

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ELEKTROOKSİDASYON YÖNTEMİ İLE Ti/TiO₂-RuO₂-IrO₂
ELEKTRODU KULLANILARAK TEKSTİL ENDÜSTRİSİ
ATIKSUYUNUN ARITIMI: BOX BEHNKEN TASARIMI İLE
OPTİMİZASYONU**

BÜŞRA KUŞ

KOCAELİ 2025

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ELEKTROOKSİDASYON YÖNTEMİ İLE Ti/TiO₂-RuO₂-IrO₂
ELEKTRODU KULLANILARAK TEKSTİL ENDÜSTRİSİ
ATIKSUYUNUN ARITIMI: BOX BEHNKEN TASARIMI İLE
OPTİMİZASYONU**

BÜŞRA KUŞ

Prof. Dr. Sevil VELİ
Danışman, Kocaeli Üniversitesi

Prof. Dr. Ayla ARSLAN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Doç. Dr. Nazire Pınar TANATTI
Jüri Üyesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Tezin Savunulduğu Tarih: 14.01.2025

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmada,

- Bu tezin/projenin 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,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

- Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Büşra KUŞ

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma iznini Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımını bana ait olacaktır.

Tezin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan **“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi / Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
- Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Büşra KUŞ

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışmada, tekstil atıksuyunun elektrooksidasyon yöntemine tabii tutularak pH, süre ve akım yoğunluğu parametrelerinin renk, KOİ ve TOK giderimlerine etkisi Yanıt Yüzey Yöntemi ile incelenmiştir. Çalışmada anot olarak Ti/TiO₂-RuO₂-IrO₂ elektrodu ve katot olarak paslanmaz çelik elektrodu kullanılmıştır.

Yüksek Lisans tez çalışmalarına başladığım ilk andan itibaren her adımında yardımını hiç esirgemeyen, bilgisini ve tecrübelerini paylaşan, en zor anlarda desteğini esirgemeyen değerli danışmanım Sayın Prof. Dr. Sevil VELİ'ye teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Deneysel çalışmalarım ve tez hazırlama sürecim boyunca yardım ve desteklerinden dolayı sayın Dr. Öğr. Üyesi Melike İŞGÖREN ve Arş. Gör. Mesut SEZER hocalarıma teşekkür ederim.

Hayatımın her anında yanımda olan, hep arkamda duran, verdiğim kararlarda beni destekleyen, düştüğümde kaldıran, tüm bu zorlu süreçte yanımda olup her an bana güven veren sevgili anneme, babama, abilerim Fatih KUŞ ve Bilal KUŞ'a, kuzenim Muhammed Said ASLAN'a sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Ocak-2025

Büşra KUŞ

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI.....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
TABLolar DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER	3
2.1. Tekstil Endüstrisi Hakkında Genel Bilgi	3
2.1.1. Tekstil Endüstrisi Tanımı ve Genel Prosesleri	3
2.1.2. Tekstil Sektörünün Çevresel Etkileri	4
2.1.3. Tekstil Endüstrisinde Atıksu Kaynakları	5
2.1.4. Tekstil Atıksularının Arıtımı Hakkında Bilgi.....	7
2.2. Tekstil Endüstrisi Atıksuları Arıtma Yöntemleri	8
2.2.1. Geleneksel Arıtım Yöntemleri.....	9
2.2.2. İleri Oksidasyon Yöntemleri	12
2.2.3. Elektrokimyasal Arıtma Yöntemleri.....	17
2.2.4. Elektrooksidasyon Prosesinin Performansını Etkileyen Parametreler	22
2.3. Elektrooksidasyonda Kullanılan Elektrotlar	24
2.4. Literatür Çalışmaları.....	26
3. MALZEME VE YÖNTEM	30
3.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler	30
3.1.1. Tekstil Atıksuyu.....	30
3.1.2. Elektrooksidasyon Düzenegi	30
3.1.3. Kimyasal Malzemeler	31
3.1.4. Kullanılan Cihazlar	32
3.2. Yöntem.....	35
3.2.1. Anot Elektrot Kaplanması ve Karakterizasyonu	35
3.2.2. Deneysel Prosedür	35
3.2.3. Elektrooksidasyon Prosesinin Yüzey Yanıt Yöntemi ile Optimizasyonu	38
3.2.4. Renk Ölçümü	40
3.2.5. KOİ Analizi	40
3.2.6. TOK Analizi	41
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	42
4.1. Kaplanmış Anot Elektrotunun Karakterizasyonu.....	42
4.2. BBT Deney Tasarımı ile İstatistiksel Analiz	43
4.2.1. Renk Giderimi	44
4.2.2. KOİ Giderimi.....	50
4.2.3. TOK Giderimi.....	57
4.2.4. Optimizasyon ve Doğrulama Deneyleri.....	63
4.2.5. Spesifik Enerji Tüketimi ve Maliyet Analizi	64

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	65
KAYNAKLAR.....	67
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	81
ÖZGEÇMİŞ.....	82



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Tekstil üretim zinciri	3
Şekil 2.2.	Boyar maddelerin sınıflandırılması	5
Şekil 2.3.	Tekstil atıksuları arıtımında uygulanan yöntemler	9
Şekil 2.4.	Tekstil atıksu tüketimine yönelik arıtma yöntemleri	10
Şekil 2.5.	Elektrokoagülasyonda gerçekleşen etkileşimler	19
Şekil 2.6.	Elektrooksidasyon sisteminin şematik gösterimi	21
Şekil 3.1.	Elektrooksidasyon deney düzeneği	31
Şekil 3.2.	Hassas terazi	32
Şekil 3.3.	pH metre	32
Şekil 3.4.	İletkenlik ölçer	33
Şekil 3.5.	Spektrofotometre	33
Şekil 3.6.	Termoreaktör	34
Şekil 3.7.	TOK Cihazı	34
Şekil 3.8.	a)100 ml ham numune ve b)%50 seyreltilmiş numune	36
Şekil 3.9.	a)Elektrolit türünün renk giderimine etkisi b)NaCl miktarının renk giderimine etkisi	36
Şekil 3.10.	pH ve İletkenlik Ölçümü	37
Şekil 3.11.	a)Elektrooksidasyon deney düzeneği ve b) Şematik gösterimi	37
Şekil 3.12.	Elektrooksidasyon deneyi sonrasında alınan numuneler	38
Şekil 3.13.	Spektrofotometrede numune analizi	40
Şekil 3.14.	Termoreaktör numune analizi	40
Şekil 4.1.	Ti/TiO ₂ -RuO ₂ -IrO ₂ Elektrotunun SEM Görüntüleri	42
Şekil 4.2.	Ti/TiO ₂ -RuO ₂ -IrO ₂ Elektrotunun X-Işınımı Güç Kırınım Grafiği	43
Şekil 4.3.	EO prosesi ile renk giderimi için artıkların normal (%) olasılık değerlerine göre karşılaştırılması	46
Şekil 4.4.	EO prosesi ile renk giderimi için artıkların deney sırasına göre karşılaştırılması	46
Şekil 4.5.	EO prosesi ile renk giderimi için tahmini değerlere karşı gerçek değerlerin dağılımını gösteren grafik	47
Şekil 4.6.	EO prosesi pH-akım yoğunluğu ikili etkileşim grafikleri a) 2D Kontur ve b) 3D Yüzey	48
Şekil 4.7.	EO prosesi pH-zaman ikili etkileşim grafikleri a) 2D Kontur ve b) 3D Yüzey	49
Şekil 4.8.	EO prosesi akım yoğunluğu-zaman ikili etkileşim grafikleri a) 2D Kontur b) 3D Yüzey	50
Şekil 4.9.	EO prosesi ile KOİ giderimi için artıkların normal (%) olasılık değerlerine göre karşılaştırılması	52
Şekil 4.10.	EO prosesi ile KOİ giderimi için artıkların deney sırasına göre karşılaştırılması	53
Şekil 4.11.	EO prosesi ile KOİ giderimi için tahmini değerlere karşı gerçek değerlerin dağılımını gösteren grafik	54
Şekil 4.12.	EO prosesi pH-akım yoğunluğu ikili etkileşim grafikleri a) 2D Kontur b) 3D Yüzey	55
Şekil 4.13.	EO prosesi pH-zaman ikili etkileşim grafikleri a) 2D Kontur b) 3D Yüzey	55

Şekil 4.14.	EO prosesi akım yoğunluğu-zaman ikili etkileşim grafikleri (a) 2D Kontur (b) 3D Yüzey	56
Şekil 4.15.	EO prosesi ile TOK giderimi için artıkların normal (%) olasılık değerlerine göre karşılaştırılması	58
Şekil 4.16.	EO prosesi ile TOK giderimi için artıkların deney sırasına göre karşılaştırması	59
Şekil 4.17.	EO prosesi ile TOK giderimi için tahmini değerlere karşı gerçek değerlerin dağılımını gösteren grafik	60
Şekil 4.18.	EO prosesi pH-akım yoğunluğu ikili etkileşim grafikleri (a) 2D Kontur (b) 3D Yüzey	61
Şekil 4.19.	EO prosesi pH-zaman ikili etkileşim grafikleri (a) 2D Kontur (b) 3D Yüzey	62
Şekil 4.20.	EO prosesi akım yoğunluğu-zaman ikili etkileşim grafikleri (a) 2D Kontur (b) 3D Yüzey	63



TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1.	Tekstil endüstrisinin farklı basamaklarındaki ana kirletici bileşenleri.....	6
Tablo 2.2.	Tekstil Endüstrisi Atıksuyu Arıtma Yöntemleri Avantaj ve Dezavantajları	11
Tablo 2.3.	Radikal türleri	13
Tablo 2.4.	Oksidan ve oksidasyon potansiyelleri	13
Tablo 2.5.	İOP kullanım alanları	14
Tablo 2.6.	Elektrokimyasal Yükseltgenme ve İndirgenme Reaksiyonları.....	18
Tablo 2.7.	Farklı anotlara ait oksijen dönüşüm potansiyelleri	24
Tablo 3.1.	Atıksuyun karakterizasyonu.....	30
Tablo 3.2.	EO deneyi için bağımsız değişkenler	38
Tablo 3.3.	EO Deney Seti.....	39
Tablo 4.1.	EO prosesi ile giderim sonuçları	44
Tablo 4.2.	EO prosesi ile renk giderim ANOVA tablosu	44
Tablo 4.3.	EO prosesi renk giderimi için model istatistikleri.....	45
Tablo 4.4.	EO prosesi ile KOİ giderim ANOVA tablosu	50
Tablo 4.5.	EO için kodlanmış terimler katsayılar tablosu.....	51
Tablo 4.6.	EO Prosesi ile TOK Giderim ANOVA Tablosu	57
Tablo 4.7.	EO için kodlanmış terimler katsayılar tablosu.....	58

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

HCl	: Hidroklorik asit
●OH	: Hidroksil radikali
H ₂ O ₂	: Hidrojen Peroksit
O ₃	: Ozon
IrO ₂	: İridyum dioksit
RuO ₂	: Rutenyum dioksit
NaCl	: Sodyum Klorür
Na ₂ SO ₄	: Sodyum Sülfat

Kısaltmalar

BBT	: Box-Behnken Tasarımı
BDD	: Boron Doped Diamond
EK	: Elektrokoagülasyon
EO	: Elektrokoksiasyon
İOP	: İleri Oksiasyon Prosesleri
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
K.T.	: Kareler Toplamı
O.K.	: Ortalama Kare
S.D.	: Serbestlik Derecesi
SEM	: Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskopisi)
TOK	: Toplam Organik Karbon
VIF	: Variance Inflation Factor (Varyans Enflasyon Faktörü)
YYY	: Yüzey Yanıt Yöntemi

ELEKTROOKSİDASYON YÖNTEMİ İLE Ti/TiO₂-RuO₂-IrO₂ ELEKTRODU KULLANILARAK TEKSTİL ENDÜSTRİSİ ATIKSUYUNUN ARITIMI: BOX BEHNKEN TASARIMI İLE OPTİMİZASYONU

ÖZET

Bu çalışmada, tekstil endüstrisinden temin edilen atıksuyun elektrooksidasyon yöntemi ile arıtımı incelenmiştir. Elektrooksidasyon (EO) prosesinde, anot olarak spreyle kaplama yöntemiyle elde edilen Ti/TiO₂-RuO₂-IrO₂ elektrot ve katot olarak paslanmaz çelik elektrodu kullanılmıştır. Elektrotun yapısı, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve X-Işın Kırınımı (XRD) yöntemleriyle analiz edilmiştir. Tekstil atıksuyunun arıtılmasında kullanılan EO proses parametreleri (pH, akım yoğunluğu, zaman) Box-Behnken Tasarımı (BBT) kullanılarak optimize edilmiştir. EO prosesi ile arıtımda belirlenen bağımsız değişkenlerin etkileri renk, KOİ ve TOK parametreleri üzerinden incelenmiştir.

Elektrooksidasyon deneyleri; farklı pH (3-6-9), akım yoğunluğu (19,34 mA/cm²-38,685 mA/cm²-58,03 mA/cm²) ve sürede (1-3-5 saat) gerçekleştirilmiştir. Box-Behnken Tasarımına göre renk, KOİ ve TOK giderimine yönelik yanıtların R² değerleri 1'e yakın olduğu görülmüş ve ikinci dereceden modellerin güvenilirliğini kanıtlamıştır. EO prosesinde optimum şartlar pH 3, akım yoğunluğu 58,03 mA/cm² ve süre 3 saat olarak belirlenmiştir. Bu şartlarda en yüksek renk giderimi %99, KOİ giderimi %84 ve TOK giderimi %53 olarak gerçekleşmiştir. İşletme maliyeti 6,01 \$(kg.KOİ)⁻¹ olarak hesaplanmıştır. EO prosesi kullanarak atıksu arıtımında spreyle kaplama yöntemi ile elde edilen Ti/TiO₂-RuO₂-IrO₂ anodun başarılı sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Ti/RuO₂-IrO₂ anodunun kullanıldığı EO prosesi, atıksu arıtımı uygulamaları için umut vaat etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Elektrooksidasyon, Paslanmaz Çelik Elektrot, Tekstil Atıksuyu, Ti/TiO₂-RuO₂-IrO₂ Elektrot, Yüzey Yanıt Yöntemi.

TREATMENT OF TEXTILE INDUSTRY WASTEWATER USING Ti/TiO₂-RuO₂-IrO₂ ELECTRODE BY ELECTROOXIDATION METHOD: OPTIMIZATION WITH BOX BEHNKEN DESIGN

ABSTRACT

In this study, the treatment of wastewater obtained from the textile industry by electrooxidation method was investigated. In the electrooxidation (EO) process, Ti/TiO₂-RuO₂-IrO₂ electrode obtained by spray coating method was used as anode and stainless steel electrode was used as cathode. The structure of the electrode was analyzed by Scanning Electron Microscope (SEM) and X-Ray Diffraction (XRD) methods. EO process parameters (pH, current density, time) used in the treatment of textile wastewater were optimized using Box-Behnken Design (BBT). The effects of the independent variables determined in the treatment by EO process were investigated through color, COD and TOC parameters.

Electrooxidation experiments were carried out at different pH (3-6-9), current density (19.34 mA/cm²-38.685 mA/cm²-58.03 mA/cm²) and time (1-3-5 hours). According to Box-Behnken Design, it was observed that the R² values of the responses for color, COD and TOC removal were close to 1 and proving the reliability of the second order models. In the EO process, the optimum conditions were determined as pH 3, current density 58.03 mA/cm² and time 3 hours. Under these conditions, the highest color removal was 99%, COD removal was 84% and TOC removal was 53%. The operating cost was calculated as 6.01 \$(kg.COD)⁻¹. It was observed that the Ti/TiO₂-RuO₂-IrO₂ anode obtained by spray coating method in wastewater treatment using the EO process gave successful results. The EO process using the Ti/RuO₂-IrO₂ anode is promising for wastewater treatment applications.

Keywords: Electrooxidation, Stainless Steel Electrode, Textile Wastewater, Ti/TiO₂-RuO₂-IrO₂ Electrode, Surface Response Method.

1. GİRİŞ

Sanayi devrimi sonrası gelişen endüstri ile birlikte bu endüstriyel faaliyetlerle çevreye verilen zarar günümüze kadar hızla artış göstermiştir. Sanayi ve fabrika atıksularının doğru yapılmayan arıtımı ve deşarjı farklı çevresel ve ekolojik sorunlara yol açmakta, bunun yanı sıra canlı dokusunda birikerek toksik etki yaratmaktadır (Tanrıseven, 2013). Tekstil endüstrisi atıksuları boya ve kimyasal içeren oldukça kompleks ve toksik içeriğe sahip olup, doğru şekilde arıtılması ekolojik denge, canlıların sağlığı, içme suları açısından oldukça önemlidir.

Çeşitli boyama işlemlerinden geçen tekstil endüstrisi kaynaklı atıksuların en önemli parametrelerinden biri renktir ve alıcı su ortamında ekolojik denge ve estetiksel açısından çeşitli problemlere sebep olmaktadır (Özcan, 2016). Biyolojik olarak parçalanamayan boyar maddeler hem insan hem de çevresel açıdan toksik etkiler gösterdiğinden, bu tür atıksuların arıtılması önem arz etmektedir (Yakut, 2017). Tekstil endüstrisi, küresel atıksu üretiminin %20'sinden fazlasını ve küresel karbondioksit emisyonlarının %10'undan fazlasını kapsayarak çevreyi en fazla kirleten ikinci sektördür (Shamsuzzaman ve diğ. 2023; UNCTAD, 2019). Ayrıca, tekstil atıksuları yüksek kirlilik potansiyeline sahip olduğundan suya deşarj edilmeleri durumunda sudaki biyotayı olumsuz etkileyerek canlılara toksik etki yapmakta ve suya ışığın girişini engelleyerek fotosentezi olumsuz etkilemektedir (Tochetto ve diğ., 2022; Mazotto ve diğ., 2021).

Boyama ve tekstil endüstrisi atıksuyunun kompozisyonu, kullanılan boyar maddenin özelliklerine, tipine ve eklenen bileşen konsantrasyonuna göre önemli ölçüde değişmektedir (Gökkuş, 2009; Al-Degs ve diğ., 2000). Tekstil endüstrisi atıksuları kompleks yapıda kirlilikler içerdiğinden arıtımı çok zordur ve her yöntem verimli olmayabilmektedir.

Bazı biyolojik arıtım prosesleri verimli bir arıtım sağlayamamaktadır. Atıksularda boyar madde ve renk gideriminde membran prosesler, fenton prosesi, ıslak oksidasyon, H₂O₂/UV ve O₃ gibi ileri oksidasyon yöntemleri, yanısıra elektrokoagülasyon yöntemleri oldukça etkilidir; ancak bu yöntemler diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında daha yüksek maliyetlere sahiptir (Gökkuş, 2009; Kim ve diğ., 2004).

İleri oksidasyon prosesi, ana oksidan kaynağı olarak üretilen ve organik maddeleri hızlı bir şekilde oksitleyen •OH radikalleri ile boyar madde gibi zor parçalanan kirleticileri gidererek klasik arıtım yöntemlerine de alternatif oluşturmaktadır (Eren, 2009).

Son yıllarda, tekstil endüstrisi atıksularının arıtımında, ileri oksidasyon yöntemlerinden biri olan elektrooksidasyon yöntemi üzerinde araştırmalar artmıştır. Bu proses ile fenol, pestisit, boyar madde ve ağır metal gibi kirletici maddeler içermiş olan atıksuyun arıtımı yapılmakta ve yüksek kirletici gideriminin yanı sıra çamur oluşmamasından dolayı da çevre dostu bir yöntem olduğu görülmektedir (Öztürk, 2022; Soni ve diğ., 2017). Elektrooksidasyon yönteminde, elektronlar kirleticileri direkt mineralize etmektedir (Kaur ve diğ., 2017). Bu yöntem, son dönemlerde kirliliğin gideriminde yüksek verim sağlaması, hızlı oksidasyon oranı ve ikincil kirleticiler oluşturmaması sebebiyle oldukça ilgi görmüştür (Phan ve diğ., 2024). Tekstil atıksuyunda bulunan boyar maddelerin elektrooksidasyon yoluyla giderimi sağlanabilmektedir, bu da elektrokimyasal yollarla oluşan •OH radikallerinin atıksudaki boyar maddeleri oksitlemesiyle gerçekleşmektedir (Öztürk, 2022).

Bu çalışmada tekstil endüstrisi atıksuyunun elektrooksidasyon yöntemi ile arıtımı incelenecektir. Elektrooksidasyon ile arıtımda anot olarak Ti/TiO₂-RuO₂-IrO₂ elektrodu spreyle kaplama yöntemi ile sentezlenecek ve karakterizasyonu yapılacaktır. Reaksiyona etki eden pH, iletkenlik, süre ve akım yoğunluğu parametreleri ile çalışılarak optimizasyon yapılacak ve optimum şartlar belirlenecektir. Sonuçlar renk, KOİ ve TOK parametreleri ile izlenecektir. Daha sonra maliyet analizi yapılacaktır.

2. GENEL BİLGİLER

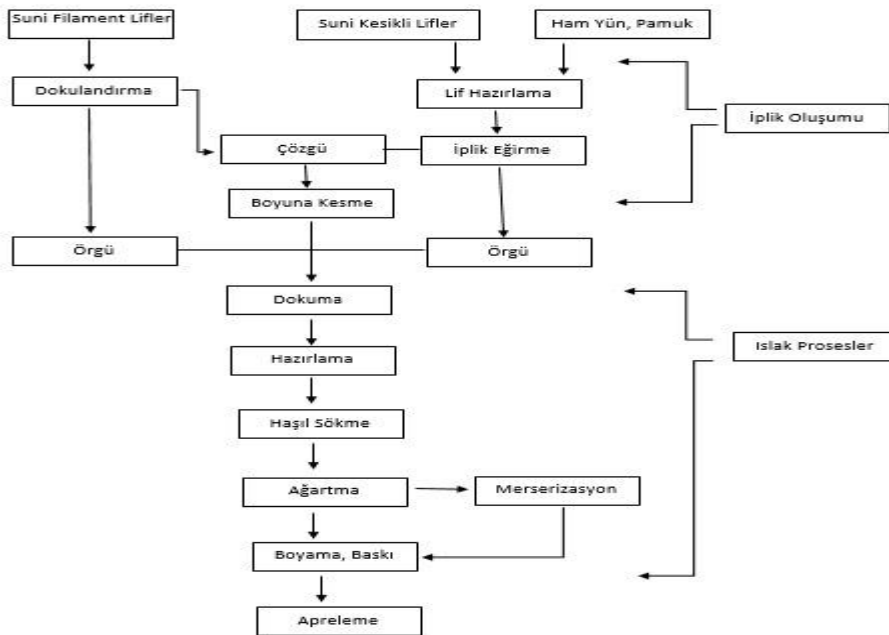
2.1. Tekstil Endüstrisi Hakkında Genel Bilgi

2.1.1. Tekstil Endüstrisi Tanımı ve Genel Prosesleri

Tekstil hayatımızın her alanında ihtiyaç duyduğumuz ürünlerin üretilmesi için gerekli bir sektördür. Gelişen teknoloji ile çalışma alanını oldukça genişletmiş ve çeşitlendirmiştir. Tekstil endüstrisinin çeşitliliği, proses çeşitliliğine de sebep olur; bu endüstri sentetik ve doğal ipleri eğirme, dokuma ve örme, dikim, tekstil ürünleri son işlemleri gibi prosesleri içermektedir (Birgül, 2006).

Tekstil sektörü, birçok alt sektöre sahip heterojen bir yapıdadır ve bu endüstride iplik üretimi; kumaş örme, dokusuz yüzeyli kumaş üretimi, dokuma ve sentetik elyaf üretimi; doğal, sentetik elyaf hazırlama süreçlerini içermektedir (Ardalı, 2021). Tekstil endüstrisinde yapılan işlemler esnasında her bir ıslak işlem sonrasında büyük miktarlarda atık oluşmaktadır (Demir, 2019).

