektedir [3].

2.5.13. Evsel atık niteliğindeki kullanma suları

Evsel nitelikli atıksu miktarı her fabrika için farklılık göstermektedir. Evsel atıksuların B değeri genel 0,2 ve miktarı ise yaklaşık %3-5 olarak hesaplanabilir [11].

Eğer fabrikanın kurulu olduğu bölgede kanalizasyon altyapısı bulunuyorsa bu sular bağlı bulunan belediyenin deşarj standartları göz önünde bulundurularak kanalizasyona direk deşarj edilebilir. Eğer ki fabrika yerleşim yerinden uzak ve dolayısıyla kanalizasyon alt yapısı olan bir lokasyonda kurulu değil ise bu evsel nitelikli atıksuları doğal alıcı ortama verme zorunluluğu oluşacaktır. Böyle bir durumda atıksuların içindeki katı maddelerin ayrılması için çok bölmeli bir durultma havuzundan geçirilmesi gerekmektedir [4].

Diğer yandan bu atıksuları, fabrikadan çıkan atıksularla birlikte arıtma tesisine iletmekte mümkündür. Evsel nitelikli atıksuların içinde fazla miktarda bulunan azot ve bakteri fabrika atıksuyun içerisindeki bazı maddelerin indirgenmesine yardımcı olabilir [2].

2.5.14. Meydan ve yağmur suları

Tıpkı evsel atıksu miktarının her fabrikada farklılık göstermesi gibi meydan ve yağmur sularının miktarı da her fabrika için değişiklik göstermektedir [11].

2.6. Şeker Fabrikası Atıksularının Karakterizasyonu

Şeker üretimi için tarlalardan gelen şeker pancarlarının üzeri toprakla kirlendiğinden, topraktaki azot ve fosforu da beraberinde getirmektedir. Pancar üzerindeki toprak suya karıştığında askıda katı madde ve bulanıklık oluşturmaktadır. Endüstrinin pek çok ünitesinde soğutma suyu kullanıldığı için kirletici parametreler arasında sıcaklıkta yer almalıdır. Üretim esnasında meydana gelen kaçaklar veya diğer sebeplerle atıksuya karışan şeker dolayısıyla atıksuyun BOİ₅ değeri oldukça yüksektir. Atıksu kaynaklarına göre BOİ₅ bilgileri Tablo 2.4.' te verilmiştir. Endüstrinin bütünü değerlendirildiğinde çıkış atıksu kirletici parametreleri olarak; BOİ₅, KOİ, AKM, alkalinite, çözünmüş organik ve inorganik maddeler, azotlu ve fosforlu bileşikler, fekal koliform, sıcaklık ve pH değerlendirilmelidir. Türkiye genelindeki şeker endüstrisi atıksuyunun karakteristik değerleri Tablo 2.5. ve Tablo 2.6.' da verilmiştir. Endüstrinin yurtdışındaki bazı fabrikalar için atıksu karakteristik değerleri Tablo 2.7. ve Tablo 2.8.' de verilmiştir. Ülkemiz ve yurt dışı için verilen tablolar kıyaslandığında görülen farklılığın sebebi kullanılan arıtma sistemleridir [11].

Tablo 2.4. Şeker endüstrisi atıksularının kaynakları ve BOİ₅ bilgileri [9]

Şeker Fabrikasının Az Kullanılmış Suları	Miktar %	KMnO ₄ Tüketimi	BOİ ₅ mg/L	B
Pompa Soğutma Suyu	12,3	10	7	0,02
Türbin Soğutma Suyu	9,3	13	8	0,01
Gaz Pompaları Suyu	7,3	24	23	0,07
Kondense Fazlası	3,1	60	34	0,02
Lavör Suyu	5,0	84	26	0,02
Daha Az Kirlenmiş Sular	47,0	27	17	0,14
Şeker Fabrikasının Fazla Kullanılmış Suları	Miktar %	KMnO ₄ Tüketimi	BOİ ₅ mg/L	B
Temizlik Suları	2-3	10000	3500	1,3-2
Bez Yıkama Suları	1-1,5	25000	5000	0,9-1,4
Torba Filtre Yıkama Suları	1-1,5	30000	6000	1,1-1,7
Rejenerasyon Suları	3-5	9000	4000	2,2-3,7
Yoğunlaşmış Buhar Fazlası	0-5	800	400	0-0,4
Evsel Atıksular	3-5	500	300	0,2-0,3
Meydan Suları	1-5	3500	1500	0,3-1

Tablo 2.5. Türkiye genelindeki şeker endüstrisi atıksuyunun karakteristik değerleri (Taşıma, Yıkama ve Proses Suları) [9]

Parametre	Pancar yıkımı ve kanal suları(Karışık)						Difüzyon Suları			Küspe Presleme Suları		
	Kapalı Devre			Açık Devre								
	Min	Maks.	Ort.	Min.	Maks.	Ort	Min.	Maks.	Ort	Min	Maks	Ort
Sıcaklık	8	22	15	6,5	20	12	34	51	43	37	52	44
Bulanıklık(SiO ₂)mg/L	600	10000	3300	700	1800	800	1200	5000	7000	1800		7800
Koku	Z4G üstünde veya z5s			z1S	z1S	z4S	z2S	z5S	z3S	z2S	z5S	z4S
pH	5,0	7,0	6,2	7,1	7,8	7,5	4,2	5,9	4,9	4,3	4,9	4,5
BOİ ₅ (O ₂) mg/L	450	3000	1300	105	210	160	1400	3000	2200	1050	3600	2600
KMnO ₄ değeri mgO ₂ /L	120	1900	540	125	185	150	1100	4000	2200	2700	4300	3350
Çürüyebilme (saat)	0,5	7	4	6	8	7	4	10	6	6	45	16
Amonyak (N) mg/L	1,5	5,0	3,0	1,2	3,5	2,0	2,5	6,5	3,9	2,0	4,6	3,2
Organik Azot (N) mg/L	18,0	90,0	45,0	7,0	15,0	10,0	55	110	85	58	186	107
Fosfat (PO ₄) mg/L	2,0	4,0	2,9	1,5	5,6	3,0	4,2	14,1	8,1	8,4	13,0	10,7
Potasyum (K), mg/L	40	130	76	8	11	10	90	170	110	100	140	120
Top. Kuru Tortu mg/L	1500	8700	4700	1100	1700	1500	3600	6700	5250	5500	8100	6600
Yanabilir maddeler mg/L	600	2400	1400	330	580	420	3000	5700	4500	4800	7400	5800
Toplam asılı katılar	850	6200	2800	580	1050	780	1200	2600	1930	1450	2250	1800
Yanabilir madde, mg/L	160	780	360	100	220	140	1000	2300	1580	1150	1950	1450
*Çamur Hacmi cm ³ /L	6	38	14	5	9	7	15	100	60	20	130	75

Parametre	Pancar yıkımı ve kanal suları(Karışık)						Difüzyon Suları			Küspe Presleme Suları		
	Kapalı Devre			Açık Devre								
	Min	Maks.	Ort.	Min.	Maks.	Ort	Min.	Maks.	Ort	Min	Maks	Ort
Sıcaklık	8	22	15	6,5	20	12	34	51	43	37	52	44
Bulanıklık(SiO ₂)mg/L	600	10000	3300	700	1800	800	1200	5000	7000	1800		7800
Koku	Z4G üstünde veya z5s			z1S	z1S	z4S	z2S	z5S	z3S	z2S	z5S	z4S
pH	5,0	7,0	6,2	7,1	7,8	7,5	4,2	5,9	4,9	4,3	4,9	4,5
BOİ ₅ (O ₂) mg/L	450	3000	1300	105	210	160	1400	3000	2200	1050	3600	2600
KMnO ₄ değeri mgO ₂ /L	120	1900	540	125	185	150	1100	4000	2200	2700	4300	3350
Çürüyebilme (saat)	0,5	7	4	6	8	7	4	10	6	6	45	16
Amonyak (N) mg/L	1,5	5,0	3,0	1,2	3,5	2,0	2,5	6,5	3,9	2,0	4,6	3,2
Organik Azot (N) mg/L	18,0	90,0	45,0	7,0	15,0	10,0	55	110	85	58	186	107
Fosfat (PO ₄) mg/L	2,0	4,0	2,9	1,5	5,6	3,0	4,2	14,1	8,1	8,4	13,0	10,7
Potasyum (K), mg/L	40	130	76	8	11	10	90	170	110	100	140	120
Top. Kuru Tortu mg/L	1500	8700	4700	1100	1700	1500	3600	6700	5250	5500	8100	6600
Yanabilir maddeler mg/L	600	2400	1400	330	580	420	3000	5700	4500	4800	7400	5800
Toplam asılı katılar	850	6200	2800	580	1050	780	1200	2600	1930	1450	2250	1800
Yanabilir madde, mg/L	160	780	360	100	220	140	1000	2300	1580	1150	1950	1450
*Çamur Hacmi cm ³ /L	6	38	14	5	9	7	15	100	60	20	130	75

Tablo 2.6. *Tablo 2.5. devamı [9]*

Parametre	Gaz Yıkayıcıdan Gelen Sular			Filtre Bezlerinin Yıkandığı Ouladan Gelen Sular			Barometrik Konden-Sörlerden Gelen Sular			Çamur Ayırmadan Gelenler (Kok-Kireç Çamuru)		
	Min	Maks.	Ort.	Min.	Maks.	Ort.	Min.	Maks.	Ort.	Min	Maks	Ort
Sıcaklık	10	42	25	43	80	65	30	65	43	8	22	16
Bulanıklık(SiO ₂)mg/L	40	800	200	10000	50000	21000	15	250	93	220	9000	4600
Koku	z1s	z5s	z3s	z2S	z5s	z3s	z1S	z5S	z4S	z1S	z3S	z2S
pH	4,8	6,7	6,1	8,5	10,0	9,4	6,6	8,5	-	6,0	6,3	6,2
BÖİ ₅ (O ₂) mg/L	30	840	370	8400	24000	14000	20	500	187	12000	17000	15000
KMnO ₄ değeri mgO ₂ /L	13	260	74	6300	18000	13000	15	65	40	2300	3900	3200
Çürüyebilme (saat)	4	Yok	-	2	36	12	1	6	4	0,17	1	0,5
Amonyak (N) mg/L	3,5	21,0	11,0	2,0	35,0	20,0	6,0	30,0	18,0	7,0	16,0	12,0
Fosfat (PO ₄) mg/L	0,2	4,8	1,6	0,7	3,5	2,4	0,1	1,1	0,5	10,5		-
Potasyum (K), mg/L	10	55	28	120	260	200	6	55	28	95		-
Top. Kuru Tortu mg/L	660	2000	1200	20000	78000	43500	275	1600	873	10200	25300	19600
Yanabilir maddeler mg/L	180	860	480	19000	32000	26000	90	990	360	5500	1300	10600
Toplam asılı katılar	15	85	39	3400	55000	82000	6	60	27	720	4100	1300
Yanabilir madde, mg/L	4	35	14	2600	27000	9500	1	35	12	500	1520	830
*Çamur Hacmi cm ³ /L		0,2	0,1	6	800	330	Görülmedi			15		7

Tablo 2.7. *Türkiye genelindeki şeker endüstrisi atıksuyunun karakteristik değerleri (İşlenen 1000 ton pancar için çıkan atıksu hacmi ve kirlilik yükleri) [9]*

Parametre	Pancar Yıkama ve Kanal Suları Karışık	Gaz Yıkayıcıdan Gelen	Filtre Bezi Yıkama	Difüzyon Suları	Küspe Presleme Suları	Barometrik Yoğulturucur den Gelen Sular	Kok-Kireç Çamuru Ayırmadan Gelen	Kireç-Çökeltme Tonlu Drenajı	Küspe Çukurları Drenaj Suları	Meydan suları	EvselNitelikli Atıksular	
											Temizlik	Evsel
Debi m ³ /1000 tp	13520	150	150	1500	500	5000					133	50
BÖİ ₅ kg/1000 tp	2704	55,4	2100	3300	1300	100	120	120	260	50	399	15
Askıda Katı Madde kg/1000 tp	10816	5,85	3300	2895	900	150	1800	170,4	260	50		
Toplam Azot kg/1000 tp	162,24	1,65	3	133,35	55,1	100	156	54				
Toplam Fosfor kg/1000 tp	40,56	0,24	0,36	12,15	5,35		1,44					
Eşdeğer Kirlilik kişi/günlü	50074	1028	38889	61111	24074	18515	33333	3155	96296	1389	7667	

Tablo 2.8. Yurtdışındaki bazı fabrikalar için atıksu karakteristik değerleri [9]

Kirli Su Tipi	Debi m ³ /kg Ürün	BOİ ₅ mg/L	KÖİ mg/L	Askıda Katı Madde mg/L	Amonyak Azotu mg/L	Kjeldahl Azotu mg/L
Şeker Pancarı Su Kanalı	7,85	200 - 210	175	400- 4300	3	
Barometrik Yoğuşturucu Suyu	6,89	30- 40		77	6,8	9,4
Küspe Bölmesi Suyu	1,38	910 - 1020				
Küspe Presleme Suyu	0,62	1710		420		
Toplam Süreç Kirli Suyu	2,27	1230 - 1600	1500	1100 - 1300		
Kok-Kireç Çamuru	0,31	1420 - 8600		120000		
Kok-Kireç Havuzları Taşkınları	0,26	1420		450		
Hamur Silosu Drenaj Suları	0,72	7000		270		

Tablo 2.9. Tablo 2.8. devamı [9]

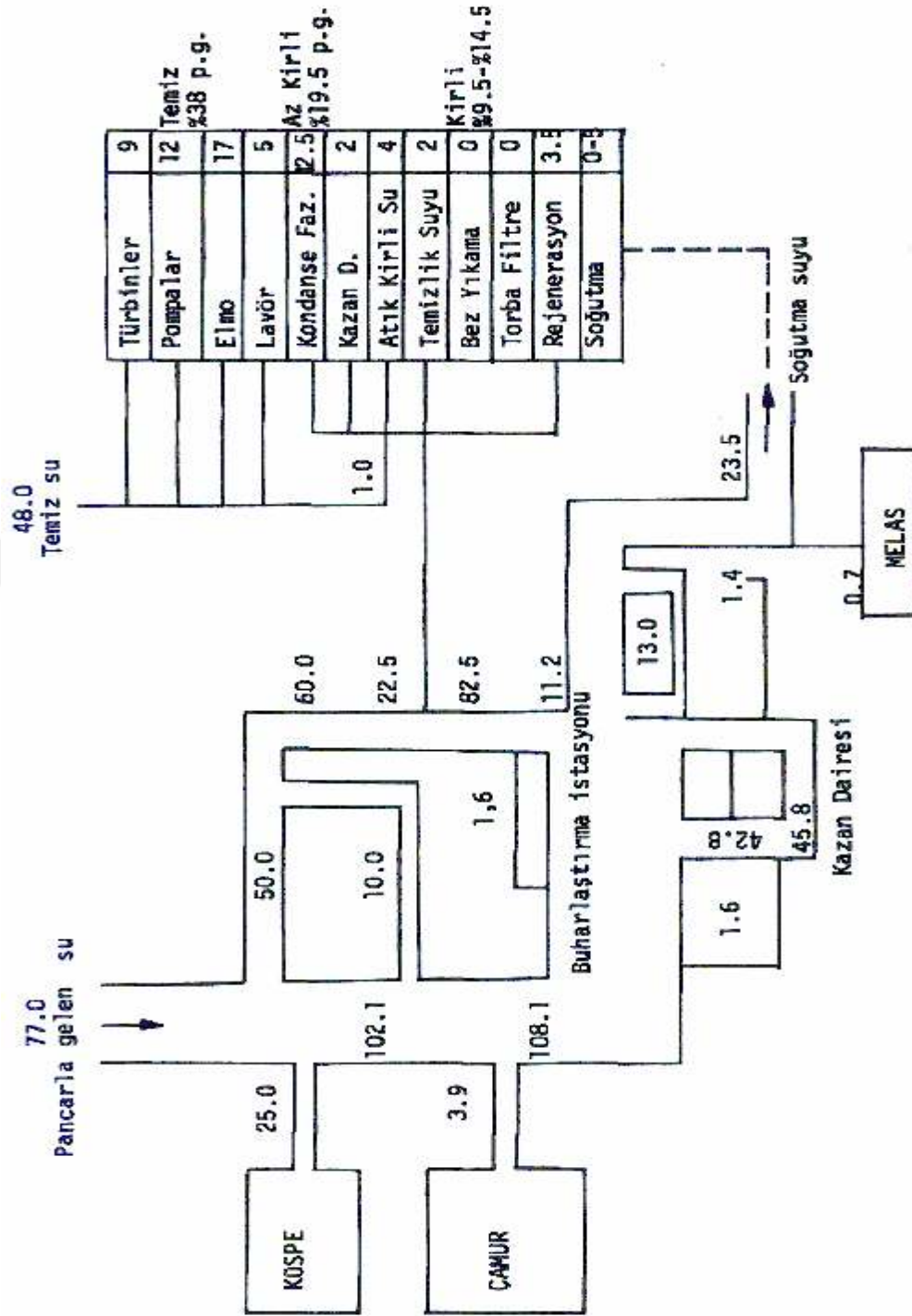
Kirli Su Tipi	Debi m ³ /ton ürün	BOİ ₅		AKM	
		mg/L	kg/ton ürün	mg/L	kg/ton ürün
Steffen Kirliliği	0,41	10000-10500		100-700	
Şeker Pancarı Yüzdürme Suyu	10,84	210	2,25	800-4300	8,5-41,7
Bölme Suyu	1,67	910	1,50	1020	1,7
Pres Suyu	0,75	1700	1,30	420	0,3
Depo Suyu	0,88	7000	6,15	270	0,25
Kireçli Sulu Çamur	0,38	8600	3,25	120000	45
Yoğuşturucu Suyu	8,34	40	0,35		
Steffen Filtresi	0,50	10500	5,20	100-700	0,05-0,35
Toplam Su	23,35		20,0		55,8-94,1
Süreç Suyu					

Tablo 2.10. İşlenen 1 ton Pancar için oluşan atıksuların Tablo 2.9'a göre değerlendirilmesi [9]

Kirli Su Tipi	Nitrat Azotu mg/L	Toplam Fosfor mg/L	Alkalinite mg/L	pH	Çözülmüş Katılar mg/L	Sülfat mg/L	Toplam Koliform EMS/100 ml	Fekal Koliform EMS/100 ml
Şeker Pancarı Yüzdürme Suyu					780			
Barometrik Yoğulturucu. Suyu	0,2	0,06	296	8,5	780	105	1,424	143
Küspe Bölmesi Suyu								
Küspe Presi Suyu								
Küspe Depo Drenaj								
Toplam Süreç Kirli Suyu					1120			
Kok-Kireç Çamuru					2850			
Kok-Kireç Havuzu Taşkını								
Steffen Kirliliği					42900			

2.7. Şeker Fabrikası Atıksularının Genel Değerlendirilmesi

Türkiye’de işletilen pek çok şeker fabrikasından alınan bilgilere göre atıksu çıkış noktaları ve yaklaşık oluşum miktar bilgileri Şekil 2.2’de verilmiştir. Şekilde pancar yüzdürme kısmından oluşan atıksu bilgisine yer verilmemiştir. Çünkü bu kısımdan oluşan atıksu miktarı her fabrika için farklılık göstermektedir. Prosesin geneli değerlendirildiğinde toplam fabrikadan çıkan atıksu miktarının, sistemin kendi içinde geri döngülü olarak kullanılan su miktarıyla kıyaslanması sonucu çok az bir miktara sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 2.2. Tipik bir Şeker üretim prosesi için atıksu çıkış noktaları ve yaklaşık miktarları [3]

Yukarıda verilen bilgiler doğrultusunda üretime giren her 1000 ton pancar başına çıkan atıksu miktarı ve kirlilik yükü bilgileri Tablo 2.11’de verilmiştir [3].

Tablo 2.11. İşlenen her 1000 pancar başına çıkan atıksu miktarı ve kirlilik yükü bilgileri [3]

	1000 ton Pancar işlenmesine karşılık	Konsantrasyon Bazında mg/L
Debi (m ³)	22218	
BOİ ₅ (kg)	18119	815
Toplam Azot (kg)	456,78	20,6
Toplam Fosfor (kg)	58,66	2,6
TAKM (kg)	18277	823
Eşdeğer Kirlilik(kişi/gün)	335534	

Bu değerlere göre toplamda 1 ton pancar üretimi için yaklaşık 22 m³ civarında su tüketilmektedir. Batı ülkelerinde ise bu miktar 18 m³’tür. Kirlenme profilinin çıkarılmasının ardından Tablo 2.12’de ülkemizdeki şeker fabrikalarının çıkan evsel nitelikli atıksu miktarı ve kirlilik yükü, Tablo 2.13’te kampanya boyunca çıkan atıksu miktarı ve kirlilik yükü ve Tablo 2.14’te fabrikaların ortalama günlük ve kampanya sonu toplam çıkan atıksu debisi ve kirlilik yükleri verilmiştir.

Tablo 2.12. Ülkemizdeki şeker fabrikalarının çıkan evsel nitelikli atıksu miktarı ve kirlilik yükü [11]

Fabrika	Atıksu Miktarı (m ³ /gün)	BOİ ₅ kg/gün	AKM Yükü (kg/gün)	Eşdeğer Kirlilik (kişi/gün)
Adapazarı	153304	125021	126111	2.315.185
Afyon	153304	125021	126111	2.315.185
Alpulu	84428	68852	69453	1.275.029
Amasya	102380	83492	84220	1.546.140
Ankara	41592	33919	34214	628,120
Bor	46658	38050	38382	704.621
Burdur	113312	92407	93213	1.711.223
Elazığ	38393	31310	31583	579.803
Erzincan	38393	31310	31583	579.803
Erzurum	59990	48921	49348	905.942
Eskişehir	149305	121760	122821	2.254.790
İlgın	79985	65228	65797	1.207.92
Kastamonu	83984	68490	69087	1.268.318
Kayseri	72786	59358	59875	1.099.209
Konya	126643	103278	104179	1.912.544
Kütahya	34993	28537	28786	528.466
Malatya	66654	54357	54831	1.006.602
Muş	57990	47290	47703	875.743
Susurluk	1 29086	105271	106189	1.949.452
Turhal	139707	113932	114926	2.109.838
Uşak	32660	26635	28867	493.235

Tablo 2.13. *Kampanya boyunca çıkan atıksu miktarı ve kirlilik yükü [11]*

Fabrika	Atıksu Miktarı(1000m³ /kampanya)	BOİ₅ (ton/kampanya)	AKM Yüğü (ton/kampanya)	Eşdeğer Kirlilik (milyon kişi/gün) kampanya
Adapazarı	22995	18750	18913	345
Afyon	24548	20000	20174	368
Alpullu	12664	0335	10425	191
Amasya	18432	15030	15160	270
Ankara	7488	6120	6173	113
Bor	7464	6080	6133	112
Burdur	18128	14784	14912	272
Elazığ	5376	4382	4420	81
Erzincan	5760	4695	4735	87
Erzurum	8400	6860	6920	126
Eskişehir	23888	19488	19657	360
Ilgın	12800	10400	10490	192
Kastamonu	15120	12330	12437	221
Kayseri	12376	10098	10186	187
Konya	20889	17045	17193	313
Kütahya	5950	4845	4887	90
Malatya	10997	7616	7682	140
Muğ	4930	4020	4055	74
Susurluk	22575	18482	18588	341
Turhal	25146	20520	20698	381
Uşak	5560	4522	4561	83

Tablo 2.14. Fabrikaların ortalama günlük ve kampanya sonu toplam çıkan atıksu debisi ve kirlilik yükleri [11]

Kirlilik	Hergün	Kampanya Sonu
Debi	1805547 m ³ /gün	291,5 milyon m ³
BOİ ₅	1472439 kg/gün	236 milyon kg
TAKM	1485279 kg/gün	238 milyon kg
Eşdeğer Kirlilik	27895179 kişi/gün	4,35 milyon kişi/gün

Tablo 2.14'teki değerler, ortalama baz alınarak diğer ek üniteler dahil edilmeden oluşturulmuştur. Bu tablo, şeker fabrikalarının kampanya boyunca oluşturduğu kirliliğin, bulundukları lokasyondaki nüfusun oluşturduğu kirliliğini neredeyse katlayan bir tablo çizmektedir. Fabrikalardan çıkan yüksek kirliliğe sahip bu atıksuların mutlaka bir arıtmadan geçirilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla şeker fabrikalarından çıkan atıksuların yönetimi için aşağıda belirtilen ilkeler dikkate alınmalıdır:

- Yüksek kirliliğe sahip çıkış atıksuyunun fabrikanın bulunduğu lokasyonda yer alan akarsu, nehir gibi doğal alıcı ortama deşarj edildiği için fabrikalarda mutlaka arıtma tesisi kurulu olmalıdır.
- Uygulanacak arıtma yöntemi için fabrikada bazı noktalarda oluşan atıksuların geri döngülü kullanılmasıyla harcanan suyun ve enerjinin en aza indirgenmesini sağlayacak teknolojiler tercih edilmelidir [3].

