

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



MUNZUR
ÜNİVERSİTESİ
2008

**TUNCELİ ORGANİZE SANAYİ BÖLGESİ ATIKSULARININ
ELEKTROKOAGÜLASYON PROSESİ İLE ARITILABİLİRLİĞİNİN
İNCELENMESİ**

Ecem ORAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Prof. Dr. Mehtap TANYOL

TUNCELİ – 2025

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

TUNCELİ ORGANİZE SANAYİ BÖLGESİ ATIKSULARININ
ELEKTROKOAGÜLASYON PROSESİ İLE ARITILABİLİRLİĞİNİN
İNCELENMESİ

Ecem ORAL
(220020013)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Prof. Dr. Mehtap TANYOL

TUNCELİ – 2025

**T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**TUNCELİ ORGANİZE SANAYİ BÖLGESİ ATIKSULARININ
ELEKTROKOAGÜLASYON PROSESİ İLE ARITILABİLİRLİĞİNİN
İNCELENMESİ**

**Ecem ORAL
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

Bu tez 22/05/2025 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **oy birliği** ile kabul edilmiştir.

İmza	imza	imza
Prof.Dr. Özlem TEPE (Fırat Üniversitesi)	Prof.Dr. Mehtap TANYOL (Munzur Üniversitesi)	Dr.Öğr.Üyesi Ayşenur CUMURCU ÖGEDEY (Munzur Üniversitesi)
BAŞKAN	DANIŞMAN	ÜYE

Bu tez, Enstitümüz Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Doç. Dr. Nagihan KARAASLAN AYHAN
Enstitü Müdürü

NOT: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı “Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu”ndaki hükümlere tabidir.

22.05.2025

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 ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi 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.

Ecem ORAL
Öğrenci

Prof. Dr. Mehtap TANYOL
Danışman

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda bana her türlü desteği veren, yardımcı olan, rehberlik eden ve değerli katkılarını sunan sayın Prof. Dr. Mehtap TANYOL'a içtenlikle teşekkür ederim.

Tez çalışma sürecimde ve hayat yolculuğumda her zaman yanımda olan canım aileme, hayatımdaki ve tezimdaki yoldaşım canım Ayşe Hocama sonsuz sevgilerimi iletir, teşekkür ederim.

Ecem ORAL
TUNCELİ- 2025



İÇİNDEKİLER

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	I
TEŞEKKÜR	II
İÇİNDEKİLER	III
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	IV
TABLolar LİSTESİ.....	V
RESİMLER LİSTESİ.....	VI
SEMBOLLER LİSTESİ.....	VII
KISALTMALAR LİSTESİ.....	VIII
ÖZET	IX
ABSTRACT.....	X
1. GİRİŞ	1
1.1. Organize Sanayi Bölgeleri Atıksuları	2
1.2. Organize Sanayi Bölgeleri Atıksularının Çevresel Etkileri	4
1.3. Organize Sanayi Bölgeleri Atıksularının Arıtım Yöntemleri	5
1.4. Elektrokoagülasyon Prosesi	6
1.4.1. Elektrokoagülasyon prosesi teorisi	7
1.4.2. Elektrokoagülasyon prosesinin avantaj ve dezavantajları	10
1.4.3. Elektrokoagülasyon prosesine etki eden faktörler	11
1.4.3.1. Akım yoğunluğunun etkisi.....	11
1.4.3.2. pH'ın etkisi.....	12
1.4.3.3. Zamanın etkisi.....	13
1.4.3.4. İletkenliğin etkisi	14
1.4.3.5. Elektrot materyalinin etkisi.....	14
1.4.3.6. Sıcaklığın etkisi.....	15
1.4.3.7. Atıksu konsantrasyonunun etkisi	16
1.4.3.8. Karıştırma hızı	17
1.5. Yanıt Yüzey Yöntemi	17
1.6. Literatürde Yapılmış Çalışmalar	19
2. MATERYAL VE METOD.....	24
2.1. Tunceli Organize Sanayi Bölgesi.....	24
2.2. Elektrokoagülasyon Reaktörü	25
2.3. Analiz Yöntemleri.....	27
2.4. Maliyet Hesabı	27
2.5. Yanıt Yüzey Yöntemi İle Deneysel Dizayn.....	28
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	30
3.1. YYY-MKT'nin Varyans Analizi ve Model Uyumu	30
3.2. Proses Faktörlerinin KOİ ve Renk Giderimi ve İşletme Maliyeti Üzerindeki Etkisi	34
3.3. Proses Faktörlerinin Optimizasyonu.....	38
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	41
5. KAYNAKLAR	44
ÖZGEÇMİŞ	
EKLER	

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Sürecin şematik mekanizması	8
Şekil 3.1. Artıkların normal dağılım grafikleri. (a) KOİ giderimi, (b) renk giderimi, (c) işletme maliyeti	33
Şekil 3.2. Artıkların deney sırasına göre dağılım grafikleri. (a) KOİ giderimi, (b) renk giderimi, (c) işletme maliyeti	34
Şekil 3.3. KOİ giderimi (a, d, g), renk giderimi (b, e, h), işletme maliyeti (c, f, ı) için 3B yanıt yüzey eğrileri	36
Şekil 3.4. Optimum sonuçları veren proses değişkenlerinin sayısal değerleri.....	39
Şekil 3.5. Elektrokoagülasyon prosesi için tahmini ve deneysel sonuçların karşılaştırılması, a) KOİ giderimi, b) renk giderimi, c) işletme maliyeti.....	40



TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 1.1. Elektrokoagülasyon prosesinin avantajları ve dezavantajları.....	10
Tablo 2.1. Tunceli OSB atıksuyunun karakterizasyonu.	25
Tablo 2.2. Proses parametreleri ve seviyeleri.	29
Tablo 3.1. Deneysel tasarım matrisi ve her bir deneyden elde edilen yanıtlar.	30
Tablo 3.2. İkinci dereceden modelin ANOVA sonuçları.....	31



RESİMLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Elektrokoagülasyon düzeneği	25
Şekil 2.2. Tunceli OSB’den alınan atıksu örneği	26



SEMBOLLER LİSTESİ

A	: Amper
Ag	: Gümüş
Al	: Alüminyum
Al(OH)₃	: Alüminyum hidroksit
Ba	: Baryum
Cd	: Kadmiyum
CH₄	: Metan
Cl	: Klor
cm	: Santimetre
CO₂	: Karbondioksit
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
d	: Elektrot arası mesafe
e⁻	: Elektron
F	: Faraday sabiti (96485 C/mol).
Fe	: Demir
Fe(OH)₂	: Demir (II) hidroksit
Fe(OH)₃	: Demir (III) hidroksit
g	: Gram
H₂	: Hidrojen
Hg	: Cıva
H₂S	: Hidrojen sülfür
I	: Akım şiddeti
kg	: Kilogram
kWh	: Kilowatt saat
L	: Litre
m²	: Metre kare
m³	: Metre küp
mg	: Miligram
Mg	: Magnezyum
mL	: Mililitre
mm	: Milimetre
NaCl	: Sodyum klorür
Na₂S	: Sodyum sülfür
Ni	: Nikel
OH⁻	: Hidroksit
Pb	: Kurşun
Si	: Silisyum
Sn	: Kalay
Sr	: Stronsiyum
t	: Zaman
U	: Hücre potansiyeli (volt)
V	: Atıksuyun hacmi (m ³)
Zn	: Çinko
%	: Yüzde

KISALTMALAR LİSTESİ

AAT	: Atıksu Arıtma Tesisleri
AKM	: Askıda Katı Madde
ANOVA	: Varyans Analizi
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
MKT	: Merkezi Kompozit Tasarım
OSB	: Organize Sanayi Bölgesi
TKM	: Toplam Katı Madde
TOK	: Toplam Organik Karbon
TUKM	: Toplam Uçucu Katı Madde
YYY	: Yanıt Yüzey Yöntemi



ÖZET

Bu çalışmada, Tunceli Organize Sanayi Bölgesi (OSB) atıksularının elektrokoagülasyon prosesi ile arıtılması araştırılmıştır. Araştırmanın temel amacı, elektrokoagülasyon sürecinde en yüksek kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ve renk giderim verimlerinin sağlandığı optimum ortam koşullarını belirlemek ve aynı zamanda işletme maliyetini minimize etmektir.

Çalışmada, akım yoğunluğu, elektrotlar arası mesafe ve reaksiyon süresi olmak üzere üç bağımsız parametrenin, KOİ ve renk giderimi ile işletme maliyeti üzerindeki etkileri Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY) esaslı Merkezi Kompozit Tasarım (MKT) kullanılarak değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalar Design Expert 7.0 yazılımı ile tasarlanmış ve analiz edilmiştir. Modelleme sonuçları, KOİ, renk giderimi ve işletme maliyeti için geliştirilen ikinci dereceden (kuadratik) modellerin istatistiksel olarak anlamlı ve güvenilir olduğunu ortaya koymuştur. Korelasyon katsayıları (R^2) sırasıyla 0.9425 (KOİ giderimi), 0.9255 (renk giderimi) ve 0.9899 (işletme maliyeti) olarak bulunmuş, bu da deneysel veriler ile model tahminleri arasında güçlü bir uyum olduğunu göstermiştir. Optimizasyon çalışmaları sonucunda; KOİ giderimi için optimum koşullar 19.86 mA/cm² akım yoğunluğu, 4.84 cm elektrotlar arası mesafe ve 79.49 dakika reaksiyon süresi olarak belirlenmiş ve bu koşullarda %68.07 KOİ giderimi sağlanmıştır. Renk giderimi için optimum koşullar 5.41 mA/cm² akım yoğunluğu, 5.15 cm elektrotlar arası mesafe ve 68.47 dakika reaksiyon süresi ile %99.93 renk giderimi elde edilmiştir. Minimum işletme maliyeti ise 6.82 mA/cm² akım yoğunluğu, 2.58 cm elektrotlar arası mesafe ve 10.29 dakika reaksiyon süresi altında 0,098 USD/m³ olarak bulunmuştur. Ayrıca, %68.07 KOİ giderimi sağlanan ortam şartlarında %98.35'lük bir renk giderimi ve 0.125 USD/m³'lük işletme maliyeti elde edilmiştir.

Bu çalışma sonucunda, elektrokoagülasyon yönteminin uygun parametrelerle optimize edildiğinde, Tunceli OSB gibi endüstriyel atıksuların etkin bir şekilde arıtılabileceği ve düşük işletme maliyetleriyle sürdürülebilir bir arıtma alternatifi sunabileceği ortaya konmuştur.

Anahtar kelimeler: Al elektrot, elektrokoagülasyon, Tunceli OSB atıksuları, yanıt yüzey yöntemi, KOİ giderimi, renk giderimi, işletme maliyeti

ABSTRACT

Investigation of Treatability of Tunceli Organized Industrial Zone Wastewater by Electrocoagulation Process

In this study, the treatment of wastewater from the Tunceli Organized Industrial Zone (OIZ) using the electrocoagulation process was investigated. The main aim of the research is to determine the optimal operating conditions that provide the highest chemical oxygen demand (COD) and color removal efficiencies in the electrocoagulation process while minimizing operational costs.

In the study, the effects of three independent parameters—current density, inter-electrode distance, and reaction time—on COD removal, color removal, and operational cost were evaluated using the Response Surface Methodology (RSM)-based Central Composite Design (CCD). The experimental work was designed and analyzed using Design Expert 7.0 software. The modeling results showed that the second-order (quadratic) models developed for COD removal, color removal, and operational cost were statistically significant and reliable. The correlation coefficients (R^2) were found to be 0.9425 (COD removal), 0.9255 (color removal), and 0.9899 (operational cost), indicating a strong correlation between the experimental data and model predictions.

As a result of optimization studies, the optimum conditions for COD removal were found to be 19.86 mA/cm² current density, 4.84 cm inter-electrode distance, and 79.49 minutes reaction time, achieving a COD removal of 68.07%. For color removal, the optimum conditions were 5.41 mA/cm² current density, 5.15 cm inter-electrode distance, and 68.47 minutes reaction time, resulting in 99.93% color removal. The minimum operational cost was found to be 0.098 USD/m³ at a current density of 6.82 mA/cm², inter-electrode distance of 2.58 cm, and reaction time of 10.29 minutes. Additionally, under the conditions providing 68.07% COD removal, a 98.34% color removal and an operational cost of 0.125 USD/m³ were achieved.

As a result of this study, it was demonstrated that when optimized with suitable parameters, the electrocoagulation method can effectively treat industrial wastewater, such as that from Tunceli OIZ, and provide a sustainable treatment alternative with low operational costs.

Keywords: Aluminum electrode, electrocoagulation, Tunceli OIZ wastewaters, response surface methodology, COD removal, color removal, operational cost.

1. GİRİŞ

Sanayi Devrimiyle makine gücüne geçilmiş, on dokuzuncu yüzyılın sonlarına doğru da sanayinin belirli bir plan dahilinde geliştirilmesi ile birlikte Organize Sanayi Bölgeleri (OSB) kurulmuştur. Organize Sanayi Bölgeleri Kanunu'nda OSB'ler, sanayi faaliyetinin sanayiye uygun alanlarda yapılmasını sağlamak, çarpık kentleşme ve çevre sorunlarını önlemek, kentleşmeyi yönlendirmek, kaynakları rasyonel kullanmak üzere kurulan bölgelerdir. Özetle OSB'ler bulunduğu ülkelerin, bölgelerin ve şehirlerin kalkındırılması, ekonomik yapısının geliştirilmesi, üretime katkı sağlaması amacıyla sanayi faaliyetlerinin yoğun olduğu bölgelerdir. OSB'lerin var olma sebeplerine bakıldığında, kuruluşların bu anlayışa uygun olarak çalışmaları beklenmektedir (Kırlioğlu ve Fidan, 2010). Bu doğrultuda OSB'ler sanayileşmenin yol açtığı olumsuzlukların üstesinden gelinerek, çevreye düzenli ve duyarlı kentleşmenin olabilirliğini sağlamaktadır. Üretim faaliyetlerinin verimli bir şekilde yürütülmesi ve sürekli kalkınmanın sağlanması için gerekli yasal düzenlemelerin yapılmasını sağlamaktadır (Bulmuş ve Koç, 2014).

OSB'nin kentlerin sağlıklı ve planlı kalkınmasının sağlanmasında, kentleşmenin büyümesini hızlandırmada önemli bir dinamik olduğu ve sanayi kuruluşlarının kuruldukları alanlara konut, alt sanayi ve diğer kentsel faaliyetleri de beraberinde getirdiği göz önüne alındığında, sanayinin planlı bir şekilde gelişmesi ve sürdürülebilir bir üretimin hedeflenmesi gerekmektedir. Tüm atık türlerinde olduğu gibi endüstriyel atıkların yönetimi için de tüm faktörler bütüncül bir şekilde değerlendirilmelidir ve çevresel, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik sağlanmalıdır (Bakı ve ark., 2016).

Atıksuların içinde kötü kokan gazlar, hastalığa neden olan mikroorganizmalar, zararlı kimyasallar ve ağır metaller bulunmaktadır. Su kirliliğine bağlı olarak kolera, ishal, sıtma gibi insanlara kolayca bulaşan hastalıklar yaşamımızı olumsuz etkilemektedir (URL-3). OSB'lerde çevresel etkilerin azaltılması önem arz etmektedir. Atıksuların çevresel etkilerini azaltmak için sanayi atıksularının düzenli bir şekilde arıtılması yapılmalıdır. Atıksu geri kazanımı yapılarak tekrar kullanım sağlanmakta ve temiz su kaynakları korunmaktadır.

Elektrokoagülasyon, patojenler, organik bileşikler ve ağır metaller dahil olmak üzere çeşitli kirleticileri ortadan kaldırmak için kullanılan potansiyel bir su arıtma yöntemidir (Bharti ve ark., 2023). Elektrokoagülasyon, geniş tabanlı, son derece güvenilir ve uygun

maliyetli bir teknolojidir. Aynı zamanda yüksek kirletici giderme verimliliğine sahiptir ve diğer tekniklerle karşılaştırıldığında daha az çamur üretmektedir (Boinpally ve ark., 2023).

Elektrokoagülasyon hiçbir zararlı yan ürün üretmez ve geleneksel su arıtma yöntemlerinden daha az kimyasal kullanılmaktadır. Elektrokoagülasyon tekniği, uygulanabilirliği, kullanım kolaylığı, çevre dostu yapısı ve çeşitli kirleticileri yönetme kabiliyeti nedeniyle içme suyunu ve çeşitli endüstriyel atıksuları arıtmak için yaygın olarak kullanılmaktadır (Bharti ve ark., 2023; Sadaf ve ark., 2024).

Bu tez çalışmasında, Tunceli OSB atıksularının elektrokoagülasyon prosesi ile laboratuvar koşullarında oluşturulan bir reaktör içerisinde kesikli sistemde arıtılması amaçlanmıştır.

1.1. Organize Sanayi Bölgeleri Atıksuları

İnsan ve hayvan gücüne dayalı üretimin yerini Sanayi Devrimi ile birlikte makine gücüne dayanan üretim almıştır. Yaşanan bu teknolojik devrim çok sayıda insanın yaşamını etkilemiş ve hayatın her alanında etkisini göstermiştir. Birçok alanda yeni buluşların yapılması, yeni tekniklerin oluşturulması, ham maddeye ulaşımın ve kullanımının kolaylaşması, üretimde artış sağlanması, teknolojinin gelişmesi ve değişmesi insan hayatında köklü bir dönüşümün yaşanmasına yol açmıştır (Küçükkalay, 1997).

On dokuzuncu yüzyılın sonlarında sanayinin belirli bir plan dahilinde geliştirilmesi ve yerleştirilmesine bağlı olarak Organize Sanayi Bölgesi (OSB) uygulamasına geçilmiştir. Ülkeler kalkınma politikalarıyla planlı bir şekilde sanayi alanları oluşturmuştur. İlk OSB İngiltere’de kurulmuş olup yirminci yüzyılın başlarında başta Amerika Birleşik Devletleri olmak üzere diğer gelişmiş ülkelerce de kurulmaya başlanmıştır. İkinci Dünya Savaşı ile birlikte ilerleyen süreçlerde OSB’ler devlet yatırımı olarak uygulanmaya başlamıştır. Cumhuriyet döneminde Türkiye’de sanayileşme girişimleri ekonomiyi kalkındırmak amacıyla özel kesimin girişimleriyle ilerlemiş ancak deneyimin olmaması ve mali güç yetersizliği, süreçte verimliliği sağlayamamıştır. 1931 yılında uygulamaya konulan ‘I. Beş Yıllık Sanayi Planı’ dahilinde sanayi alt yapısının oluşturulma çalışmaları başlamıştır. 1960 yılının başlarında planlanan uzun vadeli hedefler sonucunda 1962 yılında Bursa’da ilk olarak bir OSB kurulmuştur. Günümüzdeyse Türkiye genelinde hemen hemen her şehirde en az bir tane OSB bulunmaktadır (URL – 1; Karakaya ve Dulkadiroğlu, 2021).

OSB'lerin temel amacı, şehrin planlı gelişmesini sağlamak, organize ve planlı bir şekilde üretimde verimliliği artırmak, az gelişmiş bölgelerin ekonomilerinin yükselmesine destek olmak, oluşacak herhangi bir çevre kirliliğini önlemeye çalışmaktır. Bütün bu sanayileşme çabalarının yanında kaynakların kullanımına, belirli ömürlerinin olmasına, korunmasına, hava, su, toprak gibi doğal kaynakların kirlenmemesine dikkat edilmelidir. Bu sebeple sanayi bölgelerinden kaynaklanan çevresel sorunların asgari düzeye indirilmesi önem arz etmektedir. Sanayi tesislerinde çeşitli kirleticiler içeren su ve sıvı atıklar oluşmaktadır. Bu atıksular sanayide bulunan üretim işlemlerine, üretim sürecine, sanayi türüne, faaliyetlerin çeşitliliğine, endüstri alanına, tesis içi temizliğe, tesiste çalışan personelin kullanımına, prosedürlere uyma derecesine göre değişkenlik göstermektedir (Kırlıoğlu ve Fidan, 2010).