Tekstil Endüstrisi imalat süreçlerinde terbiye, boyama, apreleme ve baskı gibi yaş prosesler ile örme, kurutma, dokuma, fikse, eğirme gibi kuru prosesler yapılmaktadır. Bu işlemler Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. Tekstil üretim zinciri (Ardalı, 2021)

Tekstilde renklendirme asit, baz, azoik, dispers, reaktif ve kükürt boya ları gibi çeşitli boyalar aracılığıyla yapılmaktadır (Hassan, 2023). Bahsedilen işlemlerde asitler, tuzlar, alkaliler, sabunlar, ıslatıcı maddeler, deterjanlar, boyalar, indirgen ve oksitleyici maddeler gibi kimyasalların az bir kısmı kullanılmakta, kalan büyük kısmı ise atıksulara verilerek karışmaktadır (Demir, 2019).

Sulara karışan kimyasal ve boya içerikli atıksular canlı sağlığı ve çevre üzerinde olumsuz etkilere yol açmaktadır.

2.1.2. Tekstil Sektörünün Çevresel Etkileri

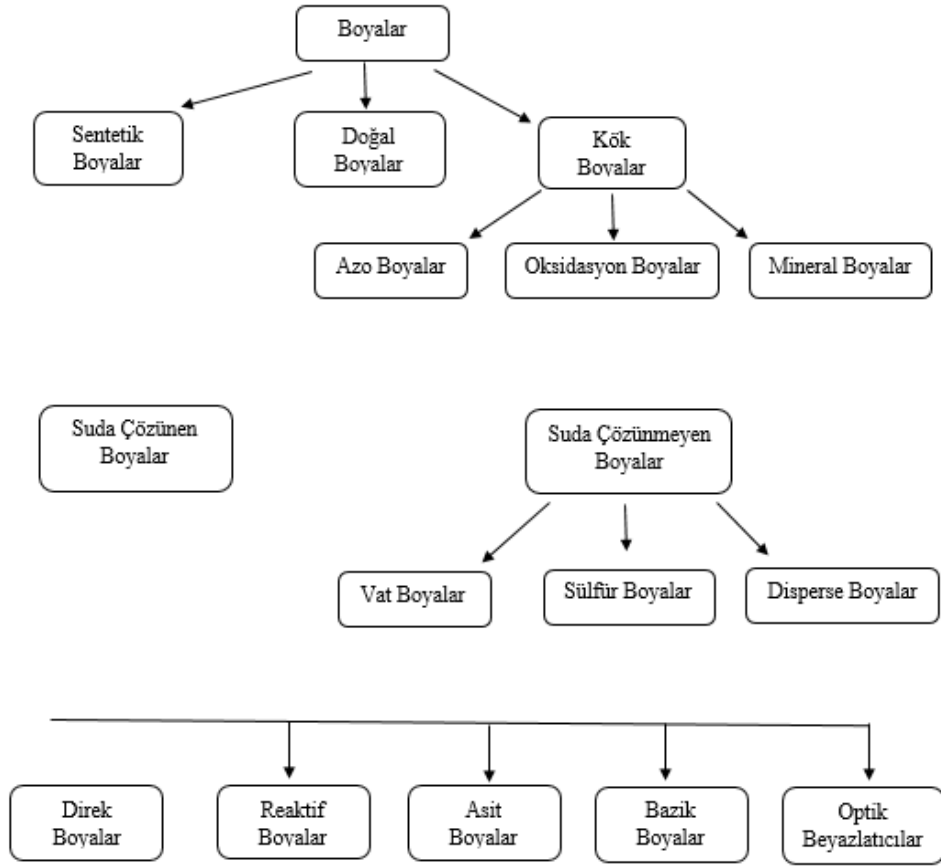
Tekstil üretiminde terbiye kısımlarından, iplik-dokuma-konfeksiyon kısımlarından ve arıtma kısımlarından çıkan katı maddeler katı atıkları, diğer yandan tekstil terbiye kısımlarındaki atıksular sıvı atıkları ve sıvı atıklardaki çözünen kimyasallar ise gaz atıkları oluşturmaktadır (Ashaboğlu, 2012).

Tekstil endüstrilerinden deşarj edilen atıksular; toksisite sebebiyle toprak, su ve yeraltı suyu kirliliğine neden olmakta ve akiferleri kirleten organik ve inorganik maddelerde birikmiş yüksek çözünürlüğe sahip reaktif boya ları içermektedir (Hassanzaadeh ve diğ., 2023; Ma ve diğ., 2017).

Tekstil atıklarının bir kısmının çöplüklerde ayrışması 200 yıldan fazla sürmektedir. Bu atıkların direkt olarak atılması, sızıntı ile sulara karışması toprağın kirlenmesine neden olmaktadır (Lee ve diğ., 2023; Gupta ve diğ., 2019). Ayrıca tekstil atıksuyunda bulunan bazı azoboyalar kanserojen etki yaratabilmektedir (Tao ve Wang, 2023; Chung, 2016). Bu yüzden tekstil atıksularının doğru yöntemle arıtılması çok önemlidir.

Kısaca, tekstil sektörünün yol açtığı sorunları özetleyecek olursak; boya/apre atıkları ekolojik dengeyi bozarak suya, toprağa, bitki ve canlılara zarar vermekte, kanalizasyona verilme durumunda ise yeraltı suları ve toprak kirliliğine sebep olmaktadır (Zengin).

Boyar madde çeşitleri Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Boyar maddelerin sınıflandırılması (Al, 2019)

Çevrede veya vücutta biriken boyalar parçalanarak aromatik aminleri oluşturmakta ve bu aminler, beyin, karaciğer, üreme, merkezi sinir sistemi ve böbrekler gibi iç organlarda mutajenik, alerjenik, teratojenik ve onkojenik etkilere neden olmaktadır (Jadhav ve diğ., 2023; Misha ve Maiti, 2018).

2.1.3. Tekstil Endüstrisinde Atıksu Kaynakları

Tekstil endüstrisi, özellikle yaş dokuma prosesleri gibi adımlar sonucunda tonlarca atıksu ürettiği için en büyük su tüketicilerinden biridir (Sánchez-Arévalo ve diğ., 2024). Tekstil atıksularının içeriklerini; işletme koşulları, proseslerde kullanılan organik ve inorganik bileşikler ve kimyasallar etkilemektedir; bu etkenler ise renk, KOİ, pH ve iletkenlik gibi kirlilik parametrelerini yükseltmektedir (Yıldırım, 2022).

Tekstil Endüstrisinde üretim için kullanılan su miktarı oldukça fazladır ve su kullanımı proses, ekipman tipine, kumaş üretimine ve boyaya bağlı olarak farklılık göstermekte, ayrıca üretimin uzunluğu kullanılan su miktarını etkilemektedir (Arslan ve diğ., 2023; Henrik ve Knudsen, 2005). Tekstil proseslerinin üretimi esnasında açığa çıkan atıksular Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Tekstil endüstrisinin farklı basamaklarındaki ana kirletici bileşenleri (Zengin)

Kirleticiler	Proses	Atıksu Karakteristikleri
Kullanılmayan nişasta bazlı parçalar, İp atıkları	HAŞILLAMA	Yüksek BOİ, Orta KOİ
Amonyak, enzimler, nişasta	HAŞIL SÖKME	Yüksek KOİ, BOİ (%34-50), sıcaklık (70-80 °C)
Dezenfektanlar, insektisit kalıntıları, sürfaktanlar, sabunlar, NaOH	PİŞİRME	BOİ (%30), Yağ asitleri, sıcaklık (70-80 °C), yüksek pH, koyu renk
Hidrojen peroksit, organikler, NaOCl, AOX	BEYAZLATMA	TDS, Yüksek pH
NaOH	MERSERİZASYON	Askıda Katı Madde Yüksek BOİ, yüksek pH,

Tablo 2.1. (Devam) Tekstil endüstrisinin farklı basamaklarındaki ana kirletici bileşenleri		
Tuzlar, sülfür, asidite/alkalinite, renk, formaldehid, metaller,	BOYAMA	Yüksek pH, BOİ (%6), Yüksek toksisite, yüksek çözülmüş katılar
Metaller, renk, üre,	BASKI	Yüksek KOİ, yüksek BOİ, yüksek toksisite, yüksek pH, güçlü renk, yüksek çözülmüş katılar,
Klorlanmış bileşikler, yumuşatıcılar, asetat, harcanan çözenler, reçineler	TERBİYE	Düşük alkalinite, yüksek toksisite, düşük BOİ,

Tekstil üretiminde çeşitli doğal ve yapay elyaflar kullanılmaktadır. Bu doğal lifler ayıklanarak temizlenir, karıştırılır ve eğirme yöntemiyle iplik haline getirilir. Daha sonra bu iplikler renklerle dokuma yardımıyla kumaşa dönüştürülmekte, boyama ve terbiyeyi kapsayan ıslak prosesten geçmektedir (Sharma ve diğ., 2023; Babu ve diğ., 2007). Islak işlem olan haşıl sökme diğer işlemlere göre minimum düzeyde su tüketmektedir (Arslan ve diğ., 2023; Shaikh, 2009).

2.1.4. Tekstil Atıksularının Arıtımı Hakkında Bilgi

Kentleşme süreçleri, imalat faaliyetlerindeki genişleme, evlerdeki kimyasalların kontrolsüz kullanımı ve endüstriyel atıksularda bulunan boya kimyasallarının salınımı, geniş çapta probleme sebep olmaktadır (Norrahma ve diğ., 2023; Salehi ve diğ. 2016). Bu endüstride tüketilen su miktarı oldukça fazladır. Aynı zamanda büyük miktarda atıksu oluşturur; örnek olarak sadece boyama ve terbiye proseslerinde ürünün kilogramı

başına 150-300 L kadar su tüketilmektedir (Mohapatra ve Gosh, 2023; Bili'nska ve diğ., 2016).

Tekstil atıksuları %60 oranında azoboya içermekte ve bunun yanında içerdikleri toksik kimyasallar, bakteri, mantar, inorganik tuzlar nedeniyle endüstriyel atıksular içinde en kirli atıksu çeşididir (El-Liethy ve diğ. 2016; Al-Tohamy ve diğ. 2020). Ayrıca tekstil endüstrisinde çok miktarda çamur oluşmakta ve bu çamurun doğaya bırakılması sakıncalıdır (Paul ve diğ., 2023; Malafaia ve diğ., 2015).

Parçalanması oldukça zor olan maddeler içeren tekstil atıksularının arıtımı için kimyasal fiziksel ve biyolojik arıtma yöntemleri uygulanmıştır özellikle biyolojik arıtım proseslerinin bir kısmı KOİ, bulanıklık, boya gideriminde etkili olmalarına karşın boya gideriminde etkili olamamışlardır (Demiral, 2008). Diğer yöntemlerin yetersiz kaldığı durumlarda kirletici maddelerin bozunmasını sağlamak için hidroksil radikalleri üretmeye dayalı bir yöntem olan ileri oksidasyon prosesleri uygulanır (Bidu ve diğ., 2023; Zazou ve diğ., 2019).

Tekstil endüstrisinde özellikle boyar madde gideriminde fiziksel arıtım (adsorpsiyon, koagülasyon-flotasyon, membran vb.), kimyasal arıtım (ozonlama, kimyasal oksidasyon, elektrokimyasal arıtma vb.) ve biyolojik arıtma (biyosorpsiyon, biyodegradasyon vb.) yöntemleri tercih edilmektedir (Yıldız, 2011). İleri oksidasyon prosesleri, herhangi bir atık oluşturmadığı için çevre dostudur; fakat kimyasal ve yüksek enerji tüketiminden dolayı biraz maliyetli olmaktadır (Bidu ve diğ., 2023; Zazou ve diğ., 2019).

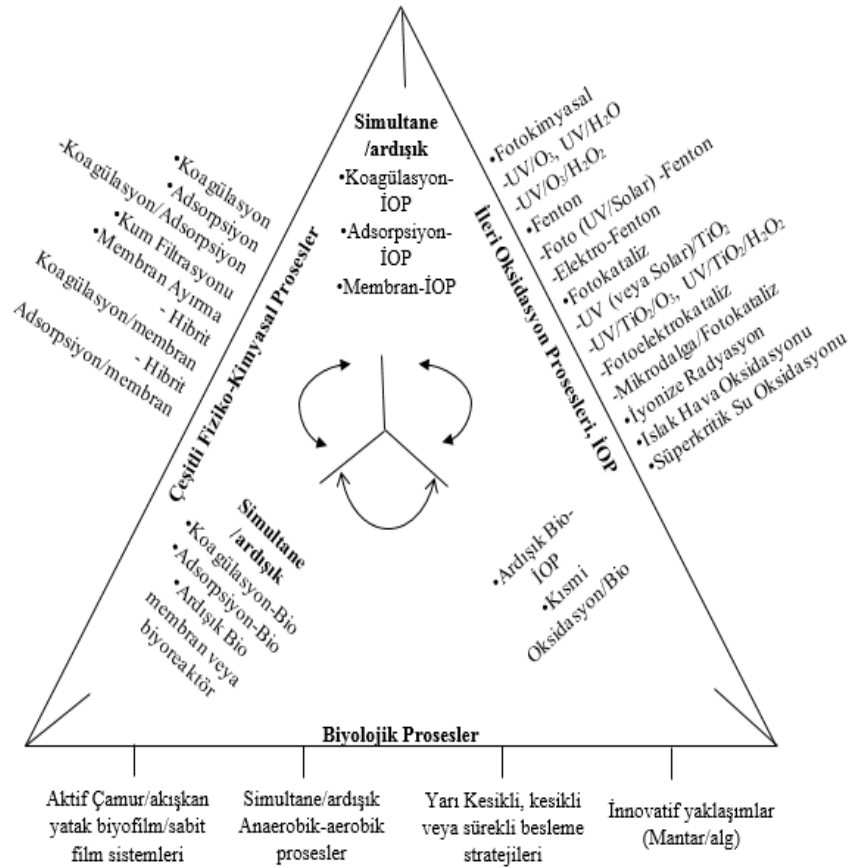
2.2. Tekstil Endüstrisi Atıksuları Arıtma Yöntemleri

Tekstil atıksuyunun arıtılmadan deşarj edilmesi; suyun renk, koku, BOİ, KOİ ve tuzluluk özelliklerini değiştirerek ekolojik tahribata neden olabilmekte ayrıca mutajenik, kanserojen ve doğal genotoksik özelliklerde olup çok geniş ekosistem ve biyolojik topluluk sağlığı açısından tehlike arz etmektedir (Mishra ve diğ., 2023).

Atıksudaki boyanın giderimi için kullanılabilen arıtma yöntemleri ise; fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemlerdir (Fard ve diğ., 2023; Shokri, 2018). Deşarj standartlarının karşılanabilmesi amacıyla fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma yöntemleri

kombinasyonlar oluşturularak da kullanılmaktadır (Yılmaz ve Şahinkaya, 2023; Al-Tohamy ve diğ., 2022). Bu yöntemlerin yanı sıra, İleri oksidasyon prosesleri de hidroksil radikalleri ile kirletici giderimini sağlayan çevre dostu ve geleneksel arıtım yöntemlerine alternatif olan bir yöntemdir (Mohapatra ve Ghosh, 2023; Punzi ve diğ., 2012).

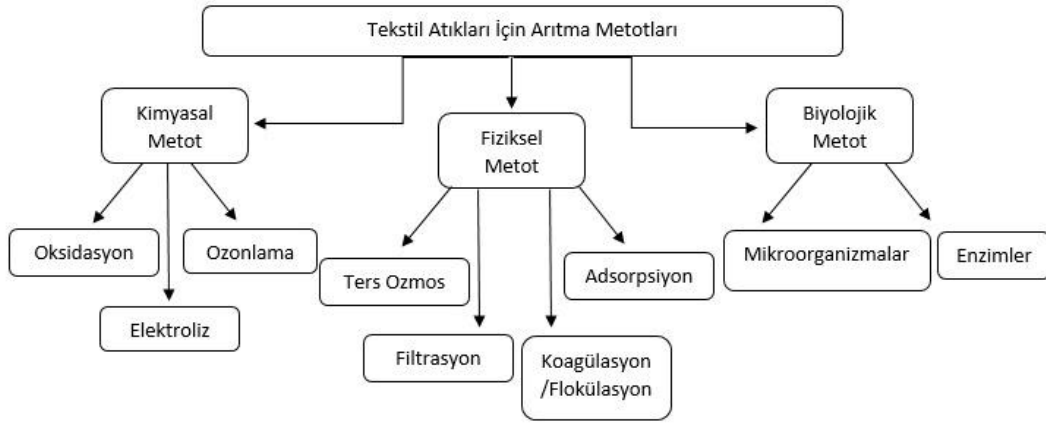
Tekstil atıksularının arıtımında kullanılan kimyasal, fiziksel, biyolojik ve bunun yanı sıra ileri arıtım ve kombine edilmiş arıtma yöntemleri Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3. Tekstil atıksuları arıtımında uygulanan yöntemler (Sarıgüznel, 2023; Hai ve diğ., 2007)

2.2.1. Geleneksel Arıtım Yöntemleri

Tekstil atıksularının arıtımında temel olarak kullanılan fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtım yöntemleri Şekil 2.4'teki şemada verilmiştir.



Şekil 2.4. Tekstil atıksu tüketimine yönelik arıtma yöntemleri (Panhwar ve diğ., 2024)

2.2.1.1. Fiziksel Arıtma Yöntemleri

Fiziksel arıtım yöntemleri membran filtrasyon, adsorpsiyon, koagülasyon, iyon değişimi ve flotasyon gibi fiziksel temelli yöntemlerdir (Tabish ve diğ., 2024). Adsorpsiyon prosesi ile parçalanması zor olan boyar maddeler adsorbanların yüzeyine yapışarak giderilmektedir ve renk gideriminde oldukça etkili bir yöntemdir (Namal, 2017; Şahin, 2006). İyon değişimi yöntemi, bir iyonun başka bir iyonla seçici olarak giderilmesi için kullanılabilirdiği gibi suyu yumuşatmak amacıyla da kullanılmaktadır (Azanaw ve diğ., 2022).

Fiziksel arıtım yöntemlerinin diğer yöntemlere göre bazı avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Düşük maliyeti, basit tasarımı, kullanımı kolay, kimyasal ihtiyacı az olması avantajlarından; çamur ve toksik yan ürün oluşumu ise dezavantajlarındandır (Sarığüznel, 2023).

2.2.1.2. Kimyasal Arıtma Yöntemleri

Kimyasal arıtma yöntemlerine, oksidasyon, ozon, kimyasal çöktürme, Cucurbituril gibi yöntemler örnek olarak verilebilir. Kimyasal oksidasyon prosesinde temel prensip yükseltgenme indirgenme tepkimesine dayanır ve oksidasyonun amacı kirletici maddeyi oksitleyerek kararsız ara ürün ya da son ürünlere dönüştürmesidir (Namal, 2017; Dörtüoöl, 2014). Kimyasal arıtım yöntemlerinde fotokataliz ve membran prosesler birleştirilerek kombine şekilde kullanılabilir (Saleh ve diğ., 2020; Meghwal ve diğ., 2019).

Tekstil boyama atıksularının arıtılmasında fiziksel ve kimyasal yöntemler basit mekanizmaları ve yüksek verimlilikleri sebebiyle yaygın olarak kullanılmakta; fakat bu yöntemlerin de kimyasal tüketimi, yüksek enerji ihtiyacı, yüksek maliyet gibi dezavantajları olabilmektedir (Cui ve diğ., 2023; Samsami ve diğ., 2020).

2.2.1.3. Biyolojik Arıtma Yöntemleri

Biyolojik yöntemler; biyosorpsiyon anaerobik ve aerobik gibi yöntemlerdir. Tekstil endüstrisi atıksularının giderilmesinde, yüksek maliyetli ve uygulama alanları sınırlı olan (her boya için kullanılmadıklarından) fiziksel ve kimyasal yöntemlerin yanında boya türünü atıksudan giderebilen mikroorganizma türlerinin de olduğu biyolojik arıtma yöntemi de bulunmaktadır (Kocaer, 2002). Atıksuyun karakteristiğindeki bileşenlerin dirençli olmasından dolayı biyolojik arıtım yöntemlerini zorlayabilir. Biyolojik olarak parçalanamayan kirleticilerin giderilmesi için biyolojik arıtma ve öncesi ya da sonrasında kimyasal arıtma ile birlikte uygulanabilmektedir (Yılmaz ve Şahinkaya, 2023).

Birçok mikroorganizma, alg, bakteri ve mantar türü atıksudaki boyayı parçalamada yeteneklidir; biyolojik arıtmanın çevre dostu olması, tam mineralizasyon sağlaması, düşük çamur üretimi ve maliyet konusunda rekabetçi olması gibi birçok avantajı mevcuttur (Panhwar ve diğ., 2024; Hayat ve diğ., 2015). Tekstil boyalarının parçalanmasında, biyolojik yöntem ile fizyo-kimyasal yöntemin birlikte kullanılması arıtım verimini arttırmaktadır (Kalia ve diğ., 2023).

Bazı arıtım yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları Tablo 2.2’de karşılaştırılmıştır:

Tablo 2.2. Tekstil Endüstrisi Atıksuyu Arıtma Yöntemleri Avantaj ve Dezavantajları (Türkmenoğlu, 2020)

Sıra	Metot	Avantaj	Dezavantaj
1	Adsorpsiyon	Metal giderim verimliliği yüksek, kinetiği hızlı, kirletici aralığı geniş	Aktif karbon maliyeti yüksek, performansı adsorbana bağlı
2	Koagülasyon	Susuzlaştırma özellikleri, AKM giderimi	Fazla çamur çökmesi, pahalı reaktifler, kimyasal sarfiyatı
3	Membran filtrasyon	Metal boya seçiciliği, küçük alan gereksinimi	Membran kirlenmesi, sermaye maliyeti, bakım, sınırlı akış miktarı, düşük verim
4	Flotasyon	Düşük bekleme süresi	Bakım ve işletme maliyeti

5	Ozonlama	Sabit basınç performansı, konsantrasyon veya katı atık	Karmaşık yapıda olması, belirli uygulamalara göre uyarılma
6	İyon değiştirme	Metal iyonunun seçici olarak uzaklaştırılması	Pahalı (sentetik reçineler), büyük ölçekli uygulama, az miktarda giderilen metal iyonu, bakım ve yüksek işletme maliyeti
7	Buharlaştırma	Yapımı, kolay kullanımı, temizliği ve bakımı kolay	Kuruma ve köpürme
8	Kristalleştirme	Saf ürün eldesi, kristal boyutu kontrol edilebilir	Fazla miktarda kimyasal ihtiyacı

2.2.2. İleri Oksidasyon Yöntemleri

1980'lerin başlarında önce içme suyu arıtımı için önerilip ardından mikrokirletici içerikli atıksuların arıtımında kullanılan ileri oksidasyon prosesleri zararlı ve toksik organik maddeleri daha az zararlı ya da zararsız son ürünlere dönüştürerek gidermektedir (Dilcan, 2019). İleri oksidasyon prosesleri, atıksudaki toksik kirletici maddelerin arıtılmasında oldukça başarılıdır ve geleneksel arıtımın yetersiz kaldığı arıtım problemlerini çözmektedir (Arifin ve diğ., 2023). Ayrıca bu yöntem, tekstil atıksularının KOİ'sini %70-80 oranında azaltmaktadır (Kore ve diğ., 2023; Ghalay ve diğ., 2013). Elektroliz, Fenton benzeri oksidasyon, Fotokataliz, persülfat oksidasyonu gibi ileri oksidasyon proseslerinin toksik ve kirletici maddelerin giderilmesinde etkili olduğu kanıtlanmıştır (Zhai ve diğ., 2022; Shang ve diğ., 2021).