2.8. Kaynakta Kirlenmeyi Önleyici Düzenlemeler ve Geri Kazanım Uygulamaları

2.8.1. Pancar yüzdürme ve yıkama sularının geri döngüsü

Pancarın yüzdürme ve yıkanma kısmından çıkan atıksudaki toprak uzaklaştırıldıktan atıksuyun içinde sadece organik kirleticiler kalacağından dolayı yüksek debili akarsulara verilebilir [4].

Geri döngülü sistemlerin kullanılmadığı fabrikalarda B değeri yaklaşık 28 iken suyun geri döngülü olarak kullanan fabrikalarda 10-15 arasında seyretmekte ve mutlak kirliliği de %45-65 daha düşük olmaktadır [3].

2.8.2. Yoğuşturucu soğutma suyunun geri döngüsü

Fabrika eğer bir akarsu kenarında kuruluysa yoğuşturucu soğutma suyu genelde bir kez kullanılır ve akarsuya deşarj edilir. Deşarj öncesi bu suyun sıcaklığının 30°C'ye getirilmesi yeterli olmaktadır. Yoğuşturucu ünitesinden çıkan suyun sıcaklığını düşürmek için, prosesteki diğer ünitelerden çıkan soğutma suları birleştirilir [2].

2.8.3. Süreç atıksuyunun geri kazanımı

Şeker üretimi esnasında su yönetimindeki asıl amaç, çok az miktarda temiz su harcanması ve dolayısıyla az miktarda atıksu oluşmasıdır [3]. Proseste su tüketimi olan kısımlardan farklı miktarlarda kirlilik oranına sahip atıksular çıkmaktadır. Bu sular birbirine karıştırılmadan kendi içlerinde geri döngülü olarak kullanılması harcanacak temiz su miktarını da azaltacaktır. Ayrıca, çamur formunda veya katıya yakın oluşan atıkların uzaklaştırılması içinde su harcanmaması önemlidir. Bundan dolayıdır ki döner filtreden çıkan çamur direk bertaraf edilmelidir. Bu durumda su az harcanmış olurken atıksu oluşumu da azaltılacaktır [4].

2.9. Atıksu Arıtım Yöntemleri

2.9.1. Başlıca kontrol parametreleri

Şeker fabrikası çıkış atıksuyu karakteristiği BOİ₅, KOİ, AKM, alkalinite, çözünmüş organik ve inorganik maddeler, azotlu ve fosforlu bileşikler, fekal koliform, sıcaklık ve pH parametrelerine bakılmalıdır. BOİ₅, AKM ve pH değerleri en önemli atıksu çıkış parametreleridir [3].

2.9.2. Kontrol ve arıtma teknolojisi

Şeker endüstrisi atıksuyu için en uygun arıtma ve deşarj yöntemleri; proses içinde geri döngüsü mümkün olan atıksuların yeniden kullanımı, pıhtılaştırma, havuz veya lagünlerde bekletme ve tarım arazilerinin sulamasında kullanılmasıdır [8]. Şeker Fabrikaları atıksularının Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'ne göre deşarj standartları Tablo 2.15 ve Tablo 2.16'da verilmiştir [12].

Tablo 2.15. *Kondenzasyon suları ile seyrelmenin olmadığı şeker fabrikalarında deşarj standartları [12]*

PARAMETRE	BİRİM	KOMPOZİT NUMUNE 2 SAATLİK	KOMPOZİT NUMUNE 24 SAATLİK
KİMYASAL OKSİJEN İHTİYACI (KOİ)	(mg/L)	500	450
ASKIDA KATI MADDE (AKM)	(mg/L)	100	80
BALIK BİYODENEYİ (ZSF)	-	4	-

Tablo 2.16. *Kondenzasyon suları ile seyrelme yapılan şeker fabrikalarında deşarj standartları [12]*

PARAMETRE	BİRİM	KOMPOZİT NUMUNE 2 SAATLİK	KOMPOZİT NUMUNE 24 SAATLİK
KİMYASAL OKSİJEN İHTİYACI (KOİ)	(mg/L)	60	-
BALIK BİYODENEYİ (ZSF)	-	4	-

2.9.3. Arıtma süreçleri

Şeker endüstrisi atıksuları, fabrikanın kurulduğu lokasyonda deşarj için uygun bir alıcı ortamın varlığına göre farklı sistemlerle yönetilir [3]. Şeker fabrikalarının birçoğunda aerobik ve anaerobik derin havuzlar kullanılır. Bazı fabrikalarda ise atıksular direk araziye ya da çamur havuzlarına gönderilir. Bilhassa kurak iklim şartlarını hâkim olduğu yerlerde, lagün veya çamur havuzlarındaki sular tarım arazilerinin sulamasında değerlendirilebilir [4].

2.10. Şeker Endüstri Atıksularının Arıtım Sistemleri

Şeker endüstrisi atıksularının yönetiminde kullanılabilecek arıtım sistemleri genel olarak aşağıdaki gibidir [3]:

- Fiziksel Arıtım
- Kimyasal Arıtım
- Biyolojik Arıtım
- Doğal arıtım

2.10.1. Fiziksel arıtım

Şeker pancarının yıkanması sonucu oluşan atıksular ve flume, kazan alt suyu gibi katı formlar barındıran atıksular için amaç su içerisinde askıda ve yüzer haldeki katıların (toprak, kum, yaprak ve bitki parçaları gibi) uzaklaştırılmasıdır. Bu uzaklaştırma işlemi için fiziksel arıtım tercih edilir [2]. Fiziksel arıtımda atıksu, çöktürme havuzlarında bekletilir ve yer çekimi etkisiyle askıda ya da yüzeyde bulunan sudan daha ağır maddeler dibe çöker. Havuz yüzeyinden alınan atıksu farklı tasarımlarda döner ızgaralardan ve eleklerden geçirilerek kendi ağırlığıyla çökemeyen maddelerde böylece uzaklaştırılır. Daha sonra atıksu kum tutucu vasıtasıyla atıksu içindeki kum taneleri ayrıştırılır. Çamur havuzları genellikle çok küçük askıda katı maddelerin çökeltilmesi için kullanılır. En iyi sonuçlar ise bağıl olarak yüksek debili atıksu girişi olan çökeltim havuzlarında görülmektedir [3].

2.10.2. Kimyasal arıtım

Şeker üretimi proses atıksularına kimyasal arıtım uygulanması, atıksuların kapalı devre geri döngülü kullanımında gerekli olmaktadır. Bu durum için uygulanabilecek iki arıtım yöntemi mevcuttur:

- Kireçleme
- Sülfürik asitle kimyasal reaksiyon

Kireçleme, albuminli bileşiklerin ve kendiliğinden çökemeyen çok küçük parçacıkların yumaklaşarak birleşip çökmesini sağlar. Kireç aynı zamanda atıksudaki bakterileri de gidermektedir. Kireçleme işlem basamakları; çamurlu atıksu, dikey çökeltme tankından belirli aralıklarla devamlı çalışan CO₂ doyurucusuna aktarılır, bu kısımdan çıkan atıksuyun pH'ı 8,5'tir. Bu kısımda çökelen kalsiyum karbonat süspansiyonda kalır ve şeker pancarı parçacıklarıyla birlikte çökeler [11].

Atıksuyun sülfürik asit ile kimyasal reaksiyonunda, %0,03-0,05 (şeker pancarının ağırlığı) oranında sülfürik asit kullanılırsa meydana gelen koagülasyonla birlikte iyi bir çökeltme olur. Şeker pancarının belirli işlemlerden geçirilmesi sonrası çıkan melas ve şeker pancarı hamuru ile birlikte kuru kolloidler, geri kazanılmış olmaktadır. Bu artıklar ise hayvan yemi olarak değerlendirilir. Bu yöntemle prostesten çıkan atıkların, şeker pancarından şeker üretimi sürecindeki döngüsünün sürekliliği amaçlamaktadır [13].

2.10.3. Biyolojik arıtım

Şeker Endüstrisi atıksularının arıtımında, anaerobik ve aerobik arıtım birlikte kullanılabilir. Bu ikili arıtma sistemlerinde, anaerobik arıtım aerobik arıtıma hazırlık olması için yapılmaktadır. Şeker endüstrisinden kaynaklanan atıksuların aerobik arıtıma alınmadan önce sudaki şeker organik asitlere indirgenmelidir. Bu işlem olmadığı takdirde şeker aerobik arıtımda parçalanmayacak ve *Bac. Subtilis* ve *Leuconostoc dekstrancum* bakterileri tarafından polifruktoz ve poliglukoz polimerlerine dönüştürülecektir. Bu durumda sudaki kirlilik yükünün artmasından dolayı aktif çamur oluşumu engellenir ve aerobik arıtmadan beklenen verim elde edilemez [11].

2.10.4. Doğal arıtım

Günümüzde pek rastlanmamakla birlikte şeker fabrikası atıksularının arıtımında doğal arıtım yöntemleri de kullanılmaktadır. Bu yöntemde atıksuların, önce bir havuzda bekletilerek yer çekimi etkisiyle dışarıdan hiçbir müdahale olmadan kendiliğinden içindeki askıda katı maddelerin çökmesi beklenir. Daha sonra üst yüzeyden alınana sular tarım arazilerinde sulama için kullanılır. Ancak bu yöntemde arıtım işlemi uzun sürdüğü ve kullanılan havuzların derinliği en fazla 1,5 m olması gerektiği için büyük alanlara ihtiyaç duyulmaktadır [3].

2.11. Elektrokimyasal Arıtım Yöntemleri

En sık tercih edilen elektrokimyasal arıtım yöntemlerinden bazıları; elektrooksidasyon, elektroflotasyon, elektrokoagülasyondur [14, 15]. Bu üç proses ayrı ayrı olduğu gibi birlikte bir sistem içinde de kullanılabilir. Bu proseslerde elektrotların şekli ve yapısı sistemin özelliklerini belirlemektedir.

Elektrooksidasyon ve elektroflotasyon proseslerinde elektrokoagülasyondan farklı olarak sistemde çözünmeyen ortama dayanıklı inert metal ya da metal alaşımlardan yapılan elektrotlar (Ti/Sn, Ti/Ru, Pt/Ti/Ir, çelik gibi) kullanılmaktadır [16, 17, 18]. Elektroksidasyonda, elektrokimyasal reaksiyon sonucunda oluşan OH radikali organik maddeleri okside eder. Elektroflotasyonda ise sistem işlerken çıkan O₂ ve H₂ gazları aracılığıyla kirleticiler sistemin üstünde toplanarak ayrılır. Elektrokoagülasyon prosesine bakıldığında ise, işletme süresince çözünebilen metal elektrotlar (Al ve Fe gibi)

kullanılmaktadır. Elektrokoagülasyon prosesi esnasında elektrotlardan çözünerek ayrılan metal iyonları ortam koşullarına bağlı olarak metal-polimer kompleksleri oluşturur ve kirleticileri adsorplayarak koagüle olur. Elektrokoagülasyon prosesinde ayrıca kirleticiler az da olsa bazen ortam şartlarına bağlı olarak elektrooksidasyon görülmektedir. Elektrokoagülasyon diğer elektrokimyasal proseslerden farklı olarak, oksidasyon, koagülasyon ve flotasyonun bir arada görülebilmesidir [19].

2.11.1. Elektrooksidasyon prosesi

Elektrooksidasyon, sistemde çözünmeyen elektrotlar (Pt/Ti, Ti/Ru/Ir, Ni/Ti/Ga, çelik gibi) kullanılarak kirleticilerin okside edildiği prosestir. Anot olarak RuO_2 , CO_3O_4 ve MnO_2 , titanyum kullanıldığında katalitik aktivitenin diğer malzemelere kıyasla daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Bununla beraber, kurşun ve grafit anotlar da çok iyi sonuçlar vermektedir. Ayrıca en iyi sonuçların metal oksit anotlarla elde edildiği bildirilmiştir [16, 17].

RuO_2 , CO_3O_4 ve MnO_2 , titanyum bazı üzerine tatbiki ile oluşturulan anot diğer anotlara göre daha iyi katalitik aktivite göstermektedir. Bununla beraber, kurşun ve grafit anotlar da çok iyi sonuçlar vermektedir.

Sigara [20], tekstil [18] ve deri [17] endüstrisi atıksularında, elektrokimyasal oksidasyonla uygulanarak elde edilen arıtım verimlerinin yüksek olduğu belirtilmiştir. Elektrooksidasyon anodik (direkt) ve dolaylı (indirekt) oksidasyon olmak üzere iki ayrılır:

- Direkt Oksidasyon

Oksidasyon, anot ve katot olarak kullanılan elektrotların yüzeyinde meydana gelir. Bu proseste en önemli kısım anottur. Anot olarak; Fe, Al, Pt, Ti, Ti/ IrO_2 , Pb/ PbO_2 , IrO_2 , TiO_2 , cam karbon, poroz karbon, fiber karbon gibi materyaller kullanılır. Katot olarak ise çoğunlukla çelik, Pt ve Ti kullanılır [21]. Katalitik aktivitesi yüksek sayesinde su hidroliz olur ve aşağıda verilen reaksiyon sonucu OH radikalleri meydana gelir. Organik kirleticiler oluşan bu OH radikallerini adsorplayarak bozunurlar (Denk. 2.2) [22]. Organik kirliliğin türü, katalitik aktivite, akım yoğunluğu ve difüzyon oranı oksidasyon verimini etkileyen parametrelerdir.

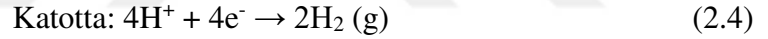
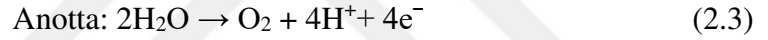


- İndirekt Oksidasyon

İndirekt oksidasyon direkt oksidasyondan farklı olarak elektrotlar arasındaki bölgede meydana gelir [23]. Organik maddelerin küçük bileşenlere parçalanması, direkt oksidasyon sonucu oluşan radikalların bozunması sonucunda ortaya çıkan birincil (Cl_2 , O_2 gibi) ve ikincil (ClO_2 , O_3 ve H_2O_2 gibi) oksidantların sulu ortama difüze olması ile gerçekleşir. Difüzyon oranı, sıcaklık ve pH indirekt oksidasyon prosesini etkileyen parametrelerdir [24].

2.11.2. Elektroflotasyon prosesi

Elektrokimyasal arıtmada en çok kullanılan yöntemlerden biri de elektroflotasyondur [25, 26]. Elektroflotasyon kısaca; sistemde meydana gelen reaksiyonlar sonucu oluşan H_2 , O_2 gibi gaz kabarcıklarının kolloidal partiküllerle adsorplanıp üst yüzeye doğru hareket ederek buradan toplanması şeklinde açıklanabilir. Prosesin temelini oluşturan bu gazların oluştuğu reaksiyonlar aşağıda verilmiştir:



Elektroflotasyon proseslerinde sıvı içerisinde bulunan askıda katı maddelerinin boyutları için bir sınırlandırma yoktur. Reaksiyon süresince oluşan kabarcıklar, genellikle 5-100 μm çapında olup, yüksek dispersiyona sahiptirler. Kullanılan elektrotların yüzey alanına göre değişen kabarcık sayısı 10-20 milyon/ cm^2 arasındadır. Bu prosesin işleyişinde elektrotların hücre içindeki dizilişi büyük önem arz etmektedir. Genellikle anot alt kısımda bulunurken, katot anodun 10-50 mm üzerinde olacak şekilde yerleştirilir [25].

Kabarcıkların boyutunu akım yoğunluğu, elektrot cinsi ve şekli belirlerken, kabarcık sayısı ve hacmi sistemin verimi belirleyen parametrelerdir. Kabarcık sayısı ve büyüklüğü akım yoğunluğu, elektrot malzemesi, pH ve sıcaklık değiştirilerek kontrol edilebilmektedir. Dolayısıyla elektroflotasyonun hızı da arttırılabilmektedir [22].

2.11.3. Elektrokimyasal membran prosesleri

Bu proste iyon seçici membranlar kullanılarak iyonların geçişi sağlanmaktadır. Aynı zamanda mikrofiltrasyon ve ultrafiltrasyon da gerçekleşmiş olur [3]. Elektrokimyasal membran proseslerinin çeşitli uygulama alanları şu şekilde verilebilir;

- Elektrodializ

İyonik türlerin, iyonik olmayan türlerden uzaklaştırılması için kalıp levha formunda iyon seçici reçinelerin (membran) kullanıldığı bir prostedir. Bilhassa deniz suyundan içme suyunun eldesinde tercih edilen bu proses aynı zamanda yiyecek, ilaç, metal endüstrisi gibi farklı sanayi atıksularının arıtımında da kullanılmaktadır [26].

Elektrodializin temel prensibi kısaca şu şekilde açıklanır; elektrik akımı uygulanmasıyla katyonlar katoda gider ve anyon değiştirici membranlar tarafından tutulurken, anyonlar ise anoda doğru hareket eder ve katyon değiştirici membranlar tarafından tutulurlar. Bu işlem sonucunda oluşan her bir yoğun ve seyreltik bölüm bir hücre çiftini meydana getirir. Bu şekilde oluşan minimum 300 hücre çifti ise bir elektrodializ hücresini oluşturur [24].

- Elektroozmoz prosesi

Atıksulardan askıda katıların uzaklaştırılması ve susuzlaştırma işlemlerinde kullanılmaktadır. Prosesin temel prensibi, membranın iki tarafı arasında iyonların taşınması için elektriksel potansiyel fark meydana getirilmesidir [2].

2.12. Elektrokoagölasyon Prosesi

Elektrik akımı vasıtasıyla atıksudan istenmeyen maddelerin uzaklaştırılması için kullanılan bu proses, tekstil endüstrisi [27-33], kağıt ve kağıt hamuru endüstrisi [34,35], hastane atıksuyu [36-38], mezbaha atıksuları [39, 40], süt yumurta endüstrisi [41-44], sızıntı suyu [45-47], gıda endüstrisi [48-50], boya üretim endüstrisi [51], evsel atıksuların arıtımı [52] gibi pek çok farklı sanayi kolundan çıkan atıksuların arıtımının yanı sıra ie suyu arıtımında [53-56] da kullanılan bir yöntemdir.

Elektrokoagölasyonla arıtımın sağladığı avantajlar ve bazı dezavantajlardan aşğıdaki kısaca maddeler halinde bahsedilmiştir.

Elektrokoagölasyonun sağladığı avantajlar:

- Proseste kullanılan ekipmanların ve işletme koşullarının basit oluşuyla birlikte iyi bir giderim verimi elde edilebilmektedir [14].

- Atık suların arıtımının yanı sıra renk ve koku gideriminde de iyi derecede verim elde edilmektedir [56].

- Proses sonucu oluşan çamurun içerisinde metal oksit ve hidroksitlerin çok fazla miktarda olması nedeniyle çamur, kolaylıkla stabil hale getirilip ve susuzlaştırılabilir. Dolayısıyla işlem sonucunda çıkan çamur kütlesi azalmaktadır [14].

- Proses esnasında oluşan floklar, kimyasal koagülasyonda oluşan floklara benzer fakat daha büyük formlardadırlar ve bünyelerinde daha az bağıl su mevcuttur. Elektrokoagülasyon prosesinde oluşan floklar asidik ortamlara daha dirençli oldukları gibi aynı zamanda daha kararlı yapıdadırlar. Bu özelliklerinden dolayı filtrasyonla daha hızlı ayrıştırılabilirler [14].

- Elektrokoagülasyonla arıtımla, kimyasal arıtıma kıyasla daha düşük toplam çözünmüş katı madde içeren bir su elde edilir. Sistemden çıkan bu su tekrar kullanıldığında, düşük miktarda çözünmüş toplam katı madde içerdiğinden, geri kazanım giderinin de düşmesine neden olur [57].

- Sistemde oluşturulan elektrik alanı bu parçacıkların daha hızlı hareket etmelerini sağlayarak koagülasyonu kolaylaştırır. Böylece en küçük kolloidal parçacıkların dahi giderimi sağlanır [14].

- Arıtım için sisteme, kimyasal madde ilavesi olmadığı için ikincil bir kirlenme önlenmiş olurken aynı zamanda oluşacak çamur miktarı da azalmaktadır [14].

- Sistemde gerçekleşen reaksiyonlar sonucu oluşan gaz kabarcıkları kirleticileri sistemin üst kısmına taşıyarak (flotasyon) arıtıma katkıda bulunurlar [58].

- Sistemin çalışması için gerekli olan elektrik enerjisi, elektrik hattı olmayan bazı kırsal alanlarda veya tercihe göre güneş, rüzgâr enerjisi veya yakıt hücreleri gibi yeşil enerji kaynaklarından biriyle de temin edilebilir [59].

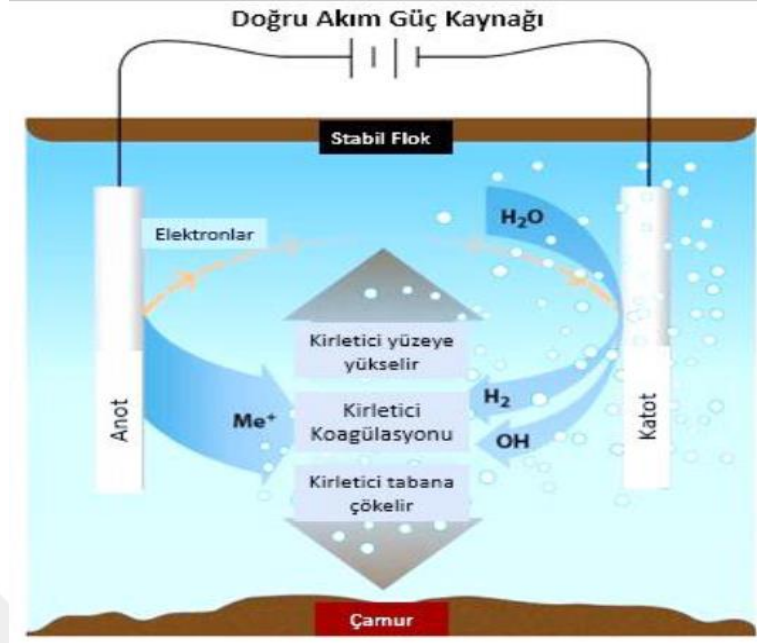
- Alternatif sistemlerde bazı kirleticilerin gideriminde birden çok proses birlikte kullanılırken elektrokoagülasyonla arıtmada bu ihtiyaç ortadan kalkmaktadır [60].