Atıksu, sıvı veya başka bir ifade ile suyun taşıyabildiği evsel, endüstriyel nitelikli atıklar ile yüzey sularının, yeraltı sularının ve yağışların karışımına ya da farklı bir ifade ile bir topluluğun ihtiyaçları sonucunda meydana gelen kullanılmış sulardır. Atıksular evsel, endüstriyel ve kentsel atıksular olarak ayrılmaktadır. Evsel atıksular; okul, hastane, ev gibi insanların toplu olarak bulundukları alanlardan kaynaklı atıksulardır. Kentsel atıksular; endüstriyel atıksu ve/veya yağmur suyunun karışımı ile oluşan atıksulardır. Endüstriyel atıksular ise yağmur suları, evsel atıksular dışında ticari faaliyet yürütülen alanlardan oluşan atıksulardır (Yüksekdağ ve ark., 2020).

Atıksu karakteristiği; yaşanan bölgeye, bölgenin faaliyette bulunduğu alana, sızıntı sularının özelliklerine, debiye, yağan yağmura göre değişken özellikler göstermektedir. Örneğin, OSB'ler iki farklı şekilde yapılandırılabilir. Farklı sektörlerde faaliyet gösteren tesisler 'karma' OSB'ler olarak, aynı sektör grubunda faaliyet gösteren tesisler 'ihtisas OSB' adıyla anılmaktadır. Birbirinden farklı sektörlerdeki işletmelerin atıksu arıtmaları miktar ve özellik bakımından atıksu arıtımında zorluklar meydana getirebilmektedir. İhtisas OSB'lerin atıksu arıtımı daha avantajlıdır. Bir diğer zorluk da bölgedeki işletmelerin sayı ve sektörlerin zaman içerisinde değişmesidir (Karakaya ve Dulkadiroğlu, 2021).

OSB'lerde bulunan tesislerin faaliyetleri sonucunda atıksuların içeriği değişebilmektedir. Örneğin, kimya endüstrisinde asit, baz ve klor fabrikaları çeşitli asitler, bazlar, alkali ve toprak alkali katyonlar ve bunların tuzlarını suya bırakmaktadır. Demir-çelik endüstrisinin kirli suları alkali ve toprak alkali elementler, siyanürler, naftalin ve fenoller içermektedir. Özellikle Fe, CN, fenol ve naftalin konsantrasyonu ile pH yüksek

olabilmektedir. Metal işleyen endüstri dallarının kirli sularında ağır metallerden Cu, Sn, Ni, Fe ve Pb' un yanında kromat, siyanür, sülfat, klorür nitrit, mineral asit ve bazlar bulunmaktadır ve özellikle siyanürler çok tehlikelidirler. Tekstil endüstrisinin kirli sularında arsenik, çeşitli ağır metaller, kromik asit, Na₂S ve çeşitli organik ve anorganik boya maddeleri, çeşitli organik maddeler ve tekstil lifleri bulunmaktadır (URL – 2).

Endüstriyel atıksular, sanayi türüne, üretim işlemlerine, faaliyetlerin çeşitliliğine, bölgenin yapılanma şekline bağlı olarak birbirinden farklılık göstermektedir. Bu nedenle arıtma yöntemine karar verirken atıksu karakterizasyonu yapılmalıdır. Atıksu karakterizasyonuna göre arıtma yöntemi belirlenmelidir.

1.2. Organize Sanayi Bölgeleri Atıksularının Çevresel Etkileri

Hızlı sanayileşme, giderek artan ve çözülmesi zorlaşan çevre kirliliğini beraberinde getirmiştir. Çevre kirliliğinin bir kolunu OSB'lerde faaliyette bulunan tesislerin üretim işlemlerine, sanayi türüne, faaliyet çeşitliliğine göre atıksular oluşmaktadır. Oluşan bu atıksuların uygun yöntem ve teknikle arıtılması gerekmektedir. Arıtılmış veya arıtılmamış atıksular yeraltı sularına, akarsulara, denizlere ve oradan da alıcı ortama kadar girmektedir. Arıtılmamış atıksuların kullanılması ciddi derecede sağlık sorunlarını beraberinde getirmekte ve doğal su kaynaklarının kirlenmesine neden olmaktadır. Aynı zamanda atıksuların içinde bulunan kimyasallar da doğal kaynak sularının yapısını bozarak kaynak sularının miktarının azalmasına neden olmaktadır. Yapısı bozulan ve miktarı azalan sularda yaşayan canlılar ve bitkiler doğal dengenin bozulmasıyla birlikte olumsuz etkilenmektedir. Arıtılmamış atıksuya maruz kalan tarımsal alanlarda yaşayan hayvanlar, bitkilerle beslendiklerinde zararlı mikroorganizmaların vücuda alınmasıyla birlikte kendi yaşamları tehlikeye girmektedir. Bu hayvanların etini, sütünü ve yumurtasını insanlar tükettiğinde ise insan sağlığını olumsuz etkilemektedir. Atıksuyun içinde bulunan kimyasallar aynı zamanda toprakta birikmesi sonucu yer üstü ve yer altı suyu kaynaklarına karışmaktadır (URL – 3).

Atıksularda bulunan organik maddeler arasında; karbonhidratlar, lignin, yağlar, sabun, sentetik deterjanlar, proteinler ve bunların ayrışmasından oluşan ürünler ile çeşitli doğal ve sentetik organik kimyasallar yer almaktadır. Kanalizasyon sistemleriyle toplanan kentsel atıksular içerisinde gerek evsel gerekse de endüstriyel kaynaklı çeşitli inorganik maddeler de bulunmakla birlikte özellikle endüstriyel atıksuların kanalizasyon sistemine verilmesi durumunda arsenik, kadmiyum, krom, bakır, kurşun, cıva, çinko gibi toksik etkiye

sahip inorganik maddeler içerebilirler. Toksik kimyasalların konsantrasyonu insan sağlığını etkilemekle birlikte bitkiler üzerinde toksik etkiye bulunabilirler. İnsan sağlığı yönünden bakıldığında atıksuların tarımsal sulamada kullanımında dikkat edilmesi gereken en önemli kirleticiler patojen mikroorganizmalardır (Kukul ve ark., 2007).

Hem kanalizasyonda ve hem de arıtılmadan alıcı ortamlara bırakılan atıksular aerob ve anaerob ayrışmaları sonrasında çok kötü kokan gazlar (H_2S , CH_4 , CO_2 , CO vb.) oluşmaktadır. Alıcı ortamda oluşan tahribatlar sağlık sorunlarını da (hastalıklar, ölümler ve sefalet oluşturur) beraberinde getirmektedir. Atıksu birçok hastalığa neden olan mikroorganizmalar (patojenler) taşıy ve bekletilmesi aşamasında da logaritmik olarak üremektedirler. Bakteriler, virüsler ve parazitler (solucanlar ve protozoanlar dahil), atıksudaki insanlar için tehlikeli olan patojen türleri olmakla birlikte deri, göz ve solunum yolu enfeksiyonlarına neden olabilecek mantarlar da atıksu ve atıksu çamurunda büyümektedir (Üçüncü, 2019).

Türkiye'nin su ve atıksu yönetim politikası, AB'ye katılım sürecinin devam etmesinin yanı sıra artan nüfus, hızlı kentleşme, küresel ve bölgesel düzeydeki gelişmeler doğrultusunda mevcut ve gelecekteki su ihtiyaçlarını göz önünde bulundurarak geliştirilmektedir (Şener ve Olhan, 2016).

1.3. Organize Bölgeleri Atıksularının Arıtım Yöntemleri

OSB'ler şehrin planlı bir şekilde kalkınmasını sağlayan sanayi faaliyetlerinin yürütüldüğü sanayi bölgeleridir. Bu faaliyetlerin sonucunda atıksular oluşmaktadır. Oluşan atıksuların arıtılması çevre kirliliği ve sağlığı bakımından, su kaynaklarının korunması açısından önem taşımaktadır. OSB'lerde Atıksu Arıtma Tesislerin (AAT) kurulmasının amacı, atıksu kalitesini iyileştirerek mevzuatla belirlenen parametrelere ait değerlerin karşılanmasını sağlamak, AAT'lerin istenen kalitede atıksu üretmesini sağlamasıdır. OSB'lerde atıksu arıtma sistemleri kurulması ile birlikte OSB'lerin çevresel etkileri azaltılıp çevre kirliliği önlenmeye çalışılmış ve atıksuları tekrar kullanılabilir hale getirilmiştir. OSB'lerde AAT uygun arıtma teknolojisinin seçimi, çıkış suyu kalitesi, atıksularda bulunan patojen mikroorganizmaların en aza indirgenecek şekilde tasarlanarak yapılmaktadır. Atıksuyun türü, kirleticinin özellikleri, jeolojik yapı, ekonomik olanaklar gibi durumlar göz önünde bulundurularak kurulmaktadır. Kaynaklarına bağlı olarak atıksu özellikleri farklılık

gösterir ve bu farklılıklar göz önüne alınarak arıtma yöntemlerine başvurulur (Durak ve ark., 2021).

AAT'ler farklı fiziksel, kimyasal, biyolojik ve ileri arıtma mekanizmalarına sahip sistemlerdir. Fiziksel arıtma, atıksu içindeki çözünmemiş halde bulunan kirleticilerin yüzdürülerek ya da farklı boyut ve ebatlardaki çökebilir katı cisimlerin atıksudan ayrıldığı arıtma işlemlerine denilmektedir. Izgaralar, kum tutucular, elekler en yaygın fiziksel arıtma üniteleridir. Fiziksel arıtma da ızgaralarda, kum tutucularında meydana gelebilecek problemlerin tespit edilmesi çözüm yöntemleri açısından önemlidir.

Kimyasal arıtma, çeşitli kimyasal tepkimeler yardımıyla veya koagülant, polielektrolit vb kimyasal maddeler kullanılarak atıksuda çözünmüş, askıda veya kolloidal maddelerin giderilmesini, kendiliğinden çökemeyen maddelerin çökmesini sağlamak amacıyla uygulanan yöntemlerdir.

Biyolojik arıtma askıda veya çözünmüş halde bulunan organik maddelerin mikroorganizmalar yardımıyla ve kısmende anorganik kirleticileri besin kaynağı kabul ederek atıksudan uzaklaştırılması işlemidir. Damlatmalı filtre, aktif çamur, biyolojik filtreler, anaerobik sistemler biyolojik arıtım ünitelerindendir. Bazı durumlarda ikinci kademe olarak fiziksel ve kimyasal proseslerle birlikte çalıştırılmaktadır (URL-4; Yüksekdağ ve ark., 2020; Kınık ve Aykaç, 2021).

İleri arıtma fiziksel veya biyolojik arıtma yöntemleriyle yeterli düzeyde arıtılamayan ya da arıtımı mümkün olmayan kirletici maddelerin (azot, fosfor, ağır metaller, toksik organik maddeler vb.) giderilmesinde kullanılan arıtma işlemidir. Nitrifikasyon, denitrifikasyon, adsorpsiyon, iyon değiştirme başlıca gelişmiş arıtma yöntemlerindendir (URL – 4).

Biyolojik arıtma tesisleri sanayi atıksularının temizlenmesi, çevre kirliliğinin azaltılması, atıksuyun yeniden kullanımı ile geri dönüşümünün sağlanması, su israfının azalması, çevreye zarar veren etkilerin azaltılması, insan sağlığına olan zararın ortadan kaldırılması adına önem taşımaktadır.

1.4. Elektrokoagülasyon Prosesi

Elektrokoagülasyon, kirleticinin atıksudan uzaklaştırılması için kurban elektrotlarla elektrik akımı sağlanmasında kullanılan elektrokimyasal bir işlemdir. Buna ek olarak, düşük başlangıç maliyetli kurulum ve bakım, kısa bir çökeltme süresiyle arıtıldıktan sonra az

miktarda çamur üretimi ve kirleticinin iyi giderim verimliliği nedeniyle ilericidir ve oldukça benimsenip yaygın olarak kullanılmaktadır (Ebba ve ark, 2022). Bununla birlikte elektrokoagülasyon, askıda katı maddelerin, ağır metallerin, emülsifiye yağların ve mikroorganizmaların sudan uzaklaştırılması için gelişmiş bir işlem ve elektrokimya, pıhtılaşma ve yüzdürme gibi bilinen tekniklerin bir kombinasyonudur (Boinpally ve ark., 2023).

Elektrokoagülasyon yöntemi, yüksek oranda kirlenmiş atıksuları arıtmak için kullanılan kimyasal pıhtılaşmanın aksine, kimyasal pıhtılaştırıcı eklenmemesiyle ikincil kirleticiler üretmemektedir. Diğer teknikler ile karşılaştırıldığında daha az çamur üretmekte dolayısıyla en küçük kolloidal parçacıkların bile uzaklaştırılmasında oldukça verimli hale getirmektedir. Kolayca bertaraf edilebilecek minimum çamur üretir. Farklı organik ve inorganik kirleticileri bozabilecek ekonomik, kullanımı kolay ve çevre dostu bir süreç olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle, elektrokoagülasyon işlemi, hedef kirleticilere bağlı olarak bağımsız olarak veya diğer arıtma yöntemleriyle kombinasyon halinde kullanılabilir (Bharti ve ark., 2023).

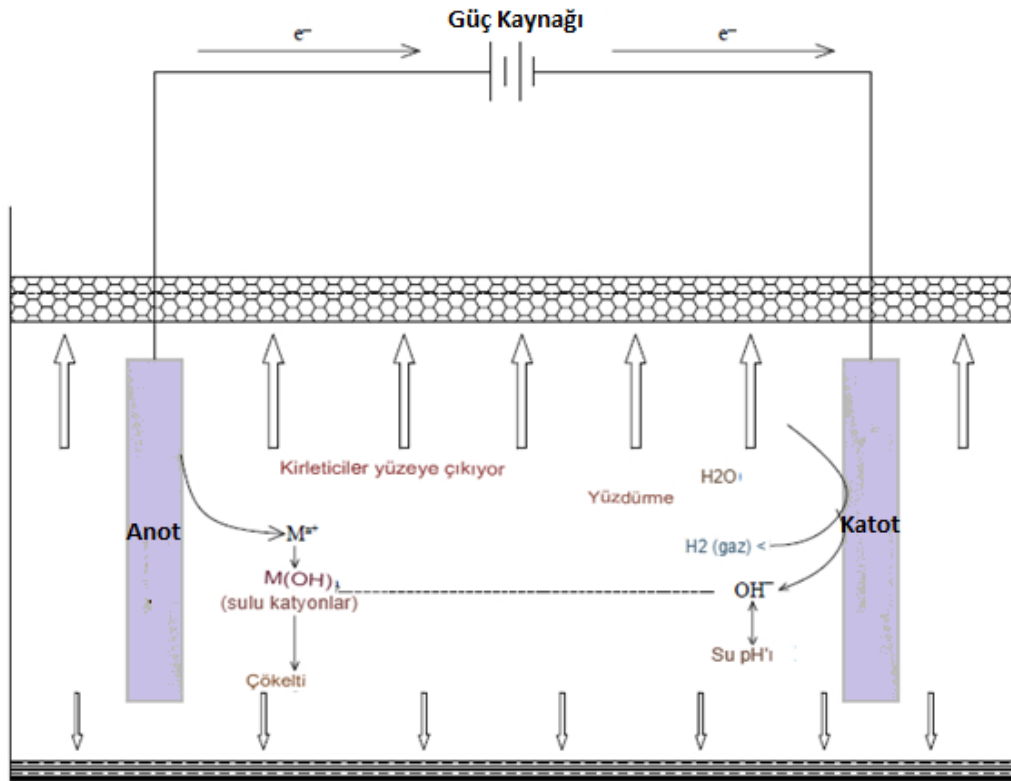
Biyolojik olarak parçalanamayan organik bileşiklerin uzaklaştırılması, büyük ölçüde sürecin yüksek verimliliği, çevre dostu olması ve uyarlanabilirliği sayesinde önemli ölçüde ilerlemiştir. Elektrokoagülasyon yaklaşımının tabakhane, tekstil, deri ve petrol arıtma endüstrilerinden üretilen atıksulardan ağır metalleri (Ni, Cr, Zn, As, Cd, Fe ve Hg) ortadan kaldırmak için yeni bir stratejidir. Klorür tuzları eklemek dışında kimyasal kullanmaktan kaçınmak, elektrokoagülasyonun kritik faydalarından biridir ve bu da onu en yeşil teknolojilerden biri haline getirmektedir. Geniş uygulaması nedeniyle, çeşitli sahalardaki yüzey ve yeraltı sularını iyileştirmek için elektrokoagülasyon tekniği de kullanılmaktadır (Sadaf ve ark., 2024).

1.4.1. Elektrokoagülasyon prosesinin teorisi

Elektrokoagülasyonun temel prensibi olan elektroliz terimi, bileşikleri parçalamak için elektrik kullanımını ifade etmektedir. Elektrotlar arasında iyon transferine izin veren bir elektrolit çözeltisinde gerçekleşen işlemde 1820 yılında Michael Faraday elektroliz kavramını tanıttı. Elektrokoagülasyon hücresinde pozitif iyonlar katoda doğru ilerleyip indirgenmekte, aynı anda negatif iyonlar anoda doğru ilerleyip oksitlenmektedir. Bir su arıtma teknolojisi olarak elektrokoagülasyonun uzun bir geçmişi olmakla birlikte Londra'da

ilk olarak 1889 yılında önerildi ve on yıl boyunca bir kanalizasyon arıtma tesisinde kullanıldı. İlk gelişim aşamalarının temel amacı, kokuyu azaltmak ve kanalizasyon atıklarının dezenfeksiyonu için klor üretmekti (Boinpally ve ark., 2023).

Elektrokoagülasyon, atıksuyun arıtılması ve kolloidal kirleticilerin dengsizleştirilmesi için elektrokimya, kimyasal ve fiziksel yöntemleri birleştirmektedir. Elektrokoagülasyonda kullanılan anot, hidroksitler oluşturmak için suda çözünen Fe, Al veya diğer metalleri içermektedir. Katot genellikle anotla aynı elementten yapılmaktadır. Elektrokoagülasyon, anotlu ve katotlu elektrolitik hücreleri içermektedir. İşlemdeki anot kurbandır ve kirleticileri uzaklaştırmak için gereken pıhtılaştırıcıları oluşturmak için çözünmeye uğramaktadır. Kısacası, bir elektrokoagülasyon süreci birbirini izleyen üç adımı ve pıhtılaşmış iyonların “yerinde” üretimini içerir. Bunlar (i) pıhtılaştırıcıları ortaya çıkarmak için kurban elektrotların elektrolitik oksidasyonunu, (ii) kirleticilerin kararsız hale getirilmesi, partiküllerin askıya alınmasını ve emülsiyonların kırılmasını ve (iii) topaklar üretmek için kararsız halde faz birikimini kullanmaktır (Sadaf ve ark., 2024).