İleri oksidasyon prosesleri seçiciliği az, oksitleme potansiyeli yüksek olan hidroksil ($\bullet\text{OH}$) radikali üretim ve kullanımı gerektirmekte, bu radikaller neredeyse hiç organik madde ayrımı yapmaksızın uygun şartlarda reaksiyona girerek kirletici organik maddelerin mineralize olmasını sağlamaktadır (Yalabık, 2010; EPA, 1998). İleri oksidasyon prosesleri; ozon (O_3), persülfat, hidrojen peroksit (H_2O_2) gibi güçlü oksitleyiciler ile katalizörler ve ışımaya gibi yöntemlerin ve bu yöntemlerin birbirleriyle oluşturulan kombinasyonlarıyla uygulanmaktadır.

Geleneksel arıtım yöntemlerine kıyasla, ileri oksidasyon prosesleri zararlı kirleticileri zararsız son ürünlere dönüştürme ve giderim verimi açısından çok daha başarılıdır (Xie ve diğ., 2023; Xie ve diğ., 2021). Serbest radikaller azot kaynaklı ise reaktif nitrojen türleri (RNT) ve oksijen kaynaklı ise reaktif oksijen türleri (ROT) olarak isimlendirilir,

bunun yanında hidroksil ($\bullet\text{OH}$), alkoksil ($\text{RO}\bullet$), peroksil ($\text{ROO}\bullet$) gibi başka radikaller de mevcuttur (Dilcan, 2019; Karabulut ve Gülay, 2016). Radikal türleri Tablo 2.3'te verilmiştir.

Tablo 2.3. Radikal türleri (Dilcan, 2019; Karabulut ve Gülay, 2016)

RADİKALLER	
Hidroksil	$\text{OH}\bullet$
Süperoksit	$\text{O}_2\bullet^-$
Alkoksil	$\text{RO}\bullet$
Peroksil	$\text{ROO}\bullet$
Hidroperoksil	$\text{HO}_2\bullet$
Lipid Peroksil	$\text{LOO}\bullet$

İleri oksidasyon teknolojileri, tekstil atıksuları için gerekli olan deşarj standartlarının belli aralıklarda olması, artan su kıtlığı nedeniyle su geri kazanımının öneminin artması ve renk parametrelerinin sınırlayıcı olmasıyla yönelinen bir yöntem olmuştur (Süren, 2019). Oksidasyon işlemlerinde kullanılmakta olan elektrokimyasal oksidasyon potansiyelleri (eV) ve oksidanlar Tablo 2.4'te gösterilmektedir.

Tablo 2.4. Oksidan ve oksidasyon potansiyelleri (Gülcan, 2019; CCOT, 1995)

Oksidan	Oksidasyon Potansiyeli (eV)
$\text{HO}\bullet$	2.8*
$\text{Cr}_2\text{O}_7^{-2}$	1.6
O_3	2.1
Cl_2	1.4
O_2	1.2
$\text{HO}_2\bullet$	1.9
H_2O_2	1.8
SO_4^-	2.6**
$\text{S}_2\text{O}_8^{-2}$	2.0
MnO_4^-	1.7

*bazı kaynaklarda 3.2 eV **bazı kaynaklarda 2.4 eV

2.2.2.1. İleri Oksidasyon Prosesleri Uygulama Alanları

İleri oksidasyon prosesleri, suyun yeniden kullanımı ve içme suyu arıtımı amaçlanan tesislerde kullanılmakta olup; su arıtımı için elektron ışını, ultrason, elektrokimyasal tabanlı birçok farklı çeşidi ortaya çıkmıştır (Olabi ve Yıldız, 2021; Stefan, 2017). Tabloda 2.5'te ileri oksidasyon proseslerinin kullanım alanları gösterilmektedir.

Tablo 2.5. İOP kullanım alanları (Olabi ve Yıldız, 2021)

Yüzey Suları	Endüstriyel Çamurlar
Dezenfeksiyon	Evsel Atıksu
Koku ve UOB'ler	Ultra Saf
Yüzme Havuzları	Endüstriyel Atıksu
Yeraltı Suları	Evsel Çamurları
Sızıntı Suları	Su Geri Dönüşüm

Tekstil atıksularında özellikle renk gideriminde fenton prosesi, ozon bazlı ileri oksidasyon prosesleri ve H_2O_2/UV bazlı ileri oksidasyon prosesleri oldukça etkili olmuştur (Bilinska ve Gmurek, 2021). İleri oksidasyon prosesleri, ana arıtım proseslerine ek olarak biyolojik, ultrasonik, ozon gibi yöntemleri ile kullanılarak arıtım verimliliğini arttırmaktadır (Ramanan ve diğ., 2023).

2.2.2.2. İleri Oksidasyon Prosesleri

İleri oksidasyon prosesleri, genellikle aktivatör ve oksidanları temel alarak 3 gruba ayrılmıştır: Bunlar kimyasal bazlı (persülfat, fenton vb.), hibrit (fotoelektron-fenton, foto-elektrokataliz vb.) ve enerji bazlı (termal, ultrason, UV ışınımı vb.) ileri oksidasyon prosesleridir (Lin ve diğ., 2023; Xu ve diğ., 2021).

• Ozonlama

Ozon, elektrokimyasal oksidasyon potansiyelinin (EOP:2.08 V) yüksek olmasından dolayı arıtma teknolojileri içinde önemli bir yere sahiptir. Ozon güçlü bir oksidan ve dezenfektan olmasında dolayı arıtım için çok uygundur, ayrıca birçok kirleticinin parçalanmasını doğrudan veya $\bullet OH$ radikalleri üreterek sağlamaktadır (Fard ve diğ., 2023). Fakat ozonun yüksek maliyetli olması ve organikleri suda kısmen okside etmesinden dolayı tek başına değil de uygun yöntemlerle kullanılması daha verimlidir (Küni ve Gül, 2009).

Atıksudaki kirletici giderim verimini arttırmak amacıyla ozonlama yöntemi ile farklı arıtım yöntemler kombine edilebilmektedir. Özellikle biyolojik arıtım yöntemleriyle

birlikte kullanılan ozonlama yönteminin giderim verimliliğinde artış olduğu görülmektedir (Holkar ve diğ., 2016; Lotito ve diğ., 2012).

- **Fenton**

Fenton, asidik şartlar altında Fe^{+2} iyonu ve hidrojen peroksit reaksiyona girerek H_2O_2 'yi ayrıştırmaya başlayarak kataliz etmesi ve hidroksil radikalleri oluşturması prensibine dayanmaktadır (Gürtekin ve Şekerdağ, 2008). Reaksiyon Denklem 2.1'de verilmiştir.



Fenton prosesleri, pH, reaksiyon süresi, H_2O_2 ve Fe konsantrasyonu gibi faktörlerden etkilenmektedir. Ayrıca reaksiyon esnasında, çökelmeyi önlemek amacıyla optimum pH değeri belirlenmelidir (Gülcan, 2019). Fenton prosesinin hem basit uygulamaya sahip hem de arıtım verimliliği yüksek bir uygulama olduğu görülmektedir.

- **UV/ H_2O_2**

UV/ H_2O_2 prosesi, kombine bir arıtım yöntemidir ve UV ışına ile peroksidin giderim verimi arttırılmıştır. Hidrojen peroksit UV ışığı altında aktif hale geçerek OH^{\bullet} radikallerini oluşturmakta ve bu radikaller de kirletici maddeyi oksitleyerek giderim sağlamaktadır.

OH^{\bullet} radikallerinin oluşumunu gösteren reaksiyon Denklem 2.2 ve 2.3'te verilmiştir.



Bu proses, yüksek konsantrasyonda organik bileşik içeren atıksuların arıtılmasında ozon ve hidroksil radikaline düşük reaktivite göstermektedir ancak belirgin bir fotoaktiviteye sahip olan organik moleküllerin giderilmesinde alternatif bir yöntem olarak görülmektedir (Atalay, 2023).

- **UV/O₃**

Bu reaksiyon UV spektrumunda fotonların su varlığında ozonu, hidrojen peroksite ve oksijene parçalaması yani ozonun fotolizi ile başlar; daha sonra UV, H₂O₂ ya da ozonla reaksiyona girerek hidroksil radikallerinin oluşumunu sağlar (Yalabık, 2010).

UV ile ozon kombinasyonu ile suda bulunan ozonun ışınlanması, H₂O₂ oluşumuna sebep olmakta ve oluşan reaksiyon Denklem 2.4'te gösterilmektedir.



O₃/UV kombinasyonunda UV ışığı ozonun giderim verimini artırır ve hidroksil radikallerinin hızlı bir şekilde, yüksek konsantrasyonlarda oluşmasını sağlar, böylelikle tam mineralizasyon sağlanmaktadır (Atalay, 2023).

- **UV/O₃/H₂O**

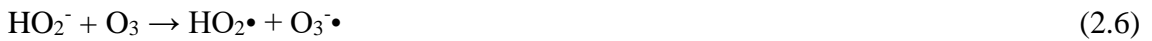
Bu proses, UV/O₃ ve O₃/H₂O₂ yöntemlerinden oluşan kombinasyondur. UV/O₃/H₂O prosesi ile OH• radikalleri ve ortamda bulunan organik kirleticiler fotookside ve mineralize edilmektedir (Çalışkan, 2018).

UV / O₃ / H₂O₂ ana mekanizması Denklem 2.5'te gösterilmektedir.



- **H₂O₂/O₃**

Ozonun arıtımda; farklı proseslerle kullanımı, tek başına kullanımından çok daha verimlidir (Çalışkan, 2018). Reaksiyonda da görüleceği üzere, H₂O₂/O₃ prosesinde H₂O₂, •OH radikalini oluşturmak amacıyla ozonla birleşmekte ve giderim verimi artmaktadır. Reaksiyonlar Denklem 2.6 ve 2.7'de verilmiştir.



- **Foto-Fenton**

Foto-fenton, geleneksel fenton reaksiyonu ile başlar ve yan ürün olarak Ferrik iyonları oluşturur ve bu ferrik iyonları da UV ile fotokimyasal olarak demir iyonlarına dönüştürülmektedir (Mohapatra ve Ghosh, 2023). Denklem 2.8 ve 2.9’da verilmiştir.



UV ışığı varlığında gerçekleşen Fenton prosesi klasik fenton yöntemiyle kıyaslandığında çoğu durumda UV sayesinde daha yüksek giderim verimine sahiptir.

Bu saydığımız yöntemlerin yanı sıra, kombine edilen ve verimliliği artan bazı yöntemler de mevcuttur. Özellikle UV ile birlikte kullanılan farklı kimyasal yöntemler mevcuttur bunlar; UV/fotokatalizi, fotofenton, H₂O₂ fotokatalizi, TiO₂ fotokatalizi gibi arıtma teknikleridir (Bhargava ve diğ., 2023).

Ayrıca İleri Oksidasyon Prosesleri ve biyolojik arıtım yöntemlerinin birleştirilerek kullanılması atıksuların arıtımı konusunda başarı sağlamakta, özellikle endüstriyel atıksularda arıtım yöntemlerinin yetersiz kalması söz konusu olduğunda entegre edilmiş sistemler arıtım verimliliğini arttırabilmektedir (Ponnusami ve diğ., 2023).

2.2.3. Elektrokimyasal Arıtma Yöntemleri

Elektrokimyasal arıtma yöntemlerine, elektrokimyasal tepkimelere dayanan elektrokoagülasyon, elektrooksidasyon ve elektrofenton uygulamaları örnek olarak verilebilir. Bu yöntemler elektrik ile diğer yöntemlerin kombinasyonlarını kapsamaktadır. Elektrokimyasal tepkimelerde, elektrotlar arasındaki iyon alışverişi ile redoks tepkimesi gerçekleşmektedir. Elektrokimyasal prosesler, özellikle tekstil boyama atıksularının arıtılmasında kullanılmakta olup katı, sıvı, gazların işlenmesini de sağlayan çok yönlü bir yöntemdir (Saeed ve diğ., 2023).

Elektroliz işleminin gerçekleşebilmesi için; elektroliz çözeltisinde belirli bir iletkenliğin olması, anot ve katot arasında bir bağlantı bulunması şartlarının sağlanması

gerekmektedir (Kırlaroğlu, 2008). Elektroliz hücresinde anot ve katotta gerçekleşmekte olan reaksiyonlar Tablo 2.6’da verilmiştir.

Tablo 2.6. Elektrokimyasal Yükseltgenme ve İndirgenme Reaksiyonları (Kırlaroğlu, 2008)

Anot Reaksiyonları	Katot Reaksiyonları
• Anot elektron verir.	• Katot elektron alır.
• Anotta yükseltgenme	• Katotta indirgenme
• Anodik çözünme ($Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$)	• Katodik birikme ($Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$)
• Anyonlar anotta toplanır.	• Katyonlar katotta toplanır
• Anolit bölge oluşur.	• Katotta bölge oluşur
• Anotta oksijen: $2H_2O - 4e^- \rightarrow O_2 + 4H^+$	• Katotta hidrojen: $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$
• Klor var ise anotta klor: $2Cl^- - 2e^- \rightarrow Cl_2$	• Gazın indirgenmesi: $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$

Elektrooksidasyon ve elektrokoagülasyon prosesleri ve bunların ayrı veya birlikte kullanıldığı hibrit prosesler çok geniş alanlarda uygulanması ve çevreye uyumlu olmasından dolayı atıksuyun arıtılmasında potansiyel yöntemlerdendir (Asfaha ve diğ., 2021).

Elektrokimyasal ve kimyasal arıtma yöntemleriyle de bazı kombinasyonlar elde edilmektedir. Bu kombinasyonlardan biri elektrokoagülasyon ve ozonun birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Bu kombine yöntemin hem arıtım verimliliği hem de renk giderimi daha yüksektir (Christian ve diğ., 2023). Bir başka kombinasyon örneği, elektrokoagülasyon ve elektrofenton yöntemlerinin birleştirilmesiyle oluşturulmuştur; bu sayede arıtım verimi ve TOK giderimi yükselmektedir (Christian ve diğ., 2023).

Elektrokimyasal arıtma yöntemlerinin diğer arıtma yöntemlerine göre avantaj ve dezavantajları mevcuttur. En önemli avantajları; arıtma sırasında elektronu bir reaktif olarak kullandığından ilave bir kimyasala ihtiyaç duyulmaması, arıtım sonrasında çamur oluşumunun olmaması ve çevre dostu olmasıdır (Al-Tohamy ve diğ., 2022). Dezavantajı ise bazı durumlarda elektrik maliyetinin yüksek olmasıdır.

2.2.3.1. Elektrokoagülasyon

Elektrokoagülasyon, çözülebilen ve pıhtılaştırıcı özellikteki metal bir (genellikle Al veya Fe) elektrota elektrik akımı uygulanarak gerçekleştirilmekte olan bir yöntemdir,

Elektrokoagülasyon yöntemi; kimyasal madde kullanılmaması, çöktürme-karıştırma havuzlarına gereksinim duymaması ve basit tasarımı sayesinde düşük maliyetli olması, oda sıcaklığı ve atmosfer basıncında çalıştırılıyor olması, üretilen çamurun düşük olması gibi avantajları sayesinde oldukça kullanışlı bir arıtım yöntemidir (Yanık, 2023). Elektrokoagülasyon gibi elektrokimyasal yöntemlerin, toksik ara metabolitlerin oluşması, yüksek enerji tüketimi, çamur üretimi gibi dezavantajları mevcuttur (Yakamercan ve diğ., 2023). Ek olarak, çözünen elektrotların yenilenmesi maliyeti, atıksu çözeltisinin yüksek iletkenlikte olması, bazı yerlerde elektrik kullanımının maliyetli olması gibi dezavantajları da vardır.

2.2.3.2. Elektroflotasyon

Elektroflotasyon prosesi, elektrolizden üretilmiş olan oksijen ve hidrojen gazları ile oluşan kabarcıkların kirleticiyi suyun yüzeyinde yüzdürmesi prensibine dayanmaktadır (Güler, 2019). Elektroflotasyon yönteminde gaz kabarcıklarının rolü oldukça önemlidir ve bu gaz kabarcıkları küçük olsa da dispersiyonu oldukça yüksektir. Bu sebeple gaz kabarcıklarının optimum yoğunluğunu sağlamak için parametreler üzerinde oynamalar yapılmaktadır (Çolak, 2017).

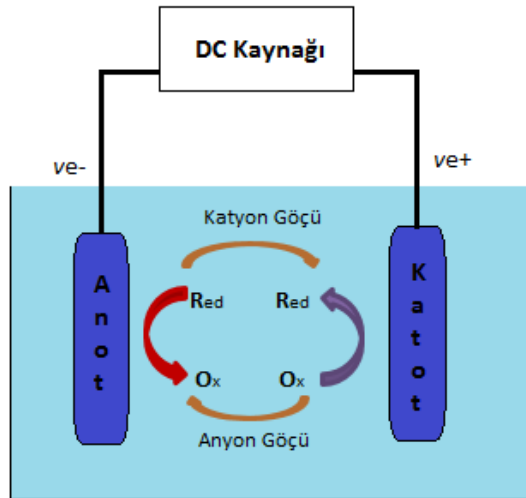
Flotasyon ve elektroflotasyon prosesleri karşılaştırıldığında; parçacık ve kabarcık yapışma olasılığını arttırabilen küçük kabarcıklar üretebilen elektroflotasyon prosesinin daha avantajlı olduğu görülmektedir (Liu ve diğ., 2022). Elektroflotasyon prosesi, elektrokoagülasyon ile bileştirilerek kullanılabilir; Elektrokoagülasyon-flotasyon yönteminde elektrotlar çoğunlukla metaldir, fakat az da olsa metal olmayan elektrotlar ya da metal ve metal olmayan elektrotların karışık çözeltileri de mevcuttur (Visigalli ve diğ., 2021; Kim ve diğ., 2012).

Elektroflotasyon prosesinde elektrotun cinsi, akım yoğunluğu, reaktör tipi ve yüzey alanı oldukça önemlidir ve işletme koşullarının optimizasyonunda pH, elektrotun tipi, sıcaklık, akım gibi parametreler ayarlanmaktadır (Çolak, 2017). Elektroflotasyonda, kimyasal madde ihtiyacı olmadığından ve prosesin basitliğinden dolayı özellikle yağ/gres içeren atıksuların arıtımı için avantajlı bir yöntemdir (Güler, 2019).

2.2.3.3. Elektrooksidasyon

Oksidasyon tepkimeleri prensibi, elektron kaybıdır ve elektrooksidasyon tepkimeleri de elektrokimyasal olarak yürütülen oksidasyon tepkimeleridir, bu yöntem ile zararlı organik maddeler parçalanarak giderilmekte ya da zararlı olmayan organik maddeye dönüştürülmektedir (Yıldız, 2011). Elektrooksidasyon prosesi ise, doğru akım kaynağına bağlı olan bir anot ve bir katot prensibine dayalıdır ve birçok arıtma yönteminden hem daha ucuz hem de daha verimlidir (Bhatt ve diğ., 2023). Elektrooksidasyon prosesi doğrudan ve dolaylı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır Doğrudan elektrooksidasyon elektronların oksitleyici bir anodun yüzeyine doğrudan transferine, dolaylı elektrooksidasyon ise elektroaktif maddeler üretimi prensibine dayanmaktadır (Guo ve diğ., 2022).

Elektrooksidasyon prosesinde elektrotların yükseltgenme ve indirgenmeleri sonucu açığa çıkan O_2 ve H_2 gazları ile oksidasyon sağlanmakta ve bu proseste, elektrot olarak Ti, Au, Pt, Ru, paslanmaz çelik vb. çözünmeyen inert elektrotlar kullanılmaktadır (Soylu, 2023). Bu yöntem ile kirletici maddeler oksidasyona uğrayarak kolay parçalanabilen organiklere ya da zararsız olan H_2O ve CO_2 gibi son ürünlere dönüşmektedir. Elektrooksidasyon yöntemi, geleneksel arıtım ile parçalanamayan boyar madde gibi kirleticilerin giderimi açısından önem kazanmıştır (Rodriguez-Narvaes, 2021; Ganiyu ve diğ., 2021). Elektrooksidasyon prosenin şematik gösterimi Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6. Elektrooksidasyon sisteminin şematik gösterimi (Yadav, 2023)

Atıksuda bulunan organik kirleticiler elektrooksidasyon yöntemi ile karbondioksite mineralize edilir. Mineralize edilen organik maddeler arıtma ve anodik elektron transfer reaksiyonu esnasında oluşan hidrojen peroksit, hidroksiradikaller, hipoklorit, klor vb. kuvvetli oksidantların üretimi ile okside edilir (Solak, 2019; Rajkumar ve Palanivelu, 2007). Elektrokimyasal yöntemin en önemli avantajı, sistemin ekstra kimyasala ihtiyaç duymaması; dezavantajı ise, işletme giderlerinin yüksek olması ve istenmeyen yan ürün oluşumu ihtimalidir (Soylu, 2023).

Elektrooksidasyon prosesinin diğer avantajları (Selki, 2023; Van hege, 2002):

- Oksidasyon işleminin kısa sürmesi,
- Kurulumunun kolay olması,
- Toksik kirletici içeren atıksuların arıtılmasını sağlaması,
- Deney esnasında kontrolünün kolay olması ve etkili sonuçlar alınabilmesi,
- Birden fazla kirlilik yayan maddelerin giderimini sağlayabilmesidir.

Elektrooksidasyonun dezavantajları (Arargüç, 2018):

- Elektriğe bağlı olarak maliyetinin yüksek olabilmesi,
- Arıtılacak suyun belli bir iletkenlikte olmasının gerekmesi,
- Ucuz ve uzun ömürlü elektrotlara ihtiyaç duyulmasıdır.

Elektrooksidasyon prosesinde, anodun katalitik aktivitesi, pH, akım, organik bileşikler, sıcaklık ve diğer oksidantların hızı en etkili parametrelerdendir. Eğer anot yeterli potansiyelde olmazsa ortamdaki klorür iyonları kloro dönüşür ya da organiklerin direkt olarak oksidasyonu gibi ikincil reaksiyonlar oluşur (Soylu, 2023; Fil ve diğ., 2012).

2.2.4. Elektrooksidasyon Prosesinin Performansını Etkileyen Parametreler

Akım Yoğunluğu: Elektrooksidasyon prosesinde akım yoğunluğu çok önemli bir etkidir, çünkü akım yoğunluğunun gerekenden yüksek olması maliyet artışına sebep olacaktır. Akım yoğunluğunun gerekenden düşük olması istenen verimin sağlanamamasına veya istenen verimi sağlaması amacıyla gerekenden uzun reaksiyon süresinin geçmesine neden olacaktır (Gündoğdu, 2022). Bu durumda arıtım süresinin kısaltılması için akım yoğunluğunun artırılması uygun olacaktır.

pH: pH, Elektrooksidasyon prosesinde direkt olarak ortamda oluşan elektrolitik reaksiyonları etkileyen önemli bir parametredir. Hidroksil radikallerinin oluşumu Elektrooksidasyon proseslerini önemli ölçüde etkilemektedir. Serbest halde bulunan OH⁻ lerin radikaller ile birleşmesiyle zamanla pH azalır bu nedenle giderim verimi ilk pH değerine ve son pH değerlerine bağlıdır (Aragüç, 2018).

Ön Arıtım: Ön arıtım yapılması, genel anlamda uygulanan bütün arıtım proseslerinin verimini arttıran bir uygulamadır. Atıksu içerisinde bulunan katı kirleticiler bazı olumsuz durumlara yol açabilmektedir. Bu kirleticiler ortamın direncini arttırarak akım yoğunluğunun verimini düşürür, bu da uygulanan akımın ısıya dönüşerek elektrik maliyetinin artmasına ve arıtma veriminin düşmesine sebep olmaktadır (Elgün, 2022). Bunun yanında ön arıtım yapılarak anotların korozyona uğraması da büyük ölçüde engellenmiş olur.