Elektrokoagülasyonun dezavantajları:

- Elektrotlar zaman içerisinde çözündüğünden, azalır ve yenilenmesi gerekir [61].
- Arıtma işinin yapılacağı bölgede elektrik enerjisi maliyetli olabilmektedir [62].
- Elektrokimyasal arıtma sisteminin çalışabilmesi için, arıtılacak suyun iletkenliğinin yüksek olması istenir, bu nedenle bazı atıksulara destek elektrolit (genellikle NaCl) ilavesi yapılmaktadır. Destek elektrolit ilavesi sonucunda atıksuyun toplam çözünmüş madde miktarı yükselmektedir [59, 63] Destek elektrolit olarak sisteme NaCl ilave edildiğinde, teorik olarak anotta klorürün yükseltgenmesi neticesinde klor gazı (Cl_2) meydana gelebilir. Asidik ortamda hipokloröz organik kirleticilerle birleşerek klorlü organik bileşikler ve çeşitli yan ürünler oluşturabilir. Oluşabilecek bu bileşiklerin insan sağlığına ve sucul ortama son derece zararlı etkileri vardır [63].
- Yüksek akım yoğunluğu veya pH gibi bazı durumlarda jelatinimsi Al veya Fe hidroksitler çözünmeye eğilimli olabilmektedir. Bu çözünme de arıtım verimini düşürmektedir [14].
- Katot elektrotu yüzeyinde geçirimsiz bir film tabakasının varlığı sistemin verimini olumsuz etkileyebilmektedir [64].

2.13. Elektrokimyanın Temeli

Elektrokimya, elektrik akımı ile kimyasal reaksiyonların gerçekleştirilmesi ya da bir başka deyişle yükseltgenme-indirgenme reaksiyonlarında elektrik enerjisini kullanan bir bilim dalıdır. Elektrik akımı için seçilen bir metal ve elektrolit vasıtasıyla, yarı indirgenme ve yarı yükseltgenme redoks tepkimeleri oluşturulur [3]. Tipik bir elektrokoagülasyon deney düzeneğinde meydana gelen reaksiyonlar Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Tipik bir elektrokoagülasyon hücresi [63]

2.13.1. Elektrokimyada bahsi geçen başlıca kavramların tanımları

Elektrokimyada bahsi geçen başlıca kavramların tanımları aşağıda verilmiştir. [65];

Kasyon ve anyon: Eksi yüklü olan ve katoda hareket eden taneciklere anyon, artı yüklü olan ve anoda hareket eden taneciklere ise kasyon denilmiştir.

Katot ve Anot: Güç kaynağının eksi kutbuna bağlanan elektrota katot, artı kutbuna bağlanan elektrota da anot denir.

Elektrot: Dış devrenin uçlarını oluşturan ve çözelti içine batırılmış olan levhalardır. Elektrotlar tel, çubuk, ağ, levha gibi şekillerde kullanılabilirler.

Elektrolit: Elektrik akımının geçmesi, madde taşınmasıyla alakalı olan iletkenlere elektrolit denir. Elektrolit maddeler; Asit veya baz çözeltileri, katı eriyik ve çözünmüş halde olan tuzlar, kolloidler, kısmen oksitler ve sülfürlerdir.

Elektroliz: Elektrolitin içerisinde elektrik akımı geçirilmesi sonucunda oluşan tüm yarı redoks tepkimeleridir.

Elektrolitik İletkenlik: Elektrik akımının, elektrolit içerisinde serbest halde bulunan iyonların vasıtasıyla iletilmesidir. Bu iyonlar uygulanan gerilimle hareket eder ve sonuç olarak elektrik akım geçmesi ancak madde taşınmasıyla mümkündür.

Elektronik (Metalik) İletkenlik: Bir metale elektrik akımı uygulanırsa, metalde madde kaybı olmadan, yapısında bulunan elektronların hareket ederek elektriği iletmesidir.

Hücre tepkimeleri: Sistemde çözünmüş halde bulunan iyonlarla dışarıdaki bir güç kaynağından yine sisteme verilen elektrik yükleri arasında gerçekleşen tepkimelerdir. Bu tepkimeler hem anot hem de katotta olan kimyasal reaksiyonların toplamıdır.

Yan tepkimeler: Hücre tepkimeleri sonucunda oluşan ürünlerin birbirleriyle, çözelti içindeki diğer taneciklerle, elektrotla, çözücüyle veya dış devreden alınan yüklerle v.b. olabilen tepkimelerdir.

Faraday'ın 1. Elektroliz yasası: Michael Faraday; Yükseltgenme veya indirgenme yarı redoks tepkimesinde, elektrotlarda değişikliğe uğrayan madde miktarının elektrolit içinden geçen elektrik miktarı ile doğru orantılı olduğunu ifade etmektedir

Faraday'ın 2. Elektroliz yasası: Faraday'ın ikinci elektroliz yasasını; Aynı elektrik miktarının çeşitli elektrolitlerden değişikliğe uğrattığı madde miktarı, bunların kimyasal eşdeğer ağırlıklarıyla orantılıdır şeklinde ifade etmektedir. Ayrıca Faraday'ın ikinci elektroliz yasasına göre bir maddenin bir eşdeğer gramının ayrışması için gerekli elektrik miktarı hesaplanabilir. Bir uluslararası coulomb, 1,11800 mg gümüş ayıran elektrik miktarına göre, 1 atom gram (dolayısıyla bir eşdeğer gram) gümüş ayırmak için gerekli elektrik miktarının $107,880/0,0011180=96496$ coulomb olduğu hesaplanabilir. Bu miktara 1 Faraday denir ve F ile gösterilir. İyot kulonmetresi ile $F=96514$ coulomb bulunmuş ve ortalama $F=96500$ coulomb kabul edilmiştir.

2.14. Elektrokoagülasyon Teorisi

1889 yılında Londra'da, elektrokoagülasyonla arıtımın uygulandığı ilk tesis kurulmuştur [66, 67]. Kirlilik gideriminde elde edilen bazı iyi sonuçlara rağmen, bu tekniğin gördüğü ilgi sınırlı kaldı. Fakat günümüzde alternatif su arıtma teknolojilerine olan talep artmasıyla elektrokoagülasyonla atıksu arıtımı gerek bilimsel gerekse ekonomik ve çevresel açıdan değer kazanmaya başlamıştır [68].

Elektrokoagülasyon prosesinde kimyasal koagülasyondan farklı olarak koagülant, anodun elektrolitik oksidasyonu sonucu meydana gelmektedir. Bu proseste yüklü iyon

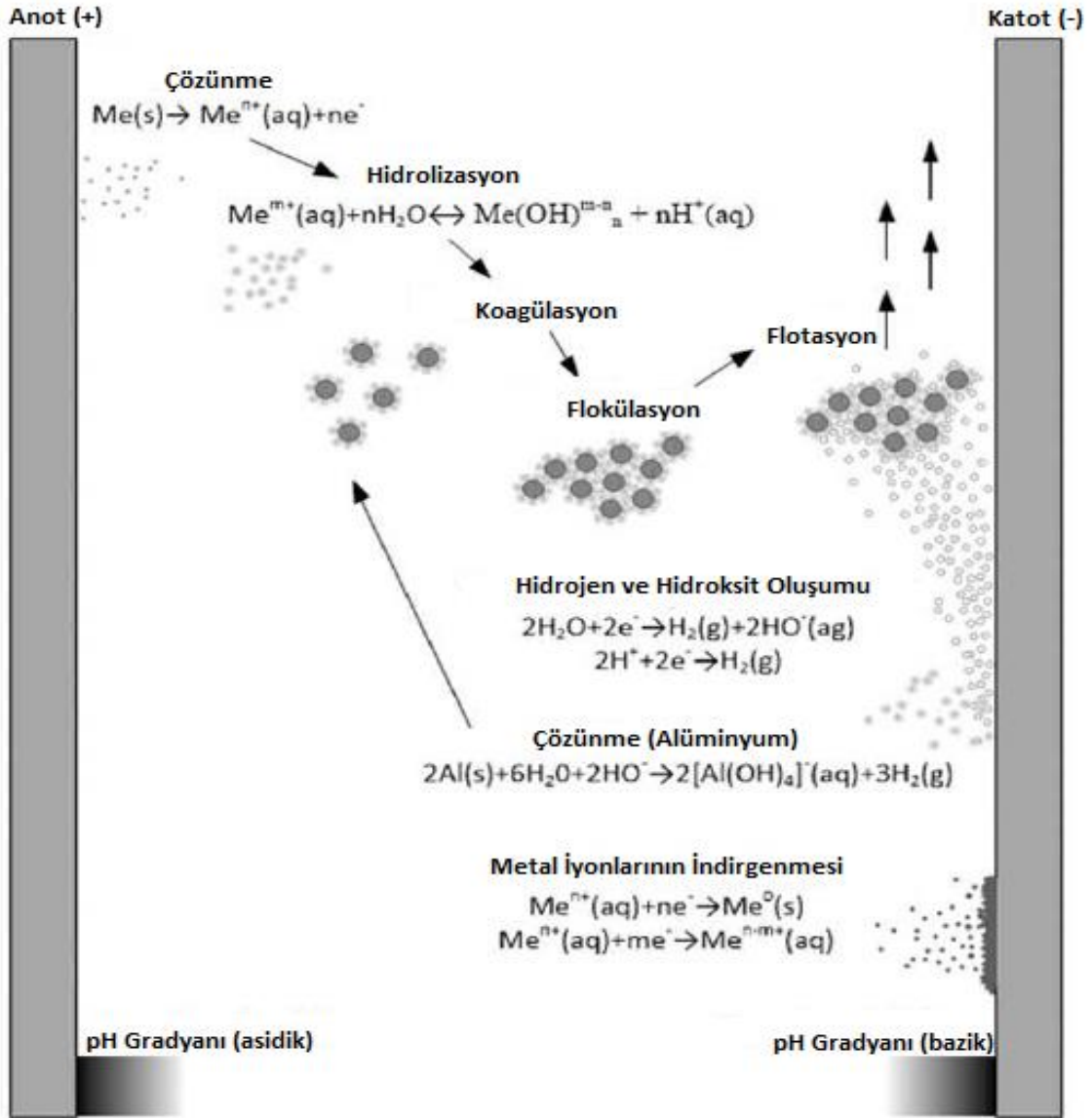
türleri ile anottan çözünmüş olan metal iyonları, metal hidroksit floklarını oluşturmaktadır [63].

Elektrokoagülasyonla atıksu arıtımı sırasında ana reaksiyonların yanı sıra yan reaksiyonlarda meydana gelmektedir.

2.14.1. Ana reaksiyonlar

Elektrokoagülasyon işleminde elektrot malzemesinin seçimi, sistemin verimi üzerine çok önemli etkiye sahiptir. En yaygın elektrot malzemeleri demir ve alüminyumdur [69]. Her iki malzeme de özellikle ucuz, kolay bulunabilen ve etkili elektrot malzemeleridir [62]. Demir ve alüminyum katyonları 2.5 ve 2.9 denklemlerine göre anotlardan çözülür [63].

Elektrokoagülasyon sisteminde, anotlarda ve katotlarda aynı anda meydana gelen çok sayıda elektrokimyasal reaksiyon vardır. En önemli reaksiyonlar Şekil 2.4'te özetlenmiştir [68].



Şekil 2.4. Elektrokoagülasyon prosesi sırasında oluşan tipik reaksiyonların şematik gösterimi [68]

Tipik bir elektrokoagülasyon prosesinde sulu ortamda demir, iki değerlikli Fe (II) ve üç değerlikli Fe (III) formlarında çözünebilirken, alüminyum yalnızca üç değerlikli Al (III) formunda çözünür. Oksidasyon indirgeme potansiyeli (OİP) ve pH koşulları uygunsa Fe (II) ayrıca Fe (III) 'e (Denk. 2.8) oksitlenebilir. Oksijen mevcut olmalı ve makul bir reaksiyon hızı elde etmek için pH nötr veya alkali olmalıdır [69]. Farklı OİP ve pH koşullarında termodinamik olarak stabil demir ve alüminyum formları, E-pH diyagramları kullanılarak tahmin edilebilir olduğu Şekil 2.4.'te gösterilmiştir [68].

Elektrot olarak demir metali kullanıldığında aşağıdaki reaksiyonlar meydana gelmektedir;

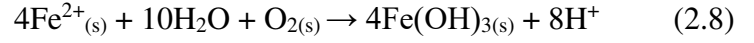
- Anotta meydana gelen reaksiyon;



- Katotta meydana gelen reaksiyon;



- Çözeltide meydana gelen reaksiyon;



Elektrot olarak alüminyum metali kullanıldığında aşağıdaki reaksiyonlar meydana gelmektedir;

- Anotta meydana gelen reaksiyon;

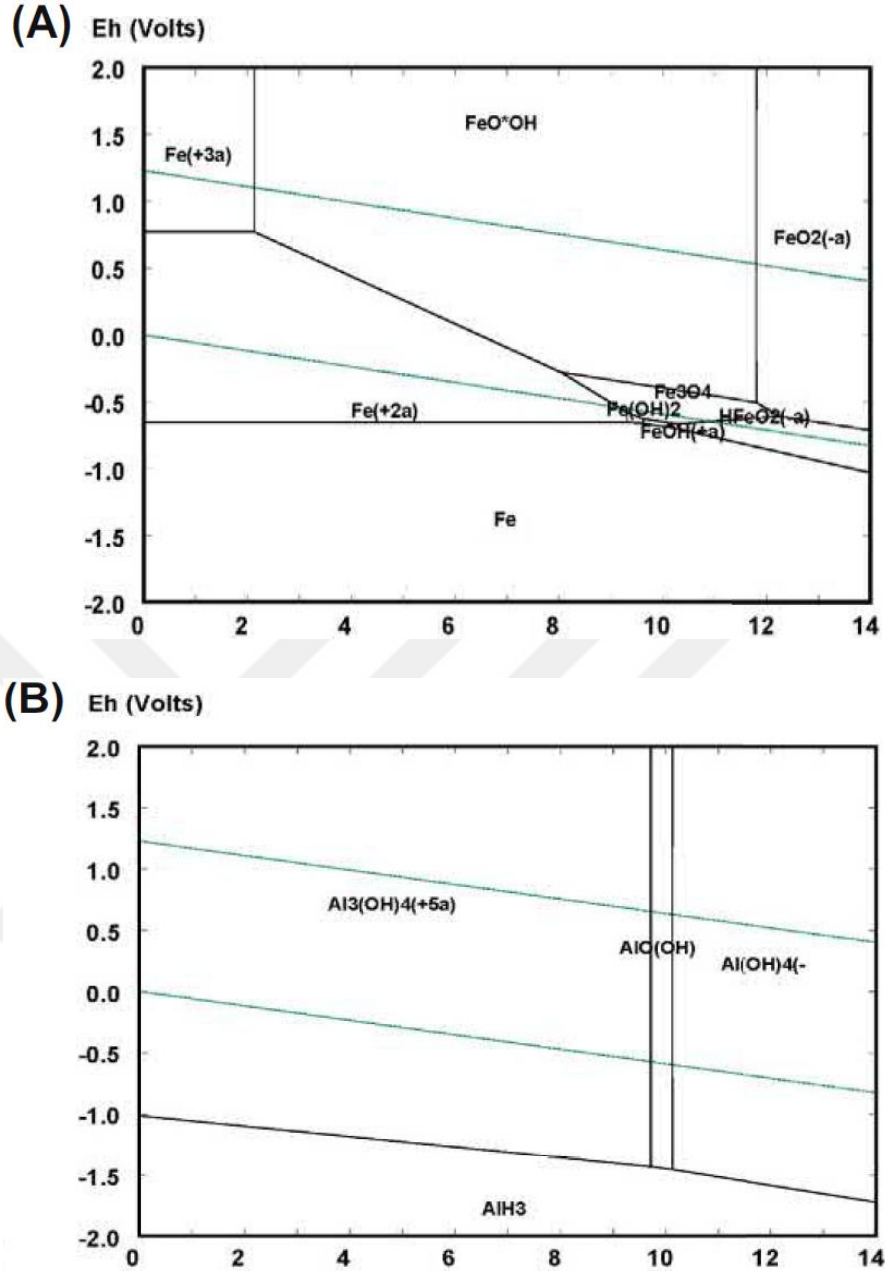


- Katotta meydana gelen reaksiyon;



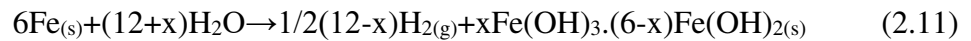
- Çözeltide meydana gelen reaksiyon, (Yüksek pH'ta alüminyum, alüminat olarak çözünür);



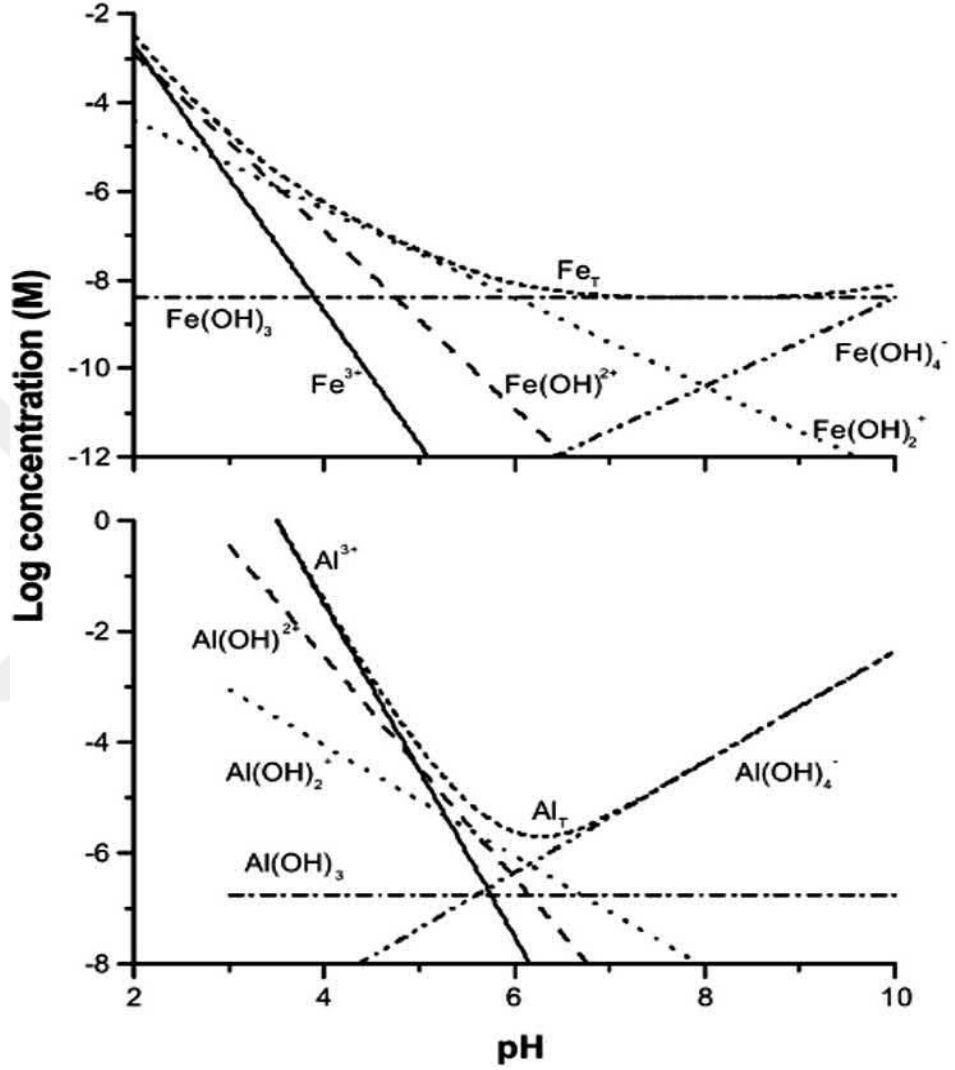


Şekil 2.5. 25 °C 1 bar ve 10⁻⁶ M'de (A) demir ve (B) alüminyumun E-pH diyagramları [68]

Ayrıca, elektrotlar üzerinde alüminyum veya demir iyonları oluştuğunda, çözeltide hidroliz veya dehidroliz reaksiyonları meydana gelir. Demir elektrotlar kullanıldığında yeşil pas oluşur [70]. Yeşil pas, hem Fe (II) hem de Fe (III) hidroksitleri ve Cl⁻, CO₃²⁻ ve SO₄²⁻ gibi anyonları içerir. Cu (II) ve Ni (II) gibi diğer metal katyonlar da çözelti içinde mevcutsa yeşil pastaki Fe (II) 'nin yerini alabilir [70, 71]. Bir elektrokoagülasyon prosesinde, yeşil pas ve hidrojen aşağıdaki tepkime, denklem 2.17' ye göre oluşur:



Fe (III) ve Al (III) 'ün tek çekirdekli hidroliz ürünleri, Şekil 2.5'te pH'ın bir fonksiyonu olarak sunulmuştur. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi elektrokoagülasyon ve kimyasal koagülasyonda benzer polinükleer türlerin oluşabilir. Ancak bu deneysel çalışmalarla doğrulanmamıştır.



Şekil 2.6. Sıfır iyonik kuvvet ve 25 ° C'de amorf hidroksitlerle denge halindeki Fe (III) ve Al (III) çözünür monomerik hidroliz ürünlerinin konsantrasyonları [68]

Anottaki reaksiyonlar sırasında çözünen metal katyonların miktarı Faraday yasasına göre hesaplanabilir (Denk. 2.12).

$$m = ItM_w / zF \quad (2.12)$$

Yukarıdaki denklemde;

I: Elektrik akımı

T: İşlem süresi

Mw: Maddenin moleküler ağırlığı (g / mol)

F: Faraday sabiti (96.485 C / mol)

z: Reaksiyona dahil olan elektron sayısı (Fe^{2+} için 2 ve Fe^{3+} ve Al^{3+} için 3)

m: Çözülmüş metal miktarı (g) 'nı ifade etmektedir.

2.14.2. Yan reaksiyonlar

Elektrokoagülasyon prosesinde, anot ve katotta aynı anda meydana gelen çok sayıda elektrokimyasal reaksiyon vardır. Bu reaksiyonlar, kirlетici maddelerin dengesizleşmesine ve hidrojen oluşumu gibi yan reaksiyonlara sebep olabilir. Proseste alüminyum ve demirin çözülmesine ek olarak, başka elektrokimyasal reaksiyonlar da gerçekleşebilir. Bunlar aşağıda verilmiştir:

- Eşitlik; denklem 2.6 ve denklem 2.10'da verilen reaksiyonlar nedeniyle katotlarda hidrojen oluşumu.
- Hidroksil iyonlarının oluşumu veya hidronyum iyonları / protonların tüketimine bağlı olarak pH artışı (Denk. 2.6 ve 2.7)
- Katotlarda metal iyonlarının indirgenmesi.

Bununla birlikte, alkali pH'ta, demir anotların çözünmesi, Faraday yasasına göre hesaplanandan daha düşüktür, bu da bu koşullarda başka elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleştiğini gösterir.

Elektrokimyasal reaksiyonlar elektrotların yüzeyinde meydana geldiğinden, reaksiyon ürünlerinin konsantrasyonu elektrot yüzeyinde en yüksektir ve konsantrasyon gradyanı yüzeyden toplu çözeltiye doğru olmaktadır. Bu nedenle, anotların yakınında pH düşer ve katot yüzeyinde tam tersi olur. pH'ın bir fonksiyonu olarak çözünürlükleri değişirse bu durum elektrot yüzeyinde inorganik tuzların çökmesine yol açabilir, örneğin, katotlar üzerinde kalsiyum karbonat çökmesi gerçekleşebilir [72].

Katotlardaki elektrokimyasal potansiyel doğru bölgede ise, katot yüzeyinde metal katyonların doğrudan elektrokimyasal indirgenmesi meydana gelebilir (Denk. 2.13).