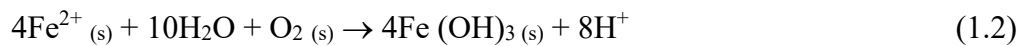


Şekil 1.1. Sürecin şematik mekanizması (Bharath ve ark.,2018)

Elektrokimyasal yöntemin alüminyum ve demir elektrotlar kullanılarak reaksiyon mekanizması Şekil 1.1'de gösterilmiştir. Uygulanan bir elektrik akımında anodik malzemenin oksidasyonu ve katodik malzemenin indirgenmesi gerçekleşmiştir (Bharath ve ark., 2018). Elektrokoagülasyon süreci birkaç adımdan oluşmaktadır:

- I. Harici bir güç kaynağından bir elektrik akımı beslendiğinde, aktif pıhtılaştırıcı katyonlar (genellikle alüminyum veya demir), kurban anot denklemlerinin (1.1) ve (1.4) elektrolitik oksidasyonu ile çözeltiye salınır.
- II. Eşzamanlı olarak, katot hidroliz denklemi (1.6) nedeniyle hidroksil iyonları üretilir.
- III. Metal katyonları hidroksillerle reaksiyona girerek monomerik ve polimerik tür denklemleri (1.2), (1.3) ve (1.5) oluşturur.
- IV. Kirleticilerin, askıda partikül maddelerin ve emülsiyonların yüzey yükünün nötralizasyonu, metal hidroksillerle reaksiyonu nedeniyle elde edilir.
- V. Nötralize edilmiş partiküllerin aglomerasyonu ve pıhtılaşması sulu fazda flok olarak meydana gelir.
- VI. Daha ağır toprakların çökeltilmesi, süpürme pıhtılaşması yoluyla çökeltme ile gerçekleşir.
- VII. Hidrojen kabarcıkları katotta su elektrolizi ile üretilir, bu da süpürme pıhtılaşma denklemi (1.6) yoluyla çözeltinin yüzeyindeki flokların yüzmesine neden olur (Mao ve ark., 2023).

Anot reaksiyonları:



Katot reaksiyonları:



Elektrotlar arasında, farklı elektrot şekilleri kullanılarak pıhtılaştırıcılar oluşturan bir sıvı yoluyla bir akım sağlanır. Bu süreçte reaksiyon mekanizmaları, operasyonel parametrelere ve suda bulunan spesifik kirletici türlerine bağlıdır (Bharti ve ark., 2023).

1.4.2. Elektrokoagülasyon prosesinin avantaj ve dezavantajları

Elektrokoagülasyon prosesinin avantajları ve dezavantajları aşağıda verilmiştir.

Tablo 1.1. Elektrokoagülasyon prosesinin avantajları ve dezavantajları (Bharath ve ark., 2018; Mao ve ark., 2023; Aladily ve ark., 2025).

Avantaj	Dezavantaj
Kirletici maddelerin uzaklaştırılmasını kolaylaştırmak için gaz kabarcıkları, daha büyük ve daha kararlı topaklar üretir ve küçük kolloidal parçacıkları bile çıkarabilir.	Katot pasivasyonu, kalsiyum, magnezyum ve diğer maddelerin hidroksitleri nedeniyle meydana gelmekte, akım akışını ve hidrojen salınımını engellemektedir.
Yüksek tuz ve pH seviyeleri de dahil olmak üzere çok çeşitli koşullar altında çalışabilir. Buna karşılık pH, sıcaklık ve organik maddenin varlığı gibi çevresel faktörlere duyarlıdır.	Atıksudan yüksek konsantrasyonlarda demir ve alüminyum iyonlarının uzaklaştırılması için işlem sonrası gerekli olabilir.
En küçük kolloidal parçacıkları bile daha hızlı çarpışma ve kolaylaştırılmış pıhtılaşma yoluyla giderebilir.	Elektriğe sınırlı erişimi olan bölgelerde elektrokimyasal yöntemler maliyetli olabilir.
Elektrokoagülasyon, düşük yatırım, bakım, enerji ve arıtma maliyetleri gerektirir.	Elektrotlar üzerinde çamur birikmesi, sürekli çalışma sırasında elektrolitik işlemi engelleyebilir.
Elektrokoagülasyon arıtılmış atıksular hoş, kokusuz, berrak ve renksiz su sağlar.	Elektrokimyasal yöntemler, biyolojik olarak parçalanabilen kirleticileri ve çözünebilir organik maddeleri uzaklaştırmak için biyolojik işlemler kadar etkili olmayabilir.
Elektrokoagülasyon, düşük çamur üreten bir süreçtir. Elektrokoagülasyon tarafından üretilen çamur esas olarak metalik oksitler / hidroksitlerden oluşur.	Anotlar oksidasyon nedeniyle çözelti halinde çözülür ve düzenli aralıklarla değiştirilmesi gerekir.

Tablo 1.1. devamı

	Atıksu süspansiyonunun iletkenliği yüksek olmalıdır.
Elektrokoagülasyon prosesinde ilave kimyasallara gerek yoktur.	Viskoz hidroksitin bazı durumlarda çözünmesi muhtemel olabilir.
Elektroliz sırasında oluşan gaz kabarcıkları, kirleticileri zorlanmadan ayrılabilceği çözeltinin tepesine kadar ilerletebilir.	Ayrışması nedeniyle anot periyodik olarak değiştirilmektedir.
Elektrokoagülasyon tarafından oluşturulan floklar kimyasal floklara benzer. Elektrokoagülasyon floklarının boyutu çok daha büyüktür, daha az bağlı su içerir ve aside dayanıklı ve daha sağlamdır.	Katotta indirgenmiş metallerin ve hidroksitlerin çökmesi nedeniyle katot pasivasyonun direnci artmaktadır.
Elektrokoagülasyon tarafından üretilen atıksuyun yeniden kullanılması, kimyasal işlemlerle ilgili olarak daha az miktarda toplam çözünmüş katı madde içerdiğinden daha az su geri kazanım maliyetine katkıda bulunur.	
Elektrokoagülasyon, daha verimli pH aralığı ve pH nötralizasyon sonucu sağlar ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıyla uygun şekilde kullanılabilir.	
Uygulanan akım, küçük koloidal parçacıkların kolayca ayrılmasını sağlar.	
Güneş panelleri veya diğer alternatif enerji kaynakları ile güçlendirilebilir.	

1.4.3. Elektrokoagülasyon prosesine etki eden faktörler

Elektrokoagülasyon prosesine etki eden birçok faktör bulunmaktadır. Bu faktörlerden akım yoğunluğunun etkisi, pH'ın etkisi, zamanın etkisi, iletkenliğin etkisi, elektrot materyalinin etkisi, sıcaklığın etkisi, atıksu konsantrasyonunun etkisi ve karıştırma hızı parametreleri aşağıda verilmektedir.

1.4.3.1. Akım yoğunluğunun etkisi

Akım yoğunluğu, elektrottan salınan metal iyonlarının sayısını tanımlayan birim alan başına akım olarak tanımlanmaktadır. Elektrokoagülasyonun verimliliği üzerinde etkisi olan

kabarcık oluşum hızını, pıhtılaştırıcı doz oranını, toprak boyutunu ve gelişimini akım yoğunluğu etkilemektedir. Akım yoğunluğu arttıkça anotun çözünme hızı artar ve sonuç olarak, metal hidroksit topaklarının miktarı, kirlilik giderme verimliliği artar. Metal iyonlarının çözeltiye ayrışması akım yoğunluğu ile doğru orantılıdır ve bu değerler pH, sıcaklık ve su akış hızı gibi diğer kısıtlamalardan da etkilenmektedir (Boinpally ve ark., 2023).

Uygulanan akım yoğunluğu genellikle metal iyonu ayrışması ile doğru orantılıdır. Bununla birlikte, daha az akım kullanmak, suyu ısıtırken elektriği israf etme olasılığını artırmakta ve toplam akım kullanımının belirli bir ürünü üretmek için kullanılan akıma oranı olarak ölçülen akım verimliliğinde bir düşüşe de neden olabilmektedir. Arıtılmış su kalitesi ancak akım yoğunluğu için kritik değer artarsa önemli ölçüde iyileşir. pH, sıcaklık ve su akış hızı gibi diğer faktörler, akım yoğunluğu için ideal ağırlığı etkiler (Sadaf ve ark., 2024).

Uygulanan akım yoğunluğu aralığı, atıksu türlerine bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Akım yoğunluğundaki bu değişim, yoğunlukla atıksudaki kirletici maddelerin türünden kaynaklanan iyonik etkileşimdeki değişikliklerden kaynaklanmaktadır (Das ve ark., 2022).

1.4.3.2. pH'nın etkisi

pH seviyeleri, elektrokoagülasyon etkinliği üzerinde önemli bir etkisi olan temel bir faktördür. Çözeltinin asitliğini veya alkalinitesini gösterirler ve elektrokoagülasyon işleminin kimyasında önemli bir role sahiptirler. Pıhtılaştırıcıların oluşturulmasını kolaylaştırmak ve kirleticilerin kararsızlaştırılması ve ortadan kaldırılmasındaki etkinliklerini artırmak için belirli bir pH aralığının korunması genellikle esastır. pH seviyeleri, metal iyonlarının elektrotlardan çözünürlüğünü ve pıhtılaştırıcı üretiminde önemli bileşenler olan hidroksit iyonlarının oluşumunu etkilemektedir. Operatörler ve araştırmacılar, pH değerlerini atıksuyun özelliklerine göre uyarlayarak kirletici pıhtılaşmasını ve çökmesini iyileştirmektedir (Patel ve ark., 2025).

Çözelti pH'ı, elektrokoagülasyon işlemi sırasında pıhtılaştırıcıların salınmasını ve oluşumunu büyük ölçüde kontrol etmektedir. Katot çevresinde H_2 'nin oluşumu ve OH^- iyonlarının oluşumu çözelti pH'ını önemli ölçüde artırmakta, uygun olmayan pH koşulları çift tabakayı değiştirebilmekte ve bu da pıhtılaştırıcı oluşumunu azaltabilmektedir. Ayrıca, yüksek alkali durumda oluşan monomerik ve polimerik türler çok düşük emilim kapasitesi

göstermektedir. Bu nedenle, pıhtılaştırıcı türlerin elektrokoagülasyon süreci boyunca kirletici adsorpsiyon kapasitesini iyileştirmek için pH'daki değişim etkili bir şekilde sürdürülmelidir (Das ve ark., 2022).

Elektrokoagülasyon prosesinde yüksek verim ve stabilite elde etmek için, çözeltinin pH'ını optimal bir aralıkta kontrol etmek gerekmektedir. Flokların yük ve adsorpsiyon kapasitesiyle birlikte aynı zamanda prosesin iletkenliğini ve enerji tüketimini de etkilemektedir. Daha düşük pH'da, H₂ gazı üretimi artar, bu da elektrot pasivasyonuna ve verimliliğin düşmesine neden olabilmektedir. Daha yüksek pH'dayken ise oksijen gazı üretimi artar, bu da pıhtılaştırıcıların oksidasyonuna ve performansın düşmesine neden olabilmektedir. Bu nedenle, çözeltinin pH'ını optimum bir aralıkta kontrol etmek, elektrokoagülasyon işleminde yüksek verimlilik ve stabilite elde etmek için de çok önemlidir (Aryanti ve ark., 2024).

1.4.3.3. Zamanın etkisi

Elektrokoagülasyon süresi, atıksudaki kirlilik arıtımının etkinliğini belirleyen çok önemli bir bileşendir. Atıksuyun elektrokoagülasyon reaktörü içinde elektrokimyasal reaksiyonlara maruz kaldığı süreyi temsil etmektedir. Bu zamansal boyut, kirleticilerin atıksudan uzaklaştırılma derecesini önemli ölçüde etkilemektedir. Daha uzun arıtma süreleri, elektrotlarda oluşan pıhtılaştırıcılar ile atıksuda bulunan kirleticiler arasında daha kapsamlı etkileşimleri kolaylaştırmaktadır. Sonuç olarak, uzun süreler genellikle daha yüksek giderim verimliliğine yol açmaktadır. Bununla birlikte, optimal arıtım süresini belirlerken bir denge kurmak önemlidir. Aşırı uzun süreli arıtım süresi, pıhtılaştırıcıların aşırı dozlanmasından sorumludur. Bu durumda parçacıkların toplanması tersine dönmektedir. (Aladily ve ark., 2025, Patel ve ark., 2025).

Elektrokimyasal işlemde reaksiyon süresi arttıkça enerji ve elektrot tüketimi de artma eğilimi göstermektedir. Bu, kirli suların arıtılmasında elektrokoagülasyon işleminin maliyet etkinliğini etkileyen önemli bir parametre olarak reaksiyon süresinin önemini vurgulamaktadır (AL-Rubaye ve ark. 2024; Bharath ve ark., 2018).

1.4.3.4. İletkenliğin etkisi

Elektrokoagülasyon işlemi sırasındaki akım yoğunluğu etkisi, çözeltinin iletkenliğine ve iyonik gücüne bağlıdır. Yüksek iletkenlik ve iyonik mukavemet, çözeltinin ohmik direncini azaltır, bu da iyonların dökme çözelti içindeki göçünü artırıp elektroliz reaksiyon süresi kısaltmakta ve elektrokoagülasyon için enerji tüketimini azaltmaktadır. Elektrokoagülasyonda yüksek elektrot iletkenliği istenmesine rağmen, aşırı yüksek iletkenliğin, amaçlanan elektrolitik ayrışma reaksiyonuna müdahale edebilecek ikincil parazitik reaksiyonlara neden olabileceğine dikkat etmek önemlidir.

Klorür bazlı elektrolitler, elektrokoagülasyon için daha az enerji gerektiren ortamlardır. Sodyum klorür (NaCl), iletkenliği ayarlamak için yaygın olarak kullanılır ancak artık tuzları gidermek için işlem sonrası gerektirebilir. Bununla birlikte, Cl iyonlarının varlığında ikincil bir reaksiyon meydana gelebilmekte ve Cl iyonlarının oksidasyonu, kanserojen olarak kabul edilen perklorat ve diğer klor formları (HOCl ve ClO^- gibi) gibi zararlı dezenfektan yan ürünleri üretebilmektedirler (Aryanti ve ark. 2024).

1.4.3.5. Elektrot materyalinin etkisi

Elektrot malzemesi, elektrokimyasal reaktörün performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Elektrokoagülasyonda Al, Cs, Fe, Ag, As, Ba, Cr, Mg, Na, Si, Ca, Cd, Sr ve Zn gibi çeşitli elektrot malzemeleri kullanılmakla birlikte geniş kullanılabilirlikleri, düşük maliyetleri ve üstün çözünürlükleri nedeniyle Al veya Fe atıksu arıtımı için yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrotlar, Al veya Fe plakalarının yanı sıra Fe veya Al frezeleri, kesimler ve diğer malzemeler gibi artıklardan üretilir. Elektrot plakalarının yüzeylerinin düzenli olarak durulanması gerekir, elektrot üzerindeki herhangi bir çamur birikmesi metal katyonların sıvıya salınmasını sınırlamaktadır (Boinpally ve ark., 2023).

Anot malzemesi, verimli elektrokoagülasyon işlemi için en önemli bileşenlerden biridir. Kurban anot elektrokoagülasyon içinde çözülür ve katot tarafında hidrojen gazı ve hidroksit iyonları üretilmektedir. Anot malzemesinin seçimi, atıksu arıtımının verimliliğini artırmada, uygun çamur yönetimi ve minimum çevresel etki için oldukça önemlidir. Bugüne kadar en sık kullanılan anot malzemeleri Al ve Fe'dir (Sadaf ve ark., 2024).

Al ve Fe elektrotlarının yüksek performansı, bakır, çinko ve magnezyuma kıyasla Al^{3+} ve Fe^{3+} iyonlarının daha yüksek yük değeriyle elektriksel çift katmandaki

azalmasıyla ilişkilidir, böylece pıhtılaşma flokülasyon işleminde daha da fazla yardımcı olmaktadır. Al elektrotlarının kullanımına oranla Fe elektrotları elektrokoagülasyon işleminin maliyetini en aza indirebilse de işlenmiş elektrokoagülasyon numunelerinde kırmızımsı kahverengi bir renk tonu geliştirebilmekte ve bu da bulanık bir çözelti üretmektedir. Al elektrotu yüksek mukavemet/ağırlık oranı, korozyona dayanıklı özelliği ve yüksek elektrik iletkenliği oluşturmakta, arıtılmış çözeltiye herhangi bir renk vermemekte ve atıksuya bağlı olarak uzaklaştırma verimliliği açısından Fe elektrotundan kolayca daha iyi performans gösterebilmektedir. Al, verimli ve ekonomik olarak uygulanabilir olması nedeniyle tabakhane, süt ürünleri, metal kaplama atıksuları, tekstil atıksuları arıtımı ve farmasötik atıksulardan antibiyotiklerin uzaklaştırılması gibi çeşitli sektörlerdeki su ve atıksuların arıtılmasında başarıyla uygulanmıştır. Bu nedenle, hedeflenen kirleticilere ve maliyet-fayda analizine dayalı olarak uygun elektrot malzemesinin seçimi çok önemlidir (Das ve ark., 2022; Sadaf ve ark., 2024).

Bahsedilen elektrot malzemelerinin seçimi, atıksu bileşimine, maliyet hususlarına, elektrokimyasal uygun bağlara ve çalışma koşullarına bağlıdır. Örneğin, atıksu bileşimi dikkate alındığında, Al elektrotları, mükemmel adsorpsiyon kabiliyetleri ve su stabiliteyi nedeniyle yüksek organik kirletici seviyelerine sahip atıksuları arıtmak için seçilebilir. Öte yandan, Fe elektrotları ağır metalleri ve bazı organik kirleticileri verimli bir şekilde ortadan kaldırmaktadır. Al ve Fe, etkinlikleri ve maliyet verimlilikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılsalar da korozyona karşı savunmasızdırlar. Savunmasız olmaları daha kısa bir kullanım ömrüne, sık sık değiştirilmesine ve işletme maliyetlerinin artmasına yol açar. Elektrokoagülasyonun uzun vadeli katyonunun maliyet etkinliği değerlendirilirken elektrot malzemelerinin dayanıklılığı dikkate alınmalıdır. Değiştirme sıklığını azaltmak için yüksek kaliteli ve bakımlı elektrotlar kullanılarak uzun ömür ve optimum performans elde edilebilmektedir (Aryanti ve ark., 2024).

1.4.3.6. Sıcaklığın etkisi

Sıcaklık, elektrokoagülasyon prosesini kullanarak kirletici giderme verimliliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Sıcaklığın elektrokimyasal pıhtılaşma süreci üzerinde olumlu veya olumsuz bir etkisi olabilir, bu nedenle ortam sıcaklığında gerçekleştirilen bir elektrokoagülasyon işleminde, işlem sırasında sıcaklıkta değişikliklere neden olan faktörlerin bilinmesi gerekmektedir. Çözeltinin sıcaklığı, ortam içindeki reaksiyon hızlarını,

metal hidroksitlerin çözünürlüğünü, sıvı iletkenliğini, kolloidal parçacıkların kinetiğini ve gaz kabarcıklarının sayısını değiştirerek elektrokoagülasyon işlemini etkilemektedir. Sıcaklıktaki artış, metal hidroksit oluşumundaki azalmaya bağlı olarak kirletici giderme verimliliğini azaltmaktadır. Düşük sıcaklıkta, düşük anodik çözünme oranı nedeniyle kirletici giderme verimliliği de düşüktür. Aynı zamanda sıcaklıktaki artış ile beraber elektrotların çözünme oranını yükselterek elektrotların ömrünü kısaltabilmektedir (Bharath ve ark., 2018; Aryanti ve ark., 2024).

Sonuç olarak, kirleticilerin etkin bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlamak, enerji tüketimini en aza indirmek ve elektrotlar ve arıtılmış su kalitesi üzerindeki olumsuz etkileri önlemek için sıcaklığın izlenmesi ve ayarlanması esastır. Her uygulama için özelleştirilmiş kalite kontrol stratejilerinin uygulanması, elektrokoagülasyon sürecinin sürdürülebilirliğini ve etkinliğini önemli ölçüde artırabilmektedir (Aryanti ve ark., 2024).