Elektrot Tipi: Elektrooksidasyon yönteminin temelinde çözünmeyen elektrotlar (Ru, Ti, Pt vb.) aracılığıyla anot alanında açığa çıkan gazlar (O₂, Cl₂), oluşan OH⁻ ve H₂O yardımıyla istenilen oksidasyonun gerçekleşmesi prensibi yer almaktadır (Kaygusuz, 2013). Buradan da anlaşılacağı üzere elektrot tipi, elektrooksidasyon prosesinin verimine etki eden önemli parametrelerdendir. Elektrooksidasyon prosesinde elektrot olarak paslanmaz çelik, Ti/PbO₂, Ti/SnO₂, Ti/IrO₂, gibi elektrotlar kullanılmaktadır.

Arıtım Süresi: Arıtma proseslerinde, giderim verimini etkileyen en önemli parametrelerden biri arıtım süresidir. Bu parametre elektrooksidasyon prosesi için de oldukça önemlidir. Arıtım süresi, hesaplanan süreden kısa olursa arıtımda istenilen verim elde edilemez; uzun tutulursa işletme maliyeti artar. Her iki durum da istenmemektedir (Aragüç, 2018).

Anot Malzemesi: Elektrooksidasyon prosesini etkileyen en önemli etkenlerden biri anot malzemesidir. Kullanılan anot malzemesinin korozyona karşı direnci ve katalitik aktivitesi elektrooksidasyon prosesini büyük ölçüde etkilemektedir. Yüksek oranda organik içeren atıksuların elektrooksidasyonunda farklı malzemeli çeşitli anotlar kullanılmıştır. Bu anotlara bor kaplı elmas (BDD), platin kaplamalı titanyum (Ti/Pt), iridyum oksit kaplamalı titanyum örnek olarak gösterilebilir, ayrıca farklı anotlara ait oksijen dönüşüm potansiyelleri Tablo 2.7'de verilmiştir.

Tablo 2.7. Farklı anotlara ait oksijen dönüşüm potansiyelleri (Kaygusuz, 2013)

Anot Türleri	Değer (V)
Pt	1,3-1,6
Pt-Sn	2,5
Ti ₄ O ₇	2,2
PbO ₂	1,9
SnO ₂	1,9
IrO ₂	1,6
Grafit	1,7
Si/BDD	2,3
Ti/BDD	2,7-2,8

Destek Elektrolit Türü ve Konsantrasyonu: Destek elektrolit türü ve konsantrasyonu elektrooksidasyon prosesini etkileyen başlıca etkenlerden biridir. Elektrooksidasyonda kullanılan elektrolit türleri atıksuyun iletkenliğinin ve prosesin hızının artmasını sağlamaktadır (Selki, 2023; Bhatnagar ve diğ., 2014). Destekleyici elektrolit ilavesi ile bazı kimyasal oksitleticiler oluşmakta ve oksidasyonun gelişmesinde rol oynamaktadır, buna örnek olarak; Na₂SO₄ elektrolit ilavesi sülfat radikali (SO₄²⁻) oluşumuna neden olmaktadır (Erden, 2018).

2.3. Elektrooksidasyonda Kullanılan Elektrotlar

Elektrooksidasyon yönteminde temel prensip, iletken çözeltilinin içine iki adet elektrot ekleyerek doğru akım kaynağı kullanılarak oluşturulan elektrik akımı ile gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonların başlatılması ve hızlandırılmasıdır (Kaygusuz, 2013). Elektrooksidasyon Ti, Pt, paslanmaz çelik, Ru gibi çözünmeyen anot elektrotlarla H₂ ve O₂ gazlarının oluşması sonucunda gerçekleşen bir işlemdir. Bir elektrolit hücresinde gerçekleşmekte olan ve redoks tepkimelerin esas alınmasıyla organik maddenin giderim verimi için kullanılacak anot materyali başlıca rol oynayacağı için anot materyalinin elektrokatalitik özellikleri oldukça önemlidir (Kama, 2019; Garcia-Segura ve diğ., 2018).

Elektrooksidasyon prosesinde anot aktif ve temel rol oynayan bir elektrottur ve elektrooksidasyon prosesinde etkili olan parametrelerden en önemlisi anodun katalitik aktivitesidir (Kahraman, 2019). Elektrooksidasyon prosesinde elektrotlarda kullanılan metallerin katalitik etkisi önemlidir. Bu metal yüzeylerde meydana gelen oksidasyon

doğrudan oksidasyondur ve oluşan oksidasyon reaksiyonları genel olarak aşağıda gösterilen Denklem 2.10 ile 2.16 arasındaki gibi ilerler (Ceylan, 2024).



Elektrooksidasyon prosesinde, elektrot malzeme prosesin verimliliğini büyük ölçüde etkilemektedir. Elektrotun sahip olması gereken özellikler şunlardır (Kaygusuz, 2013; Anglada ve diğ., 2009):

- Maliyeti düşük ve dayanıklılığı yüksek olmalı
- Elektriksel iletkenliği yüksek olmalı
- Seçiciliği ve katalitik aktivitesi olmalı
- Fiziksel ve kimyasal kararlılığa sahip olmalı
- Korozyona karşı dirençli olmalı

Elektrooksidasyon prosesinde kullanılan en önemli anot malzemelere BDD, TiO_2 , PbO_2 , grafit, Pt ve titanyum bazlı alaşımlar örnek olarak gösterilebilir (Santos ve diğ., 2022). Ayrıca anot malzemelere katkılı PbO_2 , SnO_2 ve IrO_2 gibi elektrotlar da eklenebilir, bütün bu elektrotlar elektrooksidasyon ile atıksulardan organik atıkların giderilmesi amacıyla kullanılmaktadır (Türkay ve diğ., 2018).

Elektrooksidasyon prosesinde verimliliği arttırmak amacıyla, PbO_2/Ti , $\text{Ti}/\text{Pt-Ir}$, $\text{Ti}/\text{RhO}_x\text{-TiO}_2$, $\text{TiO}_2/\text{TiRuO}_2$, Ti/Pt gibi anot elektrotları bu şekilde farklı kombinasyonlarda kullanılabilir (Kahraman, 2019). Elektrooksidasyon prosesinde ortama dayanıklı olan çözünmeyen inert metal veya metal alaşımlardan yapılan elektrotlar (Ti/Sn , $\text{Pt}/\text{Ti}/\text{Ir}$, çelik, Ti/Ru vb.) kullanılarak çözünmeyen

metal/metal oksit elektrotlarla ortamdaki kirleticileri okside etmektedir. Diğer taraftan elektrooksidasyon yönteminde en yüksek sonuçların metal oksit anotlar ile alındığı belirtilmektedir (Ayhan, 2022; Carneiro ve diğ., 2018).

Karışık metal oksit (KMO) elektrotların birleşimi yüksek elektrokatalitik verime sahip, düşük maliyetli malzemeler eldesi konularına odaklanarak araştırılmalıdır, buna örnek olarak Ti, Ir, Ru oksitler varlığında ve potansiyellerinin geliştirilmesi üzerinde olumlu etkiler nedeniyle büyük ilgi görmüştür (Kim ve diğ., 2023; Wu ve diğ., 2014).

Elektrooksidasyonda kullanılan anotlardan TiO_2 anot materyalinin son zamanlarda yapılan çalışmalarda umut verici olduğu görülmektedir. TiO_2 anot materyallerinin sabit şekilde kullanılması avantajının yanında pahalı ve pasif olmasıyla birlikte organik bileşiklerin anodik oksidasyonunda düşük verimlilik dezavantajı da vardır (Erden, 2018; Särkkä ve diğ., 2015). Ayrıca anot olarak TiO_2 elektrot materyalleri farklı metal oksitlerin kaplanmasıyla çeşitli oksidasyon potansiyellerine ulaşabilmektedir.

Son yıllarda araştırmacıların, elektrot ömrünü uzatmak için titanyum alt tabaka anot kaplamasına korozyona karşı yüksek dirençli ve yüksek stabiliteye sahip soy metal oksitler ekledikleri görülmektedir (Zhang ve diğ., 2021; Guerrini ve diğ., 2009). Bu sebeple, elektrokimyasal proseslerde kirletici gidermek amacıyla elektrotların yüzeyi TiO_2 , IrO_2 , RuO_2 ve NiO_2 gibi karışık metal oksit ile kaplanarak RuO_2/IrO_2 , RuO_2/TiO_2 ve IrO_2/TiO_2 gibi daha verimli elektrotlar elde edilmektedir (Ebratkhahan ve diğ., 2022).

2.4. Literatür Çalışmaları

Deliktaş ve Yavuz (2021), Reaktif Orange 16 boyar maddesinin Ti/RuO_2 karışık metal oksit elektrot ile elektrokimyasal oksidasyon yöntemi uygulanarak NaCl destek elektrolitinin renk giderimine etkisini araştırmışlar. Çalışma sonucunda, NaCl destek elektrolitinin renk ve toksisite açısından arıtım veriminin yüksek olduğunu görülmüştür. Başlangıç kirlilik derişimi 30 mg/l ve arıtım süresi 20 dk iken ve başlangıç kirlilik derişimi 125 mg/l ve arıtım süresi 40 dk iken de renk giderimi %100 verimle gerçekleşmiştir.

Okur ve ark. (2022), yaptıkları çalışmada tekstil atıksuyunun elektrooksidasyon prosesi ile arıtımı esnasında Ti/RuO₂-IrO₂ ve BDD elektrotlarının performansını incelemiştirlerdir. Çalışmada kullandıkları Ti/RuO₂-IrO₂ elektrotunu termal ayrıştırma yöntemiyle titanyum üzerine RuO₂ ve IrO₂ kaplamasıyla oluşturmuşlardır. Optimum koşullarda her iki elektrot da pH 4'te maksimum verimlilik göstermiştir. En iyi giderim verimliliği 5 saat süreyle 800 A/m² akım uygulanarak elde edilmiş olup, BDD'nin renk giderimi %93, KOİ giderimi %48 ve TOK giderimi %75; Ti/RuO₂-IrO₂'nin renk giderimi %88, KOİ giderimi %41 ve TOK giderimi %62 olarak bulunmuştur.

Pinto ve diğ. (2022), yaptıkları çalışmada yeniden kullanım için uygun kalitede arıtılmış tekstil boyama atıksuyunun (TBA) ve tuzların tamamen geri kazanılmasının sağlanması için BDD anot kullanarak elektrooksidasyonun fizibilitesini değerlendirmişlerdir. Çalışma sonucunda, 60 ve 100 mA/cm²'de 10 saatlik elektrooksidasyonun ardından, KOİ'si sırasıyla 200 mg/l'den düşük ve 50 mg/l'den düşük olan renksiz işlenmiş TBA elde edilmiştir. Elektrooksidasyon, tuz tasarrufunun ve suyun yeniden kullanımının yanında, ekotoksisiteyi 18,6 kata kadar azaltarak TBA'nin ciddi ekotoksisite birikimi olmadan yeniden kullanılmasına olanak sağlamıştır.

Kaur ve diğ. (2018), boyutsal olarak kararlı Ti/RuO₂ anotu kullanarak gerçek tekstil atıksuyunu sürekli reaktörde elektrokimyasal yöntem ile arıtımını incelemiştirlerdir. Optimum çalışma şartlarında pH, akım yoğunluğu, süre, işlem görme süresi parametreleri verilen sıra ile pH=5,54; 1,37 A; 124 dk; 157,6 dk'dır. Bu koşullar altında çalışma sonucunda KOİ giderimi %86,22; renk giderimi %94,74 ve spesifik enerji tüketimi 0,012 kWh olarak bulunmuştur.

Sözüdoğru (2022), sentetik şekilde hazırlanan atıksudan Metilen Mavisi boyasının giderimini, katot malzemesi olarak paslanmaz çelik ve anot malzemesi olarak Ti/IrO₂/RuO₂ kullanarak laboratuvar ölçekli elektrooksidasyon yöntemi ile araştırmıştır. Atıksuyun akım yoğunluğu (1.0 mA/cm², 1.5 mA/cm², 2.0 mA/cm² ve 2.5 mA/cm²), ilk pH değeri (3.0, doğal pH (\approx 5.0), 7.0, 9.0 ve 11.0), destek elektrolit konsantrasyonu (1.0 mM, 1.5 mM, 2.0 mM ve 2.5 mM) ve destek elektrolit türü (NaCl, KCl, Na₂SO₄ ve NaNO₃) değişkenlerinin Metilen Mavisi boyasını giderme verimliliği üzerindeki etkisini incelenmiştir. Akım yoğunluğunun 1 mA/cm²'den 2.5 mA/cm²'ye çıkarılmasıyla Metilen Mavisi yüzdelik giderim verimi %78.31'den %88.98'e arttığı görülmektedir.

Ayrıca 30 dakikalık elektrooksidasyon yönteminde en yüksek giderimin %78.31 değeriyle doğal pH değeri yani ≈ 5 olduğu sonucuna ulaşılmıştır. En iyi destek elektroliti giderim verimi %78.31 olan NaCl elektroliti olduğu belirlenmiş ve NaCl elektrolitinin konsantrasyonunun 1.0 mM'den 2.5 mM'ye arttırıldığında giderim verimi %78.31'den %88.25'e arttığı gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda, anot olarak Ti/IrO₂/RuO₂ kullanılarak Metilen Mavisinin giderilmesinde elektrooksidasyon prosesi oldukça uygun bir yöntem olarak görülmüştür.

Zou ve ark. (2017), gerçek tekstil endüstrisi atıksuyunun elektrokimyasal oksidasyonunu BDD anotu kullanarak gerçekleştirmiş ve çeşitli parametrelerin KOİ giderim verimine etkisini incelemişlerdir. İncelenen parametreler uygulanan akım yoğunluğu (20-100 mA/cm²), pH değeri (2,0-10,0) ve atıksulara eklenen NaCl konsantrasyonu (0-3 g/L) şeklindedir. Bu parametrelerin KOİ oksidasyon kinetiği ve enerji tüketimi üzerindeki etkilerini incelemiştir. Optimum çalışma koşulları olarak pH parametreleri, akım yoğunluğu ve eklenen NaCl konsantrasyonu sırasıyla 2, 60 mA/cm², 3 g/L olarak bulunmuştur. Optimum koşullardaki KOİ gideriminin 3 saat sürede %100 olduğu görülmüştür. Ayrıca özgül enerji tüketiminin 11,12 kWh/kg KOİ olduğu görülmektedir.

Kaur ve ark. (2017), gerçek tekstil atıksuyunun RuO₂ kaplamalı Ti elektrot (Ti/RuO₂) kullanarak elektrooksidasyon ile arıtım performansını ve belirlenen parametrelerin (pH, elektroliz süresi, akım) kimyasal oksijen yüzdesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deneysel tasarımı ve veri analizi için Box-Behnken Tasarımını kullanmışlar. Proses parametrelerinin optimum değerleri pH=5,49; akım=1,66 A ve elektroliz süresi=80 dk olarak bulunmuştur. Optimum parametrelerde yapılan deneyler için renk giderimi, KOİ giderimi ve tüketilen özgül enerji sırasıyla %97,25, %80,0 ve 0,679 Wh olarak hesaplanmıştır.

Aquino ve ark. (2014), gerçek tekstil atıksuyunun Ti-Pt/ β -PbO₂ ve Ti/Ti_{0,7}-Ru_{0,3}O₂ (DSA) anotlarını kullanarak elektrokimyasal yöntem ile giderimini incelemişlerdir. Çalışmada, klor iyonlarının varlığı ve yokluğunda, sıcaklık ve pH parametrelerinin elektrokimyasal hücredeki bulanıklık ve KOİ giderimleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bulanıklık ve KOİ için en iyi giderim nötr ve bazik çalışma koşullarında elde edilmiştir. Bu bazik ve nötr pH ortamında Ti- Pt/ β -PbO₂ anodu daha

yüksek oksidasyon gücüne sahiptir ve KOİ giderim veriminin yüksek olduğu görülmüştür.



3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler

3.1.1. Tekstil Atıksuyu

Deneyde kullanılan atıksu Çorlu (Tekirdağ) ilçesinde yer alan bir tekstil endüstrisinin atıksu arıtma tesisi girişindeki dengeleme tankından alınmıştır. Numunenin renginin koyuluğu içerdiği farklı boyaların karışımından kaynaklanmaktadır. %50 seyreltilmiş atıksuyun karakterizasyonu Tablo 3.1’de verilmektedir. Atıksu numunesi, laboratuvarında +4 °C’de buzdolabında saklanmıştır.

Tablo 3.1. Atıksuyun karakterizasyonu

Parametre	Değerleri
Renk (Pt-Co)	10200
İletkenlik ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	790
pH	7.01
KOİ (mg/l)	2150
TOK (mg/l)	520

3.1.2. Elektrooksidasyon Düzenegi

Elektrooksidasyon deneylerinde kullanılan düzenekte, içerisinde numune bulunan 250 ml’lik cam beher, deney esnasında ısınmanı önlenmek için içerisinde su bulunan başka bir kabın içine konulmuştur. Hazırlanan düzenek MTOPS MS300 HS marka manyetik karıştırıcının üzerine konularak deney süresince karıştırılması sağlanmıştır.

Elektrooksidasyon deneyleri, Tt-Technic RXN 305D II marka güç kaynağı ve manyetik karıştırıcıdan oluşturulan düzenekte gerçekleştirilmiştir. Güç kaynağına bağlı olan kablolar elektrotlara bağlanmış, elektrotlar numunenin içine daldırılarak deneyler yapılmıştır. Bu esnada numune içine balık da eklenerek sürekli karıştırılmıştır. Şekil 3.1’de deney düzenegi verilmiştir.

DAS (demir amonyum sülfat) hazırlanmıştır. Bu çözeltiler hazırlanırken; $K_2Cr_2O_7$, Ag_2SO_4 , H_2SO_4 , $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2 \cdot 6(H_2O)$ kimyasalları kullanılmıştır.

3.1.4. Kullanılan Cihazlar

- Hassas Terazi (Kern Abs (Tip:220-4))

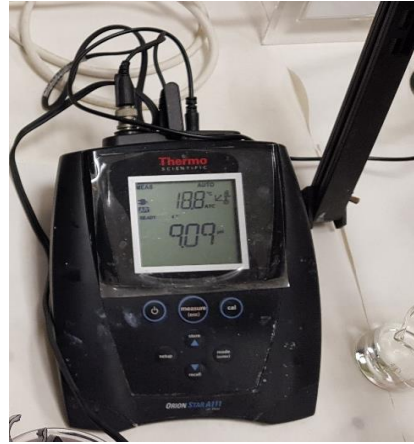
Numuneye ilave edilen NaCl'nin istenen miktarda olmasını sağlamak amacıyla her deney öncesi KERN ABS (Tip:220-4)) marka ve Şekil 3.2'de gösterilen hassas terazide tartılmıştır.



Şekil 3.2. Hassas terazi

- pH metre

Deney öncesi ve sonrası numunenin pH ölçümleri yapmak amacıyla Şekil 3.3'te gösterilen Thermo Scientific ORION STAR A111 marka cihaz kullanılmıştır.



Şekil 3.3. pH metre

- İletkenlik Ölçer

Numunenin NaCl eklendikten önce-sonraki iletkenliği ve deney öncesi-sonrası iletkenliği ölçmek amacıyla Şekil 3.4’de verilen Thermo Scientific ORION STAR A112 marka iletkenlik ölçer kullanılmıştır.



Şekil 3.4. İletkenlik ölçer

- Spektrofotometre

Numunenin başlangıç ve elektrooksidasyon işlemi sonrasında dalga boyları ölçümünü yapmak için Şekil 3.5’teki HACH DR 6000 markalı spektrofotometre kullanılmıştır.



Şekil 3.5. Spektrofotometre

- Termoreaktör

Numunenin elektrooksidasyon işlemi önce-sonrası KOİ'sini ölçmek amacıyla Şekil 3.6'da verilen TR 420 model termoreaktör kullanılmıştır.



Şekil 3.6. Termoreaktör

- TOK Cihazı

Numunenin elektrooksidasyon işlemi önce-sonrası TOK'unu ölçmek için Şekil 3.7'de gösterilen Shimadzu TOC- markalı TOK Cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.7. TOK Cihazı

3.2. Yöntem

3.2.1. Anot Elektrot Kaplanması ve Karakterizasyonu

Elektrooksidasyon prosesinde kullanılan anot elektrotu spreyle kaplama yöntemi ile kaplanmıştır.

Öncelikle belli işlemlere tabi tutulmuş titanyum tabanına; 130 g/l konsantrasyonlu heksakloroiridik asit (H_2IrCl_6), 150 g/l konsantrasyonlu hidroksotriklorür rutenyum ($Ru(OH)Cl_3$) ve 230 g/l konsantrasyona sahip titanyum triklorürden ($TiCl_3$) oluşan termal bozunabilir bir çözelti uygulanmıştır. Daha sonra elektrotun çalışma yüzeyine, hazırlanan çözelti katmanlar halinde ve katman başına 35-45 mL m^{-2} elektrostatik alanda püskürtülmüştür. Her katman uygulandıktan sonra elektrot kurutulmuş ve ilk 3-4 katman için 390-400°C, sonraki katmanlar için ise 420-480°C'de ısıtılma işlemi yapılmıştır.

Elektrot yüzeyine çözeltinin çok katmanlı olarak uygulanması, ağırlıkça %50 oranında TiO_2 ; %30 oranında IrO_2 ; %20 oranında RuO_2 metal oksitlerini içeren elektrokatalitik kaplamalı elektrotların elde edilmesini sağlamıştır. Ardından elektrotun çalışma yüzeyine 100-140 g/m^2 miktarında %25'lik sulu hidrojen peroksit çözeltisi püskürtülmüş ve 460-480°C sıcaklıkta ısıtılma işlemi gerçekleştirilmiştir. Elektrotların mikro yapısı, Jeol JSM-6060 (Akishima, Japonya) kullanılarak SEM analizi ile görüntülenmiştir. Elektrotların nicel faz analizleri X-ışını kırınımı (XRD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizler, Cu-K α radyasyonu ile 10° ile 90° arası ölçüm yapan bir difraktometre (Rikagu, DMax 2200, Akishima-Shi, Japonya) kullanılarak yapılmıştır.

3.2.2. Deneysel Prosedür

Deneysel çalışmada numune hacmi 200 ml olarak kullanılmıştır. Bu numune 100 ml tekstil atıksu üzerine 100 ml saf su ilavesi ile %50 seyreltilerek çözelti hazırlanmıştır. Hazırlanan numune Şekil 3.8'de verilmiştir.



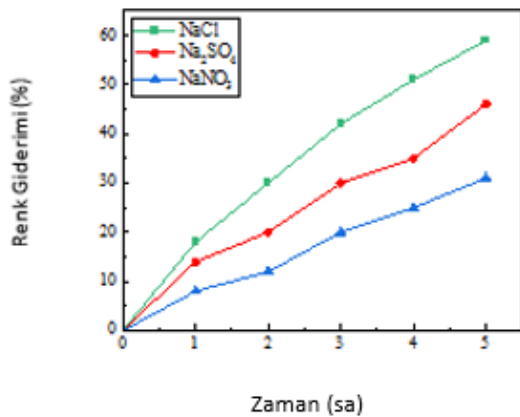
(a)

(b)

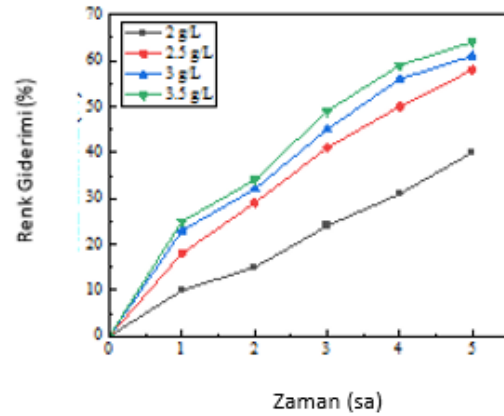
Şekil 3.8. a) 100 ml ham numune ve b) %50 seyreltilmiş numune

Numunenin pH ve iletkenliği ölçülmüş, ardından numunenin iletkenliğini arttırmak amacıyla destek elektrolit numuneye ilave edilmiştir.