2.15. Elektrokoagülasyonla Arıtım Prosesine Etki Eden Parametreler Teorisi

Elektrokoagülasyonu; iletkenlik, pH, kolloidlerin boyutu, ortamın kimyasal ve fiziksel özellikleri gibi parametreler etkilemektedir [14]. Elektrokoagülasyona etki eden parametrelerden aşağıdaki başlıklar altında bahsedilmiştir.

2.15.1. Akım yoğunluğu

Akım yoğunluğu, elektrot yüzeyinde meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonların hızı ile doğru orantılıdır ve aynı zamanda elektrot yüzeyinde meydana gelen reaksiyonları tanımlayan elektrot potansiyeli üzerinde de bir etkiye sahiptir. Görünüşe göre demir ve alüminyum anotlarda çözünme reaksiyonu birincil reaksiyondur ve diğer reaksiyonların oranı, pH nötr veya asidik olduğunda tipik akım yoğunluklarında ve elektrot potansiyellerinde önemsizdir [73,74]. Alkali pH'ta, demir anotların çözünme hızı, Faraday yasası tarafından hesaplanan değerden daha düşük olabilir, bu da bu koşullarda anotta başka reaksiyonların olabileceğini gösterir [73].

Elektrokoagülasyonda sisteme uygulanan akım, elektrotlardan çözünen Al^{+3} ve Fe^{+2} iyonların miktarını tayine eder. Elektrokimyasal eşdeğer ağırlık Alüminyum metalinde 335,6 mg/(A.saat), demir metalinde ise 1041 mg/(A.saat) olarak bilinmektedir. Yüksek akım uygulandığında, sistem fazla ısınacağı için akım verimi (birim enerji başına giderilen kirletici miktarı [63]) ve dolayısıyla da arıtım verimi düşmektedir. Ayrıca yüksek akımda harcanan elektrik enerjisi miktarını arttırdığı unutulmamalıdır [57].

Akım verimini yüksek tutabilmek için akım yoğunluğu belirlenirken akış hızı, pH ve sıcaklık gibi parametreler dikkate alınmalıdır. Yüksek akım verimliliğini sağlamak için akım yoğunluğunun seçimi akış hızı ile birlikte pH ve sıcaklık gibi işletme parametreleri ile yapılmalıdır. Kesintisiz ya da uzun süre çalışan bir sistem için akım yoğunluğu 20-25 A/m² aralığında tutulmalıdır [63, 75]. Akım verimi alüminyumda

%120-140 olurken demirde %100 olabilmektedir. Alüminyumun amfoter bir metal olması sebebiyle akım verimi %100'ün üzerinde seyretmektedir. Ortamdaki anyonların türü de akım verimi etkilememektedir [15, 25]. Arıtılmış suyun kalitesi, üretilen iyonların miktarına (mg) veya elektriksel yüke, akım verimine ve zamana bağlıdır. Arıtım için gerekli olan elektriksel yükün kritik değere ulaşmasından sonra akım miktarını arttırmak arıtım veriminde kayda değer bir fark oluşturmamaktadır [76].

2.15.2. Elektrolit türü ve konsantrasyonu

Arıtım verimini arttırmak ve ortamdaki iletkenliği optimum düzeyde olması için; İnert tuzlar (sodyum nitrat, sodyum sülfat vb.), Halojenli tuzlar (sodyum ve potasyum klorür vb.) veya deiyonize su tercih edilir. İletkenlik için tercih edilen bu tuzlar, pH'da yaklaşık 0.3 birimlik bir değişikliğe sebep olur [25, 77].

Bu tuzlar içerisinde sistemde NaCl tercih edildiğinde elektrik sarfiyatının daha az olduğu ve renk gideriminde iyi sonuçlar alınmaktadır. Ayrıca, HCO_3^- , SO_4^{2-} gibi anyonların sistem verimine olan olumsuz etkilerini de büyük miktarda indirgemektedir.

Ca^{+2} ve Mg^{+2} iyonları elektrotların yüzeylerinde yalıtkan bir tabaka meydana getiren kalsiyum veya magnezyum iyonlarının çökmesine sebep olmaktadır [75, 78]. Oluşan bu tabaka elektrotlar arasındaki potansiyeli birden yükselterek akım verimini hızla düşürmektedir. Bu düşüşün olmaması için ortamdaki anyonlar içerisinde Cl^- 'ün oranı %20 olmalıdır. NaCl sistemde iletkenliğe yaptığı katkının yanı sıra elektrokimyasal tepkimelerle oluşan klorunda dezenfeksiyona katkısı olmaktadır [25, 75, 79, 80].

2.15.3. pH'ın etkisi

Elektrokoagülasyon prosesinin temel parametrelerden birisi de pH değeridir. Su arıtımı için elektrokoagülasyon başlangıç pH'nın anahtar bir parametre olduğu bilinmektedir [81]. Çözeltinin iletkenliği, elektrotların çözünmesi, hidroksitlerin türleşmesi ve koloidal partiküllerin zeta potansiyeli üzerinde etkisi vardır. Alüminyum ve demir katyonları ve hidroksitler, kolloidlerin dengesizleşmesine neden olur [68]. Çok yüksek ve düşük pH değerlerinde ortamdaki metal hidroksitlerin varlığı artacağından oluşacak floklar da önemli ölçüde azalır ve proses verimi düşer [14, 47]. Örneğin, 3'ün altındaki pH'larda, hacim başına sabit bir akımla alüminyum salınım hızı 3'ün üzerindeki

pH'lardan daha düşüktür [82]. Alüminyum katotların kimyasal çözünmesi, pH'ın alüminatın oluştuğu seviyeye yükselmesi nedeniyle oluşur. Çok asidik ortamın bu reaksiyonu inhibe etmesi muhtemeldir çünkü üretilen hidroksil iyonları ortamdaki asit tarafından tüketilir. Asidik pH'ta, demir elektrotların çözünmesi elektrik olmadan bile önemliyken, Fe (II) 'nin Fe (III)' e oksidasyonu sadece 5'in üzerindeki pH'larda meydana gelir [73]. Çözünme hızı yüksek pH'ta azalır, bu kabul edilebilir bir durumdur çünkü oksijenin varlığında alkali pH'da demirin korozyon hızı azalır, çünkü yüzeyde pasif bir tabaka oluşur [68]. Alüminyumla en iyi arıtım veriminin pH 7'de elde edildiği görülmüştür [25]. Çıkış suyunun pH'sı asidik atıksular için artma, alkali atıksular için azalma eğiliminde olması elektrokoagülasyon prosesinin üstünlüklerinden bir tanesidir [63]. Bununla birlikte, elektrokoagülasyon işlemi sırasında pH artar ve bu da onu sürekli değişen bir parametre haline getirir [68]. İletkenliğin yüksek olduğu durumlarda pH'ın etkisi önemsizdir [64].

2.15.4. Elektrot malzemesi

Elektrot malzemesi, elektrokoagülasyon sisteminde hangi elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleşeceğini belirler [68]. Elektrokoagülasyon sistemlerinde en çok tercih edilen ve başarılı sonuçlar elde edilen malzemeler alüminyum ve demir (paslanmaz çelik) olmaktadır [63]. Metal oksit kaplı titanyum gibi atıl elektrotlar, bazı yapılarda katot olarak kullanılır. Suda fazla miktarda Ca^{2+} veya Mg^{2+} (sertlik) iyonu içerdiğinde, inert katot materyali (paslanmaz çelik gibi) önerilir [25].

Alüminyum her durumda Al (III) olarak çözünürken, demirin Fe (II) veya Fe (III) olarak çözünüp çözünmediği konusunda bazı tartışmalar vardır [66,73]. Çoğu sonuç, demirin [73, 83, 84] gibi Fe (II) olarak çözündüğünü ve oksijen gibi oksidanlar yeterli konsantrasyonda mevcutsa ve pH alkali ise çözelti içinde Fe (III) 'e oksitlenmektedir.

Sistemde kullanılan elektrotların formları çubuk veya plaka şeklinde olabilmektedir. Bu plaka yüzeylerinin belirli periyotlarla temizlenmesi, örneğin distile suyla durulanması, sistemin düzgün bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır [63].

Alüminyum, Al^{3+} iyonlarının yüksek koagülasyon verimi sebebiyle atıksu ve su arıtımında tercih edilmektedir. Demir genellikle, ekonomik olması ve atıksulardaki kirlilik giderim veriminin yüksek olması sebebiyle tercih edilmektedir [85]. Bir çalışmada

[83], alüminyum elektrotlarla yüksek renk giderimi elde edilirken, demir elektrotların endüstriyel atık sudan KOİ ve fenolün gideriminde alüminyumdan daha etkili olduğu görülmüştür. Alüminyum ve demir elektrot kombinasyonlarının kullanıldığı bazı çalışmalar da vardır. Demir ve alüminyum kombinasyonu, hem rengi (%71) hem de KOİ'yi (% 69) yüksek verimlilikle giderir. [86, 87, 88].

Optimal malzeme seçimi, atıksudan uzaklaştırılacak kirletici maddelere ve elektrolitin kimyasal özelliklerine bağlıdır. Genel olarak, sadece işlemin etkinliği düşünüldüğünde çoğu durumda alüminyum demir ile karşılaştırıldığında daha üstün görünmektedir. Ancak alüminyumun demirden daha pahalı olduğu unutulmamalıdır [68].

2.15.5. Elektrotlararası mesafe

Sistem verimini pek etkilemese de elektrotlar arası mesafe arttırıldığında verimde çok az bir miktarda artış olabilmektedir. Meydana gelen bu küçük artışın elektrostatik etkilerle ilişkisi muhtemeldir. Elektrotlar arası mesafe arttığına ortamdaki iyonların hareketi azaldığı için flok oluşumu hızlanmaktadır [15].

2.15.6. Sıcaklık

Elektrokoagülasyon esnasında meydana gelen reaksiyonların hızları endotermik reaksiyonlarda görüldüğü gibi sıcaklık artışıyla doğru orantılı olarak artmaktadır. Fakat sıcaklık 27°C'yi geçtiğinde, elektrotlardan kopan iyonların hareketliliği istenen düzeyi geçtiği anda flok oluşumu azaldığından sistem verimi düşmektedir. Alüminyum elektrotların kullanıldığı sistemler için akım verimi, 60°C'ye kadar yükselmekle birlikte sıcaklığın daha da artmasıyla düşmektedir [63]. Sıcaklık çok yüksek olduğunda, Al (OH)₃ jelinin geniş gözeneklerinde bir büzülme olduğu, bunun da elektrot yüzeyinde birikme olasılığı daha yüksek olan yoğun flokların oluşumuna neden olduğu öne sürülmektedir [25, 89]. Artan sıcaklık aynı zamanda alüminyumun çözünürlüğünü de arttırır. Ancak, artan sıcaklığın uzaklaştırma verimliliği üzerinde olumlu ve olumsuz etkileri olabileceği görülmektedir. Sıcaklığın uzaklaştırma verimliliği üzerindeki etkisinin kirletici maddelerin uzaklaştırma mekanizmasına bağlı olması mümkündür [68].

2.15.7. Destek elektrolit ve ortamdaki anyon konsantrasyonu

Çözeltideki anyon konsantrasyonu, alüminyum elektrotların pasif tabakasının stabilitesini etkiler. Sülfat anyonları pasifleştirici ajanlardır ve bu nedenle metal katyonların üretimini azaltır [91]. Klorür ise pasif tabakanın parçalanmasına ve çukurlaşmaya neden olur. Hareket halindeki anyonlar çökeltideki hidroksil anyonların yerini alabilir ve bu da flok oluşum verimi üzerinde bir etkiye sahiptir. Kirletici bir anyon, örneğin florür veya fosfat ise rekabet eden anyonlar da doğrudan bir etkiye sahip olabilir [68].

2.15.8. Güç kaynağı

Elektrokimyasal sistemlerinde çoğunlukla doğru akım güç kaynağı tercih edilmektedir. Sisteme uygulanan akım; anot, katot potansiyelini, denge potansiyel farkını ve çözeltideki potansiyel düşüşü karşılayabilmelidir [62]. Elektrot yüzeylerinde gerçekleşen oksidasyonu mümkün mertebe azaltmak için güç kaynağının yönü belirli periyotlarda değiştirilmelidir [56].

2.15.9. Reaksiyon Süresi

Elektrokoagülasyonda üretilen flok miktarı, akım miktarı ve işletme süreleri kullanılarak Faraday yasasına göre hesaplanabilir (Denk. 2.12). Anotlar üzerinde elektroliz ile üretilen flok konsantrasyonu hacim başına eklenen elektrik yükü ile doğru orantılıdır (litre başına kulomb). Bununla birlikte, çözünen toplam pıhtılaştırıcı miktarı, elektrotların düşük pH'ta kimyasal çözünmesini ve alüminyum katotların çözünmesini de içerir. Akım yoğunluğunun, katotlarda hidroksil iyonu üretim oranını etkilediği için muhtemelen alüminyum katotların kimyasal çözünmesi üzerinde bir miktar etkisi vardır [68].

Bir çalışmada [74], platinleştirilmiş titanyum anot ve alüminyum katottan yapılmış bir elektrokimyasal hücre ile katotlardan alüminyum çözünmesini incelenmiştir. Hacim başına sabit akım (540 C / L) ve çeşitli akım yoğunlukları kullanılarak elde edilen sonuçlara göre akım yoğunluğu azaldıkça üretilen alüminyum miktarının arttığını gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, düşük akım yoğunluğunda ($<1 \text{ A / dm}^2$) bile, çözelti pH'ı yüksek asidik değilse katotlar üzerinde çözülme reaksiyonunu başlattığını ve bu nedenle katotlarda üretilen alüminyum miktarının, elektrik yükünden daha fazla işletme süresine bağlı olduğunu göstermektedir.

Farklı sektörler için elektrokoagülasyonla atıksu arıtımında kullanılan elektrot türüne göre işletme süreleri ve KOİ giderim verileri aşağıdaki Tablo 2.17’de karşılaştırılmıştır.

Tablo 2.17. İşletme sürelerine göre KOİ giderim verimleri

Endüstri	Süre dk	Elektrot Türü	KOİ Giderim Verimi %	Kaynak No
Tekstil	20	Al	72,5	29
	10	Fe	78	30
	10	Al	60	
	10	Al	50	27
	15	Fe	65	31
	15	Al	63	
	3	Fe	84	32
	15	Fe	65	33
	5	Al	65	
Kâğıt	30	Al	90	34
	5	Fe	56	35
Hastane	9	Fe	96	37
	34	Al	65	38
Mezbaha	25	Fe	86	39
	25	Al	93	
	20	Al	85	40
Süt ve Yumurta	1	Fe	98	41
	25	Al	61	42
	14	Fe	95	43
	20	Al	80	44
Sızıntı	30	Al	70	45
	30	Al	45	46
	30	Al	45	47
Gıda	30	Al	90	50
	60	Al	81	49
	30	Fe	91	
	20	Fe	95	48
	20	Al	97	
Boya Üretimi	15	Al	94	51
	15	Fe	93	

2.16. Konuyla İlgili Önceden Yapılmış Çalışmalar

Bogliolo ve arkadaşları [91], Şeker üretim prosesin de sisteme giren suların geri döngülü olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Bu prosesin bir kısmında kullanılan basınç suyunun ters osmoz ile arıtılabilmesi için fizibilite çalışması yapılmıştır. Sonuç olarak; proseste kullanılan basınç suyunun, %1-3 toplam katı, çözünmüş halde bulunan şeker (%60-80), çözünmüş tuzlar, kolloid ve askıda katı madde içerdiğini bulmuşlardır.

Vlyssides ve arkadaşları [18], Pancar melası şurubunun elektrokimyasal yöntemlerle arıtımı araştırılmıştır. Arıtma işlemi için destek elektrolit olarak NaCl kullanılmıştır. Sistemde; klor, kloratlar ve diğer yükseltgenler kullanılmıştır. Bu kimyasal maddelerin güçlü yükseltgeme potansiyeli vasıtasıyla organik kirleticiler CO₂ ve H₂O üretmiştir. Elde edilen bu verilere dayanarak arıtımın anotta meydana gelen katalitik reaksiyonlar sonucu oluştuğu belirtilmiştir. Ham atıksu KOİ'si 72.000 mg/L olduğu durumda arıtım sonrası çıkış KOİ değeri 8.000 mg/L olarak bulunmuştur. Bu çalışmada, pancar melası şurubunun arıtımında elektrokimyasal yöntemlerin uygulanabilirliği ve verimli sonuçlar elde edilebileceği gözlemlenmiştir.

Ramjeawon çalışmasında [92], Şeker kamışından şeker üretimi yapan fabrikalarda temiz üretim için araştırma yapmıştır. Bu fabrikaların çevre kirliliğine neden olduğunun anlaşılması üzerine bu tesislerde su ve atıksu yönetim sistemi kurulması gerektiğinden bahsetmiştir. Yaptığı çalışma sonucunda; fabrikada 3 yıl süre ile temiz üretim çalışmaları yapılması ve bu kapsamda tesis için uygun atıksu arıtım yöntemi seçilmesi gerektiğini belirtmiştir.

Pena ve arkadaşları [93], Melas fermentasyonu sonucu oluşan atıksuyun ozonla kimyasal yükseltgenme yöntemiyle renk giderimini araştırmıştır. Bu çalışmada, tepkime süresi, ozon miktarı ve bunların renk giderimine etkisini incelemiştir. Sisteme verilen ozon miktarına bağlı olarak, 30 dakika sonunda; renk gideriminin %93 ve KOİ giderim veriminin %25 olduğunu bulmuşlardır. Ancak TOK gideriminin olmadığını gözlemlemişlerdir.

Jimenez ve arkadaşları [94], Pancar melası alkolik fermentasyon atıksuyunun aerobik ve anaerobik olarak arıtımını incelemiştir. Aerobik arıtımda; *Penicillium* sp. *Aspergillus*. Bakteri türleri kullanılmış olup atıksu (KOİ 82 g/L) %50 oranında seyreltilmiştir. KOİ giderim verimini yaklaşık olarak %52,1 olarak bulmuşlardır.

Koyuncu bu çalışmasında [3], Şeker ve alkol fabrikası atık sularının elektrokimyasal yöntemlerle arıtılabilirliğini araştırmıştır. Tıkaç akım reaktörde, bor katkılı elmas elektrotlar kullanarak; akım yoğunluğu, destek elektrolit derişimi ve çözelti karıştırma hızının arıtım verimine etkilerini incelemiştir. Aynı zamanda alkol fabrikası atıksuyunda sıcaklık ve pH'ın arıtım verimine etkilerini incelemiştir. Ham atıksu KOİ değeri yaklaşık 4500 mg/L olan alkol fabrikası atıksuyu için %96, ham atıksu KOİ değeri yaklaşık 1000 mg/L olan şeker fabrikası atıksuyu içinse %95 KOİ giderim verimi elde etmiştir. Elde edilen sonuçlara göre istenilen KOİ deşarj kriterinin sağlandığını belirtmiştir.

Bodakçı bu çalışmasında [95], Şeker fabrikası atıksuyu, brine çözeltisi ve klorofenol sentetik atık suyunun arıtımını elektrokimyasal yöntemle arıtılmasını iki aşamalı olarak araştırmıştır. Çalışmada yapılacak deneylerin tasarımı için Deney Dizayn Expert programı kullanılmıştır. Şeker fabrikası yıkama ünitesi atık suyunun arıtımı için yapılan deneyler sonucunda; akım yoğunluğu, elektroliz süresi, pH ve NaCl derişimleri sırası ile 1mA/cm², 67.5 dk, pH: 7.5, 1 gr/L olduğu şartlarda renk giderimi; %82.1 FTU; Bulanıklık % 83.94 NTU olduğu şartlar optimum olarak belirlemiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında, Fenol, 2-klorofenol ve 4- klorofenolden oluşan sentetik organik atık suyun EC ile optimizasyon deneyleriyle, KOİ deneylerinden ve GC-MS sonuçlarından en ideal arıtımın hangi koşullarda yapıldığını belirlemiştir. Belirlenen bu optimum değerlerde akım yoğunluğu, elektrolit derişimi, elektroliz süresi ve pH sırası ile 0.49 mA/cm²; NaCl: 1.19 gr/L, işletim süresi; 87.03 dk pH:7.77 olduğu şartlarda KOİ giderim verimi %59.89'dir.

Tatar, çalışmasında [76], Şeker fabrikası atıksu arıtma tesisi dengeleme havuzu atıksuyunun elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtılabilirliğini ve sistem parametrelerinin KOİ giderim verimi üzerine etkisini incelemiştir. Elektrot malzemesi, başlangıç pH'sı, akım yoğunluğu, karıştırma hızı, destek elektrolit türü ve konsantrasyonunun KOİ giderim verimi üzerine etkilerini belirlemiştir. Alüminyum elektrotla yapılan deneylerde 2,143 mA/cm² akım yoğunluğunda, 150 devir/dakika karıştırma hızında, başlangıç pH'sı: 6, destek elektrolit derişimi: 100 mmol NaCl, işletme süresi: 180 dakika olduğu şartlarda KOİ giderim verimini %97,43 olarak bulmuştur. Demir elektrotla yapılan deneylerde 4,286 mA/cm² akım yoğunluğunda, 150 devir/dakika karıştırma hızında, başlangıç pH'sı 8'de, destek elektrolit derişimi 100 mmol NaCl, işletme süresi 180 dakika olduğu

şartlarda KOİ giderimi %67,24 olarak bulunmuştur. Yapılan tüm deneylerde, çözeltiye destek elektrolit ilavesinin KOİ giderim verimini arttırdığı ve enerji tüketimini azalttığını belirtmiştir.

Güven ve arkadaşları [96], Sentetik şeker endüstrisi atık suyunun elektrokimyasal arıtımını araştırmışlardır. Yapılan bazı optimizasyon deneyleri sonucu arıtma için demir elektrot seçilmiş olup deney tasarımı için Design expert-6 programından yararlanmışlardır. Yapılan deneyler sonucu; sekiz saatlik işletme süresince uygulanan 12V enerji ve 50 gr/L NaCl destek elektrolit ilavesi ile en yüksek KOİ giderim verimini %86.36 olarak bulmuşlardır.

Wang ve arkadaşları [97], Şeker pancarı endüstrisi atıksuları orta ve yüksek içerdiği KOİ değerine göre kategorize etmişlerdir. Orta düzeyli KOİ değeri olan atıksu için; uygulanan voltaj, elektrot alanı, başlangıç sülfat seviyesi ve çalışma sıcaklığı dahil olmak üzere elektrokimyasal koşulların sülfür giderimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Orta düzeyli KOİ değeri olan atıksu da %96'nın üzerinde sülfür giderimi elde etmişlerdir. KOİ değeri yüksek düzeyde olan atık su için yapılan deneyde ise biyogazdaki H₂S içeriğini %96'ya kadar düşürmüşlerdir. Yapılan deneyler sonucunda sülfür bileşiği bakımından zengin atıksuların anaerobik arıtımının da bir kısmında yer alabileceği görüşünde bulunmuşlardır.

Sharma ve Şimşek [98], Şeker endüstrisi atıksuyunda KOİ giderimi için, elektrooksidasyon (EO) ve elektrokimyasal peroksidasyonun (ECP) işletme performansını, laboratuvar ölçekli bir çalışmada incelenmişlerdir. Deneyler için Box-Behnken Tasarımı (BBD) kullanılmış ve hem EO hem de ECP için optimize etmişlerdir. pH, H₂O₂ dozajı, akım yoğunluğu ve çalışma süresinin etkilerini BBD kullanarak araştırmışlardır. Akım yoğunluğu; 48,5 mA/cm² ve 393 dk işletme süresi neticesinde elde edilen sonuçlarda, EO'nun optimum pH 5.3 koşullarında atıksudaki organik maddelerin %75'ini uzaklaştırıldığını gözlemlemişlerdir. ECP için yapılan deneylerde ise 21 mL/Lo'lik optimum H₂O₂ dozajı, 48 mA/cm² akım yoğunluğu; ve 361 dk işletme süresi koşullarında, KOİ ile toplam ve çözünmüş organik karbonun sırasıyla % 65, 64, 66 ve 63 oranında gideriminin sağlandığını belirtmişlerdir.