1.4.3.7. Atıksu konsantrasyonunun etkisi

Giriş atıksuyunda bulunan kirleticilerin konsantrasyonunu ifade eden başlangıç kirletici konsantrasyonları, elektrokoagülasyon işleminin performansını düzenleyen temel bir parametredir. Başlangıç kirletici konsantrasyon faktörü ile elektrokoagülasyon işlemi arasındaki spesifik ilişkinin, kirleticilerin doğasına, elektrot malzemesine ve işlem koşullarına bağlı olarak değişebileceğine dikkat edilmelidir. Literatüre göre, başlangıç kirletici konsantrasyonundaki bir artış (diğer parametreleri sabit tutarak), elektrokoagülasyon işleminin kirletici giderme verimliliğini azaltmaktadır. Bunun nedeni, sabit çalışma parametresinde, yüksek kirletici konsantrasyonuna sahip flok oluşturmak için yetersiz üretilen pıhtılaştırıcı miktarının sabitlenmesidir. Bu nedenle, artık kirletici konsantrasyonunu istenen uzaklaştırma verimine kadar azaltmak için daha uzun bir elektroliz süresi gerekmektedir. Kirletici konsantrasyonu sadece elektrokoagülasyon verimliliğini azaltmakla kalmaz aynı zamanda çözeltinin direncini ve iletkenliğini artırarak enerji tüketimini de artırmaktadır (Bharath ve ark., 2018; Patel ve ark., 2025). Ayrıca, atıksudaki başlangıç kirletici konsantrasyonu yüksek olduğunda, büyük miktarda kirletici molekülü etkili bir şekilde çöktirmek için yeterli metal hidroksit flokları oluşmayabilmektedir (AL-Rubaye ve ark., 2024; Aladily ve ark., 2025).

1.4.3.8. Karıştırma hızı

Karıştırma hızı, elektrokoagülasyon prosedürlerinde önemli bir parametredir ve çözeltideki iyonların hareketliliğini artırarak kütle transfer kinetik süreçlerini geliştirmektedir. Karıştırma ya harici cihazlarla mekanik olarak yapılır ya da elektrokoagülasyon işleminin kendisine bırakılır (Boinpally ve ark., 2023).

Karıştırma hızı, pıhtılaştırıcı malzemeyi elektrot çözeltisi tarafından üretilen reaktöre verimli bir şekilde taşır. Ayrıca pH ve sıcaklık gibi diğer cihaz değişkenlerini homojenize eder. Daha yüksek karıştırma hızları, reaktör topraklarını parçalayabilir ve sudan çıkarılması zor olan küçük topraklar üretebilir. Karıştırma hızı asılı parçacıkların doğası, elektrotların konfigürasyonu ve sıvının akış hızı gibi çeşitli faktörlerden etkilenir. Karıştırma hızındaki artış, bir elektrokoagülasyon reaktöründe iyonların ve üretilen flokların taşınmasını iyileştirerek kirletici gideriminin genel verimliliğini artırır. Bununla birlikte, karıştırma hızındaki önemli bir artış, flok üretiminin yeterliliğini azaltarak elektrokoagülasyonun uzaklaştırma verimliliğini azaltır. Dahası, floklar, daha düşük bir karıştırma hızında karıştırmanın homojenliği nedeniyle elektrotlar arasına yerleşecektir. Bu birikim hücre direncini artırabilir. Elektrotların yakınında durgun bölgelerin oluşmasını önlemek için karıştırıcı tipi, hızı ve elektrokoagülasyon reaktörü içindeki konumu gibi karıştırma parametrelerini optimize ederek ılımlı bir karıştırma hızının kullanılması önerilir. Reaktörün dibine yerleştirilmiş pervane tipi bir karıştırıcı, yüksek karıştırma hızları gerektirmeden çözeltiyi karıştıran bir girdap oluşturabilir (Bharti ve ark., 2023).

1.5. Yanıt Yüzey Yöntemi

Yanıt yüzey yöntemi, kimya endüstrisindeki üretim süreçlerinin iyileştirilmesine yardımcı olmak için 1951'de Box ve Wilson tarafından geliştirilmiştir. Amaç, örneğin düşük maliyetle yüksek verim ve saflık elde etmek için kimyasal reaksiyonları optimize etmektir. Bu, sıcaklık, basınç, reaksiyon süresi ve reaktanların oranı gibi faktörleri içeren sıralı deneyler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aynı yöntem, bir veya daha fazla nicel faktörün seviyelerinden etkilenen herhangi bir yanıtı modellemek veya optimize etmek için kullanılabilir.

Yanıt, niceliksel bir sürekli değişkendir (ör. verim, saflık, maliyet) ve ortalama yanıt, p faktörlerinin (ör. sıcaklık, basınç) seviyelerinin düzgün ancak bilinmeyen bir işlevidir ve

seviyeler gerçek değerlidir ve doğru bir şekilde kontrol edilebilmektedir. Ortalama yanıt, işlem kombinasyonlarının bir fonksiyonu olarak çizildiğinde, yanıt yüzeyi olarak adlandırılan $p + 1$ boyutlarında bir yüzeydir.

Bir yanıt yüzeyi elde etmenin amacı iki yönlüdür:

1. Ortalama yanıtın maksimize edildiği (veya minimize edildiği veya belirli bir hedef değere eşit olduğu) uygulanabilir bir tedavi kombinasyonu x 'i bulmak için; ve
2. Faktörlerin ortalama yanıt üzerindeki “yerel” etkilerini daha iyi anlamak için bu iyi konum veya bölgenin çevresindeki yanıt yüzeyini tahmin etmek (Dean ve ark, 2017).

Yanıt yüzeyi yöntemi, minimum sayıda deneyle ana etkileri ve etkileşim etkilerini hesaba katmakta, böylece faktörler ve tepkiler arasındaki nedensel ilişkiyi netleştirmektedir. Deney tasarımı ve optimizasyon metodolojisi, modern araştırma ve geliştirmede önemli bir rol oynamaktadır. Optimizasyon problemine geleneksel yaklaşım, diğer değişkenleri sabit tutarken bir değişkenin etkisini incelediğimiz tek faktörlü yöntemdir.

En uygun koşulları elde etmek için bu prosedür diğer değişkenlerle tekrarlanmaktadır. Bu yöntemin temel dezavantajı, incelenen değişkenler arasındaki etkileşimli etkileri temsil etmemesi, dolayısıyla değişkenlerin süreç üzerindeki tam etkisini sağlayamamasıdır. Ek olarak, tek faktörlü yaklaşım, araştırmayı yürütmek için gereken deney sayısını artırdığından maliyetli ve zaman alıcı olacaktır. Sonuç olarak, çok değişkenli teknikleri kullanan faktör optimizasyonu prosedürleri, daha hızlı, daha ekonomik ve daha verimli oldukları ve birden fazla değişkenin eşzamanlı optimizasyonuna izin verdikleri için teşvik edilmiştir.

Yanıt yüzey yönteminin bir optimizasyon aracı olarak uygulanması birkaç adımdan oluşmaktadır. Bunlar arasında;

- Bağımsız değişkenlerin ve aralıklarının seçilmesi,
- Deney tasarımının seçilmesi ve deneylerin yapılması,
- Deneysel sonuçlara dayalı doğrusal bir regresyon modeli denklemi oluşturulması,
- Modelin uygunluğunun kontrol edilmesi ve
- Model temsilinin grafiğinin çizilmesi ve optimal elde edilmesi koşullarıdır.

Merkezi kompozit tasarım, Box ve Wilson tarafından 1951'de tam düzey faktöriyel tasarıma alternatif olarak tanıtılan en yaygın kullanılan yanıt yüzey tasarımlarından biridir.

Üç seviyeli bir faktöriyel deney kullanmadan yanıt değişkenine ikinci dereceden (ikinci dereceden) bir model uygulamışlardır, bu nedenle deneysel yanıt yüzeyi optimizasyonu için yaygın olarak kullanılmaktadır. Merkezi kompozit tasarım, yıldız noktaları veya eksenel noktaları olan üç seviyeli faktöriyel tasarımın genişletilmiş bir şeklidir. Bu, faktöriyel tasarımlar verilerdeki eğriliği tespit ettiğinde kullanılır, bu nedenle önceki doğrusal tasarımdan ikinci dereceden bir yanıt yüzeyi tasarımına genişletmek gerekmektedir. Bu bağlamda merkezi kompozit tasarım, eğrilik etkisinin tahmin edilmesini sağlayan merkez noktaları ve yıldız noktaları ekleyerek faktör tasarımını genişletmektedir.

Merkezi kompozit tasarım üç bölümden oluşmaktadır: faktöriyel noktalar, eksenel/yıldız noktaları ve merkez noktalarıdır. Faktöriyel noktalar, iki farklı seviyedeki noktaların olası bir kombinasyonunu içerir (-1, +1) ve ana etkilerin, doğrusal etkileşim etkilerinin ve ikinci dereceden etkilerin tahmininde önemli bir role sahiptir. Merkez noktalar, tasarımın “0” seviyesi ile temsil edilen önemli noktalarından biridir, toplam sayıları 3 ile 5 arasındadır. Bunlar, ikinci dereceden model terimleri oluşturmak ve faktörler arasındaki ikinci dereceden etkileşim etkisini analiz etmek için kullanılmaktadır. Eksenel veya yıldız noktaları yalnızca merkezi kompozit tasarım özellikleridir ve $-\alpha/\alpha$ ile temsil edilmektedir. Bir merkezi kompozit tasarım her zaman bir tasarımdaki faktör sayısının iki katı kadar yıldız noktası içermektedir (Szpisják-Gulyás ve ark., 2023).

1.6. Literatürde Yapılmış Çalışmalar

Ebba ve ark., (2022) yapmış oldukları çalışmada merkezi kompozit tasarıma dayalı tepki yüzey tasarım süreci, elektrokoagülasyon prosesi kullanılarak hastane atıksularının arıtılması için farklı operasyonel parametreleri optimize etmek için kullanılmıştır. Çalışma, pH (3-7.5), akım (0.03–0.09 A), elektrotlar arasındaki mesafe (1-2 cm), elektrolitik konsantrasyon (1-3 g/L) ve elektroliz süresi (20-60 dakika) gibi çeşitli faktörler dikkate alınarak deneysel olarak araştırılmıştır. Varyans analizi (ANOVA) ile değerlendirilen bağımsız değişkenlerle önemi ve etkileşimleri, farklı koşullar altında % renk, kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ve bulanıklık giderme ve enerji tüketimi ikinci dereceden bir model yardımıyla tahmin edilmiştir. Optimum koşullar, minimum enerji tüketimi ile maksimum % renk, KOİ ve bulanıklık giderimine ulaşmak için matematiksel ve istatistiksel yöntemlerle elde edilmiştir. Maksimum renk (%92,30), KOİ (%95,28) ve bulanıklık (%83,33) giderimi verimleri; pH 7.5, akım 0.09A, elektrolitik konsantrasyon 3 g/L, elektrotlar arasındaki

mesafe 2 cm ve reaksiyon süresi 60 dakika elde edilmiştir. Bu, elektrokoagülasyon işleminin, çeşitli çalışma parametreleri altında çeşitli atıksu türlerinden ve endüstriyel atıksulardan kirleticileri giderebileceği gösterilmiştir.

Rahman ve ark., (2024) yaptıkları çalışmada, Borneo kentsel nehrindeki toplam organik karbon seviyelerini iç tüketim azaltmak için bir toplu elektrokoagülasyon arıtma sistemi geliştirmeyi amaçlamışlardır. Buna uygun olarak, bu çalışma elektrik akımı ve bekleme süresinin toplam organik karbon giderim verimliliği üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Daha sonra, arıtılmış kentsel nehir suyundaki toplam organik karbon seviyelerinin, 5 A elektrik akımında ve 25 dakikalık bekleme süresinde bir toplu elektrokoagülasyon arıtma sistemi kullanılarak iç tüketim güvenliği standardını karşıladığını bulmuşlardır. Arıtma sistemi, başlangıçtaki toplam organik karbon seviyelerini 5,65 mg/L'den 0,97 mg/L'ye düşürerek maksimum toplam organik karbon azaltma verimliliği %82,83'e ulaşmıştır. Bu çalışmada yapılan enerji işletme maliyeti analizi, elektrokoagülasyon arıtma sisteminin 116,51 g Al(OH)₃ üretebileceğini bildirmiştir. Ek olarak, yerinde alüminyum hidroksit pıhtılaştırıcılar kullanılarak kentsel nehirdeki toplam organik karbon seviyelerinin düşürülmesi, 0.99 regrasyon katsayısına sahip Freundlich izoterm modelini takip ederek çok katmanlı bir adsorpsiyon sergilemiştir. Alüminyum hidroksit pıhtılaştırıcılar, kentsel nehirden gelen toplam organik karbonu 1,40 dakika⁻¹ adsorpsiyon hızında ve 0,20 mg/g maksimum adsorpsiyon kapasitesinde azaltabilmiştir. Yapılan enerji dağıtıcı X-ışını analizi, adsorpsiyon işleminin meydana geldiğini gösteren alüminyum hidroksit pıhtılaştırıcıları ve karbon elementinden oluşan elektrokoagülasyon floklarının varlığı gözlemlenmiştir. Genel olarak, bu çalışma, toplu elektrokoagülasyon arıtma sisteminin, makul bir maliyetle iç tüketime uygun görülen bir adsorpsiyon işlemiyle Borneo kentsel nehrinden toplam organik karbon seviyesini düşürmek için kullanılabileceğini göstermiştir.

Patel ve ark., (2024) yaptıkları çalışmada, yüksek oranda kirlenmiş dibromlu atıksuyun elektrokoagülasyon işlemi kullanılarak arıtılmasıyla ilgilenmiştir. Çalışma metodolojisinde, farklı elektrot aralıklarına, akım yoğunluğuna ve pH'a sahip dört paralel alüminyum (Al) elektrotlu 2 L'lik kesikli reaktör kullanılmıştır. Sonuçlar elektrot aralığı için optimum değerin 1,5 cm, akım yoğunluğu için 50 Amp/m² ve pH 9 olduğunu göstermiştir. Bu optimal değer için, giderim verimliliği şu şekilde ortaya çıkmıştır: KOİ için %34.09, toplam çözünmüş katı madde için %29.80, renk için %56.17 ve bulanıklık için %20. pH 9'da maksimum toplam metal kaybı 1,77 g/L iken, en yüksek güç tüketimi pH 3'te 2,4 Wh/L idi.

pH 3 en verimli çökelme oranını sergilerken, pH 9 maksimum kalıntı ve köpük ağırlığı 8,42 g/L ile sonuçlanmıştır. Araştırma, dibromlu atıksuyunu tedavi etmek için elektrokoagülasyon sürecinin uygulanabilirliği hakkında ayrıntılı bilgi verilmiştir. Sonuçlar, elektrokoagülasyon işleminin dibromlu atıksuyun arıtımı için uygulanabilir olduğunu göstermiştir.

Sezer ve ark., (2024) yaptıkları çalışmada, biyolojik atıksu arıtma tesisi (atıksu arıtma tesisi) atıksuyundaki mikroplastiklerin uzaklaştırılması, alüminyum elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyon işlemi ile araştırılmıştır. Taguchi tasarımı kullanılarak pH, akım yoğunluğu ve reaksiyon süresi gibi proses değişkenlerinin önemi varyans analizi (ANOVA) ile değerlendirilmiştir. İstatistiksel olarak F ve p değerlerine göre mikroplastik giderimi için en etkili parametre akım yoğunluğu, ardından pH ve reaksiyon süresidir. Oluşturulan modelin R^2 değeri %98'in üzerinde bulunmuştur. Taguchi sonuçlarına göre optimum proses koşulları pH 9, akım yoğunluğu 1.905 mA/cm² olarak belirlenmiş, reaksiyon süresi 15 dakika ve %99 mikroplastiklerin uzaklaştırma verimi elde edilmiştir. Bu optimum koşullar altında enerji ve elektrot tüketimi dikkate alınarak proses maliyeti 0,049 \$/m³ atıksu olarak hesaplanmıştır. Görsel analizler sonucunda, atıksu atıklarında lif, film, pelet, amorf ve tanımlanmamış formlar baskınken, elektrokoagülasyon ile işlemten sonra sadece lif yapıları gözlenmiştir. Bu çalışmada, elektrokoagülasyon prosesinin, mikroplastikler giderimini çok düşük maliyetle ve yüksek verimlilikle sağlamak için atıksu arıtma tesisi atıksuyuna entegre edilebilen alternatif bir arıtma yöntemi olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca bu çalışma sonucunda elektrokoagülasyon prosesinin gerçek atıksuya uygulanarak mikroplastikler gideriminde de kullanılabileceği gözlenmiştir.

Vicente ve ark., (2023) elektrokoagülasyon, mobilya endüstrisinden polivinil asetat içeren atıksuyun arıtılması için bir yöntem olarak araştırılmıştır. Çalışmada, arıtım sürecinde demir konsantrasyonunun ve pasivasyonun gelişimini değerlendirilmiştir. Elektrotlar arası mesafenin (d), akım yoğunluğunun ve modun arıtım performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için laboratuvar ölçekli deneyler yapılmıştır. Üç d değeri (0,3, 0,6 ve 0,9 cm) incelenmiş ve performans üzerinde anlamlı bir etkisi olmadığı bulunmuştur. Bununla birlikte, daha düşük d değerleri, uygulanan voltajdaki düşüş nedeniyle enerji tüketiminin azalmasına neden olmuştur. Doğru akım ve alternatif darbeli akım olmak üzere iki akım modu altında üç akım yoğunluğu değeri (132, 158 ve 197 A/m²) incelenmiştir. Alternatif darbeli akımın anot aşınmasını, elektrot pasivasyonunu ve enerji tüketimini azalttığı için ekonomik olarak daha uygun bir yaklaşım olduğu bulunmuştur. Serbest bırakılan demir

miktarı d ile artmış ve akım yoğunluğunun demir konsantrasyonu üzerindeki etkisinin doğrusal olmadığı bulunmuştur. Bununla birlikte, alternatif darbeli akımın uygulanması, test edilen tüm akım yoğunlukları için demir içeriğini azaltmıştır. Testler, elektrokoagülasyonun KOİ ve toplam askıda katı maddeleri gidermede etkili olduğunu ve sırasıyla %92 ve %99'un üzerinde giderim verimliliği sağladığını göstermiştir. Bununla birlikte, incelenen arıtma prosedürleri, su deşarjı için AB yasal gerekliliklerini karşılamak için yetersizdir. Bu nedenle, elde edilen atıksu bir son arıtma işleminden geçmelidir.

Saavedra ve ark., (2024), substrat olarak şeker kamışı kullanılarak etanol biyoyakıt üretimi, fermantasyon–damıtma işleminden kaynaklanan ana atıksu olarak vinası üretir. Brezilya mevzuatı, vinasın sınırlı hacimlerde fertigasyon için kullanılmasına izin verir ve geri kalan atıksu, yeniden kullanılmadan veya çevreye boşaltılmadan önce arıtılmalıdır. Bu çalışmada, ham şeker kamışı vinası için alternatif bir arıtma süreci olarak elektrokoagülasyon tekniğini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Elektrot aralığının (1-3 cm), uygulanan elektrik yükünün (0-39000 C/L), akım yoğunluğunun (2,2–20 mA/cm²) ve karıştırıcı hızının (0-680 rpm) etkileri, alüminyum elektrotlu bir kesikli elektrolitik reaktörde değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonuçları, tüm deney koşullarında elektroliz sırasında çözünmüş katıların uzaklaştırıldığını ve pH'nın arttığını ortaya koymuş, bu da elektrokoagülasyonun tuz ilavesi gerekmeden vinasın pH nötralizasyonu için uygun olduğunu göstermiştir. 1 cm'lik bir elektrot boşluğu ve 2,2 mA/cm²'lik bir akım yoğunluğu, en düşük elektrik enerjisi tüketimine (11,0 kWh/m³) ve elektrolit sıcaklığındaki en düşük artışa (9,5 °C) neden olmuştur. 1 cm elektrot aralığı, 31.000 C/L uygulanan elektrik yükü, 6,1 mA/cm² akım yoğunluğu ve 430 rpm karıştırıcı hızı ile 13,5 kW h/m³ ve 2,88 kg Al/m³ tüketim ile yüksek vinası berraklığı elde edilmiştir. İşlem maliyeti 6,95 ABD doları/m³ olarak hesaplanmış ve elektrot çözünmesinin %75 olduğu belirlenmiştir. Çamur çökme hızı 0,14 cm/dakika olup, bu durum oluşan flokların yüzeyinde kabarcık gazı adsorpsiyonundan kaynaklanabilecek zayıf çökebilirliğe işaret etmektedir. Önerilen işletme parametrelerinin sonuçları, elektrokoagülasyonun şeker kamışı işleme atıksuyunun biyoteknolojik kullanımını uyarlayarak vinasın ön arıtımı için kullanılabileceğini göstermektedir.