Destek elektrolit türünü belirlemek için NaCl, Na₂SO₄ ve NaNO₃ tuzlarının etkileri incelenmiştir (Şekil 3.9.a). Şekil 3.9.a'dan görülmektedir ki, 5 saatlik elektrooksidasyon ile arıtım sonrası renk giderim verimlilikleri NaCl, Na₂SO₄ ve NaNO₃ için sırasıyla %59, %46 ve %31 olmuştur. İletkenliği en çok olan NaCl tuzunun farklı konsantrasyonlarda miktarı incelenmiş ve en yüksek renk giderimi 2,5 g /L NaCl ile sağlanmıştır (Şekil 3.9.b).



(a)



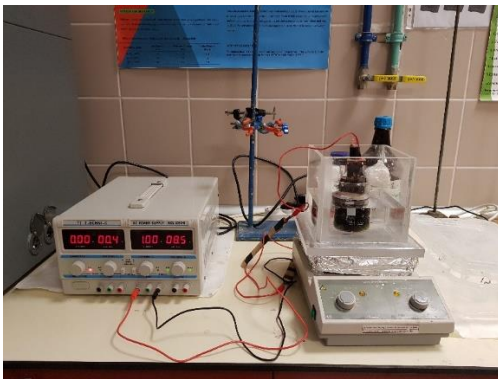
(b)

Şekil 3.9.a) Elektrolit türünün renk giderimine etkisi b) NaCl miktarının renk giderimine etkisi

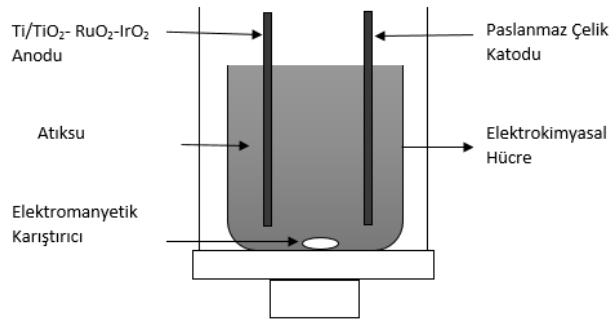


Şekil 3.10. pH ve İletkenlik Ölçümü

Düzeneğe yerleştirilen numunenin deney boyunca reaktör içindeki homojenliğinin sağlanması için balık eklenerek manyetik karıştırıcıyla 100 devir/dakikada karıştırılmıştır. Cihaza bağlı bulunan anot ve katot elektrotları numunenin içine yerleştirilerek önceden belirlenen akım verilmiş, deney setinde belirtilen süre boyunca deney devam etmiştir (Şekil 3.11). Deney boyunca numunenin ısınmasını önlemek için numune dışındaki kaba buz ilave edilmiş ve sıcaklığın bu şekilde sabit tutulması sağlanmıştır.



(a)



(b)

Şekil 3.11. a) Elektrooksidasyon deney düzeneği ve b) Şematik gösterimi

Deney süresi bittiğinde ise, numunenin pH ve iletkenliği ölçülerek renk, KOİ ve TOK ölçümleri yapılmak üzere +4 °C'de muhafaza edilmiştir.



Şekil 3.12. Elektrooksidasyon deneyi sonrasında alınan numuneler

Box-Behnken Tasarımı ile hazırlanan deney setinde belirlenen parametre değerlerine göre 15 tane ayrı deney yapılmıştır. Bu deneylerde pH, akım yoğunluğu ve süre değerleri farklı kombinasyonlarla uygulanmıştır. EO deneylerinin ardından alınan son numuneler renk, KOİ ve TOK ölçümlerine tabi tutulmuştur.

3.2.3. Elektrooksidasyon Prosesinin Yüzey Yanıt Yöntemi ile Optimizasyonu

Yapılan çalışmada, deneysel tasarım için Design Expert programı kullanılmıştır. Bu çalışmada yanıt yüzey yöntemi kapsamında Box-Behnken Tasarımı (BBT) kullanılmıştır. Birçok aşamadan oluşan bu yöntem sırasıyla; tabloya bağımsız değişken ve bu değişkenlerin değer aralıklarının (minimum ve maksimum noktalar) seçilerek girilmesi, deney setinin oluşturulması ve deneylerin bu sete uygun yapılması, deney sonrasında sonuçların programa aktarılarak lineer regresyon oluşturulması, uygunluğunun (anlamlılık) doğrulanması ve grafiklerinin oluşturulması şeklinde uygulanmaktadır.

Elektrooksidasyon deneysel tasarımı için seçilen bağımsız değişkenler; pH değeri, uygulanan akım yoğunluğu ve reaksiyon süresidir. Bağımsız değişken olan parametrelerde seçilen değişim aralık değerleri Box-Behnken tasarımı kullanılarak Tablo 3.2’de gösterilmiştir. Seçilen değer aralıkları; pH için 3-6-9, akım yoğunluğu için 19,34-38,685-58,03 mA/cm² ve süre için 1-3-5 saat şeklinde belirlenmiştir.

Tablo 3.2. EO deneyi için bağımsız değişkenler

Parametreler	Seviyeler		
	-1	0	+1

pH	3	6	9
Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	19,34	38,685	58,03
Süre (saat)	1	3	5

Deneyde kullanılan üç bağımsız değişken için, Box-Behnken tasarımı kullanılarak 15 deney seti oluşturulmuştur. Tablo 3.3'te oluşturulan deney seti verilmiştir.

Tablo 3.3. EO Deney Seti

Deney Numarası	pH	Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Süre, saat
1	3	19,34	3
2	9	19,34	3
3	3	58,03	3
4	9	58,03	3
5	3	38,685	1
6	9	38,685	1
7	3	38,685	5
8	9	38,685	5
9	6	19,34	1
10	6	58,03	1
11	6	19,34	5
12	6	58,03	5
13	6	38,685	3
14	6	38,685	3
15	6	38,685	3

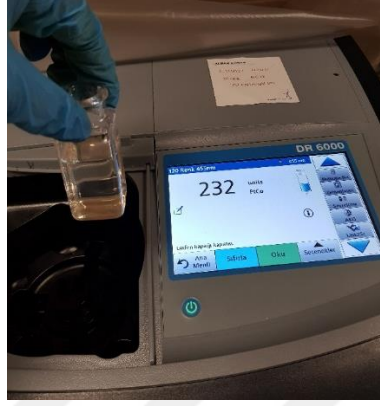
Bağımsız değişkenler ve yanıt değişkeni arasındaki ilişki Denklem 3.1'de gösterildiği üzere ikinci dereceden polinom modeli ile tahmin edilmiştir.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3.1)$$

Y; yanıt, β_0 , β_i ve β_{ij} sırasıyla kesme, doğrusal, ikinci dereceden ve etkileşim için model katsayılarıdır. X_i ve X_j kodlanmış girdi faktörleridir ve ε artıklardır.

3.2.4. Renk Ölçümü

Numuneden 6 ml ve saf sudan 18 ml ekleyerek, 4 kat seyreltilmiş numune elde edilmiş ve seyreltik numune filtre kağıdından geçirilerek küvete konup Şekil 3.13'teki gibi spektrofotometrede ölçülmüştür.



Şekil 3.13. Spektrofotometrede numune analizi

1 ml atıksu ve 29 ml saf su ilave edilerek saf atıksu 30 kat seyreltilmiş ardından süzdürülüp ölçülmüştür. Ölçüm 455 nm dalga boyunda yapılmıştır.

3.2.5. KOİ Analizi

KOİ Ölçümü için; 1,5 ml $K_2Cr_2O_7$, 3,5 ml H_2SO_4 ve 2,5 ml numune kullanılmıştır.

Numune 1/10 oranında seyreltilerek alınmıştır. 3,5 ml H_2SO_4 ve 1,5 ml $K_2Cr_2O_7$ tüpe ilave edilmiştir. Numuneden 1 ml ve saf sudan 9 ml alınarak 1/10 oranında seyreltilerek bu seyreltik numuneden 2,5 ml tüpe eklenmiştir.



Şekil 3.14. Termoreaktör nunume analizi

Her numune için bu şekilde 2 tüp hazırlanmıştır. Numuneden 1 ml ve 9 ml saf su seyreltilerek tüpe eklenmiştir (2'şer tane). 2 tüpe de saf su eklenerek Şekil 3.13'teki termoreaktöre yerleştirilmiş ve 148 °C'de 2 saat işleme tabi tutulmuştur.

3.2.6. TOK Analizi

Cihaz çalıştırılarak öncelikle 3 tüp saf su okutulmuş daha sonra bir numune ardından bir saf su olacak şekilde cihaza yerleştirilmiş ve okuma başlatılmıştır. Cihazın okuması sonrasında sonuçlar alınmıştır.

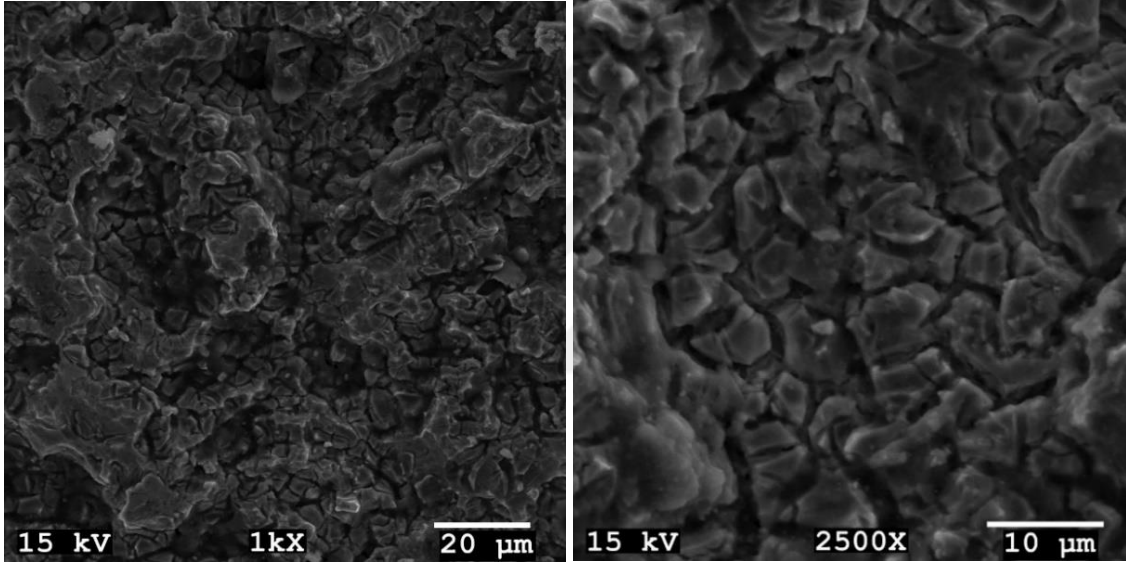


4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Kaplanmış Anot Elektrotunun Karakterizasyonu

Yapılan çalışmada anot olarak kullanılan Ti/TiO₂-RuO₂-IrO₂ elektrotunun metal elektron kaplanmış olması elektrotların stabilitesini ve elektrokatalitik özelliklerini arttırmıştır. Çünkü elektrokatalitik aktivite doğrudan kaplamanın hem yapısını hem de pürüzlülüğünü etkilemektedir.

Kaplanan Ti/TiO₂-RuO₂-IrO₂ anot elektrotunun SEM görüntüleri Şekil 4.1'de verilmektedir.

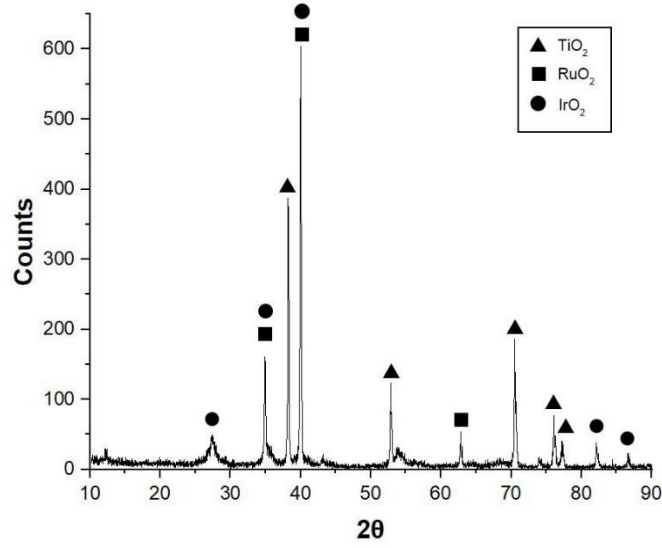


Şekil 4.1. Ti/TiO₂-RuO₂-IrO₂ Elektrotunun SEM Görüntüleri

Şekil 4.1'de görülmektedir ki, Ti substratının metal oksitler ile kaplanması sırasında yüzey pürüzlülüğü artmış ve kristal oluşumları gerçekleşmiştir.

Yüzey pürüzlülüğünün artışı ve kristal oluşumu ise elektrot yüzey alanının artmasına neden olmaktadır.

Ti/TiO₂-RuO₂-IrO₂ elektrotunun kimyasal yapısını ortaya çıkarmak için XRD analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz grafiği Şekil 4.2'de verilmektedir.



Şekil 4.2. Ti/TiO₂-RuO₂-IrO₂ Elektrotunun X-Işınımı Güç Kırınım Grafiği

Şekil 4.2’de görülmektedir ki, Ti alt tabakası üzerine kaplanmış TiO₂, RuO₂ ve IrO₂’nin varlığını kanıtlayan birçok pik mevcuttur. Bazı piklerin birden fazla metal okside karşılık geldiği de gözlenmiştir. Bunun nedeni ise titanyum, iridyum ve rutenyum oksitlerinin aynı rutil benzeri kristal yapıya sahip olmalarıdır.

4.2. BBT Deney Tasarımı ile İstatistiksel Analiz

Box-Behnken Tasarımı (BBT), belirli etkilerin toplanarak hesaplandığı bir matematiksel eşitlik geliştirilmesini de sağlamaktadır. Yani bu bahsedilen, her bir $Y=f(x)$ cevabının A, B ve C bağımsız değişkenlerinin fonksiyonu olarak tahmin edildiği ve eşitliklerde verilen bir sabit, üç birinci dereceden etki (A, B, C), üç kuadratik etki (A^2 , B^2 , C^2) ve üç interaktif (AB, AC, BC) etkinin toplanarak hesaplandığı matematiksel eşitliktir (Kobya ve diğ., 2017). Bu eşitlik renk, KOİ ve TOK giderimleri için ayrı ayrı oluşturulmuştur. Denklemlerdeki A, B ve C sembolleri sırasıyla pH, akım yoğunluğu ve reaksiyon süresi değerleri şeklindedir.

EO prosesi ile tekstil atıksuyunun arıtımını incelemek için toplamda 15 deney gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler, BBT ile hazırlanan deney setine uygun olarak yapılmıştır. Seçilen parametrelerin etkilerinin araştırılması ve deney sonuçlarının görülmesi amacıyla yüzey yanıt yöntemleri tercih edilmiştir. Deney sonuçlarında,

numunenin renk, KOİ ve TOK giderim verimleri hesaplanmıştır. Sonuçlar Tablo 4.1’de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. EO prosesi ile giderim sonuçları

Deney Numarası	pH	Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Süre, saat	Renk Giderim Verimi (%)	KOİ Giderim Verimi (%)	TOK Giderim Verimi (%)
1	3	19,34	3	48	29	18
2	9	19,34	3	35	23	16
3	3	58,03	3	99	84	53
4	9	58,03	3	80	57	35
5	3	38,685	1	75	50	32
6	9	38,685	1	55	35	25
7	3	38,685	5	90	79	50
8	9	38,685	5	83	62	41
9	6	19,34	1	24	11	6
10	6	58,03	1	85	62	43
11	6	19,34	5	60	42	29
12	6	58,03	5	89	79	48
13	6	38,685	3	78	55	33
14	6	38,685	3	80	57	35
15	6	38,685	3	77	56	34

4.2.1. Renk Giderimi

Elektrooksidasyon prosesi ile renk giderimi sonuçları istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve BBT ile Anova Analizi oluşturulmuştur. Anova Analizi Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. EO prosesi ile renk giderim ANOVA tablosu

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi (df)	Ortalama Kare	F-Değeri	p-Değeri	İstatistiksel Anlamlılık
Model	6466,32	9	718,48	267,76	< 0,0001	Anlamlı
A-pH	435,13	1	435,13	162,16	< 0,0001	
B-Akım Yoğunluğu	4324,50	1	4324,50	1611,61	< 0,0001	
C-Süre	861,13	1	861,13	320,92	< 0,0001	
AB	9,0	1	9,0	3,35	0,1265	
AC	42,25	1	42,25	15,75	0,0107	
BC	256,00	1	256,00	95,40	0,0002	
A ²	2,31	1	2,31	0,86	0,3957	

B ²	535,39	1	535,39	199,52	< 0,0001	
C ²	11,85	1	11,85	4,42	0,0896	
Artık	13,42	5	2,68			
Uyumsuzluk	8,75	3	2,92	1,25	0,4733	Anlamsız
Saf Hata	4,67	2	2,33			
Toplam	6479,73	14				

Tablo 4.2’de p-değerinin 0,05’in altında olması modelin “anlamli” olduğunu göstermektedir. Tabloya göre, p-değerinin <0,0001 olduğu görülmektedir, bu değerin istatistiksel açıdan anlamlı olduğunu göstermektedir. Modelin F değeri 267,76 istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. Buna bağlı pH, akım yoğunluğu, süre, pH-süre, akım yoğunluğu-süre ikili etkileşimleri ve karesel akım yoğunluğu anlamlıdır.

Tablo 4.2’de model uyumsuzluğu da verilmiştir; model uyumsuzluğunun anlamsız olması istenmektedir. EO prosesi renk giderimi için model uyumsuzluğu F-Değeri 1,25 ve p-Değeri 0,4733 olduğu belirlenmiştir. p-değerinin 0,05’den yüksek olması model uyumsuzluğunun anlamsız olduğunu göstermektedir.

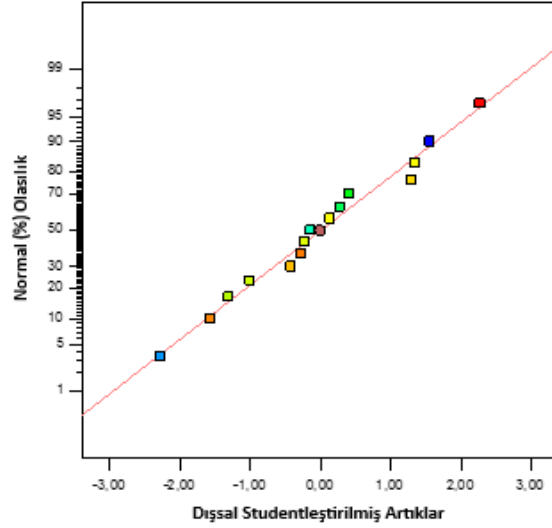
EO prosesi renk giderimi için bulunan model istatistikleri sonuçları Tablo 4.3’te verilmiştir.

Tablo 4.3. EO prosesi renk giderimi için model istatistikleri

Model İstatistikleri	
Standart Sapma	1,64
Ortalama	70,53
%C.V.	2,32
R ²	0,9979
Adj-R ²	0,9942
Pre-R ²	0,9768
Adeq Pre	55,888

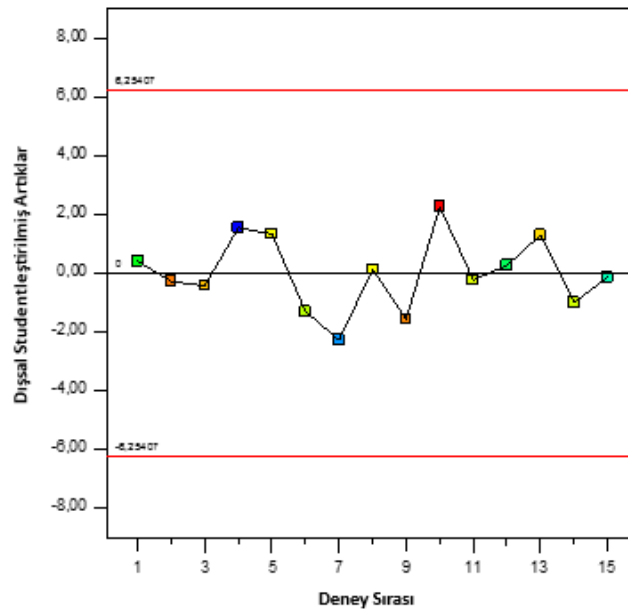
Tablo 4.3’te R² değerinin 0,9979 olduğu görülmekte, bu değerin 1’e yakın olması modelin yeterliliğini doğrulamaktadır. Adj-R² ve Pre-R² değerleri ise sırasıyla 0,9942 ve 0,9768 şeklindedir. Bu değerlerin 1’e yakın olması, modelin tahminleri ve deneysel sonuçların birbiriyle tutarlı olduğunu göstermektedir. %C.V. değerinin %10’dan küçük olması istenmektedir. Tablo 4.3’te verilen %C.V. değeri 2,32’dir yani istenen değer aralığındadır.

EO prosesi ile renk giderimi için artıkların normal % olasılık değerlerine göre karşılaştırmaları Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. EO prosesi ile renk giderimi için artıkların normal (%) olasılık değerlerine göre karşılaştırılması

Artıkların dağılımının çizgi etrafında ve normal dağılıma uyduğu ise Şekil 4.3'te görülmektedir. EO prosesi ile yapılan deneylerdeki renk giderimleri için deney sırasına göre istatistiksel karşılaştırması Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. EO prosesi ile renk giderimi için artıkların deney sırasına göre karşılaştırması

Şekil 4.4'te görüldüğü üzere, tüm artıklar 0 çizgisinin etrafında rastgele dağılmışlardır ve bu durum normal dağılıma uygundur. Ayrıca, artıkların dış limitlerin ($-6,25407 < \text{artık} < 6,25407$) dışına çıkmaması modelin uygunluğunu desteklemektedir.

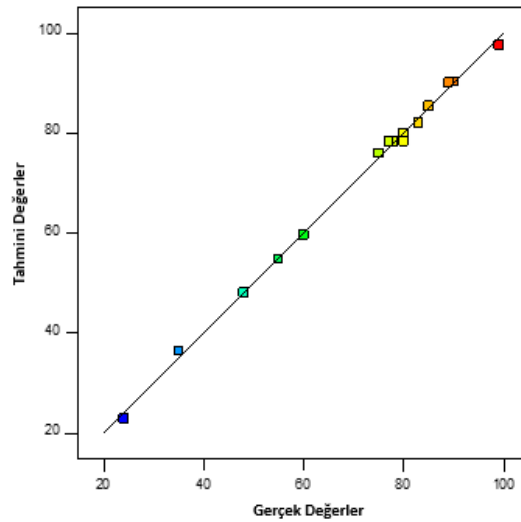
Design Expert 10.0.4 yazılım programının Box-Benken tasarımı kullanılarak renk giderimi için kodlanmış faktörler denklemi ve gerçek faktörler denklemi sırasıyla Denklem 4.1. ve Denklem 4.2.'de verilmiştir.

$$\text{Renk Giderimi (\%)} = +78.33 - 7.38A + 23.25B + 10.38C - 1.50AB + 3.25AC - 8.00BC - 0.79A^2 - 12.04B^2 - 1.79C^2 \quad (4.1)$$

$$\text{Renk Giderimi (\%)} = -44,57142 - 2,02791 \times \text{pH} + 4,46681 \times \text{Current Density} + 12,62397 \times \text{Time} - 0,025846 \times \text{pH} \times \text{Current Density} + 0,54167 \times \text{pH} \times \text{Time} - 0,20677 \times \text{Current Density} \times \text{Time} - 0,087963 \times \text{pH}^2 - 0,032177 \times \text{Current Density}^2 - 0,44792 \times \text{Time}^2 \quad (4.2)$$

Denklem 4.1'e göre; pH'ın renk giderimine negatif etkisi olmuşken, akım yoğunluğu ve sürenin pozitif etkisi olmuştur. Denklem 4.2'ye göre de pH'ın negatif, akım yoğunluğu ve sürenin pozitif etkisi olmuştur.