Sahu ve Dhanasekaran [99], Şeker kamışı fabrikası atık sularının elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtılmasını amaçlamışlardır. Deneylerini,

elektrokimyasal reaktör ile kesikli ve sürekli şekilde gerçekleştirmişlerdir. pH: 6.5, elektrotlar arası mesafe: 20 mm, akım yoğunluğu: 178 A/m^2 ve işletme süresi: 120 dakika olduğu şartlarda gerçekleştirdikleri deneylerde, %83 KOİ giderim verimi ve %90 renk giderimi elde etmişlerdir. Sürekli çalıştırılan reaktörde, akış hızının 0,375 L/sa ve işletme süresinin 120 dakika olduğu koşullarda, %67,5 KOİ giderim verimi ve %70,5 renk giderimi elde etmişlerdir.

Sahu ve arkadaşları [100], Şeker kamışı endüstrisi atık suyunun elektrokimya ile arıtımında alüminyum elektrotları kullanmışlardır. Optimizasyon deneyleri için Design Expert 6.0.8 programında pH: 4–10, akım yoğunluğu: $44.5\text{--}133.5 \text{ A/m}^2$, elektrot aralığı: 10–20 mm ve işletme süresi: 20–100 dakika olmak üzere dört işlem parametresi üzerinden model oluşturmuşlardır. Yapılan deneyler sonucu; pH 7, akım 1 A, elektrot mesafesi 1.5 cm ve işletme süresinin 60 dakika olan optimum koşullarda % 69.2 KOİ ve %88.6 renk giderim verimi kaydetmişlerdir.

Tiwaru ve Sahu [101], Şeker kamışı endüstrisi atıksuyunun, elektrokoagülasyon ve kimyasal koagülasyon yöntemlerinin birlikte kullanılarak arıtılması araştırmışlardır. Elektrokoagülasyonla arıtım için belirlenen; pH: 6, elektrot mesafesi: 20 mm, akım yoğunluğu: 178 A/m^2 işletme süresi: 120 dakika olduğu optimum koşullarda, KOİ ve renk giderim verimlerini sırasıyla; %81, %83,5 olarak bulmuşlardır. Birleşik arıtmada sonuçlarında ise KOİ ve renk giderim verimlerini sırasıyla; %98 ve %99.5 olarak bulmuşlardır.

Asaithambi ve Matheswaran [102], Elektrokimyasal oksidasyon tekniği ile Sentetik şeker endüstrisi atıksuyundan organik bileşiklerin uzaklaştırılması arıtımı konusunda elektrokimyasal oksidasyon tekniği ile incelemişlerdir. Bir elektrokimyasal reaktördeki akım yoğunluğu, elektrolit konsantrasyonu ve akış hızı gibi çeşitli deneysel parametrelerin etkisi, KOİ giderimi ve güç tüketimi yüzdesi parametrelerinin etkilerini çalışmışlardır. Elektrolit konsantrasyonu ve akım yoğunluğunun artmasıyla KOİ giderim veriminin arttığı bulmuşlardır. Maksimum KOİ giderim verimini, 5 A/dm^2 akım yoğunluğunda ve elektrokimyasal reaktörde 5 g/L elektrolit konsantrasyonunda %80,74 olarak elde etmişlerdir. Akım yoğunluğu, KOİ konsantrasyonu ve akış hızı gibi elektrokimyasal reaktör sistemi parametreleri, yanıt yüzey metodolojisi kullanılarak optimize etmişlerdir. Yapılan deney sonuçları ile model tahmin sonuçlarının uyumlu olmuştur ve korelasyon katsayısı 0.9888 olarak bulmuşlardır.

Sahu ve Chaudhari [103], Şeker endüstrisi atık suyundan KOİ ve renk giderimi için elektrokoagülasyon işleminde demir elektrot kullanarak çalışma yapmışlardır. İşletim süresi: 120 dk, Akım yoğunluğu: 178 A/m², başlangıç pH: 6 ve Elektrotlar arası mesafe: 20 mm olan koşullarda KOİ ve renk giderim verimi sırasıyla; %84 ve %86 olarak kaydetmişlerdir. Ayrıca; Başlangıç pH: 2–10, Akım yoğunluğu 39–195 A/m², elektrotlar arası mesafe: 10–25 mm ve İşletme süresi: 0–120 dk olan aralıklarda yapılan deneylerde çeşitli parametrelerin KOİ ve renk giderimi üzerine etkilerini incelemişlerdir. Yapılana bu deneyler sonucunda; enerji tüketimi, elektrot metalinin kütsel kaybı, filtreleme ve çamur çökmesinin pH'a bağlı olduğunu bulmuşlardır. Termogravimetrik analizle, deney sonrası oluşan çökeltinin inorganik yapıda olduğunu tespit etmişlerdir

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmada; KOİ değeri yüksek (4850mg/L) olan bir şeker üretim endüstrisi atıksuyunun elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtımı incelenmiştir. Özellikle ülkemizde yaygın olarak görülen şeker pancarından toz şeker üretim endüstrisinde kullanılan su tüketiminin fazla oluşu ve oluşan atıksulardaki KOİ değerinin yüksek olması sebebiyle, mevcut sistemlere alternatif bir arıtım yöntemi geliştirebilmek adına elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtım çalışmaları yapılmıştır.

Deneylere başlamadan önce incelenecek parametrelerdeki çalışma aralıklarına karar verebilmek için yapılan ön deneylerin sonuçlarına göre Dizayn-expert programında bir model oluşturulmuştur. Deneylerde kullanılan atıksu, şeker pancarından şeker üretimi yapan bir fabrikaya ait arıtma tesisinin dengeleme havuzundan alınmış olup hiçbir kimyasal müdahale olmadan, +4°C’te laboratuvarda bulunan buzdolabında muhafaza edilmiştir. 500 mL atıksuyun arıtılması için; monopolar paralel bağlı, 50x30x3 mm boyutlarında sekiz adet demir veya alüminyum elektrotun oluşturduğu özel tasarım sistem kullanılmıştır. Ham atıksu için yapılan karakterizasyon çalışmasında ölçülen parametrelere ilişkin değerler Tabla 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Ham atıksu için yapılan karakterizasyon çalışmasında ölçülen parametrelere ilişkin değerler.

Parametre	Değer
pH	6,51
Sıcaklık (°C)	17
KOI (mg/l)	4850
TAKM (mg/l)	53
Toplam P (mg/l)	4,9

3.1. Deneylerde Kullanılan Kimyasallar ve Cihazlar

Deneyler sırasında kullanılan kimyasal malzemeler, özellikleri ve kullanım amaçları Tablo 3.1 'de, kullanılan cihazlar ise Tablo 3.2`de verilmiştir.

Tablo 3.2. Deneylerde kullanılan kimyasal malzemeler, özellikleri ve kullanım amaçları.

Parametre	CAS No	Firma	Kullanım Amaçları
Sülfürik Asit	7664-93-9	SigmaAldrich	pH ayarı, KOİ analizi
Sodyum Hidroksit	1310-73-2	SigmaAldrich	pH ayarı
Sodyum Klorür	7647-14-5	SigmaAldrich	Destek elektrolit
Potasyum Dikromat	7778-50-9	SigmaAldrich	KOİ analizi
Gümüş Sülfat	10294-26-5	SigmaAldrich	KOİ analizi
Amonyum Demir II Sülfat	7783-85-9	Merck-Millipore	KOİ analizi
Ferroun İndikatör Solüsyonu	14634-91-4	SigmaAldrich	KOİ analizi

Tablo 3.3. Deneylerde kullanılan cihazlar ve kullanım amaçları.

Cihaz	Marka/Model	Kullanım Amaçları
Hassas terazi	Scaltec SBC 31	Kimyasal Tartımı
İletkenlik ölçer	WTW Inolab Cond Level1	Atık su iletkenliği ölçümü
pH ve sıcaklık ölçer	WTW Inolab pH720	Atık su pH ve sıcaklık ölçümü
Güç Kaynağı	GW Instek SPD-3606; 30V, 6A	Elektrokoagülasyon deneyi
Elektronik Karıştırıcı	Heidolph, RZR 2102	Elektrokoagülasyon deneyi

3.2. Dizayn Expert Programı ile Deney Tasarımı

Araştırmada şeker pancarından toz şeker üretimi yapan bir fabrikanın atıksuyundan, özel tasarım demir ve alüminyum elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyon yöntemiyle KOİ giderim verimleri incelenmiştir. Elektrokoagülasyon prosesini etkileyen parametrelerden; elektrot malzemesi, destek elektrolit derişimi, karıştırma hızı, akım yoğunluğu, pH'ın atıksudan KOİ giderim verimi üzerine etkileri araştırılmıştır. Bu parametreler için yapılan ön deneylerle belirlenen çalışma aralıkları Dizayn-expert programına girilmiştir. Programdan elde edilen 72 deneye ait model aşağıdaki Tablo 3.4.`te verilmiştir.

Tablo 3.4. *Dizayn-Expert deney modeli çıktıları.*

Deney No	pH	Akım Yoğunluğu (A/cm ²)	Destek Elektrolit Derişimi (mol/L)	Karıştırma Hızı (rpm)	Elektrot Malzemesi
1	6	0,03	0,15	65	Al
2	6	0,03	0,15	65	Fe
3	6	0,05	0,15	65	Al
4	7,5	0,02	0,2	82,5	Al
5	6	0,03	0,15	65	Al
6	6	0,03	0,15	65	Al
7	6	0,03	0,15	65	Fe
8	7,5	0,02	0,2	47,5	Al
9	3	0,03	0,15	65	Fe
10	7,5	0,04	0,2	82,5	Fe
11	6	0,03	0,15	65	Al
12	3	0,03	0,15	65	Al
13	4,5	0,04	0,2	47,5	Al
14	7,5	0,04	0,1	47,5	Al
15	6	0,03	0,15	65	Fe
16	4,5	0,02	0,1	47,5	Al
17	6	0,03	0,15	30	Al
18	6	0,03	0,15	65	Fe
19	6	0,03	0,15	65	Fe
20	6	0,03	0,15	65	Al
21	7,5	0,04	0,2	47,5	Fe
22	6	0,03	0,15	65	Al
23	9	0,03	0,15	65	Fe
24	6	0,03	0,15	65	Fe
25	4,5	0,02	0,2	82,5	Fe
26	4,5	0,04	0,2	82,5	Al
27	6	0,01	0,15	65	Fe
28	6	0,01	0,15	65	Al
29	9	0,03	0,15	65	Al
30	7,5	0,04	0,1	47,5	Fe
31	6	0,03	0,15	65	Fe
32	7,5	0,02	0,1	47,5	Al
33	4,5	0,02	0,2	47,5	Fe
34	4,5	0,04	0,1	47,5	Al
35	6	0,03	0,15	65	Al
36	6	0,03	0,15	65	Fe

37	6	0,03	0,05	65	Fe
38	4,5	0,02	0,2	47,5	Al
39	6	0,03	0,15	65	Fe
40	4,5	0,04	0,1	82,5	Fe
41	7,5	0,04	0,2	82,5	Al
42	4,5	0,02	0,1	47,5	Fe
43	4,5	0,04	0,1	82,5	Al
44	7,5	0,04	0,1	82,5	Fe
45	4,5	0,02	0,1	82,5	Al
46	6	0,03	0,15	65	Al
47	6	0,03	0,15	30	Fe
48	7,5	0,02	0,2	82,5	Fe
49	6	0,03	0,15	65	Fe
50	6	0,03	0,25	65	Al
51	4,5	0,02	0,1	82,5	Fe
52	6	0,03	0,15	65	Al
53	4,5	0,04	0,1	47,5	Fe
54	6	0,03	0,25	65	Fe
55	7,5	0,02	0,1	82,5	Al
56	4,5	0,02	0,2	82,5	Al
57	7,5	0,02	0,1	47,5	Fe
58	6	0,03	0,15	65	Al
59	6	0,03	0,15	100	Fe
60	6	0,03	0,05	65	Al
61	4,5	0,04	0,2	47,5	Fe
62	6	0,03	0,15	65	Fe
63	7,5	0,04	0,2	47,5	Al
64	6	0,03	0,15	100	Al
65	6	0,03	0,15	65	Fe
66	6	0,05	0,15	65	Fe
67	7,5	0,04	0,1	82,5	Al
68	6	0,03	0,15	65	Al
69	7,5	0,02	0,1	82,5	Fe
70	6	0,03	0,15	65	Al
71	7,5	0,02	0,2	47,5	Fe
72	4,5	0,04	0,2	82,5	Fe

Model çıktılarına göre önce demir daha sonrasında ise alüminyum elektrotlarla olan deneyler modeldeki sırayla yapılmıştır. Demir ve alüminyum elektrotların her biri için; pH, akım yoğunluğu, destek elektrolit derişimi ve karıştırma hızı parametrelerinin çalışıldığı değerler Tablo 3.5.'te verilmiştir.

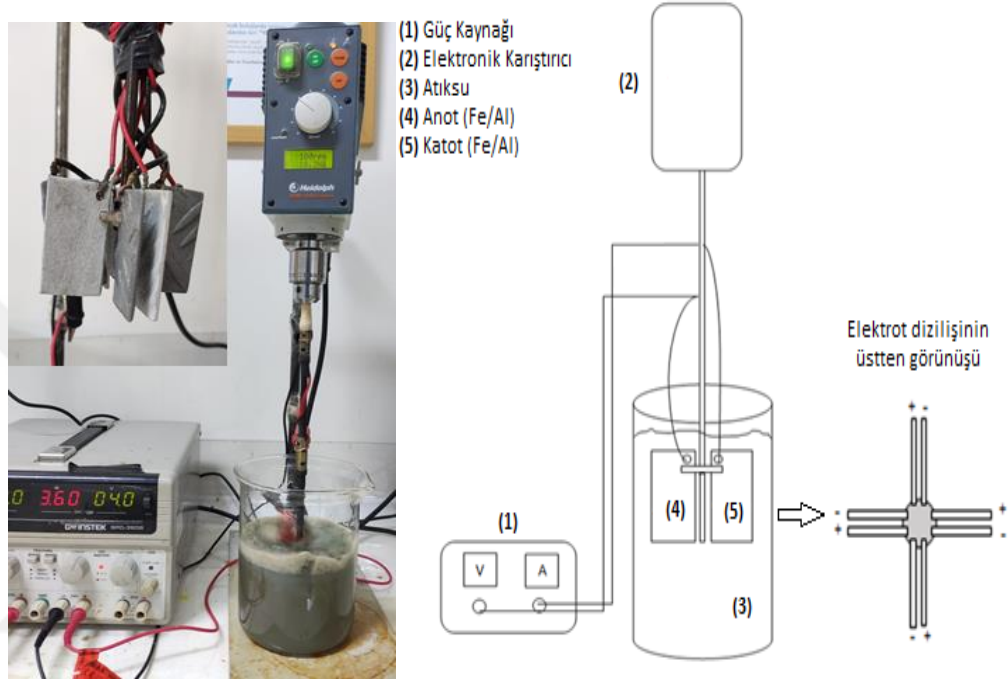
Tablo 3.5. Deneylerde incelenen parametrelerin çalışma aralıkları.

Parametre	Elektrot Malzemesi	Çalışma Değerleri
pH	Al & Fe	3; 4,5; 6; 7,5; 9
Akım Yoğunluğu (A/cm ²)	Al & Fe	0,01; 0,02; 0,03; 0,04;0,05
Destek Elektrolit Derişimi (mol/L)	Al & Fe	0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25
Karıştırma Hızı (rpm)	Al & Fe	30; 47,5; 65; 82,5; 100

3.3. Deneysel Yöntem

Deneysel çalışmalarda bu çalışmaya özel tasarlanmış deney düzeneği kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda anot olarak pedallı elektrotlar kullanılırken, katot olarak silindirik demir/alüminyum kullanılmıştır. Silindirik reaktör içerisine atıksu konulmuş, içerisine pedal tasarımlı karıştırıcı anot elektrotlar daldırılmıştır. Elektrotlar güç kaynağına bağlanarak karıştırma başlatılmaktadır. Karıştırıcı pedallar hem atıksuyun karıştırılmasını sağlarken aynı zamanda anot olarak da işlev görmektedir. Deneysel düzeneğin şematik çizimi ve fotoğrafı Şekil 3.1'de görülmektedir. Her plakanın boyutları 30mm × 50mm × 3 mm'dir. Toplam etkili elektrot alanı 18 cm² ve elektrotlar arasındaki boşluk 10 mm'dir. Alüminyum ve demir deney düzeneği birbiriyle tamamen aynı tasarımda yapılmıştır. Deney öncesi, buzdolabından çıkarılan atıksuyun oda sıcaklığına gelmesi beklenilmiş (20-25°C) ve daha sonrasında numune kabı çalkalanarak homojen hale getirilen atıksudan mezüre 500 ml alınarak silindirik katot reaktöre boşaltılmıştır. Anot karıştırıcı pedallar, silindirik reaktörün içerisine daldırılarak güç kaynağı bağlantıları yapılır. Alınan her numune için iletkenlik, pH (WTW Inolab Cond Level1) ve sıcaklık (WTW Inolab pH720) parametreleri ölçülerek modele göre belirlenen deney için destek elektrolit (NaCl) tartılarak (Scaltec SBC 31) atıksuya eklenilmiştir. Mekanik karıştırıcı (Heidolph, RZR 2102); deney için modelde belirlenen karıştırma hızına ayarlanarak çalıştırılmıştır. Elektrik akımı için güç kaynağına bağlantılar yapılarak, modelde belirlenen akıma göre güç kaynağı çalıştırıldığı anda kronometre başlatılarak; 5, 10, 20, 30'uncu dakikalarda numuneler alınmıştır. Her bir numunenin alındığı anda

okunan; pH, sıcaklık, iletkenlik değerleri kaydedilmiştir. Numuneler alındıktan sonra santrifüjlenerek üstteki duru sudan örnek alınarak KOİ analizi yapılmıştır. Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ), kapalı refluks metotla yapılmıştır (TS-2789 standardı). Her bir deneyde saf su ve fitalat için KOİ deneyi tekrar edilerek not edilmiştir. DAS sarfiyatları not edilerek, KOİ hesaplanmıştır.



Şekil 3.1. Deney düzeneği

3.3.1. Deneyisel hesaplamalarda kullanılan eşitlikler

Deneyler sonucunda arıtılan atıksu için Kimyasal Oksijen İhtiyacı'nın hesaplanması Denklem 3.1 ile yapılmıştır.

$$KOİ = 8000 \cdot c \cdot (V_1 - V_2) / V_0 \quad (3.1.)$$

Bu eşitlikte c: Standart amonyum demir (II) sülfat çözeltisinin hesaplanmış konsantrasyonu, mol/L, V_0 : Deney numunesinin hacmi veya seyreltme yapılmışsa deney numunesinin seyreltmeden önceki hacmi, mL, V_1 : Tanık deneyde titrasyonda kullanılan amonyum demir (II) sülfat çözeltisinin hacmi, mL, V_2 : Deney çözeltisinin titrasyonunda kullanılan amonyum demir (II) sülfat çözeltisinin hacmi, mL, 8000: Sonucun mg O_2 /L cinsinden ifade edebilmek için dönüştürme faktörüdür.

Deneyler sonucunda elde edilen KOİ giderim verimlerinin hesaplanması Denklem 3.2’de verilmiştir.

$$\text{Giderim Verimi} = (C_0 - C / C_0) \times 100 \quad (3.2)$$

Bu eşitlikte C_0 : Başlangıçtaki kirlilik konsantrasyonu (mg/L), C : t anındaki atıksuda kalan kirlilici konsantrasyonu (mg/L)’dur.

Deneyler esnasında atıksu arıtımı için tüketilen elektrik enerjisinin hesaplanması ise Denklem 3.3 kullanılarak yapılmıştır.

$$E = V \cdot I \cdot T / V_r \text{ (m}^3\text{)} \quad (3.3)$$

Bu eşitlikte E : Harcanan enerji (kWh/m³), V : Gerilim (Volt), I : Akım (Amper), T : Zaman (saniye), V_r : m³ arıtılan su hacmidir.

Akım yoğunluğunun hesaplanması aşağıda verilen denklemle (3.4) yapılmıştır.

$$J = I / A_s \quad (3.4)$$

Burada J : Akım yoğunluğu (mA/cm²), I : Uygulanan akım şiddeti (mA), A_s : Aktif elektrot yüzey alanı (cm²) ‘dir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Enerji sarfıyatı ve KOİ giderim verimleri değerlendirildiğinde 5., 10., 20., 30. dakikalarda alınan numunelerin analiz sonuçlarının, 10. Dakikada optimum düzeyde olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla araştırma bulguların elde edilen sonuçlar için grafikler 10. dakikada tüketilen enerji sarfıyatı ve KOİ giderim verimleri için oluşturulmuştur.

Deneylerde destek elektrolit derişmi (mol/L), akım yoğunluğu (mA/cm²), başlangıç pH değeri, karıştırma hızı (rpm) ve elektrot malzemesi (demir ve alüminyum) olmak üzere dört parametre üzerinden model çalıştırılmıştır ve edilen sonuçlar Tablo 4.1’de verilmiştir. Tabloda ayrıca ölçülen sıcaklık (°C), elektriksel iletkenlik (mS/cm) değerleri de verilmiştir.