Al-Qodah ve ark., (2024) yaptıkları çalışmada, toplam organik karbonun (TOK) verimli bir şekilde uzaklaştırılmasına odaklanarak süt atıksuyunun arıtılmasını geliştirmek için çok aşamalı bir yaklaşım yürütmüşlerdir. Araştırma üç ardışık arıtma işleminden oluşmaktadır: kimyasal pıhtılaşma, güneş enerjisiyle çalışan elektrokoagülasyon ve adsorpsiyon. İlk aşamada, dozaj, pH ve seyreltme dahil olmak üzere çeşitli koşullar altında

bir dizi organik ve inorganik pıhtılaştırıcı değerlendirilmiştir. 1 g/L demir sülfat konsantrasyonu için pH 5.6'da %68'lik bir TOK giderme verimliliği elde edilmiştir. Sonraki elektrokoagülasyon işlemi, elektrokoagülasyon işlemi sırasında elektrot tipinin, sayısının, düzenlemesinin, akım yoğunluğunun ve seyreltmenin TOK'un giderimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Hem Al hem de Fe elektrotları maksimum %47,1 ile benzer bir performans sergilemiştir. Monopolar seri düzenlemesine sahip altı elektrot kullanıldığında elektrokoagülasyon giderim verimliliği maksimum olmuştur. Son aşamada, adsorban tipi, dozu, sıcaklığı ve pH gibi faktörler dikkate alınarak çeşitli inorganik adsorbanların (zeolit, deniz kumu, şist yağı külü, ticari aktif karbon) etkinliği değerlendirilmiştir. 100 mg/L TOK ve 1,25 g adsorban dozu kullanıldığında aktif karbon için %80'lik verimle karşılaştırıldığında, şist yağı külü ve deniz kumu sırasıyla %75 ve %69'luk giderme verimleriyle en yüksek kapasiteleri sergiledi. Bu sonuçlar, bu araştırmanın üç işlemi %98,6'lık genel bir giderim verimliliğiyle birleştirdiğini göstermektedir. Bu birleşik arıtma sistemi, süt atıksularının etkin bir şekilde arıtılması için umut verici bir yaklaşım sunmakta ve süt endüstrisi atıksularıyla ilgili çevresel endişeleri gidermektedir.

Moneer ve ark., (2023) yağlı atıksulardan yağın uzaklaştırılması etkinliğini kesikli iki kutuplu bir sistemde alüminyum elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyon prosesi ile araştırmışlardır. Box—Behnken tasarımı koşulları optimize etmek için kullanılmış ve bulanıklık giderimi ve iletkenlik değişikliklerini araştırmak için yağ hacmi, sıcaklık, başlangıç pH'ı ve işlem süresi dahil olmak üzere dört bağımsız faktörün etkileri incelenmiştir. Anlamlı bağımsız değişkenler ve etkileşimleri ANOVA kullanılarak değerlendirilmiştir. Bulanıklığı gidermek için en uygun çalışma koşulları, 10 ml L⁻¹ yağ hacminde, 28 °C sıcaklıkta, başlangıç pH'ı 4'te ve pıhtılaşma süresi 90 dakikada elde edilmiştir. Sonuçlar, artan arıtma süresi ve azalan yağ hacmi ile bulanıklık giderme ve iletkenlik değişikliklerinin önemli ölçüde arttığını ortaya koymuştur. Arıtma işleminin optimum çalışma koşulları altında uygulanması, bulanıklık ve iletkenlik için sırasıyla %97,3 ve %73,4'lük giderim uzaklaştırma verimliliklerine izin vermiştir. Ekonomik çalışma, elektrokoagülasyonla yağlı atıksu arıtımının çok uygun maliyetli bir teknik olduğunu göstermiştir.

2. MATERYAL VE METOD

2.1. Tunceli Organize Sanayi Bölgesi

1990 yılında Tunceli ili İsmet İnönü Mahallesi Harçık mevkiinde bulunan 106 Hektar alan üzerinde Organize Sanayi Bölgesi kurulması yönünde yapılan çalışmalara başlanılmıştır. 1997 yılında altyapı çalışmalarına başlanılmış 2001 tarihi itibari ile tamamlanmıştır. Ancak; 2010 yılında yatırımcı ve girişimcilerden gelen arsa talepleri doğrultusunda Tunceli OSB'nin yeniden faal hale getirilme çalışmaları kapsamında Bakanlık tarafından 2011 yılı yatırım programına alınmıştır. Geçici tasfiye ile yeniden faal hale getirilmesi süreci arasında kanalizasyon, içme suyu şebeke hattı, yağmur suyu, yangın hidratları, şebeke içi kanalizasyon ve içme suyu borularında tasfiye kabulü tarihinden bugüne kadar geçen sürede mevcut imalatlarda bozulma, tıkanma ve arızalar nedeniyle kısmen tahribatlar oluşmuştur. Fırat Kalkınma Ajansı aracılığı ile OSB altyapısının iyileştirilmesi ve geliştirilmesi kapsamında hazırlanan proje 2013 yılında tamamlanmıştır.

OSB'de PVC doğrama imalatı, mobilya imalatı, çağrı merkezi hizmeti, kuruyemiş paketleme, ısıcam çitası üretimi, alüminyum doğrama imalatı, meyve suyu üretimi, sirke ve turşu imalatı, hazır yemek üretimi, unlu mamüller üretimi paketlemesi, işlenmiş et ürünleri imalatı, plastik paketleme, gıda ürünleri paketleme, hazır giyim üretimi, süt ve süt ürünleri imalatı, metal ürünleri imalatı faaliyetleri bulunmaktadır (URL – 5).

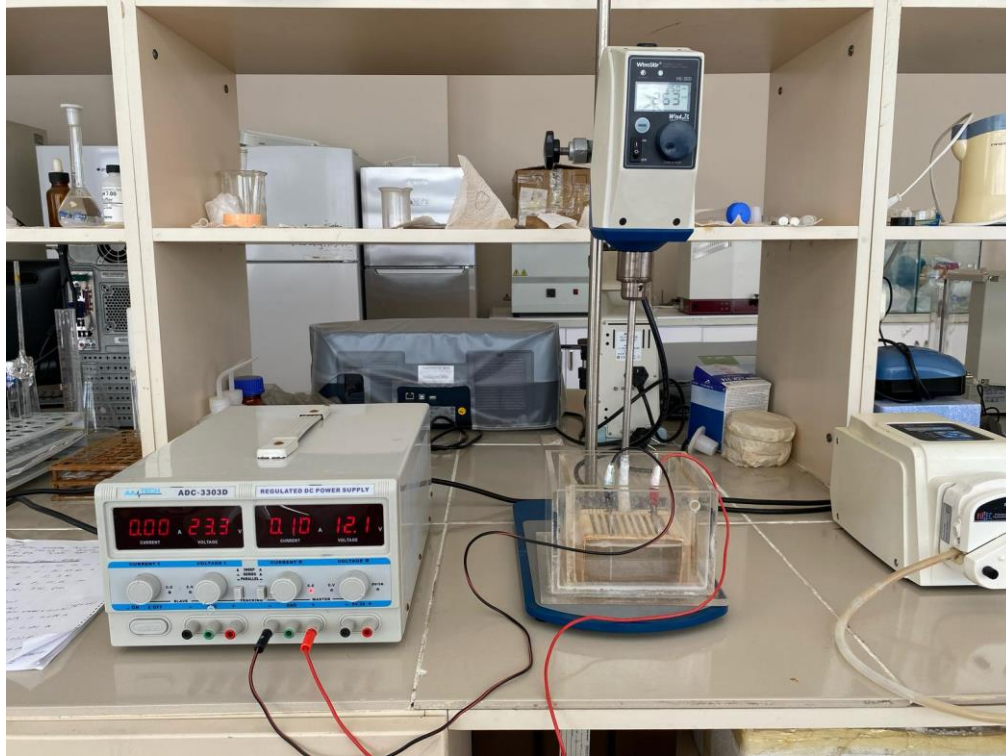
Atıksu numuneleri OSB'den Eylül 2024 tarihinde 2 saatlik kompozit numune olacak şekilde alınmıştır ve elektrokoagülasyon deneylerinde kullanılmıştır. Ham atıksuyun bazı özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Tunceli OSB atıksuyunun karakterizasyonu

Parametre	Aralık	Ortalama
pH	4.89-5.16	5.02
İletkenlik, $\mu\text{s}/\text{cm}$	1893-2220	2056
KOİ, mg/L	2120-2230	2175
TKM, mg/L	910-942	926
UKM, mg/L	482-502	492
AKM, mg/L	164-176	170
Bulanıklık, NTU	186-228	207
Renk, m^{-1}	436nm _(sarı) : 0.696-0.737	0.716
	525nm _(kırmızı) : 0.533-0.563	0.548
	620nm _(mavi) : 0.385-0.440	0.412

2.2. Elektrokoagülasyon Reaktörü

Tunceli OSB atıksularının arıtımında elektrokoagülasyon prosesinin etkinliğini tespit edebilmek amacıyla oluşturulan laboratuvar ölçekli düzenek Resim 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. Elektrokoagülasyon düzeneği

Şekil 2.1’de verilen elektrokoagülasyon düzeneği, peristaltik pompa, mekanik karıştırıcı, elektrokimyasal reaktör ve doğru akım güç kaynağından oluşmaktadır. Deney düzeneğinde kullanılan bu ekipmanların özellikleri aşağıda sıralanmaktadır:

Peristaltik pompa: Her iki yönde çalışan Filtek marka 0-100 mL/dk akış hızında pompa.

Karıştırıcı: Deney düzenek sisteminde sürekli karışımı sağlamak için dönen bir karıştırıcı.

Elektrokoagülasyon reaktörü: 1 L hacimli pleksiglas malzemeden üretilmiş 180 mm × 170 mm × 110 mm (sırasıyla uzunluk, genişlik ve yükseklik) boyutlu bir hücredir.

Doğru akım güç kaynağı: AATECH 3303D (0-3A ve 0-30V) DC güç kaynağı.



Şekil 2.2. Tunceli OSB’den alınan atıksu örneği

Tunceli OSB’den alınan atıksu her bir deneyde 500 mL hacminde alınarak elektrokoagülasyon reaktörüne aktarılmıştır (Şekil 2.2.). Deneyler 20 °C’de ve farklı zaman aralıklarında bir arıtım sürecinde yapılmıştır. Anot ve katot olarak 50 mm x 80 mm boyutunda alüminyum elektrotlar kullanılmış ve elektrotlar doğru akım güç kaynağına paralel şeklinde bağlanmıştır. Atıksuyun sıcaklığını sabit tutabilmek için reaktör su ceketli

bir elektrolitik hücre olarak tasarlanmıştır. Sürekli karışımın sağlanabilmesi için deney boyunca atıksu 250 rpm’de karıştırılmıştır.

Kullanılan elektrotlar deney çalışmalarından sonra 0,25 M H₂SO₄ çözeltisine batırılmış ve saf sudan geçirilmiştir. Deneyi tamamlanan atıksular peristaltik pompa aracılığıyla alınarak proses sırasında oluşan metal hidroksitlerin ve flokların giderimini sağlamak amacıyla 2 saat doğal çökelmeye bırakılmıştır. Duru su kısmından alınan örnekler 5000 rpm’de 8 dakika santrifüjlenmiştir. Arıtılmamış su ve duru su için incelenen parametrelerin ölçümü yapılmıştır ve giderim verimleri aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır:

İncelenen parametrelerin giderim verimleri aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır:

$$Giderim\ verimi\ (\%) = \frac{C_o - C}{C_o} \times 100 \quad (2.1)$$

Burada C_o, parametrenin başlangıç değeri; C ise arıtmadan sonraki değeridir.

2.3. Analiz Yöntemleri

Arıtım öncesinde ve sonrasında çözünmüş oksijen, iletkenlik, pH ve oksidasyon-redüksiyon potansiyeli (ORP) değerleri YSI Pro Plus multiparametre cihazı kullanılarak ölçülmüştür (EK-1). Renk ölçümü 436 nm, 525 nm ve 620 nm dalga boyunda UV-spektrofotometre (Shimadzu, UV-1800) cihazı ile ve bulanıklık ölçümü Aqua Lytic marka AL450T-IR cihazı ile yapılmıştır (EK-2). KOİ, Hach DR/890 spektrofotometre kullanılarak (SM 5220 D) ölçülmüştür. AKM, TKM ve TUKM standart metotlara göre ölçülmüştür (sırasıyla 2540 D, 2540 B, 2540 E) (APHA,1989).

2.4. Maliyet Hesabı

Elektrokoagülasyon işleminin işletme maliyeti, elektrik maliyeti ve elektrotun maliyeti hesaplanarak belirlenmiştir. Maksimum çözünmüş elektrot kütlesine Faraday yasasına göre teorik olarak ulaşılabilir ve aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir (Deveci ve ark., 2019):

$$C_{elektrot} = \frac{ItM_a}{zFV} \quad (2.1)$$

Burada $C_{elektrot}$ teorik olarak elektrot tüketimi (kg/m^3), I uygulanan akım (A), t arıtım süresi (saat), M_a anodun (Al) moleküler ağırlığı ($M_a=26,98 \text{ g/mol}$), z reaksiyona katılan elektron sayısı ($z_{Al}=3$), F Faraday sabiti (96487 C/mol) ve V hacimdir (m^3).

Enerji tüketimi formülü denklem (2.2)'de verilmiştir (Deveci ve ark., 2019):

$$C_{enerji} = \frac{ItU}{V} \quad (2.2)$$

Burada C_{enerji} elektrik enerjisi tüketimi (kWh/m^3), U voltaj (V), I uygulanan akım (A), t arıtım süresi (saat) ve V hacimdir (m^3).

Elektrokoagülasyon işleminin toplam işletme maliyeti aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\text{İşletme maliyeti} = \alpha C_{enerji} + \beta C_{elektrot} \quad (2.3)$$

Mart 2025'de sanayi için birim elektrik birim fiyatı olan 0,062 USD (2,85 TL)/kWh α katsayısı ve deneylerde kullanılan alüminyum elektrot malzemesi fiyatı 5,49 USD (200 TL)/kg β katsayısı olarak alınmıştır.

2.5. Yanıt Yüzey Yöntemi ile Deneysel Dizayn

Çok değişkenli optimizasyon teknikleri, deney tasarımında giderek daha fazla tercih edilmektedir; çünkü bu teknikler, tek değişkenli analiz yöntemlerine kıyasla önemli avantajlar sunmaktadır. Tek değişkenli analizler, seçilen değişkenler arasındaki etkileşimleri belirlemede çoğunlukla yetersiz kalmaktadır. Yanıt yüzey yöntemi (YYY), yanıtlar ile değişkenler arasındaki ilişkileri kurmak için istatistiksel ve matematiksel yaklaşımları bir araya getirir. Bu yöntem, diferansiyel hesaplama kullanarak, belirli kısıtlamalar altında minimum veya maksimum değerleri belirleyerek süreci analiz eder.

Bu çalışmada, akım yoğunluğu (A), elektrotlar arası mesafe (B) ve reaksiyon süresi (C) olmak üzere üç bağımsız faktör; işletme maliyeti, KOİ ve renk giderim verimliliği üzerindeki ideal koşulları tespit etmek amacıyla incelenmiştir. Renk giderim verimleri hesaplanırken 525 nm'de ölçülen değerler kullanılmıştır. Deneylerin tasarımı ve seçilen proses

değişkenlerine ait deneysel verilerin analizi için Design-Expert 7.0 yazılımının deneme sürümü kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar, merkezi kompozit tasarım (MKT) esas alınarak gerçekleştirilmiş ve hem gerçek hem de kodlanmış veri değerleri Tablo 2.2’de sunulmuştur. Modellemede üç faktörlü ve beş seviyeli bir MKT çalışması ($-\alpha$, -1 , 0 , $+1$, $+\alpha$) uygulanmıştır.

Tablo 2.2. Proses parametreleri ve seviyeleri.

Kod	Bağımsız değişkenler	Birim	Değişkenlerin gerçek ve kodlanmış aralığı				
			$-\alpha$	-1	0	$+1$	$+\alpha$
<i>A</i>	Akım yoğunluğu	mA/cm ²	5	8,04	12,5	16,96	20
<i>B</i>	Elektrotlar arası mesafe	cm	2	2,81	4	5,19	6
<i>C</i>	Reaksiyon süresi	dk	10	30,27	60	89,73	110

Belirlenmiş koşullar altında YYY kullanılarak istatistiksel olarak anlamlı modeller elde edilmiştir. MKT’de yaygın olarak kullanılan genel ikinci dereceden model denklemi Denklem (2.1)’de sunulmuştur.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} X_i X_j \quad (2.1)$$

Burada Y , tahmin edilen yanıtı (KOİ giderim verimi, renk giderim verimi ve işletme maliyeti) ifade etmektedir; regresyon katsayıları olan β_0 , β_i , β_{ii} ve β_{ij} sırasıyla sabit terimi, doğrusal etkiyi, ikinci dereceden (karesel) etkiyi ve etkileşim etkisini temsil etmektedir. X_i ve X_j ise bağımsız değişkenlerin kodlanmış değerlerini göstermektedir.

Modelin geçerliliği, varyans analizi (ANOVA) kullanılarak değerlendirilmiştir. ANOVA sayesinde modelin güvenilirliği belirlenebilir ve bireysel faktörler ile bu faktörler arasındaki etkileşimlerin etkisi değerlendirilebilir. Bu analizde dikkate alınan önemli parametreler arasında olasılık değeri (p -değeri), Fisher’in F -testi değeri (F -değeri), yeterli hassasiyet, korelasyon katsayısı (R^2) ve ayarlanmış R^2 yer almaktadır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. YYY-MKT'nin Varyans Analizi ve Model Uyumu

Bu çalışmada, Tunceli OSB atıksularının elektrokoagülasyon prosesi ile arıtılması sırasında, akım yoğunluğu (A), elektrotlar arası mesafe (B) ve reaksiyon süresi (C) gibi farklı parametrelerin KOİ giderimi, renk giderimi ve işletme maliyeti üzerindeki etkileri araştırılmıştır. KOİ ve renk giderim verimliliği ve işletme maliyeti cinsinden yanıtlar (Y), Design-Expert 7.0 yazılımı ile üretilen tahmin edilen verilerle birlikte Tablo 3.1'de sunulmuştur.

Tablo 3.1. Deneysel tasarım matrisi ve her bir deneyden elde edilen yanıtlar.