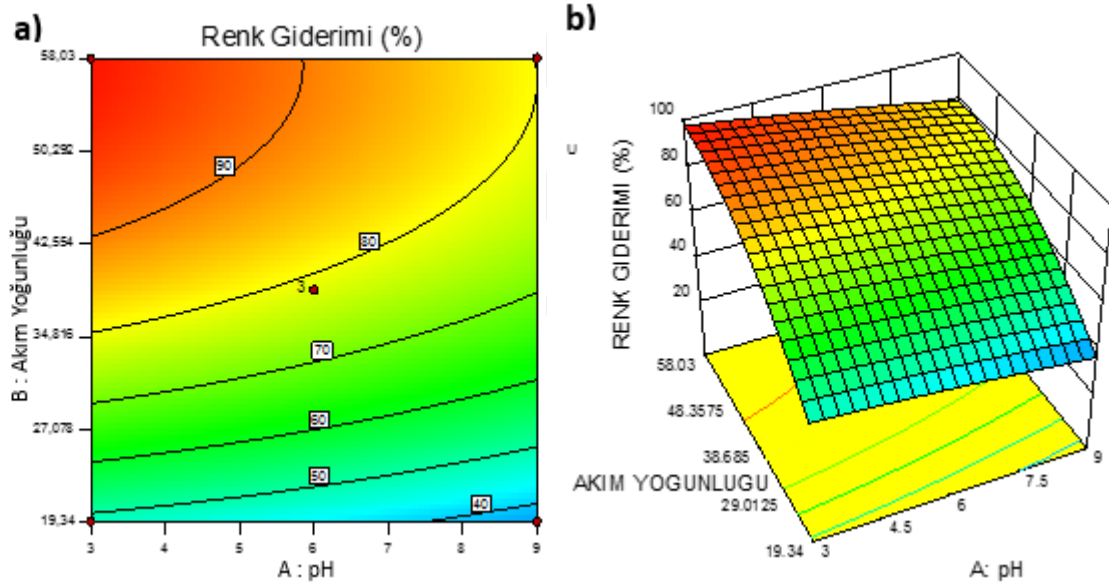
EO prosesi ile yapılan deneylerin sonucunda elde edilen renk giderim verimlerinin, program tarafından önerilen tahmin değerlerinin karşılaştırıldığı Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. EO prosesi ile renk giderimi için tahmini değerlere karşı gerçek değerlerin dağılımını gösteren grafik

Şekil 4.5'te görüldüğü üzere, noktalar düz bir doğru çevresinde toplanmıştır. Bu grafiğe göre; renk giderim verimleri %24-99 aralığında dağılım göstermektedir. Tüm veriler, 45 derece çizgisinin etrafında rastgele dağılmış olduğundan tahminlerin yüksek doğrulukta olduğu görülmektedir.

Elektrooksidasyon prosesinin deney tasarımında belirlenmiş olan parametreler pH, akım yoğunluğu ve sürenin renk giderimi üzerindeki ikili etkileşimlerini gösteren 2D kontur ve 3D yüzey grafikleri Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de verilmiştir. Cevap yüzey grafiklerinde, bir faktör sabit tutularak diğer iki faktörün birlikte etkisi incelenmiştir. Şekil 4.6'da verilen 2D kontur ve 3D yüzey grafiklerinde pH ve akım yoğunluğunun renk giderimine etkisi gösterilmektedir.

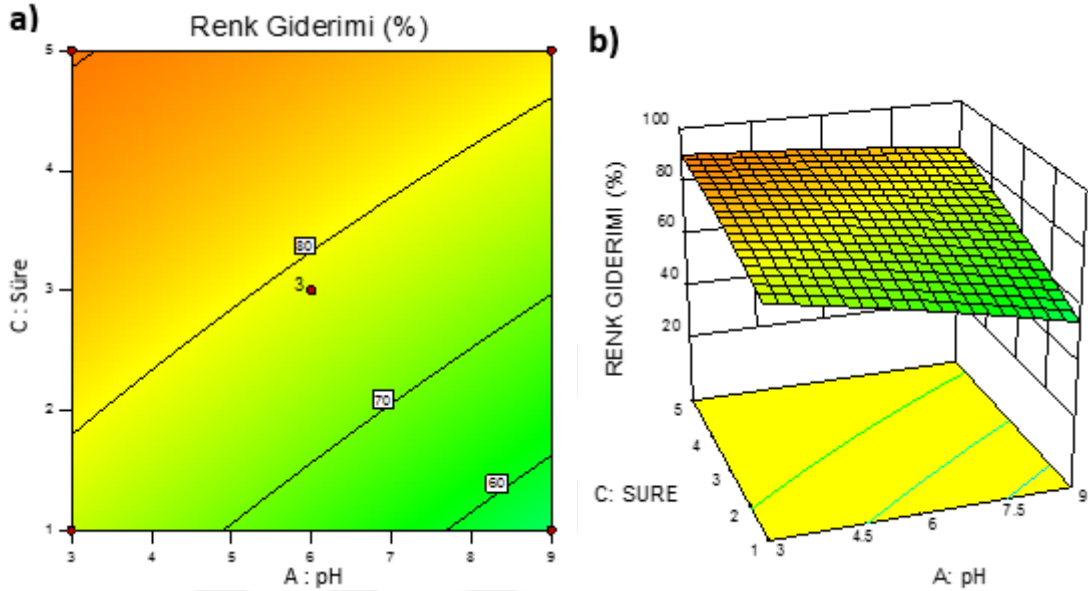


Şekil 4.6. EO prosesi pH-akım yoğunluğu ikili etkileşim grafikleri a) 2D Kontur ve b) 3D Yüzey

Şekil 4.6'da verilen grafiklerde görüldüğü üzere süre sabit tutulduğunda, pH değeri azaldıkça ve akım yoğunluğu arttıkça renk giderimi verimi artmıştır. pH 3'te akım yoğunluğunun 19,34 mA/cm²'ten 58.03 mA/cm²'e yükselmesiyle renk giderimi %48'den %99'a çıktığı görülmektedir. Düşük pH'larda renk gideriminin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu da kloro aktif türlerin ve hidroksil radikallerinin oluşmasına bağlıdır (Çakır, 2023). Akım yoğunluğundaki artış, oksitleyici radikallerin miktarını arttırmakta; dolayısıyla, akım yoğunluğu arttıkça renk giderim verimi de artmaktadır

(Günaslan ve Fil, 2023; Jalife-Jacobo ve diğ., 2016). Deney seti içerisindeki en düşük renk giderimi pH 9 ve akım yoğunluğunun 19,34 mA/cm² olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 4.7’de verilen 2D kontur ve 3D yüzey grafiklerinde pH ve zaman değişimlerinin renk giderimine etkisi gösterilmektedir.

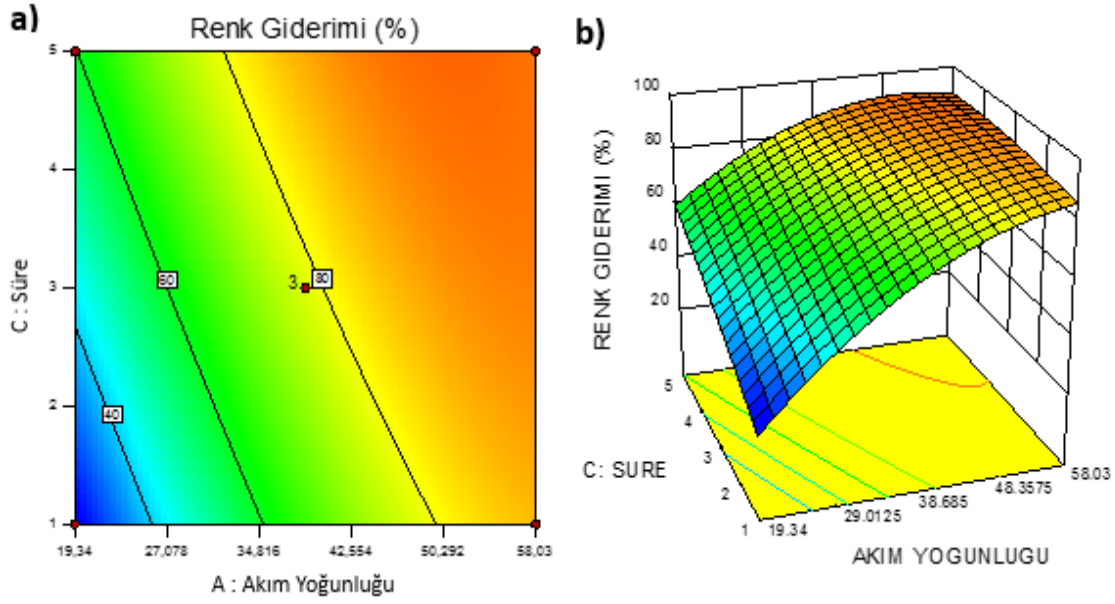


Şekil 4.7. EO prosesi pH-zaman ikili etkileşim grafikleri a) 2D Kontur ve b) 3D Yüzey

Şekil 4.7’de görüldüğü üzere akım yoğunluğu sabit tutularak, süre ve pH’ın etkisi gözlemlenmiştir. Buna göre; pH değeri düştükçe ve süre arttıkça renk giderim verimi artmıştır. pH 3’te sürenin 1 saatten 5 saate yükselmesiyle renk giderimi %75’ten %90’a çıktığı görülmektedir. pH değerleri arttıkça anot yüzeyindeki OH• radikallerinin adsorpsiyon oranı azalmakta bu yüzden reaksiyonda oluşan OH• radikalleri, daha düşük oksidasyon potansiyelli oksidantlara dönüşmektedir (Kama, 2019).

Bunun sonucunda pH düştükçe giderim verimleri artmaktadır. Deney seti içerisindeki en düşük renk giderimi pH 9 ve sürenin 1 saatte olduğu durumda gözlemlenmiştir.

Şekil 4.8’de verilen 2D kontur ve 3D yüzey grafiklerinde akım yoğunluğunun ve zamanın renk giderimine etkisi gösterilmektedir.



Şekil 4.8. EO prosesi akım yoğunluğu-zaman ikili etkileşim grafikleri a) 2D Kontur b) 3D Yüzey

Şekil 4.8’de pH sabit tutularak, süre ve akım yoğunluğunun etkisi gözlemlenmiştir. Buna göre; süre ve akım yoğunluğu arttıkça renk giderim verimi artmıştır. Akım yoğunluğu 58,03 mA/cm²’de sürenin 1 saatten 5 saate yükselmesiyle renk gideriminin %85’ten %89’a çıktığı görülmektedir. Elektrooksidasyon prosesinde akım yoğunluğu tepkime hızını etkileyen önemli bir etkindir ve proses süresini kısaltmaktadır (Tosun, 2022). Deney seti içerisindeki en düşük renk giderimi akım yoğunluğunun 19,34 mA/cm² ve sürenin 1 saat olduğu durumda gözlemlenmiştir.

4.2.2. KOİ Giderimi

Elektrooksidasyon işlemi ile KOİ giderimi sonuçları istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve Box-Behnken Tasarımı ile Anova Analizi oluşturulmuştur. Anova Analizi Tablo 4.4’te verilmiştir.

Tablo 4.4. EO prosesi ile KOİ giderim ANOVA tablosu

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi (df)	Ortalama Kare	F-Değeri	p-Değeri	İstatistiksel Anlamlılık
Model	6190,68	9	687,85	335,54	< 0.0001	Anlamlı
A-pH	528,13	1	528,13	257,62	< 0.0001	

B-Akım Yoğunluğu	3916,12	1	3916,12	1910,30	< 0.0001	
C-Süre	1352,00	1	1352,00	659,51	< 0.0001	
AB	110,25	1	110,25	53,78	0,0007	
AC	1,00	1	1,00	0,49	0,5160	
BC	49,00	1	49,00	23,90	0,0045	
A ²	0,058	1	0,058	0,028	0,8733	
B ²	228,98	1	228,98	111,70	0,0001	
C ²	0,52	1	0,52	0,25	0,6362	
Artık	10,25	5	2,05			
Uyumsuzluk	8,25	3	2,75	2,75	0,2779	Anlamsız
Saf Hata	2,00	2	1,00			
Toplam	6200,93	14				

Hesaplama Design Expert programı tarafından Tip I- kısmi kareler toplamı kullanılmıştır. Tablo 4.4'te görülmekte olan p-değerinin 0,05'in altında olması modelin "anlamlı" olduğunu göstermektedir. Tablo 4.4'e göre, p-değerinin <0.0001 olduğu görülmektedir, bu değer istatistiksel açıdan anlamlı olduğu görülmektedir. Modelin F değeri 335,54 istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. Buna bağlı, pH, akım yoğunluğu, süre, pH-akım yoğunluğu, akım yoğunluğu-süre ikili etkileşimleri ve karesel akım yoğunluğu anlamlıdır.

Tablo 4.4'te model uyumsuzluğu da verilmiştir; model uyumsuzluğunun anlamsız olması istenmektedir. EO prosesi KOİ giderimi için model uyumsuzluğu F-Değeri 2,75 ve p-Değeri 0,2779 olduğu belirlenmiştir. p-değerinin 0,05'den yüksek olması model uyumsuzluğunun anlamsız olduğunu göstermektedir.

EO prosesi için bulunan model istatistikleri sonuçları Tablo 4.5'te verilmiştir.

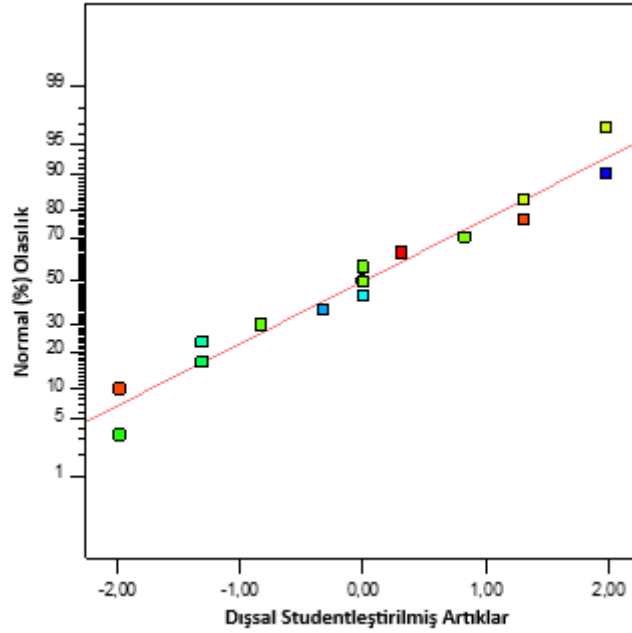
Tablo 4.5. EO için kodlanmış terimler katsayılar tablosu

Model İstatistikleri	
Standart Sapma	1,43
Ortalama	52,07
%C.V.	2,75
R ²	0,9983
Adj-R ²	0,9954
Pre-R ²	0,9780
Adeq Pre	63,193

Tablo 4.5'te verilen R^2 değerinin 0,9983 olduğu görülmüştür. Bu değer 1'e yakın olması modelin yeterliliğini doğrulamaktadır. Adj- R^2 ve Pre- R^2 değerleri ise sırasıyla 0,9954 ve 0,9780 şeklindedir. Bu değerlerin 1'e yakın olması, modelin tahminleri ve deneysel sonuçların birbiriyle tutarlı olduğunu göstermektedir.

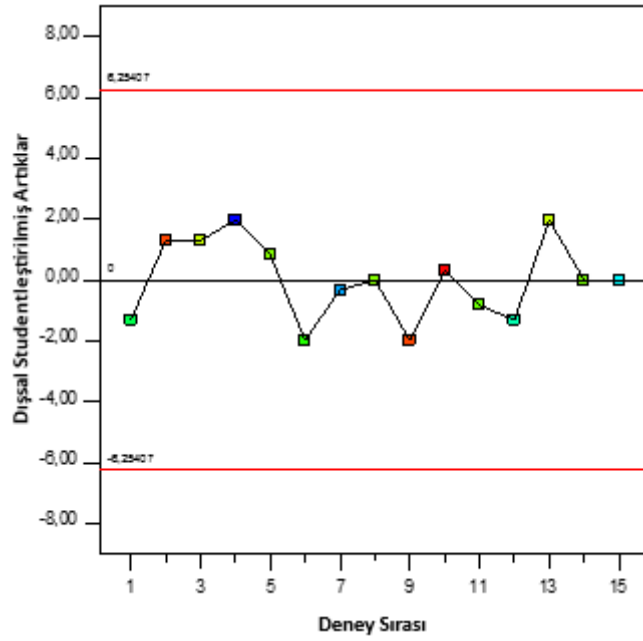
%C.V. değerinin %10'dan küçük olması istenmektedir. Tablo 4.5'te verilen %C.V. değeri 2,75 yani istenen değer aralığındadır.

EO prosesi ile KOİ giderimi için artıkların normal % olasılık değerlerine göre karşılaştırmaları Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. EO prosesi ile KOİ giderimi için artıkların normal (%) olasılık değerlerine göre karşılaştırılması

Şekil 4.9'da verilen grafiğe göre, artıkların dağılımının çizgi etrafında ve normal dağılıma uyduğu görülmektedir. EO prosesi ile yapılan deneylerdeki KOİ giderimleri için deney sırasına göre istatistiksel karşılaştırma Şekil 4.10'da verilen grafikte gösterilmektedir.



Şekil 4.10. EO prosesi ile KOİ giderimi için artıkların deney sırasına göre karşılaştırması

Şekil 4.10'daki grafikte görüldüğü üzere, tüm artıklar 0 çizgisinin etrafında rastgele dağılmışlardır ve bu durum normal dağılıma uygundur. Ayrıca, artıkların dış limitlerin $(-6,25407 < \text{artık} < 6,25407)$ dışına çıkmaması modelin uygunluğunu desteklemektedir.

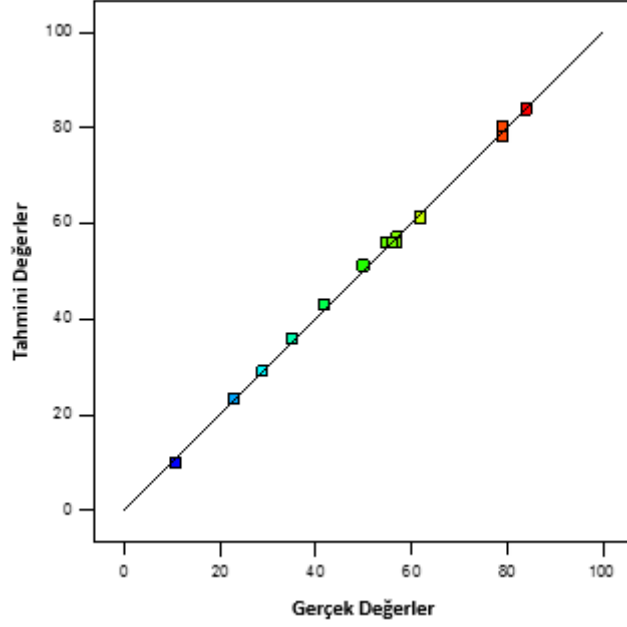
Design Expert 10.0.4 yazılım programının Box-Benken tasarımı kullanılarak KOİ giderimi için kodlanmış faktörler denklemi ve gerçek faktörler denklemi sırasıyla Denklem 4.3. ve Denklem 4.4.'te verilmiştir.

$$\text{KOİ Giderim Verimi (\%)} = +56.00 - 8.13A + 22.12B + 13.00C - 5.25AB - 0.50AC - 3.50BC + 0.13A^2 - 7.87B^2 + 0.37C^2 \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} \text{KOİ Giderim Verimi (\%)} = & -54,63832 + 0,87455 \times \text{pH} + 3,58599 \times \text{Current} \\ & \text{Density} + 9,93705 \times \text{Time} - 0,090463 \times \text{pH} \times \text{Current} \\ & \text{Density} - 0,083333 \times \text{pH} \times \text{Time} \\ & - 0,090463 \times \text{Current} \text{ Density} \times \text{Time} + 0,013889 \times \text{pH}^2 - 0,021043 \times \text{Current} \\ & \text{Density}^2 \\ & + 0,093750 \times \text{Time}^2 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Denklem 4.3'e göre; pH'ın KOİ giderimine negatif etkisi olmuşken, akım yoğunluğu ve sürenin pozitif etkisi olmuştur. Denklem 4.4' te göre de; pH'ın negatif, akım yoğunluğu ve sürenin pozitif etkisi olmuştur.

EO prosesi ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen KOİ giderim verimlerinin, program tarafından önerilen tahmin değerlerinin karşılaştırıldığı grafik Şekil 4.11’de verilmiştir.

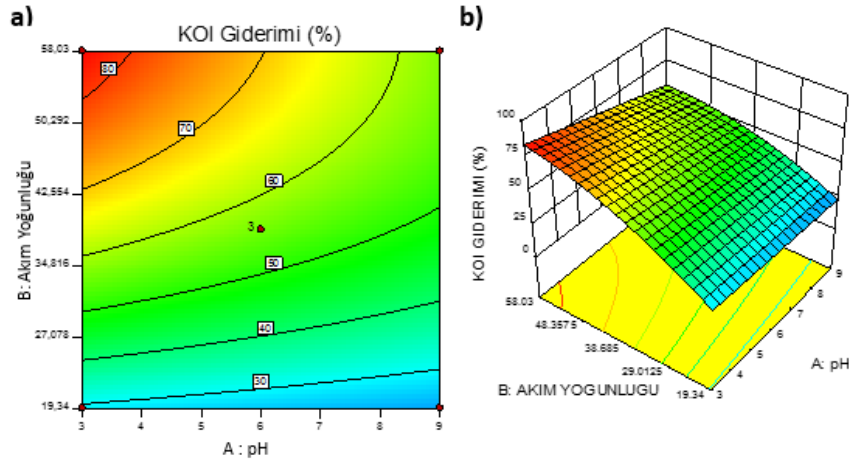


Şekil 4.11. EO prosesi ile KOİ giderimi için tahmini değerlere karşı gerçek değerlerin dağılımını gösteren grafik

Şekil 4.11’deki grafikte de görüldüğü üzere, noktalar düz bir doğru çevresinde toplanmıştır. Bu grafiğe göre; KOİ giderim verimleri %11-84 aralığında dağılım göstermektedir. Tüm veriler, 45 derece çizgisinin etrafında rastgele dağılmış olduğundan tahminlerin yüksek doğrulukta olduğu görülmektedir.

EO prosesinin deney tasarımında belirlenmiş olan parametreler pH, akım yoğunluğu ve sürenin KOİ giderimi üzerindeki ikili etkileşimlerini gösteren 2D kontur ve 3D yüzey grafikleri Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’te verilmiştir. Cevap yüzey grafiklerinde, bir faktör sabit tutularak diğer iki faktörün birlikte etkisi incelenmiştir.