Tablo 4.1. Deney sonuçları

Deney No	Elekt. Tipi	Akım Yoğun. (mA/cm ²)	pH	Karış. Hızı (rpm)	Destek Elekt. Der. (mol/L)	Zaman (dk)	Elekt. İlet. (mS/cm)	Sıcaklık (°C)	KOİ giderim %	Elektrik Sarfıyatı (kWh/m ³)
1	Al	0,03	7,3	65,0	0,15	10	20,10	19,6	61	5
2	Fe	0,03	7,9	65,0	0,15	10	19,94	18,6	72	5
3	Al	0,05	9,0	65,0	0,15	10	18,55	24,5	75	9
4	Al	0,02	7,5	82,5	0,20	10	26,10	21,6	77	3
5	Al	0,03	7,3	65,0	0,15	10	20,13	19,6	63	4
6	Al	0,03	6,9	65,0	0,15	10	22,10	22,1	63	5
7	Fe	0,03	7,8	65,0	0,15	10	19,86	18,9	76	5
8	Al	0,02	7,5	47,5	0,20	10	26,60	21,8	65	3
9	Fe	0,03	8,4	65,0	0,15	10	22,60	18,9	65	5
10	Fe	0,04	9,2	82,5	0,20	10	22,88	19,8	73	5
11	Al	0,03	6,9	65,0	0,15	10	19,02	19,5	86	5
12	Al	0,03	4,2	65,0	0,15	10	22,10	22,1	75	5
13	Al	0,04	5,5	47,5	0,20	10	20,15	20,7	62	12
14	Al	0,04	7,4	47,5	0,10	10	16,42	21,2	63	11
15	Fe	0,03	7,9	65,0	0,15	10	20,86	18,3	75	5
16	Al	0,02	5,6	47,5	0,10	10	15,95	25,2	61	3
17	Al	0,03	6,3	30,0	0,15	10	19,27	21,3	70	5
18	Fe	0,03	7,6	65,0	0,15	10	18,88	19,2	76	5
19	Fe	0,03	7,2	65,0	0,15	10	17,99	18,9	75	5
20	Al	0,03	6,9	65,0	0,15	10	19,55	19,6	77	5
21	Fe	0,04	8,8	47,5	0,20	10	25,40	19,0	61	5
22	Al	0,03	6,8	65,0	0,15	10	20,40	22,6	74	5
23	Fe	0,03	8,5	65,0	0,15	10	17,96	18,6	75	5
24	Fe	0,03	7,2	65,0	0,15	10	19,86	18,6	77	5
25	Fe	0,02	5,5	82,5	0,20	10	23,30	20,1	65	3
26	Al	0,04	5,6	82,5	0,20	10	20,86	22,4	61	11
27	Fe	0,01	6,4	65,0	0,15	10	20,10	16,4	46	1
28	Al	0,01	6,2	65,0	0,15	10	19,11	17,5	43	1
29	Al	0,03	8,8	65,0	0,15	10	18,33	21,2	65	5
30	Fe	0,04	8,9	47,5	0,10	10	17,68	17,3	70	5
31	Fe	0,03	7,3	65,0	0,15	10	19,56	18,7	80	5
32	Al	0,02	7,5	47,5	0,10	10	15,15	22,5	77	3
33	Fe	0,02	6,1	47,5	0,20	10	22,81	18,5	63	3
34	Al	0,04	5,9	47,5	0,10	10	16,42	22,4	59	11
35	Al	0,03	6,9	65,0	0,15	10	18,96	19,8	73	5
36	Fe	0,03	7,3	65,0	0,15	10	19,42	18,4	70	5
37	Fe	0,03	8,0	65,0	0,05	10	9,62	20,5	46	7
38	Al	0,02	5,2	47,5	0,20	10	16,48	21,2	74	3
39	Fe	0,03	8,4	65,0	0,15	10	19,99	18,6	72	5

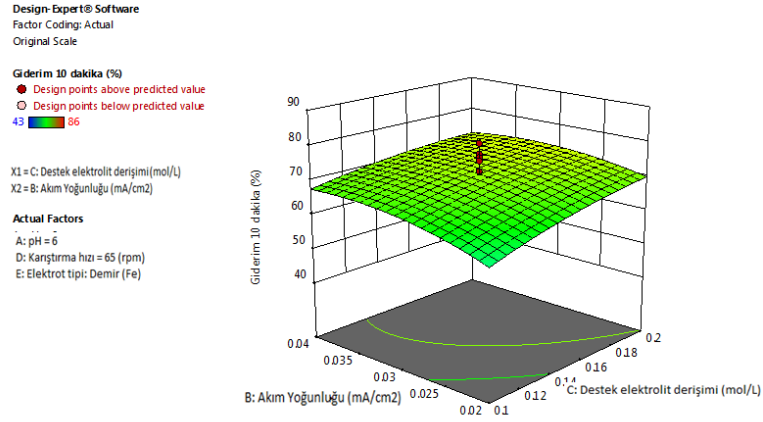
40	Fe	0,04	6,2	82,5	0,10	10	16,03	18,1	63	5
41	Al	0,04	7,5	82,5	0,20	10	20,79	20,6	66	12
42	Fe	0,02	6,5	47,5	0,10	10	17,86	21,2	59	3
43	Al	0,04	5,7	82,5	0,10	10	15,98	21,6	65	11
44	Fe	0,04	8,7	82,5	0,10	10	16,12	18,3	73	5
45	Al	0,02	4,8	82,5	0,10	10	15,41	17,3	43	3
46	Al	0,03	7,0	65,0	0,15	10	20,20	22,8	74	4
47	Fe	0,03	9,7	30,0	0,15	10	19,90	18,9	51	5
48	Fe	0,02	8,8	82,5	0,20	10	24,20	18,9	80	3
49	Fe	0,03	7,7	65,0	0,15	10	19,54	19,1	56	5
50	Al	0,03	6,6	65,0	0,25	10	32,70	19,4	61	5
51	Fe	0,02	7,2	82,5	0,10	10	17,68	18,8	61	3
52	Al	0,03	7,2	65,0	0,15	10	20,60	22,1	63	4
53	Fe	0,04	6,1	47,5	0,10	10	16,47	20,6	65	9
54	Fe	0,03	7,7	65,0	0,25	10	31,60	18,3	75	5
55	Al	0,02	7,6	82,5	0,10	10	13,88	18,9	61	3
56	Al	0,02	6,1	82,5	0,20	10	26,34	21,4	66	3
57	Fe	0,02	8,6	47,5	0,10	10	17,45	21,1	65	3
58	Al	0,03	6,8	65,0	0,15	10	19,81	19,6	64	5
59	Fe	0,03	7,6	100,0	0,15	10	19,13	18,4	61	5
60	Al	0,03	7,5	65,0	0,05	10	9,56	26,2	75	5
61	Fe	0,04	6,9	47,5	0,20	10	26,50	19,2	72	5
62	Fe	0,03	7,9	65,0	0,15	10	19,64	18,2	68	5
63	Al	0,04	7,5	47,5	0,20	10	20,59	23,1	75	12
64	Al	0,03	6,7	100,0	0,15	10	19,33	21,5	70	5
65	Fe	0,03	7,9	65,0	0,15	10	19,53	18,6	67	5
66	Fe	0,05	8,4	65,0	0,15	10	18,12	20,5	67	10
67	Al	0,04	7,2	82,5	0,10	10	16,52	21,6	75	12
68	Al	0,03	7,0	65,0	0,15	10	20,41	23,1	74	5
69	Fe	0,02	8,4	82,5	0,10	10	17,26	18,1	70	3
70	Al	0,03	6,9	65,0	0,15	10	20,53	22,9	73	5
71	Fe	0,02	9,3	47,5	0,20	10	24,20	20,2	65	3
72	Fe	0,04	7,0	82,5	0,20	10	22,54	19,1	80	5

4.1. Demir Elektrot ile Yapılan Deneyler

4.1.1. Akım yoğunluğu ve destek elektrolit derişiminin KOİ giderimi ve enerji sarfiyatı üzerindeki hesaplamalarda kullanılan eşitlikler

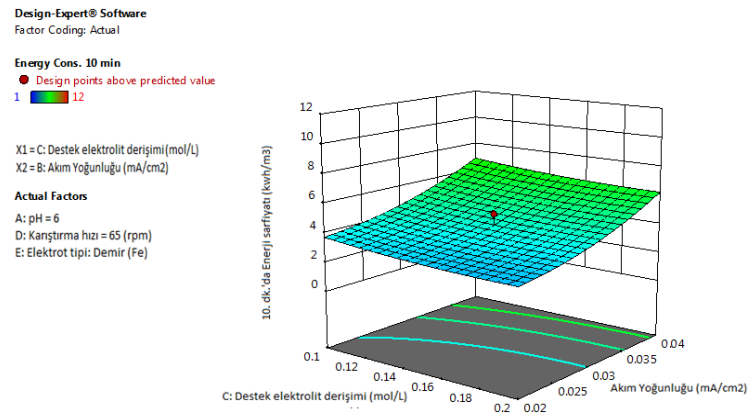
Destek elektrolit derişimi ve akım yoğunluğunun 10.dak'da KOİ giderim verimi üzerine etkileri Şekil 4.1'de verilmiştir. En yüksek KOİ giderim verimi akım yoğunluğu 0,03 mA/cm² olduğunda elde edilmiştir. Faraday yasasına göre artan akım yoğunluğu ile ortama salınan demir iyonu derişimi arttığı için koagülasyon miktarı da artış göstermiş ve

sonuçta verimde yükselme gözlenmiştir. Destek elektrolit konsantrasyonu 0.1 mol/L'den 0.2 mol/L'ye arttıkça giderim verimi de artmıştır.



Şekil 4.1. Destek elektrolit derişimi (mol/L) ve Akım Yoğunluğunun %KOİ Giderimi üzerindeki etkileri

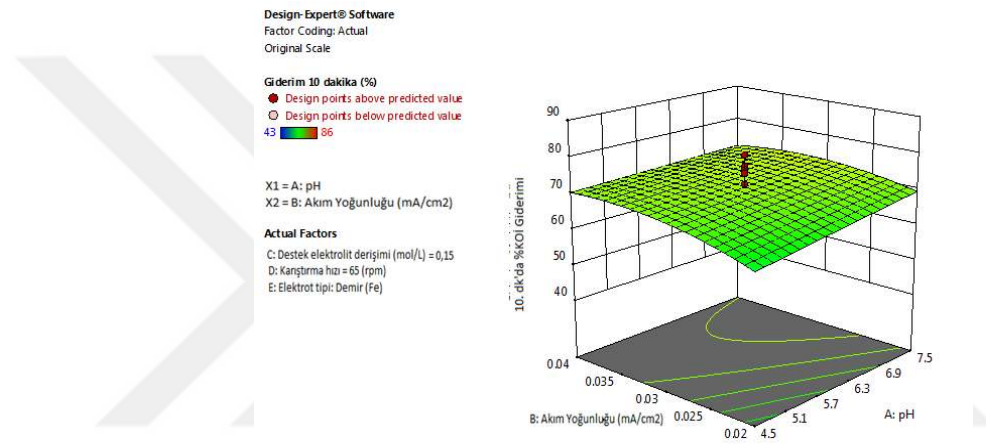
Akım yoğunluğu ve destek elektrolit derişiminin 10.dak'daki enerji sarfıyatı üzerindeki etkileri Şekil 4.2.'de gösterilmektedir. Beklenildiği gibi akım yoğunluğu 0.02 mA/cm²'den 0.04 mA/cm²'ye arttırıldığında enerji sarfıyatı 3,8 kWh/m³'den 7,0 kWh/m³'e artarak %84'lük artış görülmüştür. Destek elektrolit derişimi arttığında ortamda bulunan iyon sayısının artması iletkenliği arttırmış ve dolayısıyla da enerji tüketiminde azalış görülmüştür.



Şekil 4.2. Akım yoğunluğu ve Destek elektrolit derişiminin enerji sarfıyatı üzerindeki etkileri, pH=6, Karıştırma hızı=65 (rpm), Zaman: 10. Dk, (Demir elektrot).

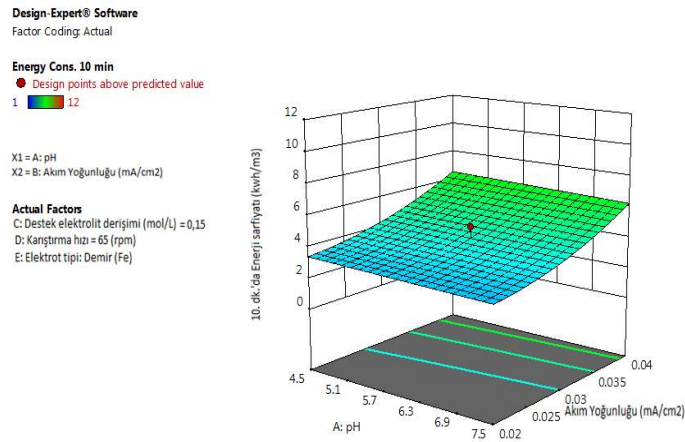
4.1.2. Akım yoğunluğu ve pH'nın KOİ giderim verimi ve enerji sarfıyatı üzerine etkileri

pH ve Akım Yoğunluğunun 10.dak'da KOİ giderimi üzerine etkileri Şekil 4.3'te verilmiştir. En iyi KOİ giderim verimi akım yoğunluğu $0,03 \text{ mA/cm}^2$ iken elde edilmekte olup % 71'lik bir giderim verimi gözlenmektedir. pH'nın giderim verimi üzerine etkisi çalışılan pH aralığında çok fazla görülmemiştir. Elektrokoagülasyon süresinin kısa olmasının bu duruma neden olduğu düşünülebilir. Elektrokoagülasyon sürecinde pH artış eğiliminde olmasına karşın kısa süreli EC deneyinde bu artışın verime etkisi belirgin olarak ortaya çıkmamıştır.



Şekil 4.3. pH ve Akım Yoğunluğunun %KOİ Giderimi üzerindeki etkileri (Destek elektrolit derişimi $(\text{mol/L})=0,15$, Karıştırma hızı=65(rpm), (Demir elektrot).

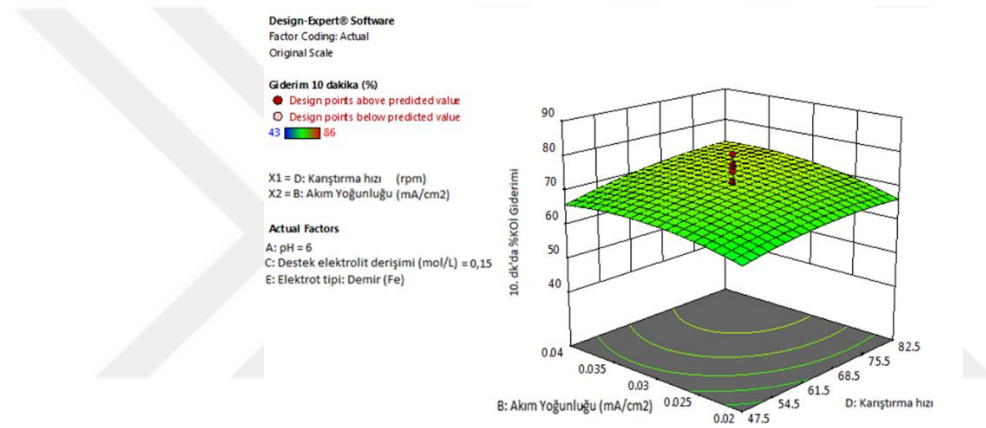
Akım yoğunluğu ve pH'nın 10.dak'daki enerji sarfıyatı üzerine etkileri Şekil 4.4.'te gösterilmektedir. pH'nın enerji sarfıyatına bir etkisinin olmadığı görülmektedir.



Şekil 4.4. Akım yoğunluğu ve pH'nın enerji sarfıyatı üzerine etkileri (Destek elektrolit derişimi $0,15 \text{ mol/L}$, Karıştırma hızı=65 (rpm), Zaman: 10. Dk, (Demir elektrot).

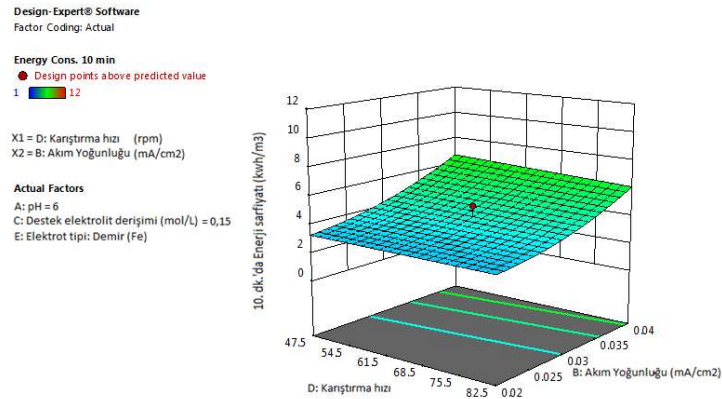
4.1.3. Akım yoğunluğu ve karıştırma hızının KOİ giderim verimi ve enerji sarfıyatı üzerine etkileri

Akım yoğunluğu ve karıştırma hızının 10.dak'da KOİ giderimi üzerine etkileri Şekil 4.5'te verilmiştir. En yüksek KOİ giderim verimi akım yoğunluğu 0,03 mA/cm² elde edilmiştir. Karıştırma hızı arttıkça KOİ gideriminin de arttığı şekilden görülmektedir. Artan karıştırma hızı ile çözünen iyonların kütle transferi artmakta ve koagülasyon hızını artırarak flok oluşumunu desteklemektedir. Artan flok oluşumu ile giderim verimi de artmıştır. Çalışılan karıştırma hızı aralığı için pozitif etki bulunmuş olmasına karşın, daha yüksek karıştırma hızları oluşan kesme kuvvetleri nedeniyle flokların dağılmasına neden olabilir. Bu nedenle bir optimizasyon gereklidir.



Şekil 4.5. Akım yoğunluğu ve karıştırma hızının %KOİ Giderimi üzerindeki etkiler.

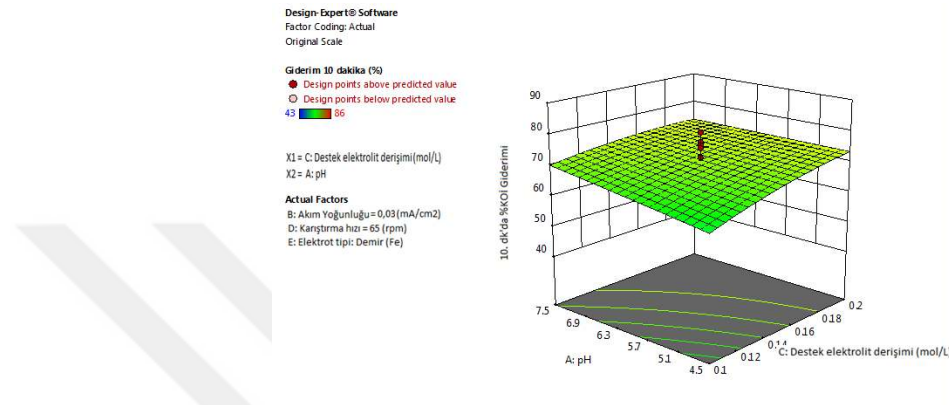
Akım yoğunluğu ve karıştırma hızının 10.dak'daki enerji sarfıyatı üzerine etkileri Şekil 4.6.'da gösterilmektedir. Karıştırma hızının artması ile iyon kütle transferi de artmış ve bu da enerji sarfıyatında hafif bir düşüşe neden olmuştur.



Şekil 4.6. Akım yoğunluğu ve karıştırma hızının enerji sarfıyatı üzerine etkileri (Destek elektrolit derişimi 0,15 mol/L , pH:6, Zaman: 10. Dk, (Demir elektrot)).

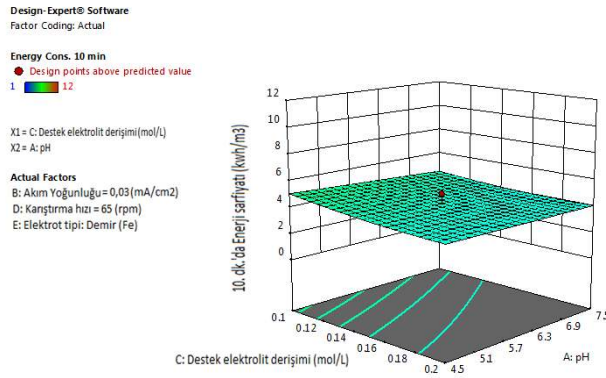
4.1.4. pH ve destek elektrolit derişimin KOİ giderim verimi ve enerji sarfiyatı üzerine etkileri

Destek elektrolit derişimi (mol/L) ve pH'nın 10.dak'da KOİ giderimi üzerine etkileri Şekil 4.7'de verilmiştir. En yüksek KOİ giderim verimi akın yoğunluğu 0.2 mol/L iken elde edilirken, pH'nın KOİ giderim verime üzerine etkisi çok fazla etkisi görülmemiştir.



Şekil 4.7. Destek elektrolit derişimi (mol/L) ve pH'nın %KOİ Giderimi üzerindeki etkileri

pH ve destek elektrolit derişimin 10.dak'daki enerji sarfiyatı üzerine etkileri Şekil 4.8.'de gösterilmektedir. Destek elektrolit konsantrasyonu 0.1 mol/L'den 0.2 mol /L arttırıldığında enerji sarfiyatında küçük bir azalma gözlenmiştir. pH'nın enerji sarfiyatına bir etkisinin çok az olduğu görülmektedir.

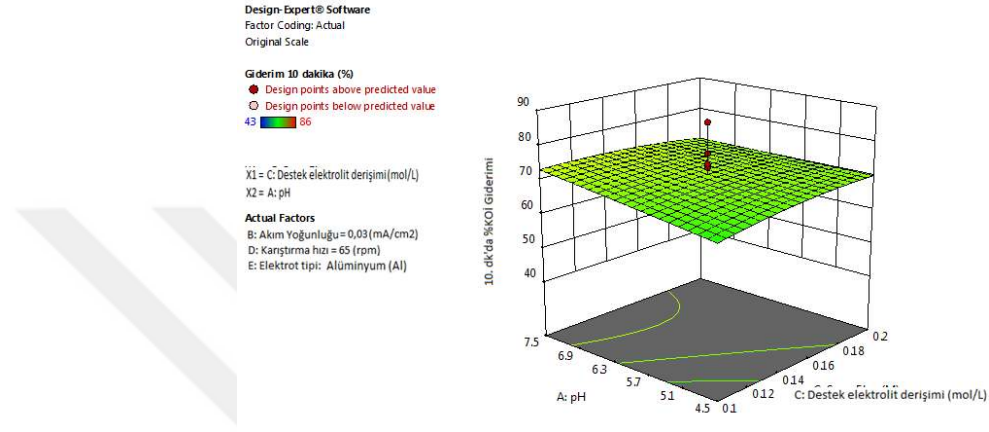


Şekil 4.8. pH ve destek elektrolit derişimin enerji sarfiyatı üzerine etkileri (Akım yoğunluğu= 0,03 (mA/cm²), Karıştırma hızı=65(rpm), Zaman: 10. Dk, (Demir elektrot).

4.2. Alüminyum Elektrot ile Yapılan Deneyler

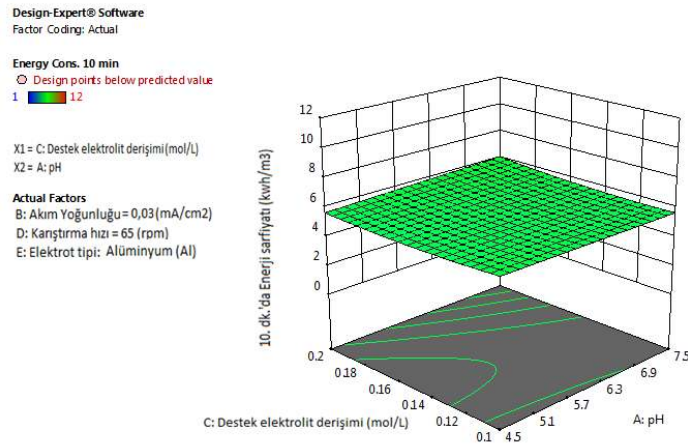
4.2.1. Destek elektrolit derişimi ve pH'ın KOİ giderim verimi ve enerji sarfiyatı üzerine etkileri

Destek elektrolit derişimi (mol/L) ve pH'nın 10.dak'da KOİ giderimi üzerine etkileri Şekil 4.9'da verilmiştir. pH ve destek elektrolit konsantrasyonunun giderim verimi üzerinde etkisinin az olduğu görülmektedir.



Şekil 4.9. Destek elektrolit derişimi (mol/L) ve pH'ın %KOİ Giderimi üzerindeki etkileri Akım yoğunluğu = 0,03 (mA/cm²), Karıştırma hızı=65 (rpm), (Alüminyum elektrot).

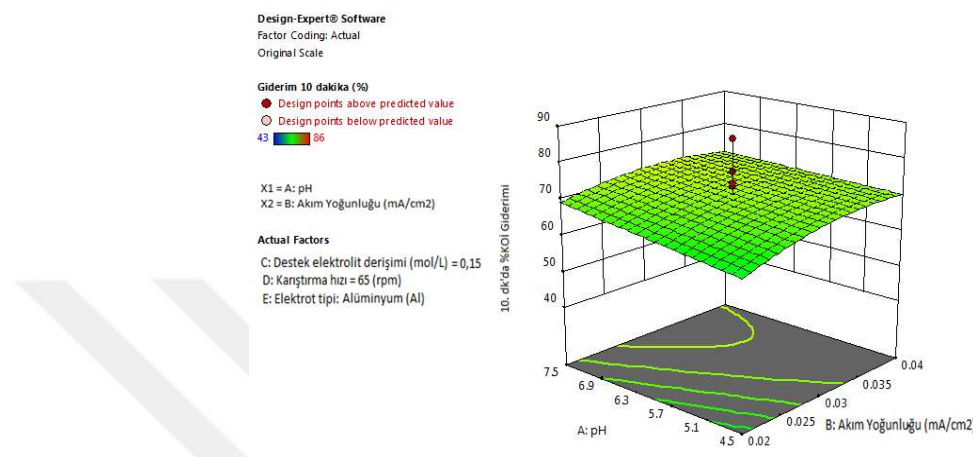
Destek elektrolit derişimi (mol/L) ve pH'nın 10.dak'da enerji sarfiyatı üzerine etkileri Şekil 4.10'da verilmiştir. pH ve Destek elektrolit konsantrasyonunun 10.dak'daki enerji sarfiyatı üzerine etkisinin az olduğu görülmektedir.