Sıra no	Faktör 1	Faktör 2	Faktör 3	Yanıt 1	Yanıt 2	Yanıt 3
	Akım yoğunluğu (mA/cm ²)	Elektrotlar arası mesafe (cm)	Reaksiyon süresi (dk)	KOİ giderimi (%)	Renk giderimi (%)	İşletme maliyeti (USD/m ³)
1	8.04	5.19	89.73	13.30	96.25	0.91
2	8.04	2.81	30.27	11.88	89.20	0.25
3	12.50	6.00	60.00	30.24	94.57	1.02
4	12.50	4.00	60.00	11.14	89.85	0.93
5	16.96	2.81	89.73	16.16	89.30	2.18
6	8.04	5.19	30.27	9.45	99.46	0.31
7	8.04	2.81	89.73	33.33	97.25	0.76
8	12.50	4.00	60.00	10.23	92.04	0.98
9	12.50	4.00	60.00	10.24	89.85	0.93
10	16.96	5.19	89.73	48.12	87.70	2.14
11	12.50	4.00	60.00	11.14	92.04	0.93
12	16.96	5.19	30.27	50.32	96.74	0.70
13	20.00	4.00	60.00	62.57	86.43	1.42
14	5.00	4.00	60.00	14.57	97.64	0.35
15	12.50	4.00	10.00	24.48	91.82	0.14
16	12.50	2.00	60.00	4.41	90.77	0.91
17	12.50	4.00	110.00	14.87	89.33	1.76
18	16.96	2.81	30.27	28.95	89.67	0.65
19	12.50	4.00	60.00	10.23	92.04	0.93
20	12.50	4.00	60.00	11.14	92.04	0.93

Modellerin güvenilirliğini ve geçerliliğini değerlendirmek, her bir faktörün etkisini ve bu faktörler arasındaki etkileşimleri belirlemek amacıyla varyans analizi (ANOVA) gerçekleştirilmiştir. Her bir değişkenin etkisi, F -değeri ve p -değeri kullanılarak analiz edilmiş; yüksek F -değeri ve düşük p -değeri, modellerin güçlü bir uyuma sahip olduğunu

göstermiştir. ANOVA sonuçları Tablo 3.2’de sunulmuş olup, üç modelinde p -değerlerinin 0.05’in altında olması, seçilen modellerin yanıt tahmini için uygun ve yüksek güvenilirliğe sahip olduğunu doğrulamaktadır. Yapılan analiz sonucunda, KOİ giderimi için A , B , AB , AC , A^2 ve C^2 faktörleri istatistiksel olarak anlamlı bulunurken ($p<0.05$); renk giderimi için A , B , AC ve BC faktörleri istatistiksel olarak anlamlı ($p<0.05$) bulunmuştur. İşletme maliyeti için ise istatistiksel olarak anlamlı bulunan faktörler A , C ve AC olmuştur ($p<0.05$).

Tablo 3.2. İkinci dereceden modelin ANOVA sonuçları.

Kaynak	KOİ giderimi (%)		Renk giderimi (%)		İşletme maliyeti (USD/m ³)	
	F -değeri	Prob > F değeri*	F -değeri	Prob > F değeri*	F -değeri	Prob > F değeri*
Model	18.21	< 0.0001	13.80	0.0002	108.80	< 0.0001
A	63.14	< 0.0001	55.70	< 0.0001	335.87	< 0.0001
B	14.27	0.0036	17.57	0.0019	2.01	0.1870
C	0.088	0.7722	3.02	0.1128	566.48	< 0.0001
AB	25.34	0.0005	0.97	0.3489	0.84	0.3822
AC	7.16	0.0233	13.66	0.0041	72.26	< 0.0001
BC	0.22	0.6515	26.71	0.0004	0.000	1.0000
A^2	50.21	< 0.0001	2.38	0.1542	0.13	0.7254
B^2	2.99	0.1144	4.69	0.0555	1.05	0.3288
C^2	5.39	0.0426	0.011	0.9190	0.59	0.4611
<i>Model istatistikleri</i>						
Yeterli hassasiyet	13.791		13.194		35.501	
R^2	0,9425		0,9255		0,9899	
R^2 -Ayarlanmış	0,8907		0,8584		0,9808	

* $p<0,05$ ’de önemli

Tablo 3.2’de sunulan verilere göre, KOİ ve renk giderimi ve işletme maliyeti için regresyon analizi sonuçları oldukça yüksek korelasyon katsayıları (R^2) (sırasıyla 0.9425, 0.9255, 0.9899) ortaya koymuş ve bu sonuçlar, seçilen modellerin deneysel verilere uyum sağladığını göstermiştir. Ayrıca, KOİ ve renk giderimi ve işletme maliyeti için elde edilen ayarlanmış- R^2 değerleri (sırasıyla 0.8907, 0.8584, 0.9808), modellerin aşırı uyum sorununa maruz kalmadan yüksek doğruluk sunduğunu teyit ederek model seçimlerinin uygunluğunu desteklemiştir. KOİ ve renk giderimi ve işletme maliyeti için elde edilen yeterli hassasiyet oranlarının 4’ün üzerinde olması (sırasıyla 13.791, 13.194, 35.501), modellerin güçlü bir öngörü kapasitesine sahip olduğunu bir kez daha doğrulamıştır (Gholamiyan ve ark., 2020).

Sonuç olarak, Design Expert yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen analizler neticesinde, KOİ ve renk giderimi ve işletme maliyeti için en uygun modellerin ikinci

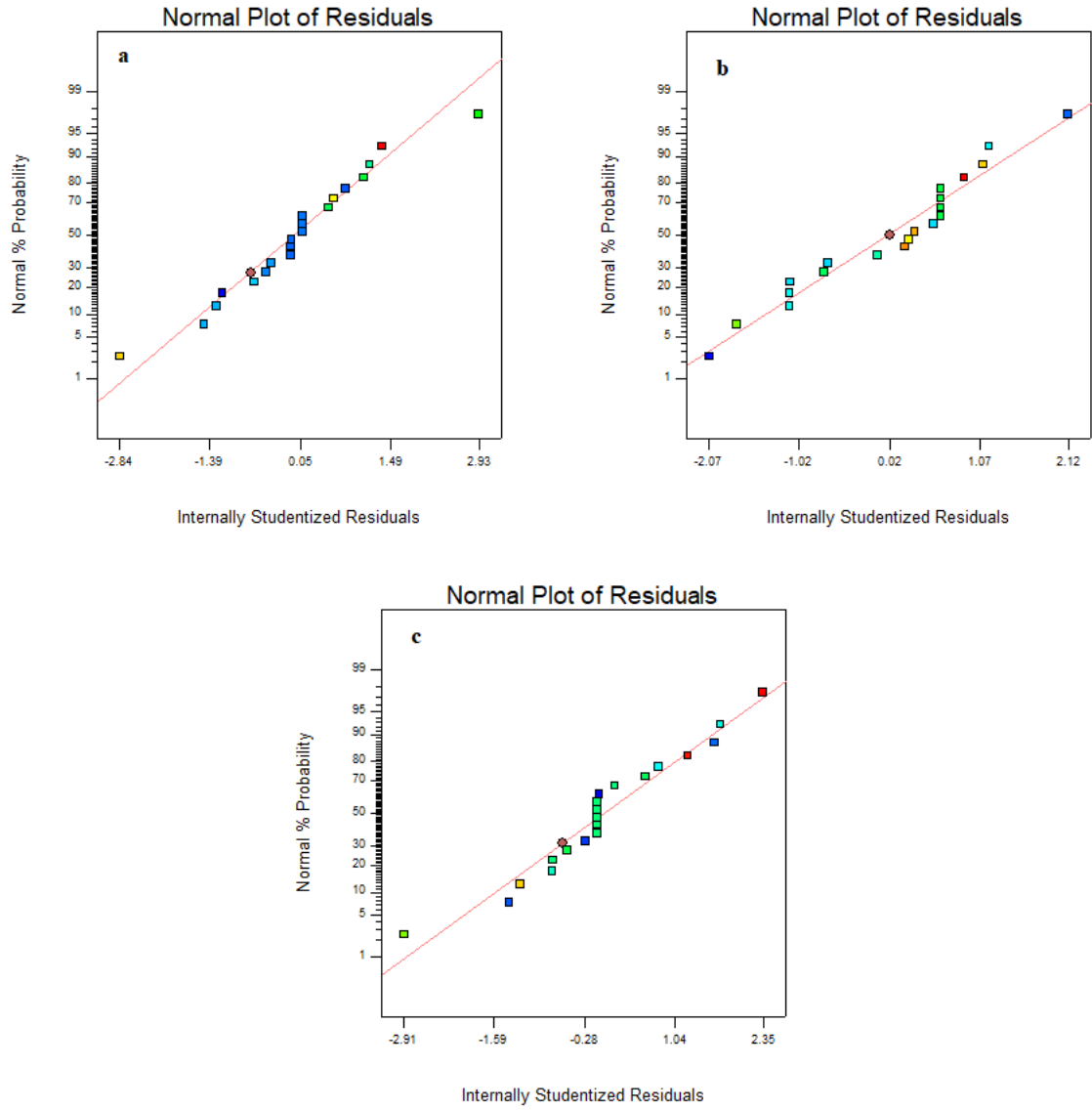
dereceden (kuadratik) modeller olduğu belirlenmiştir. Elde edilen ikinci dereceden polinom denklemler (denklem (3.1), (3.2) ve (3.3)), yanıt değişkeni ile tahmin değişkenlerinin kodlanmış faktörleri üzerinden ifade edilmiştir.

$$\begin{aligned} KOİ giderim verimi, \% = & + 10.67 + 11.45A + 5.44B - 0.43C + 9.47AB \\ & - 5.04AC - 0.88BC + 9.94A^2 + 2.42B^2 + 3.26C^2 \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} Renk giderim verimi, \% = & + 91.26 - 2.75A + 1.55B - 0.64C - 0.47AB \\ & - 1.78AC - 2.49BC + 0.55A^2 + 0.78B^2 + 0.037C^2 \end{aligned} \quad (3.2)$$

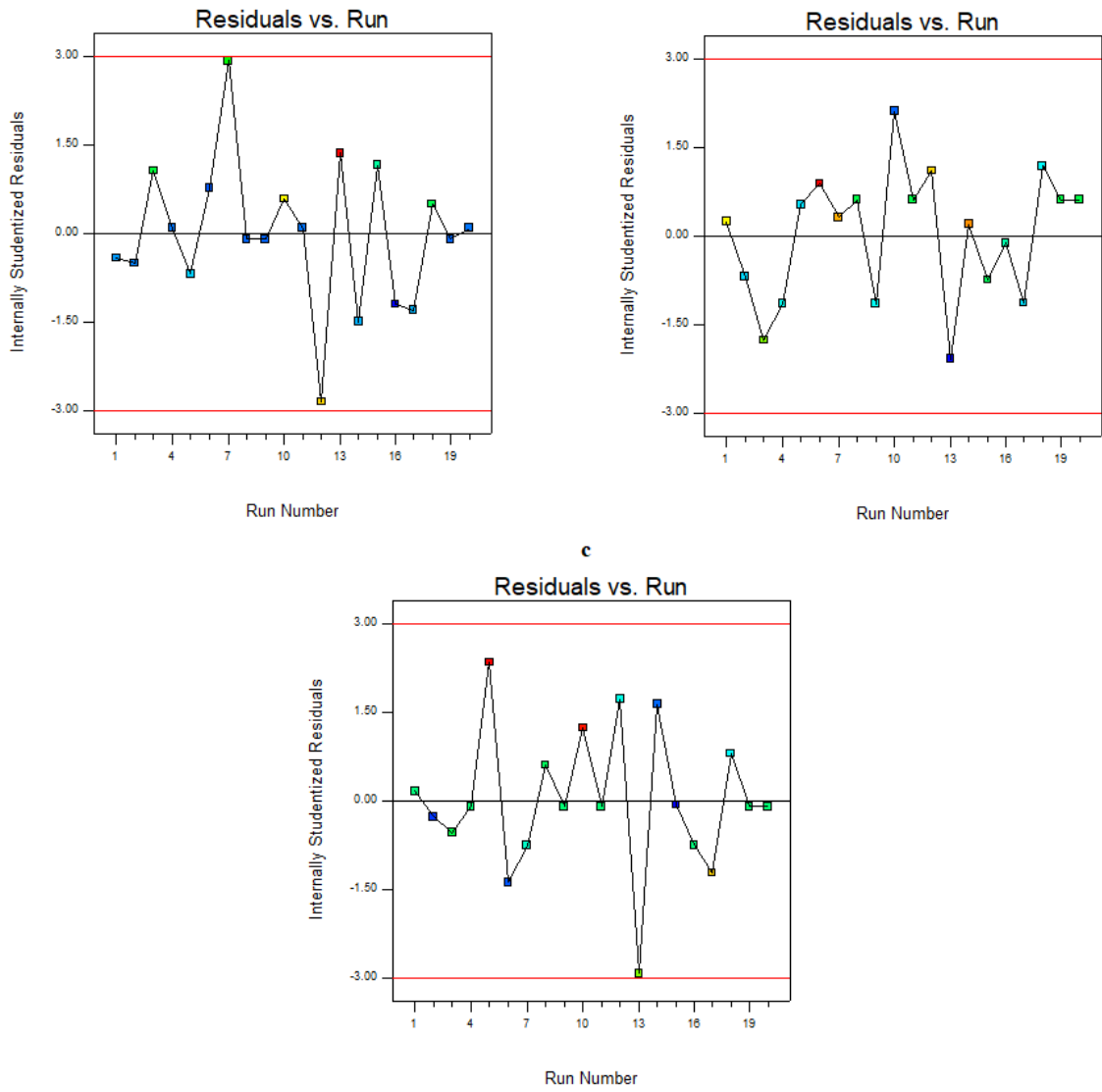
$$\begin{aligned} İşletme maliyeti (USD/m^3) = & + 0.94 + 0.38A + 0.030B + 0.50C - 0.025AB + 0.23AC \\ & + 0.0001BC - 7.362E-003A^2 + 0.021B^2 + 0.016C^2 \end{aligned} \quad (3.3)$$

Kodlanmış denklem, belirli faktör düzeyleri kombinasyonları kullanılarak yanıt değişkeninin tahmin edilmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca, denklemdeki katsayılar, her bir parametrenin yanıt değişkeni üzerindeki etkisinin hem yönünü hem de büyüklüğünü göstermektedir. Özellikle, anlamlı pozitif katsayıya sahip parametreler, yanıt değişkeni ile güçlü bir pozitif ilişkiyi işaret etmekte olup, bu parametrelerin artırılmasının yanıt değişkeninde artışa neden olacağını göstermektedir. Buna karşılık, negatif katsayıya sahip parametreler ise ters bir ilişkiyi ifade etmekte, bu parametrelerin azaltılması durumunda yanıt değişkeninin artacağı ve böylece sonucun optimize edileceği anlamına gelmektedir (Hmamouchi ve ark., 2023; Manzoor ve ark., 2024). Şekil 3.1a, 3.1b ve 3.1c sırasıyla KOİ ve renk giderimi ve işletme maliyeti giderimi için önerilen modellerin normal olasılık grafiklerini göstermektedir. Artıkların doğrusal bir çizgi izlemesi, sırasıyla KOİ ve renk giderimi ve işletme maliyetinin normal dağılım gösterdiğini ve modellerin istatistiksel açıdan güvenilir olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 3.1. Artıkların normal dağılım grafikleri. (a) KOİ giderimi, (b) renk giderimi, (c) işletme maliyeti

Ayrıca, artıklara karşılık deney sırasını gösteren grafikler Şekil 3.2a, 3.2b ve 3.2c’de sunulmuştur. Grafiklerdeki artıkların merkez çizgi etrafında ve belirlenen sınırlar içerisinde rastlantısal bir şekilde dalgalandığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, önerilen modellerin yeterli olduğu ve elektrokoagülasyon sürecini doğru bir şekilde temsil ettiği sonucuna varılmıştır.



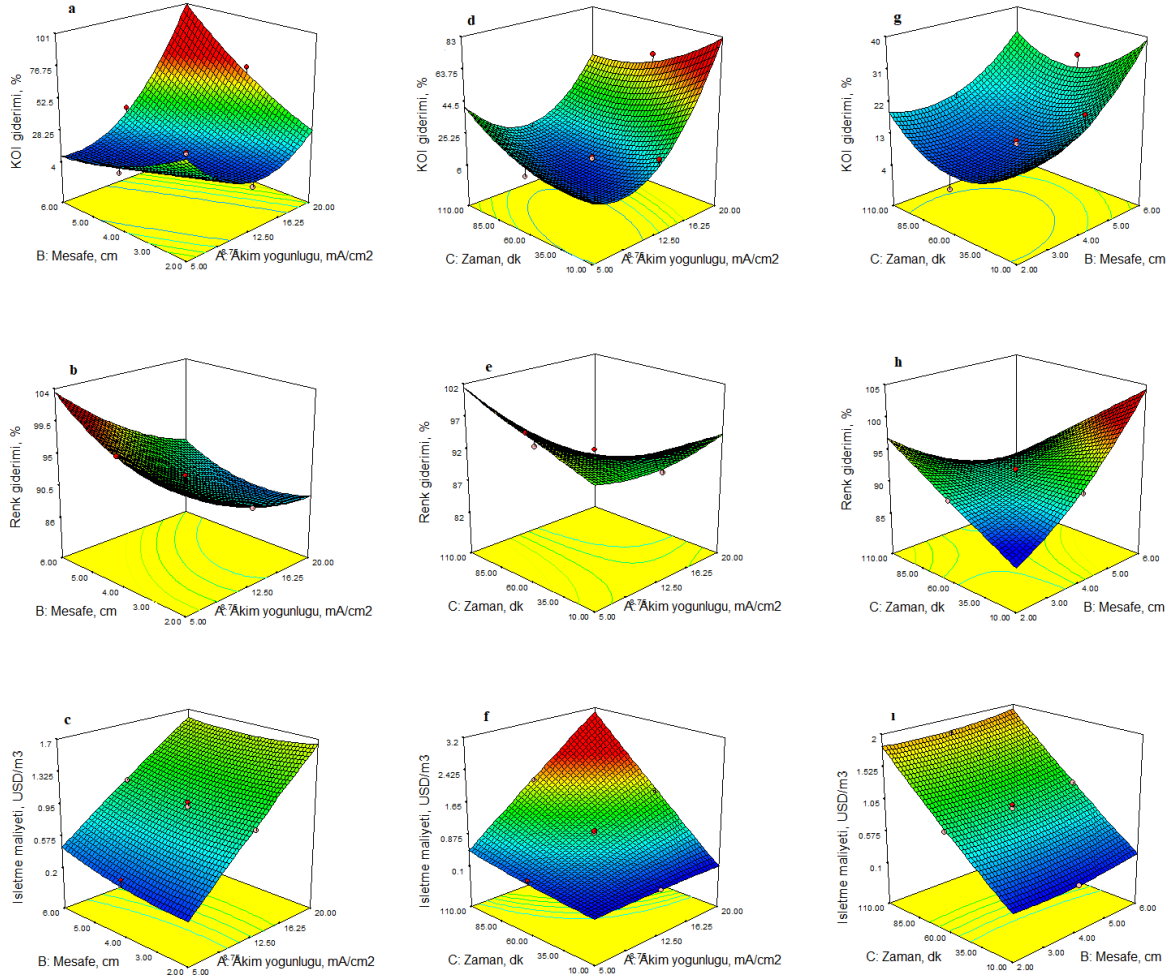
Şekil 3.2. Artıkların deney sırasına göre dağılım grafikleri. (a) KOİ giderimi, (b) renk giderimi, (c) işletme maliyeti

3.2. Proses Faktörlerinin KOİ ve Renk Giderimi ve İşletme Maliyeti Üzerindeki Etkisi

Üç boyutlu (3B) yüzey grafikleri, bağımsız değişkenlerin ve bunlar arasındaki etkileşimlerin yanıt değişkeni üzerindeki etkilerini incelemeye yardımcı olmakta olup, Şekil 3.3a-ı’da gösterilmiştir.