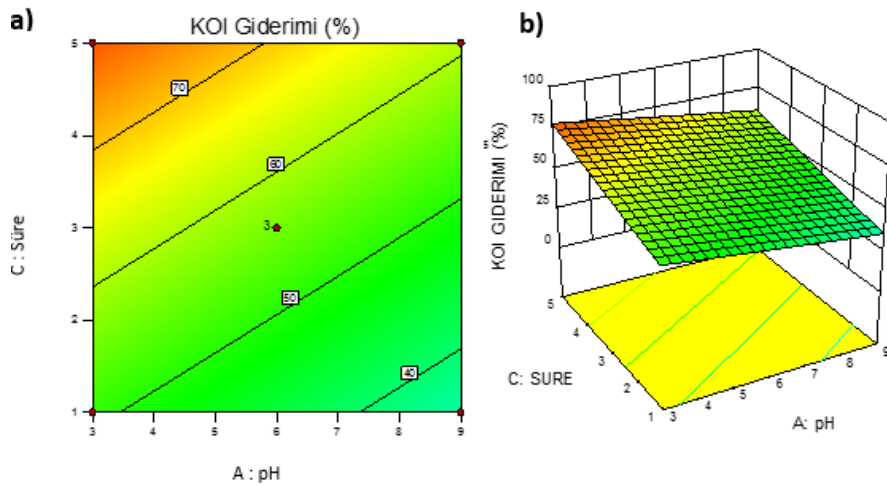
Şekil 4.12’de verilen 2D Kontur ve 3D yüzey grafiklerinde pH ve akım yoğunluğunun KOİ giderimine etkisi gösterilmektedir.



Şekil 4.12. EO prosesi pH-akım yoğunluğu ikili etkileşim grafikleri a) 2D Kontur b) 3D Yüzey

Şekil 4.12’de verilen grafiklerde görüldüğü üzere süre sabit tutulduğunda, pH değeri düştükçe ve akım yoğunluğu arttıkça KOİ giderim verimi artmıştır. pH 3’te akım yoğunluğunun 19,34 mA/cm²’ten 58.03 mA/cm²’e yükselmesiyle KOİ giderimi %29’dan %84’e çıktığı görülmektedir. Akım yoğunluğu, elektron transferinin itici gücü olduğundan, elektrooksidasyon prosesi ile KOİ’nin giderimini önemli ölçüde etkilemekte; böylelikle akımdaki artış daha fazla elektron üreterek kirleticilerin giderimini hızlandırmaktadır [Ergüven, 2023]. Deney seti içerisindeki en düşük renk giderimi pH 9 ve akım yoğunluğunun 19,34 mA/cm²’te olduğu gözlemlenmiştir.

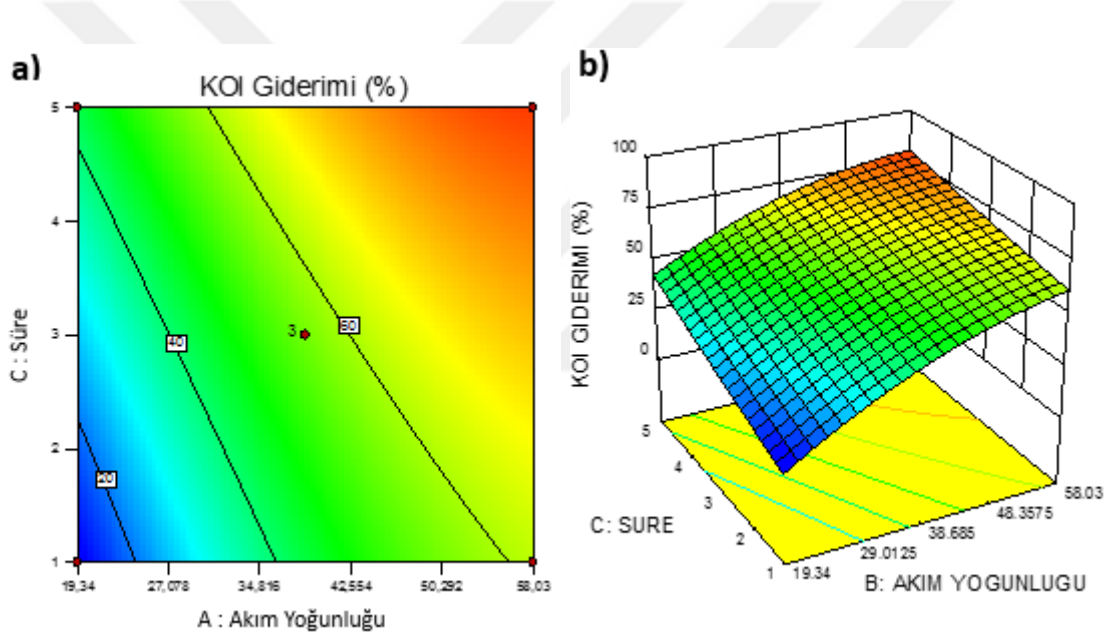
Şekil 4.13’te KOİ giderimine pH ve zaman değişiminin etkisi verilmiştir.



Şekil 4.13. EO prosesi pH-zaman ikili etkileşim grafikleri a) 2D Kontur b) 3D Yüzey

Şekil 4.13'te verilen grafiklerde akım yoğunluğu sabit tutularak, süre ve pH'ın etkisi gözlemlenmiştir. Buna göre; pH değeri düşüğe ve süre arttıkça KOİ giderim verimi artmıştır. pH 3'te sürenin 1 saatten 5 saate yükselmesiyle KOİ giderimi %50'den %79'a çıktığı görülmektedir. KOİ'nin giderimi, öncelikle hidroksil radikalleri ve aktif klorin oluşumu üzerindeki etkisine bağlıdır. Özellikle asidik pH durumunda, etkili $\bullet\text{OH}$ tutucular olan CO_3^{2-} ve HCO_3^- iyonlarının konsantrasyonunu azaltarak KOİ giderim verimini arttırmaktadır (Ergüven, 2023). Deney seti içerisindeki en düşük renk giderimi pH 9 ve sürenin 1 saatte olduğu durumda gözlemlenmiştir.

Şekil 4.14'te verilen grafiklerde akım yoğunluğu ve zamanın KOİ giderimine etkisi gösterilmiştir.



Şekil 4.14. EO prosesi akım yoğunluğu-zaman ikili etkileşim grafikleri (a) 2D Kontur (b) 3D Yüzey

Şekil 4.14'te pH sabit tutularak, süre ve akım yoğunluğunun etkisi gözlemlenmiştir. Buna göre; süre arttıkça ve akım yoğunluğu arttıkça KOİ giderim verimi artmıştır. Akım yoğunluğu $58,03 \text{ mA/cm}^2$ 'te sürenin 1 saatten 5 saate yükselmesiyle KOİ giderimi %62'den %79'a çıktığı görülmektedir. Akım yoğunluğunun artışı KOİ giderim verimi arttırmaktadır, Erkmen ve Adıgüzel yaptıkları çalışmada bunu gözlemlemiştir (Erkmen ve Adıgüzel, 2022). Deney seti içerisindeki en düşük KOİ giderimi akım yoğunluğunun $19,34 \text{ mA/cm}^2$ ve sürenin 1 saat olduğu durumda gözlemlenmiştir.

4.2.3. TOK Giderimi

EO işlemleri ile TOK giderimi sonuçları istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve Box-Behnken Tasarımı ile Anova Analizi oluşturulmuştur. Anova Analizi Tablo 4.6’da verilmiştir.

Tablo 4.6. EO Prosesi ile TOK Giderim ANOVA Tablosu

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi (df)	Ortalama Kare	F-Değeri	p-Değeri	İstatistiksel Anlamlılık
Model	2401,40	9	266,82	148,23	< 0.0001	Anlamlı
A-pH	162,00	1	162,00	90,00	0,0002	
B-Akım Yoğunluğu	1512,50	1	1512,50	840,28	< 0.0001	
C-Süre	480,50	1	480,50	266,94	< 0.0001	
AB	64,00	1	64,00	35,56	0,0019	
AC	1,00	1	1,00	0,56	0,4896	
BC	81,00	1	81,00	45,00	0,0011	
A ²	3,69	1	3,69	2,05	0,2115	
B ²	74,77	1	74,77	41,54	0,0013	
C ²	14,77	1	14,77	8,21	0,0352	
Artık	9,00	5	1,80			
Uyumsuzluk	7,00	3	2,33	2,33	0,3141	Anlamsız
Saf Hata	2,00	2	1,00			
Toplam	2410,40	14				

Hesaplama Design Expert programı tarafından Tip I- kısmi kareler toplamı kullanılmıştır. Tablo 4.6’da görülmekte olan p-değerinin 0,05’in altında olması modelin “anlamlı” olduğunu göstermektedir. Tablo 16’ya göre, p-değerinin <0.0001 olduğu yani bu değerin istatistiksel açıdan anlamlı olduğu görülmektedir. Modelin F değeri 148,23 istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. Buna bağlı, pH, akım yoğunluğu, süre, pH- akım yoğunluğu, akım yoğunluğu-süre ikili etkileşimleri ve karesel akım yoğunluğu anlamlıdır.

Tablo 4.6’da model uyumsuzluğu da verilmiştir; model uyumsuzluğunun anlamsız olması istenmektedir. EO prosesi TOK giderimi için model uyumsuzluğu F-Değeri 2,33 ve p-Değeri 0,3141 olduğu belirlenmiştir. p-değerinin 0,05’den yüksek olması model uyumsuzluğunun anlamsız olduğunu göstermektedir.

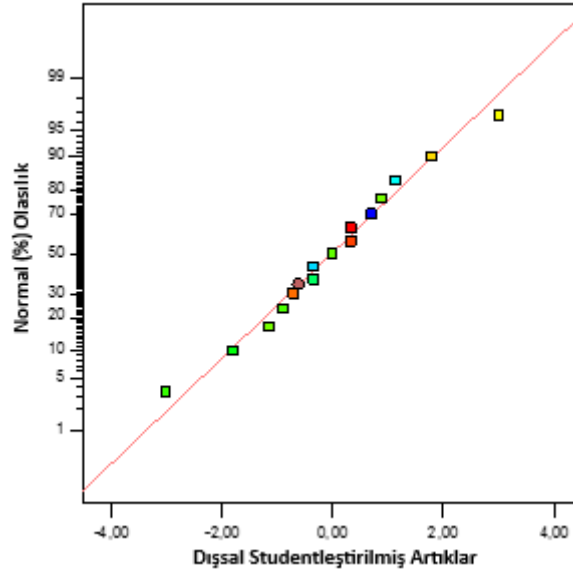
EO prosesi için bulunan model istatistikleri sonuçları Tablo 4.7’de verilmiştir.

Tablo 4.7. EO için kodlanmış terimler katsayılar tablosu

Model İstatistikleri	
Standart Sapma	1,34
Ortalama	33,20
%C.V.	4,04
R ²	0,9963
Adj-R ²	0,9895
Pre-R ²	0,9517
Adeq Pre	43,133

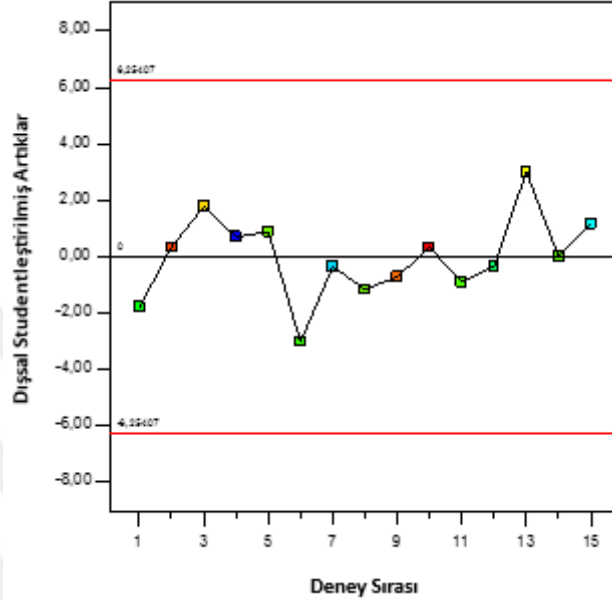
Tablo 4.7’de verilen R² değerinin 0,9963 olduğu görülmektedir. Bu değer 1’e yakın olması modelin yeterliliğini doğrulamaktadır. Adj-R² ve Pre-R² değerleri ise sırasıyla 0,9895 ve 0,9517 şeklindedir. Bu değerlerin 1’e yakın olması, modelin tahminleri ve deneysel sonuçların birbiriyle tutarlı olduğunu göstermektedir. %C.V. değerinin %10’dan küçük olması istenmektedir. Tablo 4.7’de verilen %C.V. değeri 4,04 yani istenen değer aralığındadır.

EO prosesi ile TOK giderimi için artıkların normal % olasılık değerlerine göre karşılaştırılmaları Şekil 4.15’de verilen grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4.15. EO prosesi ile TOK giderimi için artıkların normal (%) olasılık değerlerine göre karşılaştırılması

Şekil 4.15’de verilen grafiğe göre, artıkların dağılımının çizgi etrafında ve normal dağılıma uyduğu görülmektedir. EO prosesi ile yapılan deneylerdeki TOK giderimleri için deney sırasına göre istatistiksel karşılaştırma Şekil 4.16’da verilen grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4.16. EO prosesi ile TOK giderimi için artıkların deney sırasına göre karşılaştırması

Şekil 4.16’daki grafikte görüldüğü üzere, tüm artıklar 0 çizgisinin etrafında rastgele dağılmışlardır ve bu durum normal dağılıma uygundur. Ayrıca, artıkların dış limitlerin $(-6,25407 < \text{artık} < 6,25407)$ dışına çıkmaması modelin uygunluğunu desteklemektedir.

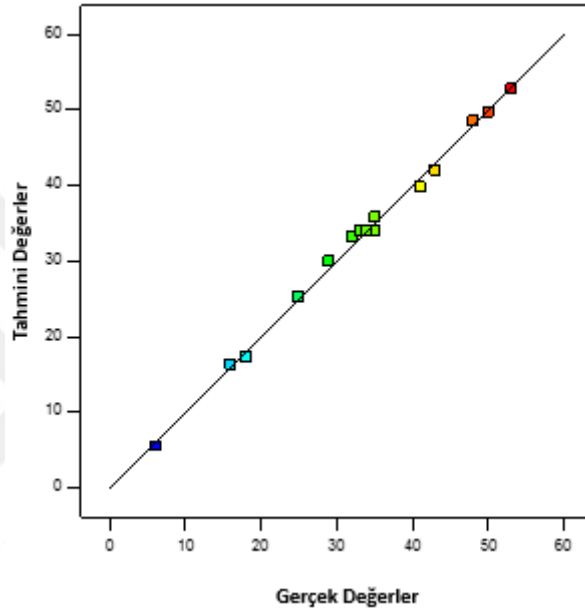
Design Expert 10.0.4 yazılım programının Box-Benken tasarımı kullanılarak TOK giderimi için kodlanmış faktörler denklemi ve gerçek faktörler denklemi sırasıyla Denklem 4.5. ve Denklem 4.6.’da verilmiştir.

$$\text{TOK Giderim Verimi (\%)} = +34,00 - 4,50A + 13,75B + 7,75C - 4,00AB - 0,50AC - 4,50BC + 1,00A^2 - 4,50B^2 + 2,00C^2 \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} \text{TOK Giderim Verimi (\%)} = & -36,61298 - 0,082989 \times \text{pH} + 2,40360 \times \text{Current Density} + \\ & 5,87442 \times \text{Time} - 0,068924 \times \text{pH} \times \text{Current Density} - 0,083333 \times \text{pH} \times \text{Time} - 0,11631 \times \\ & \text{Current Density} \times \text{Time} + 0,11111 \times \text{pH}^2 - 0,012025 \times \text{Current Density}^2 + 0,50000 \times \text{Time}^2 \end{aligned} \quad (4.6)$$

Denklem 4.5'e göre; pH'ın TOK giderimine negatif etkisi olmuşken, akım yoğunluğu ve sürenin pozitif etkisi olmuştur. Denklem 4.6'ya göre de; pH'ın negatif, akım yoğunluğu ve sürenin pozitif etkisi olmuştur.

Elektrooksidasyon prosesi ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen TOK giderim verimlerinin, program tarafından önerilen tahmin değerlerinin karşılaştırıldığı grafik Şekil 4.17'de verilmiştir.

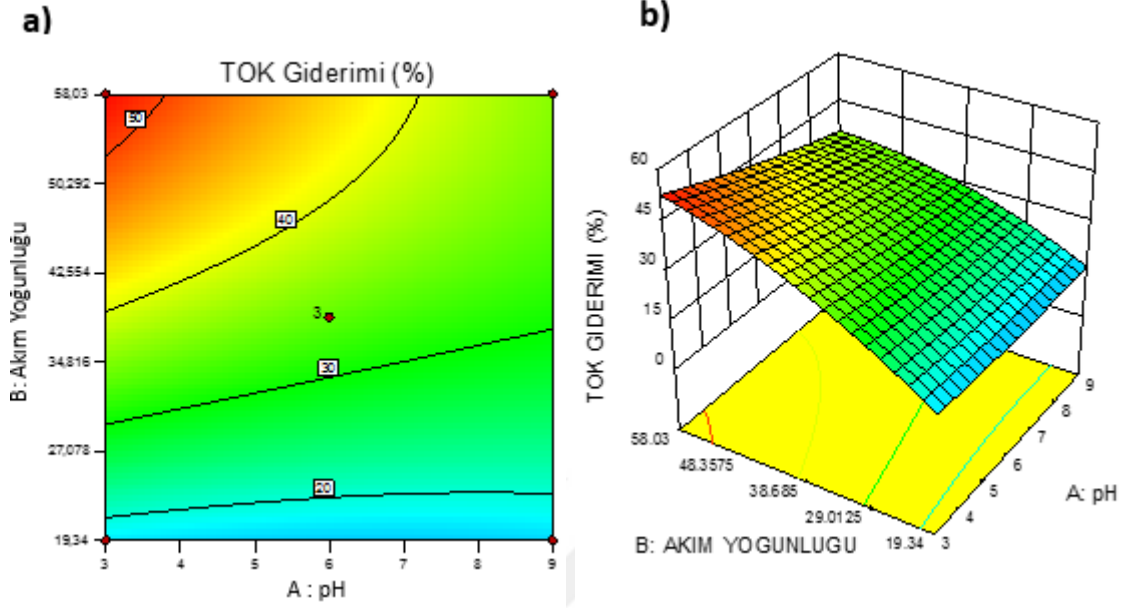


Şekil 4.17. EO prosesi ile TOK giderimi için tahmini değerlere karşı gerçek değerlerin dağılımını gösteren grafik

Şekil 4.17'de verilen grafikte de görüldüğü üzere, noktalar düz bir doğru çevresinde toplanmıştır. Şekil 4.17'de verilen grafiğe göre; TOK giderim verimleri %6-53 aralığında dağılım göstermektedir. Tüm veriler, 45 derece çizgisinin etrafında rastgele dağılmış olduğundan tahminlerin yüksek doğrulukta olduğu görülmektedir.

EO prosesinin deney tasarımında belirlenmiş olan parametreler pH, akım yoğunluğu ve sürenin TOK giderimi üzerindeki ikili etkileşimlerini gösteren kontur ve 3D yüzey grafikleri aşağıda verilmiştir. Cevap yüzey grafiklerinde, bir faktör sabit tutularak diğer iki faktörün birlikte etkisi incelenmiştir.

Şekil 4.18'de verilen 2D kontur ve 3D yüzey grafiklerinde pH ve akım yoğunluğunun TOK giderimine etkisi gösterilmektedir.

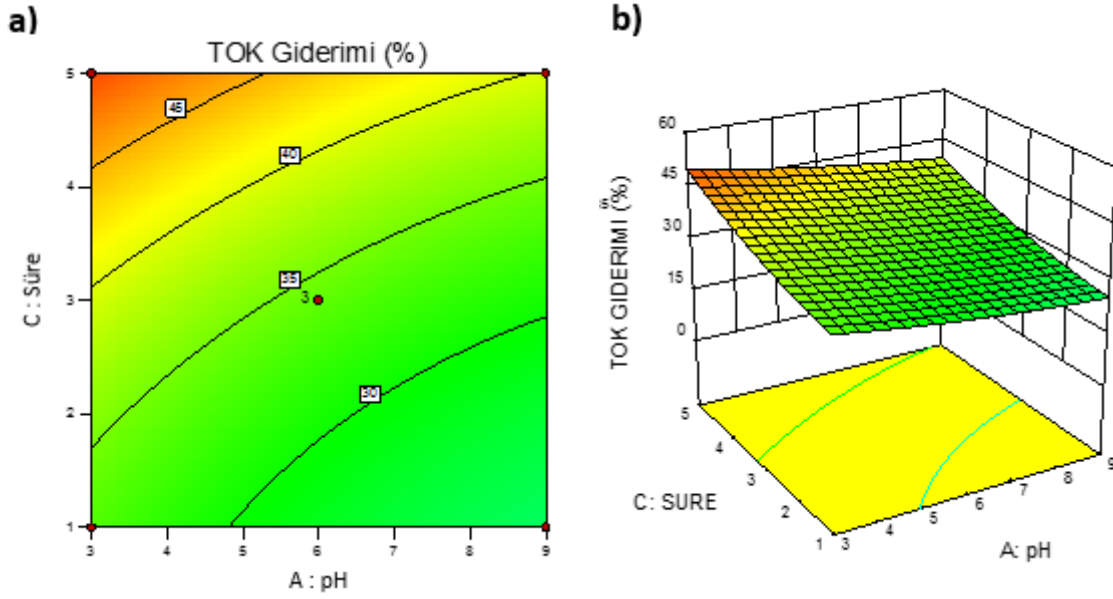


Şekil 4.18. EO prosesi pH-akım yoğunluğu ikili etkileşim grafikleri (a) 2D Kontur (b) 3D Yüze

Şekil 4.18’de verilen grafiklerde görüldüğü üzere süre sabit tutulduğunda, pH değeri düştükçe ve akım yoğunluğu arttıkça TOK giderim verimi artmıştır. pH 3’te akım yoğunluğunun 19,34 mA/cm²’ten 58.03 mA/cm²’e yükselmesiyle TOK giderimi %18’den %53’e çıktığı görülmektedir. Önceden yapılan çalışmalarda da pH değerinin azalması ile giderim verimlerinin arttığı görülmektedir (Kul, 2015).

Elektrooksidasyon prosesinde, kirlilik üzerindeki hedef oksitleme yerine, ortamda mevcut olan HCO₃⁻ ve CO₃⁻² tarafından hidroksil radikalleri (•OH) harcandığından dolayı nötral ve bazik pH değerlerinde TOK gideriminde azalma meydana gelmektedir (Fil, 2014). Deney seti içerisindeki en düşük renk giderimi pH 9 ve akım yoğunluğunun 19,34’te olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 4.19’da verilen 2D kontur ve 3D yüzey grafiklerinde pH ve zaman değişimlerinin TOK giderimine etkisi gösterilmektedir.

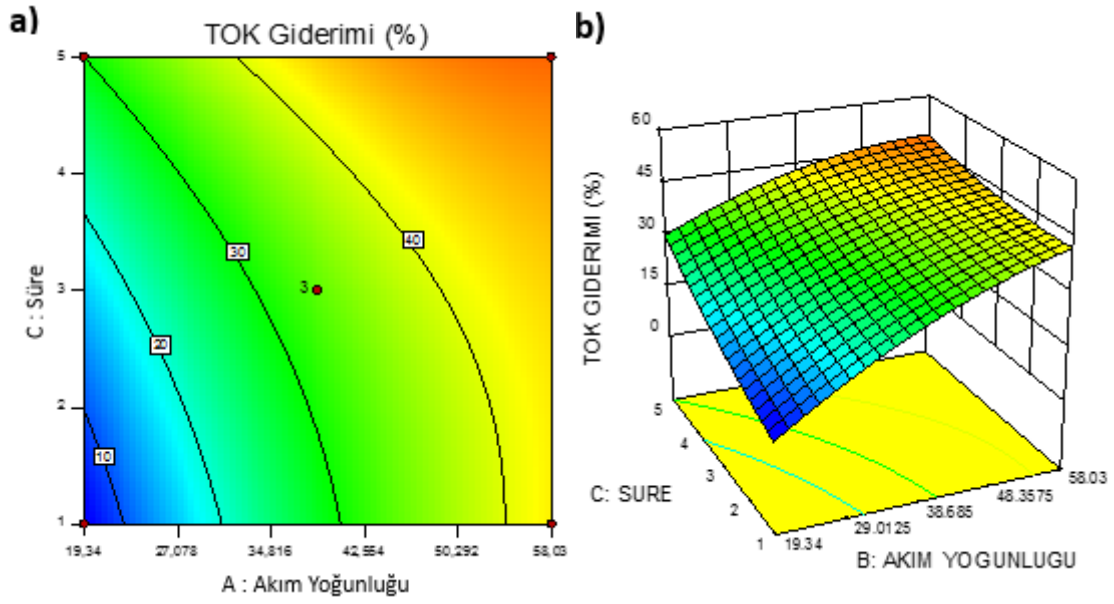


Şekil 4.19. EO prosesi pH-zaman ikili etkileşim grafikleri (a) 2D Kontur (b) 3D Yüzey

Şekil 4.19’da verilen grafikte akım yoğunluğu sabit tutularak, süre ve pH’ın etkisi gözlemlenmiştir. Buna göre; pH değeri düştükçe ve süre arttıkça TOK giderim verimi artmıştır. pH 3’te sürenin 1 saatten 5 saate yükselmesiyle TOK giderimi %32’den %50’ye çıktığı görülmektedir.