Şekil 4.10. Destek elektrolit derişimi (mol/L) ve pH'ın enerji sarfiyatı üzerine etkileri (Akım yoğunluğu = 0,03 (mA/cm²), Karıştırma hızı=65 (rpm), (Alüminyum elektrot).

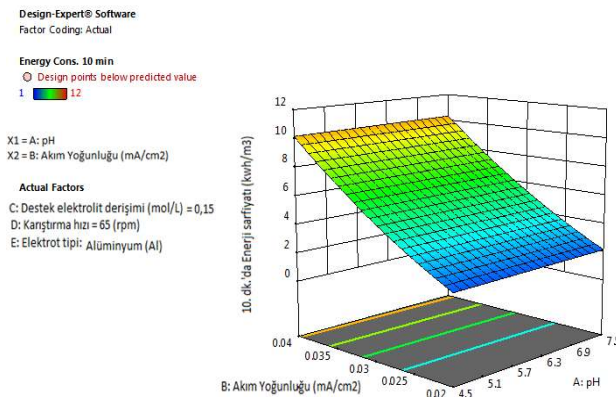
4.2.2. pH ve akım yoğunluğunun KOİ giderim verimi ve enerji sarfıyatı üzerine etkileri

pH ve akım yoğunluğunun KOİ giderimi üzerine etkileri Şekil 4.11’de verilmiştir. En yüksek KOİ giderim verimi akım yoğunluğu 0,03 mA/cm² iken elde edilirken, pH 4,5 ‘dan 7.5 ‘a arttırıldığında etkinin çok az olduğu görülmektedir.



Şekil 4.11. pH ve Akım Yoğunluğunun %KOİ Giderimi üzerindeki etkileri.

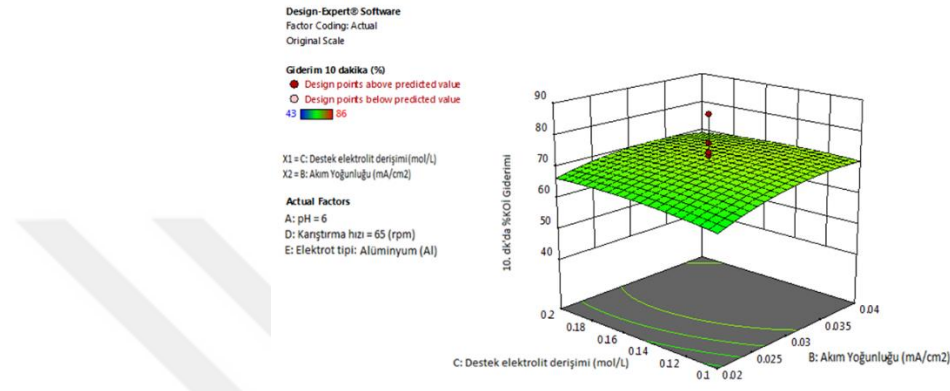
pH ve akım yoğunluğunun enerji sarfıyatı üzerine etkileri Şekil 4.12’de verilmiştir. pH ve 10.dak’daki enerji sarfıyatı üzerine etkisinin az olduğu görülmekte iken Akım yoğunluğu 0.02 ‘den 0.04 mA/cm²’ye arttırıldığında enerji sarfıyatı 2 kwh/m³’den 10 kwh/m³’e çıkarak arttığı görülmüştür. Artan akım yoğunluğu ile uygulanan akımın artması, aynı zamanda uygulanan gerilimin artmasına neden olduğu için tüketilen enerji miktarı da belirgin bir şekilde artmıştır. Demir elektrolit ile karşılaştırıldığında Alüminyum elektrolitin daha fazla elektrik sarfıyatına neden olduğu görülmüştür.



Şekil 4.12. pH ve Akım Yoğunluğunun enerji sarfıyatı üzerine etkileri (Destek elektrolit derişimi (mol/L)=0,15, Karıştırma hızı=65(rpm), (Alüminyum elektrot).

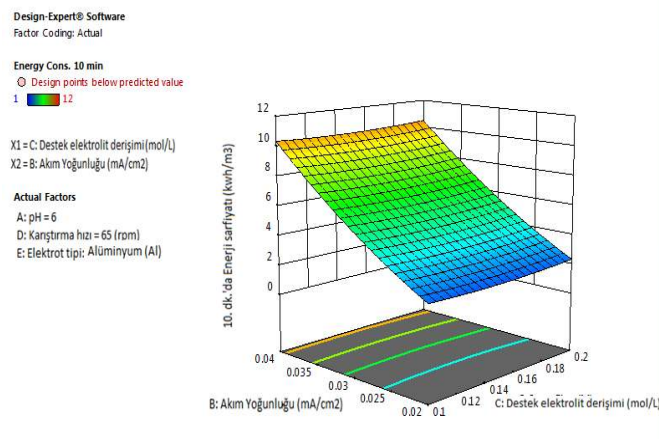
4.2.3. Destek elektrolit derişimi ve akım yoğunluğunun KOİ giderim verimi ve enerji sarfiyatı üzerine etkileri

Destek elektrolit derişimi (mol/L) ve akım yoğunluğunun 10.dak'da KOİ giderimi üzerine etkileri Şekil 4.13'te verilmiştir. En yüksek KOİ giderim verimi akım yoğunluğu 0,03 mA/cm²'de elde edilirken, destek elektrolit arttırıldığında giderim veriminin çok az etkilendiği görülmektedir.



Şekil 4.13. Destek elektrolit derişimi (mol/L) ve Akım Yoğunluğunun %KOİ Giderimi üzerindeki etkileri.

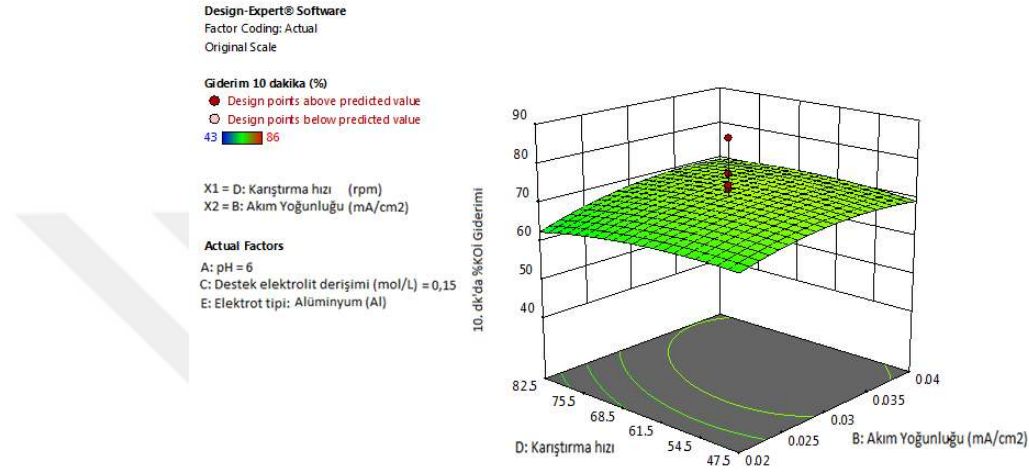
Destek elektrolit derişimi (mol/L) ve akım yoğunluğunun 10.dak'da enerji sarfiyatı üzerine etkileri Şekil 4.14'te verilmiştir. Destek elektrolit derişiminin 10.dak'daki enerji sarfiyatı üzerine etkisinin az olduğu görülmekte iken Akım yoğunluğu 0.02'den 0.04 mA/cm²'ye arttırıldığında enerji sarfiyatı 2 kwh/m³'den 10 kwh/m³'e çıkarak çok yüksek bir artış görülmektedir.



Şekil 4.14. Destek elektrolit derişimi (mol/L) ve Akım Yoğunluğunun enerji sarfiyatı üzerine etkileri, pH=6, Karıştırma hızı=65 (rpm), (Alüminyum elektrot).

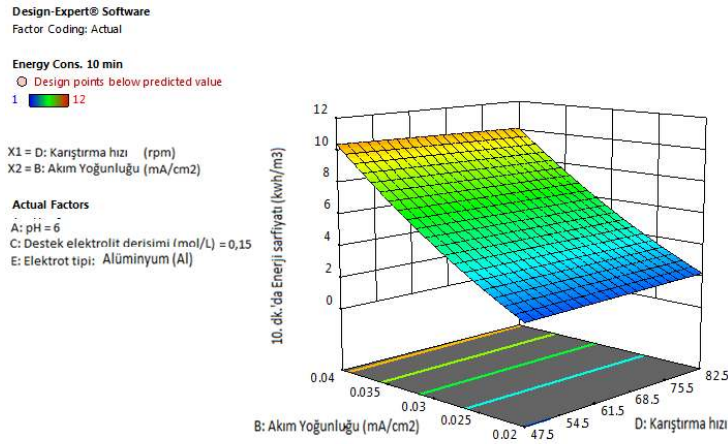
4.2.4. Akım yoğunluğu ve karıştırma hızının KOİ giderim verimi ve enerji sarfıyatı üzerine etkileri

Akım yoğunluğu ve karıştırma hızının KOİ giderimi üzerine etkileri Şekil 4.15'te verilmiştir. En yüksek KOİ giderim verimi akım yoğunluğu $0,03 \text{ mA/cm}^2$ iken elde edilirken, karıştırma hızı $82,5 \text{ rpm}$ 'den $47,5 \text{ rpm}$ 'e düşürüldüğünde giderim veriminin çok değişmediği görülmektedir.



Şekil 4.15. Akım yoğunluğu ve Karıştırma hızının %KOİ Giderimi üzerindeki etkiler.

Akım yoğunluğu ve karıştırma hızının 10.dak'ta enerji sarfıyatı üzerine etkileri Şekil 4.16'da verilmiştir. Karıştırma hızının 10.dak'daki enerji sarfıyatı üzerine etkisinin az olduğu görülmekte iken akım yoğunluğu ile çok büyük bir artış görülmektedir.



Şekil 4.16. Akım yoğunluğu ve Karıştırma hızının enerji sarfıyatı üzerine etkileri (Destek elektrolit derişimi (mol/L)=0,15, pH=6, (Alüminyum elektrot).

4.3. ANOVA analizi

Yanıt davranışını tanımlamak için ikinci dereceden (quadratic) bir model uygulanmıştır. Uygulanan modele ait veriler Tablo 4.1’de verilmiştir. Model sonucu lineer olduğu için hesaplamada bir denklem kullanılmamıştır.

Seçilen ikinci dereceden modelin yeterliliği ve önemi varyans analizi (ANOVA) yapılarak değerlendirilmiştir. ANOVA tablosu sonucunda seçilen modelin ve model terimlerinin anlamlılığı hakkında elde edilen sonuçlar; elektrik sarfiyatı için Tablo 4.2’de ve KOİ giderim verimi için Tablo 4.3’te gösterilmektedir.

Tablo 4.2. 10. dakikada elektrik sarfiyatı için seçilen ikinci dereceden modele ait ANOVA testi sonuçlar.

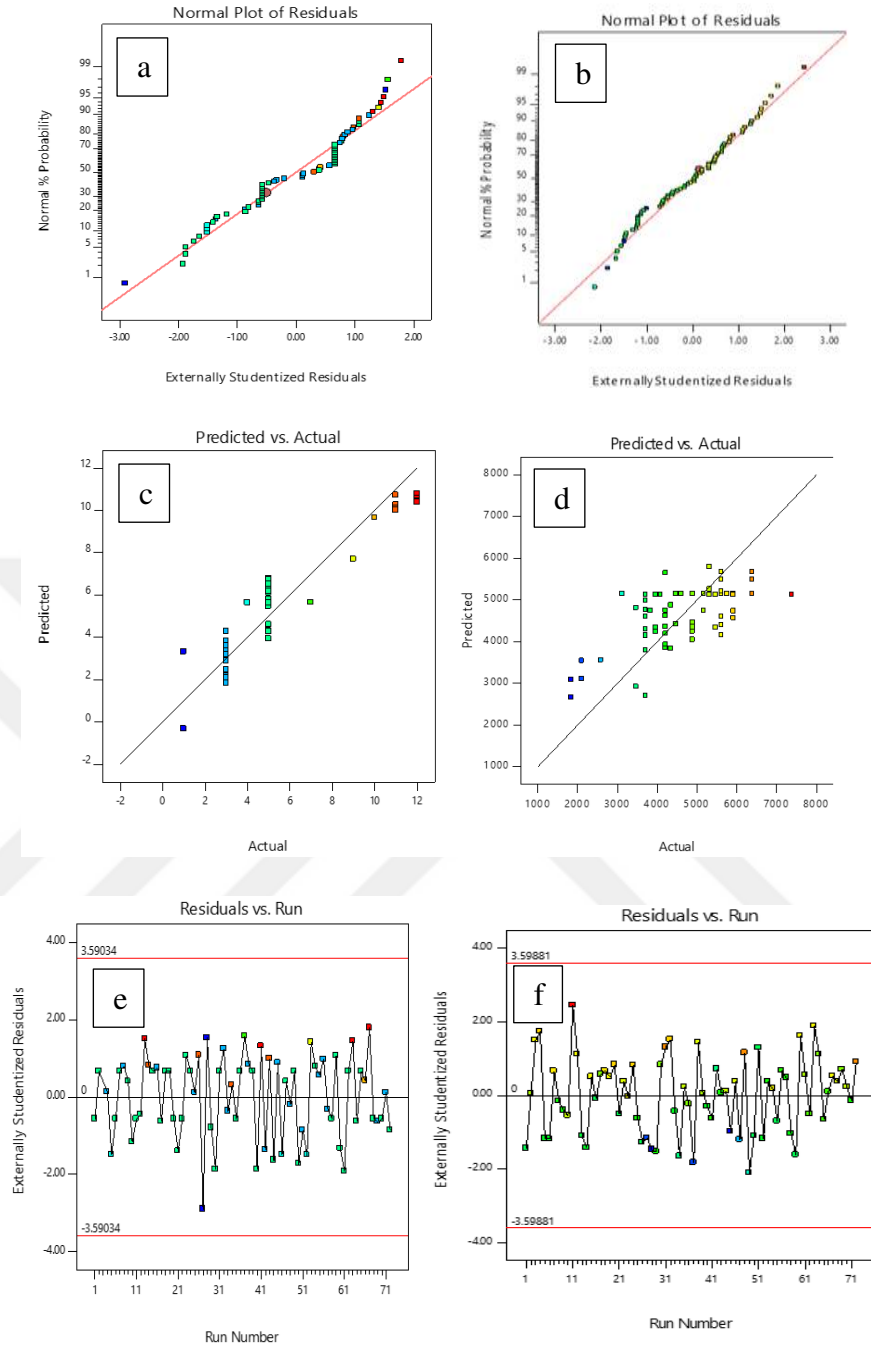
<u>Kaynak</u>	<u>Kareler Toplamı</u>	<u>df</u>	<u>Ort. Kare</u>	<u>F-Değeri</u>	<u>p-Değeri</u>
Model	408.37	14	29.17	23.34	< 0.0001 significant
A-pH	0.0833	1	0.0833	0.0667	0.7972
B-Akım Yoğ.	340.00	1	340.00	272.00	< 0.0001
C-Destek Elekt.	0.7500	1	0.7500	0.6000	0.4418
D-Karış. Hızı	0.3333	1	0.3333	0.2667	0.6076
E-Elekt. Tipi	32.62	1	32.62	26.10	< 0.0001
AC	0.5000	1	0.5000	0.4000	0.5297
AD	1.13	1	1.13	0.9000	0.3469
AE	0.7500	1	0.7500	0.6000	0.4418
BD	0.5000	1	0.5000	0.4000	0.5297
BE	66.18	1	66.18	52.94	< 0.0001
CE	2.08	1	2.08	1.67	0.2020
DE	0.3333	1	0.3333	0.2667	0.6076
B ²	15.27	1	15.27	12.21	0.0009
C ²	1.98	1	1.98	1.59	0.2129
Residual	70.00	56	1.25		
Lack of Fit	67.75	34	1.99	19.48	< 0.0001 significant
Pure Error	2.25	22	0.1023		
Cor Total	478.37	70			

Tablo 4.3. 10.dakikada %KOİ giderimi için seçilen ikinci dereceden modele ait ANOVA testi sonuçları.

<u>Kaynak</u>	<u>Kareler Toplamı</u>	<u>df</u>	<u>Ort. Kare</u>	<u>F-Değeri</u>	<u>p-Değeri</u>
Model	3.539E+07	16	2.212E+06	2.22	0.0148 significant
A-pH	3.287E+06	1	3.287E+06	3.30	0.0747
B-Akım Yoğ.	5.233E+06	1	5.233E+06	5.25	0.0257
C-Destek Elekt.	3.480E+06	1	3.480E+06	3.49	0.0669
D-Karış. Hızı	7.739E+05	1	7.739E+05	0.7772	0.3818
E-Elekt. Tipi	7040.89	1	7040.89	0.0071	0.9333
AB	7.660E+05	1	7.660E+05	0.7692	0.3843
AC	1.661E+06	1	1.661E+06	1.67	0.2019
AD	1.010E+06	1	1.010E+06	1.01	0.3183
BC	7.203E+05	1	7.203E+05	0.7233	0.3988
BD	5.395E+05	1	5.395E+05	0.5417	0.4648
CD	7.935E+05	1	7.935E+05	0.7968	0.3759
CE	2.304E+06	1	2.304E+06	2.31	0.1339
DE	2.553E+06	1	2.553E+06	2.56	0.1150
B ²	7.640E+06	1	7.640E+06	7.67	0.0076
C ²	1.588E+06	1	1.588E+06	1.59	0.2120
D ²	3.037E+06	1	3.037E+06	3.05	0.0864
Residual	5.477E+07	55	9.959E+05		
Lack of Fit	3.345E+07	33	1.014E+06	1.05	0.4648 not significant
Pure Error	2.132E+07	22	9.691E+05		
Cor Total	9.017E+07	71			

Model sonuçlarına göre ikinci dereceden modelin $p < 0.0001$ değeri ile modelin uygunluğu ve önemi görülmektedir. Dolayısıyla elde edilen sonuçlar, belirlenen işletme şartlarında KOİ giderimi için uygun bir şekilde kullanılabilir. Elde edilen veriler dahilinde matematiksel model varsayımları yapılabilmektedir.

Şekil 4.17 (a-b)'de görülebileceği gibi deney verileri üzerinden yapılan modeldeki hatalar normal bir şekilde dağılmışlardır. Şekil 4.17 (c-d)'de beklenen değer ile gerçek değerlerin grafiğindeki noktaların doğrusal bir desen içinde dağılmış olmasından dolayı modellerin yanıtları tahmin etme yeteneğini gösterdiği söylenebilir. Bu nedenle, önerilen modelin deneysel verilerin çok iyi bir açıklaması olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 4.17 (e-f) incelendiğinde deneyin yapılış sırasıyla bağlantılı herhangi bir hata yapılmadığı, hataların bağımsız olduğu görülebilmektedir.



Şekil 4.17. a) 10. Dakikadaki enerji sarfiyatı için normal dağılım grafiği, b) 10. Dakikadaki %KOİ giderimi için normal dağılım grafiği, c) 10. Dakikadaki enerji sarfiyatı için beklenen değere karşı elde edilen değer grafiği, d) 10. Dakikadaki %KOİ giderimi için beklenen değere karşı elde edilen değer grafiği, e) 10. Dakikadaki enerji sarfiyatı için deney yapılış sırasına göre hataların dağılımı, f) 10. Dakikadaki %KOİ giderimi için deney yapılış sırasına göre hataların dağılımı.

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, demir ve alüminyum elektrotlar kullanılarak elektrokimyasal yükseltgeme ile şeker endüstrisi atıksularının arıtımı araştırılmıştır. pH, destek elektrolit derişimi, akım yoğunluğu, elektrot tipi ve karıştırma hızı olmak üzere 5 farklı deneysel parametre kullanılarak deneysel modelleme yapılmıştır. Deney tasarımının çıktısı olarak KOİ giderim verimi ve enerji sarfiyatı değerlendirmeye alınmıştır. Tasarımda Design–Expert programı kullanılarak toplam 72 deney gerçekleştirilerek sonuçları değerlendirilmiştir.

Akım yoğunluğunun KOİ giderim verimi üzerine etkisi için yapılan deneylerde 0,01; 0,02; 0,03; 0,04;0,05 mA/cm² değerleri kullanılmıştır. Akım yoğunluğu arttığında Faraday yasasıyla uyumlu olarak, çözünen iyon sayısı ile koagülasyon arttığından KOİ giderim veriminde de artış gözlenmiştir. Akım yoğunluğundaki artışa karşılık kullanılan elektrotlar arasındaki potansiyel farkının yükselmesiyle enerji tüketimi de artmıştır. 10. dakikadaki en yüksek elektrik sarfiyatının; Alüminyum elektrotla yapılan deneyler sonucunda 10 kWh/m³, demir elektrotla yapılan deneyler sonucunda ise 7 kWh/m³ olduğu görülmüştür.

Destek elektrolitin KOİ giderim verimi üzerine etkisini incelemek amacıyla yapılan deneylerde; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25 mol/L derişimlerinde sisteme NaCl ilave edilmiştir. Destek elektrolit türünün KOİ giderim verimini az da olsa artırdığı görülmüştür. 10. dakikadaki en iyi KOİ giderim verimleri; Alüminyum elektrotla yapılan deneyler sonucunda %86, demir elektrotla yapılan deneyler sonucunda ise %80 olduğu görülmüştür. Destek elektrolit konsantrasyonun artırılması da KOİ giderim veriminde artış sağlamıştır. Elektrokoagülasyon esnasında sisteme uygulanan elektrik akımının daha kısa sürede iletilmesi için ortamda normalde var olan iyon sayısı destek elektrolit ilavesiyle arttırılmaktadır. Dolayısıyla sisteme eklenen destek elektrolit sayesinde elektrik sarfiyatının azaldığı görülmüştür.

Başlangıç pH'ının KOİ giderim verimi üzerine etkisini incelemek amacıyla yapılan deneylerde; 3; 4,5; 6; 7,5; 9 değerlerinde çalışılmıştır. 10. dakikadaki en iyi KOİ giderim verimlerinin elde edildiği başlangıç pH'ları sırasıyla; Alüminyum elektrot kullanılan deneyler için pH: 6,00, demir elektrot kullanılan deneyler için ise pH: 7,5 olduğu görülmüştür.

Karıştırma hızının KOİ giderim verimi üzerindeki etkisini incelemek amacıyla yapılan deneylerde; 30; 47,5; 65; 82,5; 100 rpm değerlerinde çalışılmıştır. 10. dakikadaki en iyi KOİ giderim verimlerinin elde edildiği karıştırma hızları sırasıyla; Alüminyum elektrot kullanılan deneyler için 65 rpm, demir elektrot kullanılan deneyler için ise 82,5 rpm olduğu görülmüştür.

Elektrokoagülasyon prosesi için bir diğer önemli parametre reaksiyon süresidir. Atıksuyun kirlilik durumuna göre farklı sürelerde arıtma işlemi uygulansa dahi elektrokoagülasyon prosesinden genel olarak arıtım kısa sürelerde gerçekleşmektedir [75]. Tablo 2.17’de verilen işletme sürelerine göre KOİ giderim verimlerinde de görüleceği üzere, deneyler sonucunda en iyi KOİ giderim verimleri enerji sarfıyatı göz önünde bulundurularak, 10. dakikada elde edilmiştir.