Şekil 3.3a-c, reaksiyon süresinin sabit tutulduğu (60 dk) koşullarda akım yoğunluğu (*A*) ve mesafe (*B*) arasındaki etkileşimin KOİ ve renk giderim verimliliği (%) ve işletme maliyeti üzerindeki etkileşim etkisini gösteren 3B yüzey grafiklerini göstermektedir. Önemli bir işletme parametresi olan elektrik akım yoğunluğu, doğrudan uygulanan elektrik akımı ile

ilişkilidir. Elektrik akımının artışı sırasında, çok sayıda metal hidroksit floklarının oluştuğu ve yüksek düzeyde alüminyum çözünmesinin gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu durum, kirleticilerin gideriminde önemli bir iyileşmeye yol açmıştır (Litter ve Quici, 2011). Bu çalışmada kullanılan akım yoğunluğu 5-20 mA/cm² arasında değiştirilmiş ve optimum akım yoğunlukları KOİ giderimi için 19.86 mA/cm², renk giderimi için 5.41 mA/cm² ve işletme maliyeti için 6.82 mA/cm² olarak belirlenmiştir. Elektrik akımı arttıkça, voltaj da artmakta ve Al(OH)₃ oluşumu hızlanmaktadır. Ancak, voltajın artması ile birlikte oksijen evrimi meydana geldiğinden, bu durum organik maddelerin oksidasyon verimliliğini azaltmaktadır. Aşırı yüksek elektrik akımı, atıksuların arıtımında olumsuz etkiler yaratabilmektedir (Vasudevan, 2014). Elektrik akım yoğunluğu, organize atıksuyunun arıtımında elektrokoagülasyon tekniğinin etkinliğini büyük ölçüde etkilemektedir. Elektrokoagülasyon işlemi sırasında kullanılan voltaj, kirletici giderim miktarını belirlemektedir (Mouedhen ve ark., 2008). Ancak, aşırı yüksek voltaj veya elektrik akımı kullanımı, aşırı potansiyel etkilerine yol açabilir. Bu durum, sistemin aşırı zorlandığını göstererek beklenmedik olumsuz etkiler ve istenmeyen sonuçlar doğurabilir. Yüksek voltaj veya akım koşullarında elektrot yüzeylerinde gaz kabarcıkları oluşabilir. Bu kabarcıklar, kirletici ile elektrot arasındaki temasın azalmasına sebep olarak toplam giderim verimliliğini düşürebilir. Ayrıca, gaz kabarcıkları elektrot aşınmasına neden olabilir ve bu durum elektrot materyalinin ayrılmasına ve sistemin işlevsiz hale gelmesine yol açabilir (Keshmirizadeh ve ark., 2011). Gaz kabarcıkları, yüzdürme etkilerini artırmaları nedeniyle elektrokoagülasyon sürecinde kritik bir rol oynamaktadır (Holt ve ark., 2005). Su ve atıksuyun arıtımında etkili bir yöntem olan elektrokoagülasyon yönteminde, metal hidroksitler kirleticilerle birleşerek büyük floklar oluşturur. Bu süreç, kirleticilerin birikmesi, yüzdürülmesi ve çöktürülmesini içerir (Emamjomeh, M. Sivakumar ve ark., 2009). Gaz kabarcıkları elektrotlarda elektroliz yoluyla üretilmekte olup, genellikle hidrojen ve oksijenden oluşmaktadır. Bu kabarcıklar atıksu içinde yükselirken koagüle olmuş parçacıklara tutunarak bunların yüzeye taşınmasını sağlar ve böylece temizlenmelerini kolaylaştırır (Gheraout, 2019). Gaz kabarcıklarının oluşturduğu yüzdürme etkisi, suyun kirleticilerden ayrılmasına yardımcı olur. Ayrıca, gaz kabarcıkları, floklar ile daha iyi temas sağlayarak askıda katı maddelerin ve diğer kirleticilerin daha verimli bir şekilde uzaklaştırılmasına olanak tanır ve böylece giderim verimliliğini artırır (İslam, 2019). Genel olarak, gaz kabarcıkları elektrokoagülasyon sürecinin yüzdürme bileşenini geliştirerek atıksuyun daha etkili bir şekilde arıtılmasına katkıda bulunur (Gheraout ve ark., 2011).



Şekil 3.3. KOİ giderimi (a, d, g), renk giderimi (b, e, h), işletme maliyeti (c, f, i) için 3B yanıt yüzey eğrileri.

Şekil 3.3d-f, mesafenin 4 cm’de sabit tutulduğu koşullarda akım yoğunluğu (A) ve zaman (B) arasındaki etkileşimin KOİ ve renk giderim verimliliği (%) ve işletme maliyeti üzerindeki etkileşim etkisini gösteren 3B yüzey grafiklerini göstermektedir. Bu çalışmada reaksiyon süresi 10-110 dk arasında değiştirilmiş ve optimum reaksiyon süreleri KOİ giderimi için 79.49 dk, renk giderimi için 68.47 dk ve işletme maliyeti için 10.29 dk olarak belirlenmiştir. Elektrokoagülasyon prosesinde kirleticilerin giderim verimliliği, anot malzemesi tarafından üretilen metal iyonlarının miktarına ve işlem süresi (t) üzerine bağlıdır (Prajapati ve Chaudhari, 2015). Ayrıca, Faraday kanununa (Denklem 3.4) göre metal iyonlarının yerinde üretimi doğrudan t süresine orantılıdır.

$$m = \frac{Mjt}{zF} \quad (3.4)$$

Burada m , birim yüzey alanı başına teorik olarak üretilen metal iyonlarının miktarı, z elektron sayısı (Al için $z = 3$), M anodun atom ağırlığını (Al için $M = 29,98$ g/mol için), F ise Faraday sabitini (96,486 C/mol) ifade etmektedir.

İşlem sırasında metal hidroksitlerin oluşumu ve safsızlıkların koagülasyonunun tamamlanması için gerekli reaksiyon süresi, elektrokoagülasyon süresi olarak tanımlanmaktadır. Denklem (3.4)'den de görülebileceği üzere, metal iyonlarının üretim hızı doğrudan işlem süresi (t) ile orantılıdır. Elektroliz süresinin uzatılması, flok oluşumunu artırmakta ve kirlenici giderim verimliliğini iyileştirmektedir. Ancak, ideal elektroliz süresinin ötesine geçildiğinde, ortamda kirleniciyi uzaklaştırmaya yetecek miktarda flok bulunduğundan, giderim verimliliğinde ilave bir artış gözlenmemektedir. Çünkü aşırı metal iyonu üretimi prosesi tersine çevirmekte, bu nedenle optimal bir t değeri belirlenmesi daha yüksek KOİ ve renk giderim verimliliği için kritik olmaktadır (Shalaby ve ark., 2014; Hasani ve ark., 2019).

Şekil 3.3g-1 3B yüzey grafikleri, akım yoğunluğu 12.50 mA/cm^2 'de sabit tutulurken elektrotlar arası mesafe (B) ile reaksiyon süresi (C) arasındaki etkileşimi, KOİ ve renk giderim verimliliği (%) ve işletme maliyeti açısından göstermektedir. Bu çalışmada elektrotlar arası mesafe 2-6 cm arasında değiştirilmiş ve optimum elektrotlar arası mesafe KOİ giderimi için 4.84 cm, renk giderimi için 5,15 cm ve işletme maliyeti için 2.58 cm olarak belirlenmiştir. Elektrot montajının, elektrotun gerekli etkin yüzey alanı ve elektrotlar arası mesafe için çok önemli olduğu bilinmektedir. Şekil 3a-c ve Şekil 3g-1 birlikte incelendiğinde, elektrotlar arası mesafe arttıkça, daha yüksek KOİ ve renk giderimi için daha fazla zamana ve elektrotlar arası mesafenin gerekli olduğu gözlemlenebilir. Elektrokoagülasyon sırasında, elektrotlara potansiyel uygulandığında ilk olarak anodic oksidasyon başlar. Zamanla, anod üzerinde çok ince bir metal hidroksit filmi oluşur ve bu, artan elektrotlar arası mesafe ile birlikte ek bir direnç oluşturur. Sonuç olarak, bir süre sonra akım düşer. Sabit bir akım sağlamak için uygulanan potansiyelin artırılması gerekir. Bu durumda akım sabit kalırken direnç artmaktadır. Bu nedenle, ohmik kayıp (IR direnç) artar ve bu da anodic oksidasyon hızını engeller. Anodik oksidasyon hızı düştükçe, anoddaki katyon sayısı da azalır. Bu katyonlar, koagülant oluşumundan sorumludur. Bu nedenle, daha yüksek elektrotlar arası mesafede, askıda bulunan partiküllerin aglomerasyon hızı ve

kirleticilerin adsorpsiyon oranı düşük olacaktır. Elektrotlar arası mesafe minimum olduğunda, çözünürlük ortamındaki akım akışı için direnç daha düşük olur ve bu da elektrolitik süreci kolaylaştırır. IR düşüşündeki değişim aşağıdaki denkleme göre belirlenir:

$$\eta_{IR} = I \cdot \frac{d}{A \cdot \kappa} \quad (3.5)$$

Burada I akım (A), d elektrotlar arasındaki mesafe (m), A aktif anot yüzeyi (m²), κ çözümün özgül iletkenliği (103 mS/m) olarak tanımlanır (Vik ve ark., 1984).

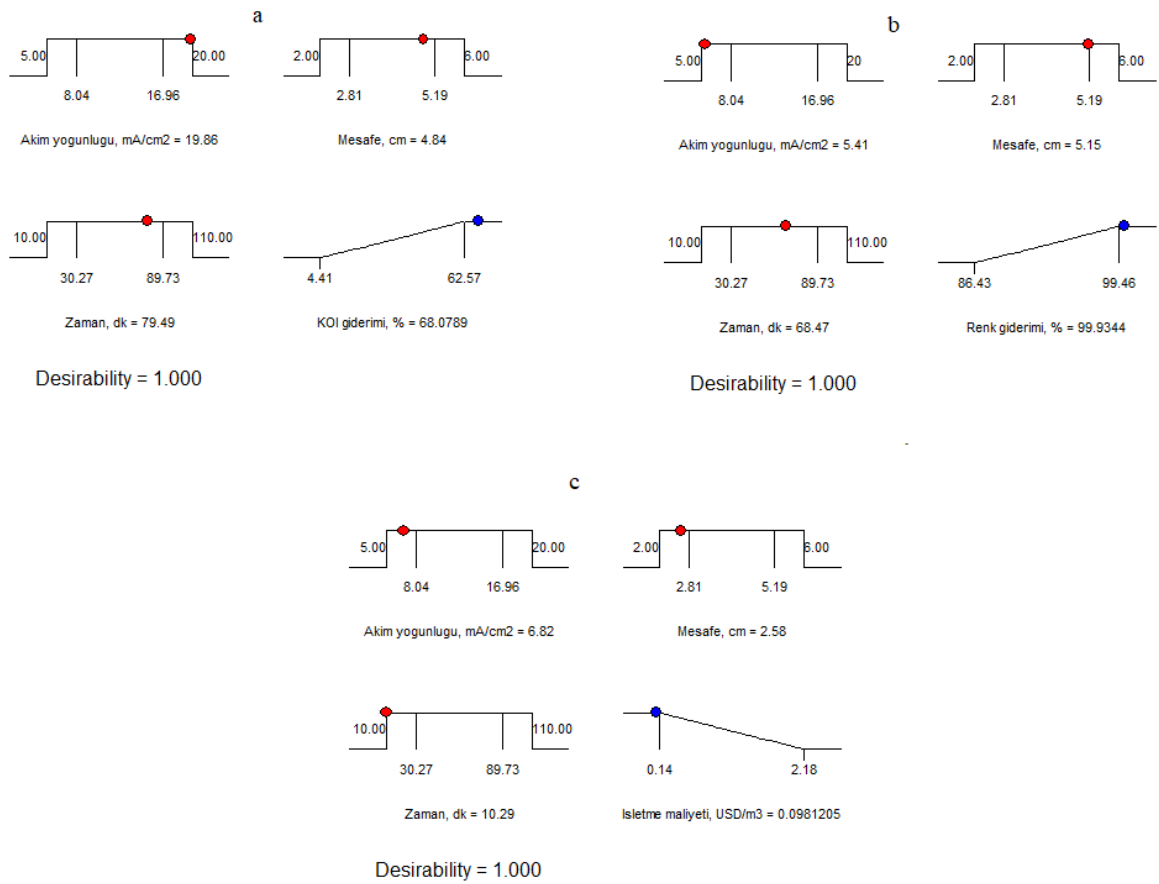
Yukarıdaki denklem, sabit anod yüzeyi ve çözüm iletkenliği durumunda, elektrotlar arası mesafe arttıkça voltaj düşüşünün (IR) arttığını belirtmektedir. IR düşüşündeki artış, elektrokoagülasyon sürecinde kabul edilebilir enerji tüketimi ve istenen etkili ayırma sağlamak için önerilmemektedir.

3.3. Proses Faktörlerinin Optimizasyonu

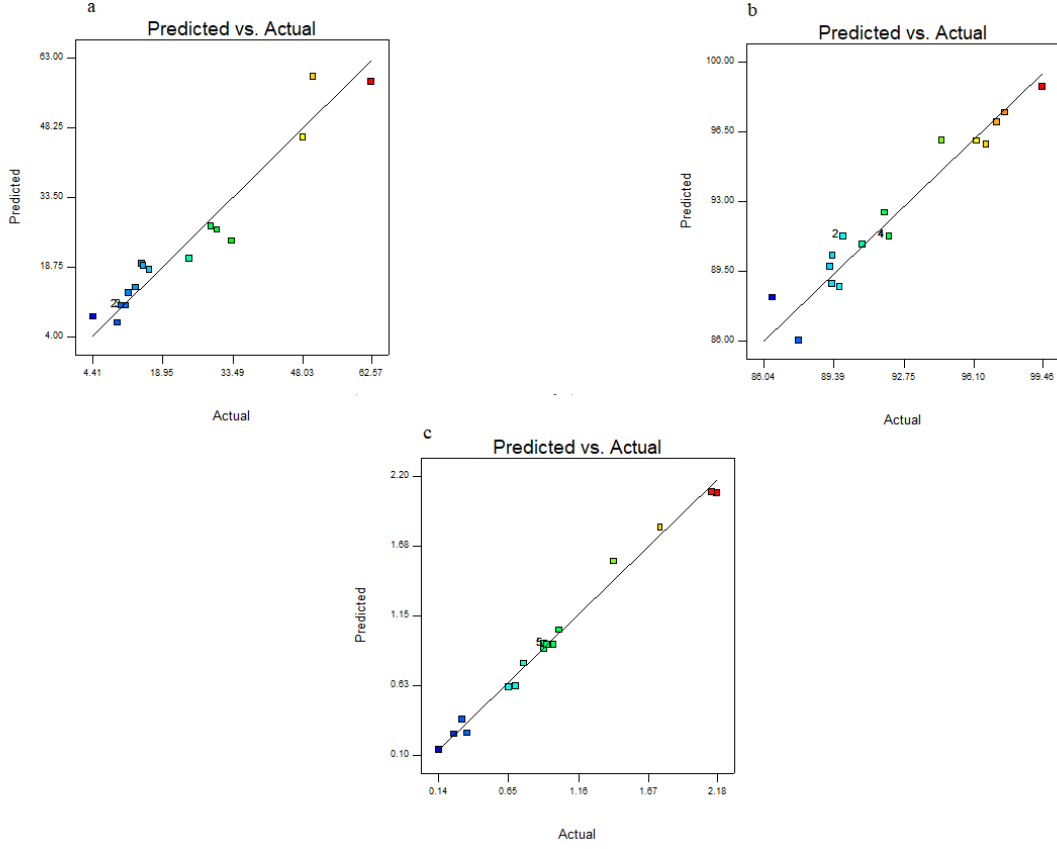
YYY'nin MKT ile kullanılmasının temel avantajlarından biri, laboratuvar deneylerine dayanarak kirleticilerin giderimi ve işletme maliyeti için optimum koşulların elde edilmesidir. Sonuçlar, Design Expert yazılımının desirability (1.000) fonksiyonu kullanılarak optimize edilmiştir. Optimizasyon sürecinde yoğunluğu (A), elektrotlar arası mesafe (B) ve reaksiyon süresi (C) değişkenleri belirlenen aralıklar içinde seçilmiş; KOİ, ve renk giderim yüzdeleri maksimize ve işletme maliyeti minimize edilmiştir ve sonuçlar Şekil 3.4a-c'de verilmiştir.

Şekil 3.4'den de görüleceği gibi Tunceli OSB atıksularının elektrokoagülasyon prosesi ile arıtım işlemi için optimum koşullar; %68.07'lik maksimum KOİ giderimi için 19.86 mA/cm² akım yoğunluğu, 4.84 cm elektrotlar arası mesafe ve 79.49 dk reaksiyon süresi olarak belirlenirken, %99.93'lük maksimum renk giderimi için 5.41 mA/cm² akım yoğunluğu, 5.15 cm elektrotlar arası mesafe ve 68.47 dk reaksiyon süresi olarak belirlenmiştir. 0.098 USD/m³'lük minimum işletme maliyetini veren optimum ortam koşulları ise 6.82 mA/cm² akım yoğunluğu, 2.58 cm elektrotlar arası mesafe ve 10.29 dk reaksiyon süresi olarak belirlenmiştir. Ayrıca yine desirability fonksiyonu kullanılarak %68.07'lik maksimum KOİ gideriminin elde edildiği ortam şartları için renk giderimi %98,35 ve minimum işletme maliyeti 0.125 USD/m³ olarak elde edilmiştir. Teorik modelin

tahminlerinin güvenilirliğini doğrulamak amacıyla, maksimum KOİ ve renk giderim verimlerinin elde edildiği optimum koşullar altında doğrulama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, giderim verimlerinin deneysel değerlerinin tahmin edilen değerlere çok yakın olduğunu ve aralarındaki farkın 0,8'den küçük olduğunu göstermiştir. Dolayısıyla bu çalışmada geliştirilen modellerin uygun ve geçerli olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 3.5, elektrokoagülasyon prosesi için KOİ ve renk giderimi ve işletme maliyetine ait tahmini ve gerçek değerlerin karşılaştırmasını göstermektedir.



Şekil 3.4. Optimum sonuçları veren proses değişkenlerinin sayısal değerleri



Şekil 3.5. Elektrokoagülasyon prosesi için tahmini ve deneysel sonuçların karşılaştırılması, a) KOİ giderimi, b) renk giderimi, c) işletme maliyeti.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Tunceli OSB atıksularının elektrokoagülasyon prosesi ile arıtılması üzerine bir araştırma yürütülmüş ve YYY esaslı MKT kullanılarak deneysel tasarım ve optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, elektrokoagülasyon prosesi parametrelerinin (akım yoğunluğu, elektrotlar arası mesafe ve reaksiyon süresi) KOİ ve renk giderim verimliliği ile işletme maliyeti üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur.

Çalışmada ulaşılan başlıca sonuçlar şunlardır:

Model uyumları;

Yapılan varyans analizi (ANOVA) sonuçlarına göre, KOİ ve renk giderimi ve işletme maliyeti için kurulan ikinci dereceden (kuadratik) modeller istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0.05$). Modellerin korelasyon katsayıları (R^2) sırasıyla 0.9425 (KOİ giderimi), 0.9255 (renk giderimi) ve 0.9899 (işletme maliyeti) olarak hesaplanmış ve bu yüksek değerler, deneysel veriler ile model tahminleri arasında güçlü bir uyum olduğunu göstermiştir.

Proses parametrelerinin etkisi:

Akım yoğunluğu, hem KOİ hem de renk giderimi üzerinde en etkili parametre olmuştur. Artan akım yoğunluğuyla birlikte çözünmüş alüminyum hidroksit floklarının sayısındaki artış, giderim verimliliğini artırmıştır. Ancak aşırı akım yoğunluklarında oksijen evrimi nedeniyle verim düşüşü gözlemlenmiştir. Elektrotlar arası mesafenin artışı, sistemdeki elektriksel direnç nedeniyle hem giderim verimliliğini hem de enerji tüketimini etkilemiştir. Optimum mesafenin 4-5 cm aralığında olduğu belirlenmiştir. Reaksiyon süresi, üretilen flokların sayısını doğrudan etkileyerek KOİ ve renk giderimini artırmış, ancak optimum süreyi aşan zamanlarda giderim verimliliğinde belirgin bir iyileşme görülmemiştir.

Optimum koşullar:

KOİ giderimi için optimum koşullar: 19.86 mA/cm² akım yoğunluğu, 4.84 cm elektrotlar arası mesafe, 79.49 dakika reaksiyon süresi ile %68.07 giderim verimi elde edilmiştir.

Renk giderimi için optimum koşullar: 5.41 mA/cm² akım yoğunluğu, 5.15 cm elektrotlar arası mesafe, 68.47 dakika reaksiyon süresi ile %99,93 giderim verimi sağlanmıştır.

İşletme maliyeti açısından optimum koşullar: 6,82 mA/cm² akım yoğunluğu, 2,58 cm elektrotlar arası mesafe, 10,29 dakika reaksiyon süresi ile 0,098 USD/m³ işletme maliyeti olarak bulunmuştur.