Şeker fabrikası atıksularının arıtımı için kullanılan demir ve alüminyum elektrotlar ile yapılan çalışmalarda yüksek giderim verimleri elde edilmiştir. Alüminyum elektrotla yapılan çalışmalar sonucunda en iyi giderimin 10. dakikada; 0,03 mA/cm² akım yoğunluğu, 0,15 mol/L destek elektrolit derişimi, pH 6,0 ve 65 rpm karıştırma hızı şartlarında KOİ giderim verimi %86 olurken enerji sarfıyatı 5 kWh/m³ olduğu görülmüştür. Demir elektrotla yapılan çalışmalar sonucunda en iyi giderimin 10. dakikada; 0,02 mA/cm² akım yoğunluğu, 0,2 mol/L destek elektrolit derişimi, pH 7,5 ve 83 rpm karıştırma hızı şartlarında KOİ giderim verimi %80 olurken enerji sarfıyatı 3 kWh/m³ olduğu görülmüştür. Ayrıca alüminyum elektrolitin enerji sarfıyatının demir elektrotuna göre fazla olduğu görülmüştür.

Elektrot tipi, akım yoğunluğu, başlangıç pH’ı, karıştırma hızı, destek elektrolit derişimi parametrelerinin incelendiği deneylerden elde edilen veriler, Koyuncu (2006), Özcan (2013), Bodakçı (2015)’in şeker pancarı endüstrisi atıksuyundan KOİ giderim verimi üzerine yaptıkları çalışma sonuçları ile örtüşmektedir [3; 75; 95].

Sonuç olarak elektrokogülasyon yönetimi kullanılarak şeker fabrikası atıksuyunun başarıyla arıtılabildiği görülmüştür. Arıtım sonucunda atıksuyun başlangıç KOİ değeri yüksek giderim verimi ile Kanalizasyona Deşarj sınırları altına indirilmiştir. Atıksuyun Direkt Alıcı Ortama deşarjı için ise başka yöntemler ile hibrit bir şekilde uygulaması yapılabilir.

KAYNAKÇA

- [1] Üçok, O., Akıncı, M. (1973). *Cumhuriyetimizin 50. Yılında Şeker Sanayimiz*, Ankara: Türkiye Şeker Fabrikaları A.Ş. Yayınları, 13.
- [2] Erdiñ, Z. (2000). Şeker Pancarı Ziraatı İle Şeker Sanayii'nin Ekonomik Gelişmeye Etkileri. *Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 17 (3), 9-26.
- [3] Koyuncu, A.G. (2006). *Şeker Endüstrisi Atıksularının Elektrokimyasal Yöntemlerle Arıtımı*. Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [4] Çınar, H. (2001). *Endüstriyel Atıksuların Özellikleri ve Arıtılması*. Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir: Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [5] Esad, B., (1958). Türkiye Şeker Sanayiinin Dünü, Bugünü ve Yarını. *Türkiye Şeker Fabrikaları*, 6 (2), 21-23.
- [6] Veldet, T. (1965). Vücudumuzun En Önemli, En Tatlı, En Saf, En Ucuz Kuvvet Kaynağı Şekerdir. *Pancar Dergisi*, 12 (1), 159-162.
- [7] Zeytinoğlu, E. (1964). Türkiye'deki Şeker Endüstrisi. *Şeker Endüstrisi Yayınları*, 12.
- [8] Geerdes, T. (1966). Ana Besin Maddelerinden Şeker ve Tarihi, *Türkiye Şeker Fabrikaları*, 123.
- [9] ... (2003), *Cumhuriyetin 80. Yılında Türk Şeker Sanayi*. Ankara: Türkiye Şeker Fabrikaları A.Ş. Yayınları, 221.
- [10] Whalley, H.C.S. De. (1969). *International Commission For Uniform Methods Of Sugar Analysis*. (Çev: P. Güray). Ankara.
- [11] Türk, H. (2007). *Elektrokimya*. (2280) Yayın yeri: Ankara: Açık Öğretim Fakültesi Yayınları
- [12] SKKY, 2008 (31.12.2004). *Şeker Fabrikaları atıksularının Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'ne göre deşarj standartları*. Resmi Gazete Sayısı: 25687.
- [13] Grimm, J.H., Bessarabov, D.G., Simon, U. ve Sanderson, R.D., (2000). characterization of doped tin dioxide anodes prepared by a sol-gel technique and their application in an spe reactor, *journal of applied electrochemistry*, 30, 293-302.
- [14] Mollah, M.Y.A., Schennach, R., Parga, J.R., Cocke, D.L., (2001). Electrocoagulation (EC)- science and applications. *Journal Hazardous Materials*, Vol:B84, 13 (1), 29-41.
- [15] Mollah, M. Y. A., Morkovsky, P., Gomes, J. A. G., Kesmez, M., Parga, J. ve Cocke, D. L. (2004). Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation, *J. Hazard. Mater.* B114, 199-210.
- [16] Rajeshwar, K., İbanez, J.G., Swai, G.M., (1994). Electrochemisty and the environmental, *Journal of Applied Electrochemisty*, 24 (1), 1077-1091.
- [17] Szpyrkowicz, L., Naumcazyk, J., Zilio F., (1995). Electrochemical treatment of tannery wastewater. *Water. Ressistant*, 32 (2), 517-524.

- [18] Vlyssides, A.G., Israilides, C.J., Lozizidou, M., Karvouni G., Mourafeti, V., (1997). Electrochemical treatment of vinasse from beet molasses. *Water Science Tech.* Vol.36 (2), 271-278.
- [19] Pekel, L. C. (2013). *Tekstil Atık Sularının Elektrokimyasal Yöntem İle Arıtılması*, Doktora Tezi, A.Ü., Ankara.
- [20] Bejankiwar, R.S., (2001). Electrochemical treatment of cigarette industry wastewater. feasibility study, *Water Res.*, 36 (5), 4386-4390.
- [21] Yokovlev, S.V., Krosnoboradko, S.G., Svetoshova, E.S., (1988). Electrochemical decolourization of organic dye containing wastewaters, *Khim Tekhnol Vody (USSR)*, 10 (1), 226-235.
- [22] Panizza, M., Boca, C., Cerisola, G., (2000). Electrochemical treatment of wastewater containing polyaromatic organic amines. *Water Research.*, 34 (3), 2604-2605.
- [23] Rajkumar, D., Palanivelu, K., (2004). Electrochemical treatment of industrial wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, B113, 34 (2), 123-129.
- [24] Israilides, C.J., Vlyssides, A.G., Mourafeti, V.N. and Karvouni, G., (1997). Olive oil wastewater treatment with the use of an electrolysis system. *Bioresource Technology*, 61 (2), 163-170.
- [25] Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Sep. Purif. Technol.*, 38, 11-41.
- [26] Gao, P., Chen, X., Shen, F., Chen, G., (2005). Removal of chromium (VI) from wastewater by combined electrocoagulation–electroflotation without a filter, *Separation and Purification Technology*, 43 (2), 117–123.
- [27] Can, O. T., Kobya, M., Demirbas, E., Bayramoglu, M. (2005). Treatment of the textile wastewater by combined electrocoagulation. *Chemosphere*, 62 (2006), 181–187.
- [28] Üçgül, İ., İskender, K. A., (2013). *Tekstil Endüstrisi Atık Suyunun Renk Giderimi İçin Elektrokoagülasyon Yöntemi Uygulaması*. Süleyman Demirel Üniversitesi Yekarum e-dergi, 1, Cilt 2, Sayı 1, 1-12.
- [29] Özyonar, F., karagözoğlu, B. (2012). Elektrokoagülasyon Prosesi ile Tekstil Sanayi Atıksuyunun Arıtımı. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28 (1), 29-37.
- [30] Bayramoğlu, M., Kobya, M., Can, O.T., Sözbir, M. (2004). Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. *Separation and Purification Technology*, 37 (2004), 117–125.
- [31] Bayramoglu, M., Eyvaz, M., Kobya, M. (2007). Treatment of the textile wastewater by electrocoagulation: Economical evaluation. *Chemical Engineering Journal*, 128 (2007), 155–161.
- [32] Zaroual, Z., Azzi, M., Saib, N., Chainet, E. (2006). Contribution to the study of electrocoagulation mechanism in basic textile effluent. *Journal of Hazardous Materials*, B131 (2006), 73–78.

- [33] Eyvaz, M., Bayramoglu, M., Kobya, M. (2006). Tekstil endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyon ile arıtılması: *Teknik ve ekonomik değerlendirme*. İtü Dergisi/e, Su Kirlenmesi Kontrolü, Cilt:16, Sayı:1-3, 55-65.
- [34] Sridhara, R., Sivakumarb, V., Prince Immanuel, V., Prakash Maranb, J. (2011). Treatment of pulp and paper industry bleaching effluent by electrocoagulant process. *Journal of Hazardous Materials*, 186 (2011), 1495–1502.
- [35] Uğurlu, M. (2004). The removal of some inorganic compounds from paper mill effluents by the electrocoagulation method. *G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 17(3), 85-99.
- [36] Manh, H. B., Luong Thi Hong, X. (2017). Removal of chemical oxygen demand from hospital wastewater using electrocoagulation. *Moroccan Journal of Chemistry*, 5 No:2 (2017), 371-376.
- [37] Murdani, Jakfar, Ekawati, D., Nadira, R., Darmadi (2018). Application of Response Surface Methodology (RSM) for wastewater of hospital by using electrocoagulation. *Materials Science and Engineering*, 345 (2018), 1-7."
- [38] Kobya, M., Senturk, E., Bayramoglu, M. (2006). Treatment of poultry slaughterhouse wastewaters by electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, B133 (2006), 172–176.
- [39] Bayar, S., Yıldız, Y. Ş., Yılmaz, A. E., İrdemez, Ş. (2011). The effect of stirring speed and current density on removal efficiency of poultry slaughterhouse wastewater by electrocoagulation method. *Desalination*, 280 (2011), 103–107.
- [40] Şengil, İ. A., Özacar, M. (2006). Treatment of dairy wastewaters by electrocoagulation using mild steel electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, B137 (2006), 1197–1205.
- [41] Tchamango, S., Nanseu-Njiki, C. P., Ngameni, E., Hadjiev, D., Darchen, A. (2010). Treatment of dairy effluents by electrocoagulation using aluminium electrodes. *Science of the Total Environment*, 408 (2010), 947–952.
- [42] Xu, L. J., Sheldon, B. W., Larick, D. K., Carawan, R. E. (2002). Recovery and Utilization of Useful By-Products from Egg Processing Wastewater by Electrocoagulation. *Poultry Science*, 81, 785–792.
- [43] Bazrafshan, E., Moein, H., Mostafapour, F.K., Nakhaie, S. (2013). Application of Electrocoagulation Process for Dairy Wastewater Treatment. Hindawi Publishing Corporation, *Journal of Chemistry Volume*, 640139, 1-8.
- [44] Bouhezila, F., Hariti, M., Lounici, H., Mameri, N. (2011). Treatment of the OUED SMAR town landfill leachate by an electrochemical reactor. *Desalination*, 280 (2011), 347–353.
- [45] İlhan, F., Kurt, U., Apaydin, O., Gonullu, M. T. (2007). Treatment of leachate by electrocoagulation using aluminum and iron electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 154 (2008), 381–389.

- [46] Top, S., Sekman, E., Hoşver, S., Bilgili, M. S. (2010). Characterization and electrocaogulative treatment of nanofiltration concentrate of a full-scale landfill leachate treatment plant. *Desalination*, 268 (2011), 158–162.
- [47] Chen, X., Chen, G., Yue, P. L. (1999). Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation. *Separation and Purification Technology*, 19 (2000), 65–76.
- [48] Solak, M., Pakdil, N. B., Kılıç, M., Kobya, M. (2017). Elektrokoagülasyon Prosesi ile Patates Cipsi üretim atıksularından fosfor giderimi: Elektrot Materyali karşılaştırması. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22 (2) (2018), 302-313.
- [49] Murthy, Z. V. P., Nancy, C., Kant, A. (2007). Separation of Pollutants from Restaurant Wastewater by Electrocoagulation. *Separation Science and Technology*, 42:4, 819-833,
- [50] Akyol, A. (2011). Treatment of paint manufacturing wastewater by electrocoagulation. *Desalination*, 285 (2012), 91–99.
- [51] Bukhari, A. A. (2007). Investigation of the electro-coagulation treatment process for the removal of total suspended solids and turbidity from municipal wastewater. *Bioresource Technology* 99 (2008) 914–921.
- [52] Özyonar, F., Karagözoğlu, B. (2011). İçme sularından elektrokoagülasyon ve kimyasal koagülasyon ile bulanıklığın giderimi. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, Cilt 27, No 1, 81-89, (2012)."
- [53] Kobya, M., Ulu, F., Gebologlu, U., Demirbas, E., Oncel, M. S. (2010). Treatment of potable water containing low concentration of arsenic with electrocoagulation: Different connection mode sand Fe–Al electrodes. *Separation and Purification Technology* 77 (2011) 283–293."
- [54] Kobya, M., Gebologlu, Ulu, F., Oncel, S., Demirbas, E. (2011). Removal of arsenic from drinking water by the electrocoagulation using Fe and Al electrodes. *Electrochimica Acta* 56 (2011) 5060–5070."
- [55] Özyonar, F., Karagözoğlu, B., Atmaca, E. (2011). İçme suyundan elektrokoagülasyon prosesi ile doğal organik madde giderimi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 27(4), 309-316.
- [56] Kaplan, F., (2007). Zeytin Kara Suyundaki Toksik Fenolik Bileşiklerin, Farklı Karbon Elektrotlar Kullanılarak, Elektrofenton Yöntemi ile Parçalanmaları. *Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.*
- [57] Karadağ, E.K., (2009). Elektrokoagülasyon Yöntemi ile Karışım Halindeki Tekstil Boyar Maddelerin Renk Giderimi. *Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.*
- [58] Jiang, J.Q., Graham, N., André, C., Kelsall, G.H., Brandon N.,(2002). Laboratory study of electro-coagulation–flotation for water treatment, *Water Research*, 36 (16), 4064-4078.

- [59] Delipınar, Ş., (2007). Maya Endüstrisi Atıksularının Elektrokogülasyon ve Kimyasal Koagülasyon ile Arıtımı. Yüksek Lisans Tezi, GYTE Müh. ve Fen Bil. Enstitüsü Gebze.
- [60] Orkun, M.O., (2007). Katı Atık Sızıntı Sularının Elektrokimyasal Yöntemlerle Arıtımının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- [61] Yıldırım, Ö., (2007), Kağıt Endüstrisi Atıksularının Elektro-Fenton Yöntemiyle Arıtılabilirliğinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniveritesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- [62] Şahin, O., (2009). Fenol İçeren Atıksuların Elektrokimyasal Metot ile Arıtımı. Yüksek Lisans Tezi, Gebze İleri teknoloji Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- [63] Öztürk, İ., (2017). *Atıksu Mühendisliği* Teknik Kitaplar Serisi, İski. İstanbul
- [64] Öztürk, T., (2006). İzmit Evsel ve Tehlikeli Katı Atık Düzenli Depolama Tesisi Elektro- ve Kimyasal Koagülasyon Yöntemleriyle Arıtılabilirliğinin İncelenmesi. Kocaeli Üniversitesi Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- [65] Üneri, S., (1988). *Elektrokimya*, Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Yayınları, Cilt I, 138, Ankara.
- [66] H. Moreno, D. Cocke, J. Gomes, P. Morkovsky, J. Parga, E. Peterson, C. Garcia, (2009) Electrochemical reactions for electrocoagulation using iron electrodes, Ind. Eng. Chem. Res. 48 2275-2282.
- [67] E.A. Vik, D.A. Carlson, A.S. Eikum, E.T. Gjessing, (1984) Electrocoagulation of potable water, Water Res. 18 1355-1360.
- [68] Silanpaa, M., (2020) Advanced Water Treatment Electrochemical Methods, Elsevier 5-83.
- [69] C.W.K. Chow, R. Fabris, J. Van Leeuwen, D. Wang, M. Drikas (2008), Assessing natural organic matter treatability using high performance size exclusion chromatography, Environ. Sci. Technol. 42 6683-6689.
- [70] P. Refait, J.M.R. Genin, (1997) Mechanisms of oxidation of Ni(II)-Fe(II) hydroxides in chloride-containing aqueous media: role of the pyroaurite-type Ni-Fe hydroxychlorides, Clay Miner. 32 597-613.
- [71] P. Refait, H. Drissi, Y. Marie, J.M.R. (1994) Génin, The substitution of Fe²⁺ ions by Ni²⁺ ions in green rust one compounds, Hyperfine Interact. 90 389-394.
- [72] D. Hasson, V. Lumelsky, G. Greenberg, Y. Pinhas, R. Semiat, (2008) Development of the electrochemical scale removal technique for desalination applications, Desalination 230 329-42.
- [73]] M.B. Sasson, W. Calmano, A. Adin, (2009), Iron-oxidation processes in an electroflocculation (electrocoagulation) cell, J. Hazard Mater. 171 704-709.

- [74] G. Mouedhen, M. Feki, M.D.P. Wery, H.F. Ayedi, Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process, *J. Hazard Mater.* 150 (2008) 124-135.
- [75] Özcan, S., (2013) Şeker Fabrikası Atıksuyunun Elektrokoagülasyon Yöntemi İle Arıtımı. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- [76] Tatar, M., (2006). Demir Elektrotlar Kullanarak Elektrokoagülasyon Yöntemiyle Sulu Çözeltilerden SCN^- İyonlarının Giderimi. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- [77] Kobyas, M., Can, O. T. ve Bayramoğlu, M. (2003). Treatment of textile wastewaters electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. *J. Hazard. Mater.*, 100, 163-178.
- [78] Alinsafi, A., Khemis, M., Pons, M. N., Leclerc, J. P., Yaacoubi, A., Benhammou, A. Ve Nejmeddine, A. (2005). Electrocoagulation of reactive textile dyes and textile wastewater. *Chem. Eng. Proc.*, 44, 461-470.
- [79] Cameselle, C., Pazos, M. ve Sanroman, M.A. (2005). Selection of an electrolyte to enhance the electrochemical decolourisation of indigo. Optimisation and scale-up. *Chemosphere*, 60, 817-822.
- [80] Özyonar, F., (2007). Entegre Et Ve Et Ürünleri Tesisleri Atıksularının Kimyasal Koagülasyon ve Elektrokoagülasyon Yöntemleriyle Arıtılabilirliğinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.
- [81] P. Cañizares, C. Jiménez, F. Martínez, M.A. Rodrigo, C. Sáez, (2009) The pH as a key parameter in the choice between coagulation and electrocoagulation for the treatment of wastewaters, *J. Hazard Mater.* 163 158-164.
- [82] G. Mouedhen, M. Feki, M.D.P. Wery, H.F. Ayedi, (2008) Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process, *J. Hazard Mater.* 150 124e135.
- [83] I. Linares-Hernández, C. Barrera-Díaz, G. Roa-Morales, B. Bilyeu, F. Ureña-Núñez, (2009) Influence of the anodic material on electrocoagulation performance, *Chem. Eng. J.* 148 97-105.
- [84] A. Bagga, S. Chellam, D.A. Clifford, (2008) Evaluation of iron chemical coagulation and electrocoagulation pretreatment for surface water microfiltration, *J. Membr. Sci.* 309 82-93.
- [85] Golder, A.K., Hridaya, N., Samanta, A.N. ve Ray, S. (2005). Electrocoagulation of methylene blue and eosin yellowish using mild steel electrodes. *J. Hazard. Mater.*, 137, 134-140.
- [86] R. Katal, H. Pahlavanzadeh, (2011) Influence of different combinations of aluminum and iron electrode on electrocoagulation efficiency: application to the treatment of paper mill wastewater, *Desalination* 265 199-205.
- [87] J.A.G. Gomes, P. Daida, M. Kesmez, M. Weir, H. Moreno, J.R. Parga, G. Irwin, H. McWhinney, T. Grady, E. Peterson, D.L. Cocke, (2007) Arsenic

- removal by electrocoagulation using combined AlFe electrode system and characterization of products, *J. Hazard Mater.* 139 220-231.
- [88] W. Chou, C. Wang, K. Huang(2009) , Effect of operating parameters on indium (III) ion removal by iron electrocoagulation and evaluation of specific energy consumption, *J. Hazard Mater.* 167 467-474.
- [89] Kurt, U., (2007). Fenton ve Elektrokimyasal Yöntemlerle Evsel Atıksuların Arıtılabilirliğinin Araştırılması. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [90] A. Kolics, J.C. Polkinghorne, A. Wieckowski, (1998) Adsorption of sulfate and chloride ions on aluminum, *Electrochim. Acta* 43 2605-2618.
- [91] Bogliolo, M., Bottino, A., Capannelli, G. De Petro, Servida, M., Pezzi, A.G., Valini, G., (1996). Clean water recycle in sugar extraction process. Performance analysis of reverse osmosis in the treatment of sugar beet press water. *Desalination*, 108 (3), 261-271.
- [92] Ramjeawon, T., (2000). Cleaner production in Mauritian cane-sugar factories. *Journal of Cleaner Production*, 8 (1), 129-256.
- [93] Pena, M., Coca, M., Gonzalez, G., Rioja, R., Garcia M.T. (2003). Chemical oxidation of wastewater from molasses fermentation with ozone. *Chemosphere*, 51 (4), 893-900.
- [94] Jimenez, B., Antonia M., Borja, R., Martin, A., 2003. Aerobic-anaerobic biodegradation of beet molasses alcoholic fermentation wastewater. *Process Biochemistry*, 38 (2), 1275-1284.
- [95] Bodakçı, H., (2015) Elektrokoagülasyon Yöntemi İle Şeker Pancarı Ve Organik Kökenli Atık Suların Arıtılması Ve Brine Çözeltilisinin Saflaştırılması Prosesleri İçin İdeal Koşulların Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara Üniversitesi, Ankara.
- [96] Güven, G., Perendeci, A., Tanyolaç, A. (2009). Electrochemical treatment of simulated beet sugar factory wastewater. *Chemical Engineering Journal* 151 (2009) 149–159.
- [97] Wang, Y., Lin, H., Ding, L., Hu, B. (2020). Low-voltage electrochemical treatment to precipitate sulfide during anaerobic digestion of beet sugar wastewater. *Science of the Total Environment* 747 (2020) 141243.
- [98] Sharma, S., Simsek, H., (2020). Sugar beet industry process wastewater treatment using electrochemical methods and optimization of parameters using response surface methodology. *Chemosphere* 238 (2020) 124669.
- [99] Sahu, O., Dhanasekaran, P., (2021), Electrochemical removal of contaminants from sugarcane processing industry wastewater using copper electrode. *Journal of the Iranian Chemical Society*, <https://doi.org/10.1007/s13738-021-02173-4>.
- [100] O. Sahu, O., Mazumdar, B., Chaudhari, P. K., (2018). Electrochemical treatment of sugar industry wastewater: process optimization by response surface methodology. *International Journal of Environmental Science and Technology* (2019) 16:1527–1540.

- [101] Tiwari, A., Sahu, O., (2016). Treatment of food-agro (sugar) industry wastewater with copper metal and salt: Chemical oxidation and electro-oxidation combined study in batch mode. *Water Resources and Industry* 17 19–25.
- [102] Asaithambi, P., Matheswaran, M., (2011). Electrochemical treatment of simulated sugar industrial effluent: Optimization and modeling using a response surface methodology. *Arabian Journal of Chemistry* (2016) 9, S981–S987.
- [103] Sahu, O.P., Chaudhari, P.K., (2014). Electrochemical treatment of sugar industry wastewater: COD and color removal. *Journal of Electroanalytical Chemistry* 739 (2015) 122–129.



EKLER



ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: Click or tap here to enter text.

Adı Soyadı : Hande CANIGÜROĞLU

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim :

Lisans: On Dokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği
Bölümü, 2013.