Çalışmanın temel amacı, en yüksek KOİ giderim veriminin sağlandığı ortam şartlarını optimize etmek olmuştur. Bu amaç doğrultusunda desirability fonksiyonu kullanılarak, %68,07'lik maksimum KOİ gideriminin elde edildiği optimum koşullar altında minimum işletme maliyeti 0,125 USD/m³ olarak belirlenmiştir. Ayrıca renk giderimi açısından da %98.35 gibi yüksek bir verimliliğe ulaşılması, elektrokoagülasyon yönteminin renk gideriminde oldukça etkili olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, elektrokoagülasyon yönteminin uygun proses parametreleri altında uygulandığında, endüstriyel atıksuların etkili bir şekilde arıtılabileceği ve aynı zamanda işletme maliyetlerinin minimize edilebileceği ortaya konmuştur.

Bu çalışmada elde edilen bulgular doğrultusunda gelecek çalışmalara ve uygulamalara yönelik aşağıdaki önerilerde bulunmaktadır:

Farklı elektrot malzemeleri kullanımı:

Sadece alüminyum elektrotlar değil, demir, çelik veya hibrit elektrot sistemleri gibi farklı anot/katot kombinasyonları ile çalışarak giderim verimliliklerinin karşılaştırılması önerilmektedir. Bu sayede daha ekonomik veya daha yüksek verimli alternatifler geliştirilebilir.

Enerji verimliliğinin artırılması:

Reaksiyon süresi ve akım yoğunluğu parametrelerinin optimize edilerek daha düşük enerji tüketimi ile benzer veya daha yüksek giderim verimleri sağlanması hedeflenmelidir. Alternatif enerji kaynakları (örneğin güneş enerjili EC sistemleri) ile sistem desteklenebilir.

Atık çamur yönetimi:

Elektrokoagülasyon süreci sonunda oluşan çamur karakterizasyonu yapılabilir ve bu çamurun bertarafı veya yeniden kullanımı (örneğin yapı malzemeleri üretiminde) değerlendirilebilir, böylece çevresel sürdürülebilirlik artırılabilir.

Pilot ölçekli çalışmalar:

Laboratuvar ölçekli başarılı sonuçlar, saha uygulamalarına taşınarak pilot ölçekli sistemler kurulabilir, böylece uzun süreli performans, sistem dayanıklılığı, bakım gereksinimleri gibi parametreler ayrıntılı şekilde değerlendirilebilir.

Sürecin diğer arıtma teknolojileriyle entegrasyonu:

Elektrokoagülasyon, membran filtrasyon, biyolojik arıtma veya ileri oksidasyon teknolojileri gibi diğer yöntemlerle entegre edilerek hibrit sistemler tasarlanabilir. Böylece daha yüksek kirletici giderimi ve su geri kazanımı sağlanabilir.

Makine öğrenmesi ile proses optimizasyonu:

İlerleyen çalışmalarda, yapay zeka ve makine öğrenmesi (örneğin yapay sinir ağları, XGBoost gibi) tabanlı modelleme teknikleri kullanılarak elektrokoagülasyon süreci daha doğru şekilde tahmin edilebilir ve optimize edilebilir.

Çevresel etki ve yaşam döngüsü analizi:

Elektrokoagülasyon sistemlerinin çevresel etkileri (karbon ayak izi, enerji tüketimi, malzeme kullanımı vb.) kapsamlı bir yaşam döngüsü analizi (LCA) ile incelenebilir ve daha sürdürülebilir arıtım çözümleri geliştirilebilir.

5. KAYNAKLAR

- Aladily, A.A., Mohammed, T.J., Albayati, T.M., 2025. Coupling of electrocoagulation and membrane in hybrid and integrated systems for wastewater treatment, focusing on trends of reactor designs, fundamentals, and factors affecting the process: A critical review. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 208:110093.
- AL-Rubaye, S.F.A., AlHaboubi, N.A., Al-Allaq, A.H., 2024. Factors Affecting Electrocoagulation Process for Different Water Types: A Review. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, 20(1):17-32.
- Al-Qodah, Z., Al-Shannag, M., Hudaib, B., Bani-Salameh, W., 2024. Enhancement of dairy wastewater treatment efficiency in batch chemical-assisted solar-powered electrocoagulation-adsorption system. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9:100760.
- APHA, 1989. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th ed., American Public Health Association, Washington, D.C.
- Aryanti, P.T.P., Nugroho, F.A., Phalakornkule, C., Kadier, A., 2024. Energy efficiency in electrocoagulation processes for sustainable water and wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12:114124.
- Baki, O., Yakan, M., Nogay, A., 2016. Solid waste management in Sinop Organized Industrial Zones. *International Journal of Ecosystems and Ecology Sciences*, 6(4): 499-504.
- Bharath, M., Krishna B.M., Manoj Kumar, B., 2018. A Review of Electrocoagulation Process for Wastewater Treatment. *International Journal of ChemTech Research*, 3(11):289-302.
- Bharti, M., Das, P.P., Purkait, M.K., 2023. A review on the treatment of water and wastewater by electrocoagulation process: Advances and emerging applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11: 111558.
- Boinpally, S., Kolla, A., Kainthola, J., Kodali, R., Vemuri, J., 2023. A state-of-the-art review of the electrocoagulation technology for wastewater treatment. *Water Cycle*, 4:26-36.
- Bulmuş, C., Koç, S., 2014. Organize Sanayi Bölgelerinin Bölge Ekonomilerindeki Etkinliklerinin Karşılaştırılması: Kayseri ve Sivas Örneği. *Kırıkkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 4(1):177-215.
- Das, P.P., Sharma, M., Purkait, M.K., 2022. Recent progress on electrocoagulation process for wastewater treatment: A review. *Separation and Purification Technology*, 292:121058.
- Dean, A., Voss, D., Draguljić, D., 2017. Design and Analysis of Experiments Second Edition. Springer Cham, Switzerland, 565–614.
- Deveci, E.U., Akarsu, C., Gönen, Ç., Özay, Y., 2019. Enhancing treatability of tannery wastewater by integrated process of electrocoagulation and fungal via using RSM in an economic perspective. *Process Biochemistry*, 84:124–133.

- Durak, A., Özgüven, A., Demir Yetiş, A.,** 2021. Van İli Atıksu Arıtma Tesisleri İşletme Sorunları ve Çözüm Önerileri. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 10(4):1448-1463.
- Ebba, M., Asaithambi, P., Alemayehu, E.,** 2022. Development of electrocoagulation process for wastewater treatment: optimization by response surface methodology. *Heliyon*, 8: e09383.
- Emamjomeh, M.M., Sivakumar, M.,** 2009. Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes. *Journal of Hazardous Materials*, 90(5):1663–1679.
- Gheraout, D.,** 2019. Electrocoagulation process: a mechanistic review at the dawn of its modeling. *Journal of Environmental Science and Allied Research*, 2(1):22–38.
- Gheraout, D., Naceur, M.W., Gheraout, B.,** 2011. A review of electrocoagulation as a promising coagulation process for improved organic and inorganic matters removal by electrophoresis and electroflotation. *Desalination and Water Treatment*, 28(1–3):287–320.
- Gholamiyan, S., Hamzehloo, M., Farrokhnia, A.,** 2020. RSM optimized adsorptive removal of erythromycin using magnetic activated carbon: Adsorption isotherm, kinetic modeling and thermodynamic studies. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 17:100309.
- Hasani, G., Maleki, A., Daraei, H., Ghanbari, R., Safari, M., McKay, G., Yetilmezsoy, K., Ilhan, F., Marzban, N.,** 2019. A comparative optimization and performance analysis of four different electrocoagulation-flotation processes for humic acid removal from aqueous solutions. *Process Safety and Environmental Protection*, 121:103–117.
- Hmamouchi, S., El Yacoubi, A., El Hezzat, M., Sallek, B., El Idrissi, B.C.,** 2023. Optimization of photocatalytic parameters for MB degradation by g-C₃N₄ nanoparticles using Response Surface Methodology (RSM). *Diam Relat Mater*, 136(5):109986.
- Holt, P.K., Barton, G.W., Mitchell, C.A.,** 2005. The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. *Chemosphere*, 59(3):355–367.
- Islam, S.M.D.U.,** 2019. Electrocoagulation (EC) technology for wastewater treatment and pollutants removal. *Sustainable Water Resources Management*, 5(1):359–380.
- Karakaya, M., Dulkadiroğlu, H.,** 2021. Kayseri Organize Sanayi Bölgesi Atıksu Arıtma Tesisinde Tasarım ve Mevcut Durum Karşılaştırması. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10(2):101-110.
- Keshmirizadeh, E., Yousefi, S., Rofouei, M.K.,** 2011. An investigation on the new operational parameter effective in Cr(VI) removal efficiency: a study on electrocoagulation by alternating pulse current. *Journal of Hazardous Materials*, 190(1–3):119–124.
- Kınık, Z., Aykaç, Z.,** 2021. Atıksu Arıtma Tesislerinde Karşılaşılan Problemler ve Çözüm Önerileri. *Türk Hidrolik Dergisi / Turkish Journal of Hydraulic*, 5(1):59-65.
- Kırhoğlu, H., Fidan, M.E.,** 2010. Organize Sanayi Bölgeleri İçinde ve Dışında Faaliyet Gösteren İşletmelerin Çevre-Atık Yönetimi ve Muhasebesi Konularında Mevcut Durum ve Farklılıkları (Sakarya İlinde Bir Araştırma). *Muhasebe ve Denetime BAKIŞ*, 1-28.

- Kukul, Y.S., Ünal Çalışkan, A.D., Anaç, S., 2007.** Arıtılmış Atık Suların Tarımda Kullanılması ve İnsan Sağlığı Yönünden Riskler. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 44(3):101-116.
- Küçükcalay, M.A., 1997.** Endüstri Devrimi ve Ekonomik Sonuçlarının Analizi. *İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 2 (Güz): 51-68.
- Litter, M.I., Quici, N., 2011.** Photochemical advanced oxidation processes for water and wastewater treatment. *Recent Patents on Engineering*, 4 (3):217–241.
- Manzoor, Q., Farrukh, M.A., Sajid, A., 2024.** Optimization of lead (II) and chromium (VI) adsorption using graphene oxide/ZnO/chitosan nanocomposite by response surface methodology. *Applied Surface Science*, 655:159544.
- Mao, Y., Zhao, Y., Cotterill, S., 2023.** Examining Current and Future Applications of Electrocoagulation in Wastewater Treatment. *Water*, 15: 1455.
- Moneer, A.A., Thabet, W.M., Khedawy, M., El-Sadaawy, M.M., Shaaban, N.A., 2023.** Electrocoagulation process for oily wastewater treatment and optimization using response surface methodology. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20:13859–13872.
- Mouedhen, G., Feki, M., Wery, M.D.P., Ayedi, H.F., 2008.** Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process. *Journal of Hazardous Materials*, 150(1):124–135.
- Patel, S.K., Shukla, S.C., Natarajan, B.R., Asaithambi, P., Dwivedi, H.K., Sharma, A., Singh, D., Nasim, M., Raghuvanshi, S., Sharma, D., Sen, S., Dubey, S., Prajapati, A.K., 2025.** State of the art review for industrial wastewater treatment by electrocoagulation process: Mechanism, cost and sludge analysis. *Desalination and Water Treatment*, 321: 100915.
- Patel, S.K., Shukla, S.C., Natarajan, B.R., Prajapati, A.K., 2024.** Electrocoagulation treatment of debrominated wastewater: A critical observation and analysis. *Desalination and Water Treatment*, 320:100690.
- Prajapati, A.K., Chaudhari, P.K., 2015.** Physicochemical treatment of distillery wastewater – a review. *Chemical Engineering Communications*, 202(8):1098–1117.
- Rahman, N.A., Jol, C.J., Linus, A.A., Taib, S.N.L., Parabi, A., Borhan, W.W.S.W., Ming, C.K., Parabi, A.S.L., Jalal, N.S.A., Baharuddin, N., Samsul, S.N.A., Mutalip, N.A., Sharkawi, F.B., Jol, E.J., James, A.B., Jitai, A.A., Hamid, D.F.A.A., Amit, M.A.N., Mafadi, M.H., 2024.** Batch electrocoagulation system for the treatment of Borneo urban river in relation to the industrial zone. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12:112514.
- Saavedra, M.D.M., Concha, V.O.C., Bastos, R.G., 2024.** Electrocoagulation treatment of sugarcane vinasse: Operating parameters and cost analysis by response surface methodology. *Journal of Cleaner Production*, 448:141597.
- Sadaf, S., Roy, H., Fariha, A., Rahman, T., Tasnim, N., Jahan, N., Sokaan-Adeaga, A.A., Safwat, S.F., Islam, M.S., 2024.** Electrocoagulation-based wastewater treatment process and significance of anode materials for the overall improvement of the process: A critical review. *Journal of Water Process Engineering*, 62:105409.
- Sezer, M., Topkaya, E., Aksan, S., Veli, S., Arslan, A., 2024.** Optimizing microplastic treatment in the effluent of biological nutrient removal processes using

electrocoagulation: Taguchi experimental design. *Journal of Environmental Management*, 369:122413.

Shalaby, A., Nassef, E., Mubark, A., Hussein, M., 2014. Phosphate removal from wastewater by electrocoagulation using aluminium electrodes. *American Journal of Environmental Engineering and Science*, 1(5):90–98.

Szpisják-Gulyás, N., Al-Tayawi, A., Horváth, Zs., László, ZS., Kertész, Sz., Hodúr C., 2023. Methods for experimental design, central composite design and the Box–Behnken design, to optimise operational parameters: A review. *Acta Alimentaria*, 52(4):521-537.

Şener, G., Olhan, E., 2016. Atıksu Arıtma Tesislerinin Kırsal Alan Üzerindeki Çevresel Sosyal ve Ekonomik Etkileri. *Tarım Ekonomisi Dergisi*, 22(2):9-16.

URL – 1, 2025. <https://www.sanayi.gov.tr/sanayi-bolgeleri/organize-sanayi-bolgeleri-hizmetleri> . Organize Sanayi Bölgeleri Hizmetleri. 04.02.2025.

URL – 2, 2025. https://www.biyologlar.com/v8/endustri-atik-sulari_ . Endüstri Atık Suları. 04.02.2025.

URL – 3, 2025. <https://damlacevre.com.tr/atik-su-ve-cevreye-etkileri/#:~:text=Nitrat%20ve%20fosfat%20i%C3%A7eren%20g%C3%BCbreler,d%C4%9Fer%20hayvanlar%C4%B1%20da%20olumsuz%20etkilemektedir> . Atık Su ve Çevreye Etkileri. 12.02.2025.

URL – 4, 2025. https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/atiksu-aritma-tesisi-ile-hizmet-verilen-belediyeler-i-85746_ . Atıksu Arıtma Tesisi ile Hizmet Verilen Belediyeler. 12.02.2025.

URL – 5, 2025. <https://tunceliosb.org.tr/hakkimizda/> . Tunceli Organize Sanayi Bölgesi. 03.03.2025.

Üçüncü, O., 2019. Atıksu Arıtımı, Atıksu Deşarjı ve Su Kirliliği: Trabzon İli Örneği. *Türk Hidrolik Dergisi*, 3(2):14-29.

Vasudevan, S., 2014. An efficient removal of phenol from water by peroxi-electrocoagulation processes. *Journal of Water Process Engineering*, 2:53–57.

Vicente, C., Silva, J.R., Santos, A.D., Silva, J.F., Mano, J.T., Castro, L.M., 2023. Electrocoagulation treatment of furniture industry wastewater. *Chemosphere*, 328:138500.

Vik, E.A., Carlson, D.A., Eikum, A.S., Gjessing, T., 1984. Electrocoagulation of potable water. *Water Research*, 18:1355–1360.

Yüksekdağ, M., Gökpınar, S., Yelmen, B., 2020. Atıksu Arıtma Tesislerinde Arıtma Çamurları ve Bertaraf Uygulamaları. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 18:895-904.

ÖZGEÇMİŞ



EKLER

EK.1 Elektrokoagülasyonla arıtım öncesinde ve sonrasında çözünmüş oksijen, pH, ORP ve iletkenlik değerleri.

Run	Çözünmüş Oksijen (mg/L) Giriş	Çözünmüş Oksijen (mg/L) Çıkış	pH Giriş	pH Çıkış	ORP (mV) Giriş	ORP (mV) Çıkış	İletkenlik (µs/cm) Giriş	İletkenlik (µs/cm) Çıkış
1	11,61	7,98	5,07	5,27	-45,9	-163,5	1954	2018
2	11,87	9,80	5,21	5,17	-53,2	-186,1	1967	2031
3	12,18	9,46	5,05	5,05	3,1	-158	1904	1854
4	10,90	9,40	4,97	5,08	43,2	-213,5	1946	1856
5	11,57	7,23	4,89	5,35	-25,4	-145,4	1877	1818
6	12,35	9,44	5,26	5,1	-32,5	-163,7	2220	1978
7	13,18	9,58	5,05	5,19	-32	-191,6	1889	1856
8	10,91	8,80	5,05	5,09	55,9	-88,7	1893	1879
9	10,90	9,40	4,97	5,08	43,2	-213,5	1946	1856
10	10,32	7,58	4,87	5,36	75,5	-205,7	1947	1806
11	10,90	9,40	4,97	5,08	43,2	-213,5	1946	1856
12	10,22	8,70	4,88	4,97	63,8	-164,9	1963	1897
13	10,92	7,79	5,02	5,1	45	-186	1889	1850
14	11,67	9,12	5,02	5,06	-2,8	-183,6	1942	1945
15	11,98	9,66	5,16	5,2	-62,5	-189	1868	2211
16	10,33	9,33	4,98	5,02	81,3	-102,8	1871	1744
17	8,89	8,93	4,88	5,05	126,3	-235,6	1956	1674
18	9,88	10,38	4,8	5,05	96,2	-202,3	1945	1869
19	10,91	8,80	5,05	5,09	55,9	-88,7	1893	1879
20	10,91	8,80	5,05	5,09	55,9	-88,7	1893	1879

EK. 2 Elektrokoagülasyonla arıtım öncesinde ve sonrasında bulanıklık ve renk ölçüm değerleri.

No	Bulanıklık (NTU) Giriş	Bulanıklık (NTU) Çıkış	Renk (Abs) Giriş			Renk (Abs) Çıkış		
			436	525	620	436	525	620
1	185	81,70	0,696	0,534	0,412	0,051	0,020	0,021
2	185	40,30	0,700	0,533	0,416	0,045	0,057	0,019
3	212	38,50	0,721	0,553	0,430	0,049	0,030	0,021
4	212	71,40	0,721	0,553	0,430	0,093	0,056	0,057
5	212	61,10	0,728	0,561	0,439	0,097	0,060	0,040
6	206	16,70	0,733	0,560	0,440	0,007	0,003	0,004
7	228	27,40	0,731	0,560	0,440	0,036	0,016	0,014
8	212	44,00	0,721	0,553	0,430	0,059	0,044	0,030
9	212	71,40	0,721	0,553	0,430	0,093	0,057	0,057
10	212	66,10	0,721	0,553	0,430	0,096	0,068	0,049
11	212	71,40	0,721	0,553	0,430	0,093	0,044	0,057
12	212	22,50	0,721	0,553	0,430	0,027	0,018	0,011
13	212	80,20	0,721	0,553	0,430	0,100	0,075	0,057
14	212	12,70	0,720	0,551	0,427	0,019	0,013	0,010
15	200	217,00	0,737	0,563	0,385	0,070	0,046	0,032
16	212	74,10	0,737	0,553	0,430	0,072	0,051	0,038
17	212	79,00	0,721	0,553	0,430	0,089	0,059	0,042
18	212	35,90	0,721	0,553	0,430	0,042	0,057	0,023
19	212	44,00	0,721	0,553	0,430	0,059	0,044	0,030
20	212	44,00	0,721	0,553	0,430	0,059	0,044	0,030