Daha önce yapılan çalışma sonuçlarına göre, elektrooksidasyon prosesinde başlangıç pH değerinin artırılmasıyla giderim veriminde azalma gözlemlenmiştir. Buna göre, pH değeri düşük olduğunda organik kirliliklerin anot yüzeyine difüzyonu daha hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir ve pH değeri azaltıldıkça TOK giderim verimi de artmaktadır (Selki, 2023). Deney seti içerisindeki en düşük renk giderimi pH 9 ve sürenin 1 saatte olduğu durumda gözlemlenmiştir.

Şekil 4.20’de verilen 2D kontur ve 3D yüzey grafiklerinde akım yoğunluğu ve zamanın TOK giderimine etkisi gösterilmektedir.



Şekil 4.20. EO prosesi akım yoğunluğu-zaman ikili etkileşim grafikleri (a) 2D Kontur (b) 3D Yüzey

Şekil 4.20’de gösterilen grafiğe göre pH sabit tutularak, süre ve akım yoğunluğunun etkisi gözlemlenmiştir. Buna göre; süre arttıkça ve akım yoğunluğu arttıkça TOK giderim verimi artmıştır. Akım yoğunluğu 58,03 mA/cm²’te sürenin 1 saatten 5 saate yükselmesiyle TOK giderimi %43’ten %48’e çıktığı görülmektedir. Akım yoğunluğunun artmasıyla TOK giderim verimi de artmaktadır. Bunun nedeni akım yoğunluğunun artışı oksidan oluşum miktarını, reaksiyon hızını ve elektron transfer sürecini hızlandıracağı için giderim verimi artacaktır ve Patel ve ark., gerçekleştirdikleri çalışmada akım yoğunluğundaki artışın renk giderim verimliliğini arttırdığını ayrıca giderim için gereken süreyi azalttığı sonucuna varmışlardır (Ceylan, 2024; Patel ve diğ., 2023). Deney seti içerisindeki en düşük TOK giderimi akım yoğunluğunun 19,34 mA/cm² ve sürenin 1 saat olduğu durumda gözlemlenmiştir.

4.2.4. Optimizasyon ve Doğrulama Deneyleri

Doğrulama deneyleri, modelin güvenilirliğini test etmek amacıyla üç kez tekrar edilmiştir. İkinci dereceden bir model ve optimum koşulların desirability analizi kullanarak tahmin edilen optimum değerler pH değeri 3, akım yoğunluğu 58.03 mA/cm² ve süre 3 saat olarak belirlenmiştir. Optimum koşullar altında renk giderim verimi

%97.61; KOİ giderim verimi %83.93 ve TOK giderim verimi %52.82 olarak bulunmuştur.

Üç kez tekrar edilen deneyler sonucunda renk giderim verimi %95.53±1.32; KOİ giderim verimi %82.11±1.02 ve TOK giderim verimi %52.77±0.98 şeklindedir. Deneysel ve tahmin edilen giderim verimleri karşılaştırıldığında aradaki farkın çok düşük olması modelin güvenilirliğini kanıtlamaktadır.

4.2.5. Spesifik Enerji Tüketimi ve Maliyet Analizi

EO prosesinin uygulanabilirliği açısından maliyet önemli bir faktördür. Bu çalışma için, enerji maliyeti de dikkate alınarak prosesin işletme maliyeti hesaplanmıştır. pH ayarlamasında kullanılan kimyasal malzemelerin ve destekleyici elektrolitin (NaCl) maliyeti, enerji maliyetine kıyasla düşük olduğundan maliyet analizinde ihmal edilmiştir.

Optimum koşullar altında KOİ giderimi ve Spesifik Enerji Tüketimi (SET) hesaplaması Denklem 3.7.'de gösterilmiştir.

$$SET_{KOI} \text{ (kWh (kg KOI}^{-1}\text{))} = \frac{U \times I \times t}{10^3 \times V \times (KOI_0 - KOI_t)} \quad (4.7)$$

Burada, U potansiyel farkı, I uygulanan akım, t reaksiyon süresi, V atıksu hacmi, KOİ₀ başlangıç KOİ konsantrasyonu ve KOİ_t, t zamanındaki KOİ konsantrasyonunu ifade etmektedir.

Optimum koşullar altında KOİ giderimi ile işletme maliyetleri Denklem 3.8'de verilen denklem ile hesaplanmıştır.

$$OC \text{ (\$ (kg KOI}^{-1}\text{))} = (SET_{KOI} \times a) \quad (4.8)$$

Burada, SET_{KOI} KOİ giderimi ile ilgili hesaplanan enerji tüketimini, a ise 2024 yılı için Türkiye'deki elektrik piyasa fiyatını (\$ (kWh)⁻¹) göstermektedir.

Denklem 4.7 ve Denklem 4.8'e göre, SET_{KOI} 176.74 kWh (kg KOİ)⁻¹ ve işletme maliyetleri 6.01 \$ (kg KOİ)⁻¹ olarak bulunmuştur.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada, tekstil endüstrisi dengeleme tankından alınmış olan atıksuyun EO prosesi ile arıtımı incelenmiştir. EO yönteminde anot olarak Ti/TiO₂-RuO₂-IrO₂ elektrodu ve katot olarak paslanmaz çelik elektrodu kullanılmıştır. Sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Anot olarak Ti/TiO₂-RuO₂-IrO₂ elektrodu spreyle kaplama yöntemiyle kaplanmış ve karakterizasyonu yapılmıştır. XRD analizine göre görüntüler, elektrot yüzeyinde RuO₂, IrO₂ ve TiO₂'nin varlığını göstermektedir. SEM görüntüleri incelendiğinde, kaplama sırasında anotun yüzey pürüzlülüğünün arttığı ve kristal oluşumu görülmüştür.
- Çalışma için Box-Behnken tasarımı ile oluşturulan deney setiyle paralel olarak toplamda 15 deney yapılmıştır. EO deneyleri pH 3-6-9; akım yoğunluğu 19,34 mA/cm²- 38,685 mA/cm²-58,03 mA/cm² ve süre 1-3-5 saatte gerçekleştirilmiştir. Optimum şartların pH değeri 3, akım yoğunluğu 58,03 mA/cm² ve süre 3 saatte sağlandığı görülmüştür.
- Deneyler sonucunda, optimum şartlarda en yüksek renk, KOİ ve TOK giderim verimleri sırasıyla %99, %84 ve %53 olarak bulunmuştur. pH düşüldükçe, akım yoğunluğu ve süre arttıkça giderim verimlerinin arttığı görülmüştür.
- Buna göre seçilen düzeylerde modelden elde edilen sonuçların istatistiksel anlamlılığı incelenmiştir. Box-Behnken ile yapılan değerlendirmeye göre R² değerleri renk giderimi için 0,9979; KOİ giderimi için 0,9983 ve TOK giderimi için 0,9963 olgusu görülmüştür. Bu değerlerin 1'e yakın olması deney sonuçlarının istatistiksel açıdan anlamlı olduğunu göstermektedir.
- Doğrulama deneyleri 3 kez tekrar edilmiştir. Bu deneyler sonucunda, optimum şartlar altında renk giderim verimi %95.53±1.32; KOİ giderim verimi %82.11±1.02 ve TOK giderim verimi %52.77±0.98 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar deneysel ve tahmin edilen değerlerin birbirine yakın olduğunu, dolayısıyla modelin güvenilirliğini göstermektedir.
- Spesifik Enerji Tüketimi 176.74 kWh (kg KOİ)⁻¹ ve işletme maliyeti 6.01 \$ (kg KOİ)⁻¹ olarak hesaplanmıştır.

Bu çalışma sonucunda spreyle kaplama yöntemi ile kaplanmış olan Ti/TiO₂-RuO₂-IrO₂ elektrodunun uygulamada başarılı olduğu görülmektedir. EO prosesi ile tekstil atıksuyu arıtımının, optimum şartlar altında kısa süreli, düşük maliyetli, uygulanabilir ve umut vaat eden bir yöntem olduğu görülmüştür.



KAYNAKLAR

- Al, O. (2019). Tekstil Atıksularındaki Katyonik Boyar Maddelerin Fizikokimyasal Arıtımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, 579090.
- Al-Degs, Y., Khraisheh, M.A.M., Allen, S.J. and Ahmad, M.N. (2000). Effect of Carbon Surface Chemistry on the Removal of Reactive Dyes from Textile Effluent. *Water Research*, 34(3), 927-935.
- Al-Tohamy, R., Ali, S.S., Li, F., Okasha, K.M., Mahmoud, Y.A.G., Elsamahy, T., Jiao, H., Fu, Y., Sun, J. (2022). A Critical Review on The Treatment of Dye-containing Wastewater: Ecotoxicological and Health Concerns of Textile Dyes and Possible Remediation Approaches for Environmental Safety. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 231, 113160.
- Al-Tohamy, R., Kenawy, E., Sun, J., Ali, S.S., (2020). Performance of A Newly Isolated Salttolerant Yeast Strain *Sterigmatomyces Halophilus* SSA-1575 for Azo Dye Decolorization and Detoxification. *Front. Microbiol.*, 11, 1163.
- Anglada, A., Urriaga, A., Ortiz, I. (2009). Contributions Of Electrochemical Oxidation To Waste-water Treatment: Fundamentals and Review Of Applications. *J Chem Technol Biotechnol*, 84, 1747–1755.
- Aquino, J., M., Rocha-filho, R., C., Ruotolo, L., Bocchi, N., Biaggio, R. (2014). Electrochemical Degradation of a Real Textile Wastewater Using β -PbO₂ and DSA Anodes. *Chemical Engineering Journal*, 251, 138-145.
- Arargüç, E., C. (2018). Atık Aktif Çamurun Elektrooksidasyon Yöntemi ile Ön Arıtımının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 498374.
- Ardalı, Y. (2021). *Tekstil Endüstrisi Atıksu Kaynakları ve Özellikleri Boyama*. 3. <https://avys.omu.edu.tr/public>.
- Arifin, M.N., Jusoh, R., Abdullah, H., Ainirazali, N., Setiabudi, H.D. (2023). Recent Advances in Advanced Oxidation Processes (AOPs) for The Treatment of Nitro- and Alkyl-phenolic Compounds. *Environmental Research*, 229.
- Arslan, M., Yaqub, M., Shaikh, I., A. (2023). Assessment of Reuse Potential of Highway Runoff Water in Textile Wet Processing. *Water Resources and Industry*.
- Asfaha, Y., G., Tekile, A., K., Zewge, F. (2021). Hybrid Process of Electrocoagulation and Electrooxidation System for Wastewater Treatment: A Review. *Cleaner Engineering and Technology*, 4.
- Ashaboğlu, B. (2012). Tekstil Ürünlerinde Çevresel Yaklaşımlar. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Güzel Sanatlar Enstitüsü, İstanbul, 319468.

- Atalay, Erođlu, H. (2023). Tekstil Endüstrisi Atıksuların Membran Destekli İleri Oksidasyon Prosesleri ile Geri Kazanımı. Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Samsun, 826998.
- Ayhan, H., H. (2022). Brode Endüstrisi Atıksularında Elektrokoksidasyon Prosesi ile Toplam Organik Karbon Giderimi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 716290.
- Azanaw, A., Birlie, B., Teshome, B., Jemberie, M. (2022). Textile Effluent Treatment Methods and Eco-friendly Resolution of Textile Wastewater. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 6.
- Babu, B., R., Parande, A., K., Raghu, S. and Kumar T., P. (2007). Cotton Textile Processing: Waste Generation and Effluent Treatment. *Journal of Cotton Science*, 11(3), 141–153.
- Bhargava, N., Bahadur, N., Kansal, A. (2023). Techno-economic Assessment of Integrated Photochemical AOPs for Sustainable Treatment of Textile and Dyeing Wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 56.
- Bhatnagar R., Joshi H., Mall I.D. ve Srivastava V.C. (2014). Electrochemical Oxidation of Textile Industry Wastewater by Graphite Electrodes. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 49(8), 955-966.
- Bhatt, P., Engel, B, A., Shivaram, K., B., Turco, R., F., Zhou, Z., Simsek, H. (2023). Treatment and Optimization of High-strength Egg-wash Wastewater Effluent Using Electrocoagulation and Electrooxidation Methods. *Chemosphere*, 140632.
- Bidu, J., M., Njau, K., N., Rwiza, M., Bruggen, B., V. (2023). Textile Wastewater Treatment in Anaerobic Reactor: Influence of Domestic Wastewater as Co-substrate in Color and COD Removal. *South Africa Journal of Chemical Engineering*, 43, 112-121.
- Bilinska, L., Gmurek, M. (2021). Novel Trends in AOPs for Textile Wastewater Treatment. Enhanced Dye By-products Removal by Catalytic and Synergistic Actions, *Water Resources and Industry*, 26.
- Bilińska, L., Gmurek, M., Ledakowicz, S. (2016). Comparison Between Industrial and Simulated Textile Wastewater Treatment by AOPs–Biodegradability, Toxicity and Cost Assessment. *Chemical Engineering Journal*, 306, 550–559.
- Birgöl, A. (2006). Tekstil Endüstrisi Atıksu Arıtımında İleri Oksidasyon Proseslerinin Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 202227.
- Bulca, Ö., Palas, B., Atalay, S., Ersöz, G. (2021). Performance Investigation of The Hybrid Methods of Adsorption or Catalytic Wet Air Oxidation Subsequent to Electrocoagulation in Treatment of Real Textile Wastewater and Kinetic Modelling. *Journal of Water Process Engineering*, 40.

- Carneiro, J. F., Aquino, J. M., Silva, A. J., Barreiro, J. C., Cass, Q. B., & Rocha-Filho, R. C. (2018). The Effect of The Supporting Electrolyte on The Electrooxidation of Enrofloxacin Using a Flow Cell with a BDD Anode: Kinetics and Follow-up of Oxidation Intermediates and Antimicrobial Activity. *Chemosphere*, 206, 674-681.
- CCOT (Calgon Carbon Oxidation Technologies) (1995). *The AOP Handbook*, Markham, Ontario, Canada.
- Ceylan, B. (2024). Ti/IrO₂-RuO₂ ve Bor Katkılı Elmas (BDD) Elektrotların Kullanıldığı Elektrokimyasal Oksidasyon Prosesi ile İlaç Etken Maddesinin Arıtımı. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Kocaeli, 859376.
- Christian, D., Gaekwad, A., Dani, H., Kandya, S., M. (2023). Recent Techniques of Textile Industrial Wastewater Treatment: A Review. *Materials Today Proceeding*, 77(1), 277-285.
- Chung, K., T. (2016). Azo Dyes and Human Health: A Review. *J. Environ. Sci. Health, Part C.*, 34, 233–261.
- Cui, J., Feng, Y., Xu, B., Zhang, W., Tan, L. (2023). Reactor Performance of Static Magnetic Field Membrane Bioreactor for Treating Actual High-salt Textile Dyeing Wastewater and Possible Mechanism on Magnetically Enhanced Membrane Fouling Control. *Process Safety and Environmental Protection*, 179, 835-846.
- Çakır, S. (2023). Boyar Madde İçeren Atıksuların Arıtımında Elektrokimyasal Uygulaması ve Yüzey Yanıt Yöntemi ile Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 827765.
- Çalışkan, H. (2018). Zeytin Karasuyunun Arıtımında İleri Oksidasyon Proseslerinin Uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 521592.
- Çolak, Z. (2017). Adıyaman Kâhta Yüzüncü Yıl Göleti'ne Deşarj Edilen İlçe Atıksuyunun Elektrotasyon Yöntemiyle Arıtılabilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Adıyaman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adıyaman, 457719.
- Deliktaş, E., Yavuz, Y. (2021). Ti/RuO₂ Karışık Metal Oksit Elektrot Kullanılarak Elektrokimyasal Oksidasyon ile Boyarmadde Giderimine NaCl Destek Elektrolitinin Etkisi ve Toksik Etkilerin Değerlendirilmesi. *Eurasian Journal of Biological and Chemical Sciences*, 4(1), 1-16.
- Demir, B. (2019). Tekstil Atıksularındaki Boyar Maddelerin Fotokatalitik Oksidasyon ile Giderimi için ZnO Bazlı Katalizörlerin Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 558107.
- Demiral, N. (2008). Pamuklu Tekstil Endüstrisi Atıksularının Membran Teknolojisi ile Geri Kazanımı. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 232775.

- Dilcan, G., E. (2019). İleri Oksidasyon Prosesleri ile İnsektisit Giderimi. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 605288.
- Dörtkol M. (2014). Doğal ve Modifiye Kil ile Sulu Çözeltilerden Boyar Madde Giderimi. Yüksek lisans Tezi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Nevşehir, 374341.
- Ebratkahan, M., Zarei, M., Babaei, T., Hosseini, M., G., Hosseini, M., M., Fathipour, Z. (2022). "Efficient Electrochemical Removal of 5-fluorouracil Pharmaceutical from Wasterater by Mixed Metal Oxides Via Anodic Oxidation Process. *Chemosphere*, 296, 134007.
- Elgün, C. (2022). Kâğıt Endüstrisi Atıksularının Elektrokoksasyon Yöntemiyle Arıtılması. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 758342.
- El-Liethy, M., A., Hemdan, B., A., El-Taweel, G. (2023). New Insights for Tracking Bacterial Community Structures in Industrial Wastewater from Textile Factories to Surface Water Using Phenotypic, 16S rRNA Isolates Identifications and High-throughput Sequencing. *Acta Tropica*, 238.
- EPA, (1998). *Handbook of Advanced Photochemical Oxiation Processes*, Office of Research and Development. Washington DC, 2-4.
- Erden, G. (2018). Biyolojik Çamurların Elektro-Oksidasyon Prosesi ile Şartlandırılması. Dokuz Eylül Üniversitesi-Mühendislik Fakültesi, *Fen ve Mühendislik Dergisi*, 20(60), 1018-1025.
- Eren, Z. (2009). İleri Oksidasyon Prosesleri ile Tekstil Boyarmaddelerinin ve Tekstil Atıksularının Arıtılması. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Ergüven, F. (2023). Alkolsüz İçecek Endüstrisinden Kaynaklanan Atıksuların Elektrokoksasyon ile Arıtımı. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bursa, 840969.
- Erkmen, J., Adıgüzel, M. (2022). Acid Red-20 Sentetik Boyar Maddenin Elektrokoksasyon Yöntemi ile Sulu Çözeltiden Uzaklaştırılması. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(2), 363-371.
- Fard, M., S., Ehsani, A., Soleimani, F. (2023). Treatment of Synthetic Textile Wastewater Containing Acid Red 182 by Electro-Peroxone Process Using RSM. *Journal of Environmental Management*, 344.
- Fil, B., A. (2014). Antep Fıstığı İşletme Atıksularının Elektrokoksasyon ile Arıtılması. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 376258.
- Fil, B. A., Boncukcuoğlu, R., Yılmaz, A. E., ve Bayar, S. (2012). Antepfıstığı İşleme Atıksularının Elektrokoksasyon Yöntemiyle Ön Arıtım Çalışmaları. *İğdir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitü Dergisi*, 2(2): 29-36.

- Ganiyu, S., O., Martínez-Huitle, C., A., Oturan, M., A. 2021. Electrochemical Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: Advances in Formation and Detection of Reactive Species and Mechanisms. *Current Opinion Electrochemistry*, 27, 100678.
- Garcia-Segura, S., Ocon, J.D., Chong, M.N. (2018). Electrochemical Oxidation Remediation of Real Wastewater Effluents-A Review. *Process Safety and Environmental Protection*, 113, 48–67.
- Ghalay, A.E., Ananthashankar, R., Alhattab, M., Ramakrishnan, V.V. (2013). Production, Characterization and Treatment of Textile Effluents: A Critical Review. *Chem. Eng. Technol.*, 05(01), 1000182.
- Gökkuş, Ö. (2009). Boyarmadde İçeren Tekstil Atıksularında Fenton Prosesi ve Kimyasal Koagülasyon Uygulanarak Renk ve KOİ Gideriminin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 246079.
- Guerrini, E., Colombo, A., Trasatti, S. (2009). Surface Modification of RuO₂ Electrodes by Laser Irradiation and Ion Implantation: Evidence of Electrocatalytic Effects. *J. Chem. Sci.*, 121, 639.
- Guo, Z., Zhang, Y., Jia, H., Guo, J., Meng, X., Wang, J. (2022). Electrochemical Methods for Landfill Leachate Treatment: A Review on Electrocoagulation and Electrooxidation. *Science of The Total Environment*, 806(2).
- Gupta, R., Shukla, V.K., Agarwal, P. (2019). Sustainable Transformation in Modest Fashion Through "RPET technology" and "Dry-Dye" Process, Using Recycled PET plastic. *Int. J. Recent Technol. Eng.* 8.
- Gülcan, H. (2019). Antibiyotiklerin Fotokimyasal İleri Oksidasyon Prosesleri ile Giderimi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 609409.
- Güler, S. (2019). Elektroflotasyon Yöntemi ile Sintine Atıksularının Arıtımının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 562483.
- Günaşlan, S., Fil, B., A. (2023). Ti/IrO₂/RuO₂ Anot Kullanılarak Organik İçerikli Gerçek Atıksulardan Renk Giderilmesinde pH ve Akım Yoğunluğunun Etkisi. *1st International Conference on Scientific and Innovative Studies*, 262-267.
- Gürtekin, E., Şekerdağ, N. (2008). Bir İleri Oksidasyon Prosesi: Fenton Proses. *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3(14), 229-236.
- Hai, F. I., Yamamoto, K., & Fukushi, K. (2007). Hybrid Treatment Systems for Dye Wastewater. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 37(4), 315–377.

- Hassan, M., M., Saifullah, K. (2023). Ultrasound-assisted Sustainable and Energy Efficient Pre-treatments, Dyeing, and Finishing of Textiles – A Comprehensive Review. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 33.
- Hassanzaadeh, H., Salem, A., Salem, S. (2023). Recovery of Binary-component Textile Wastewater Contaminated by Reactive Dyes Through Adsorption Onto Magnetic Separable MgO Nanoparticles Produced from Solid Waste of Ductile Cast Iron Industry, Process Identifications, Characterization and Regeneration. *Process Safety and Environmental Protection*, 178, 46-55.
- Hayat, H., Mahmood, Q., Pervez, A., Bhatti, Z.A., Baig, S.A. (2015). Comparative Decolorization of Dyes in Textile Wastewater Using Biological and Chemical Treatment. *Sep. Purif. Technol.*, 154, 149–153.
- Henrik, W., Knudsen, H., H., (2005). Water Savings and Reuse in the Textile Industry. Modern Tools and Methods of Water Treatment for Improving Living Standards. *Springer*, Dordrecht, 169–189.
- Holkar, C., R., Jadhav, A., J., Pinjari, D., V., Mahamuni, N., M., Pandit, A., B. (2016). A Critical Review on Textile Wastewater Treatments: Possible Approaches. *Journal of Environmental Management*, 182, 351-366.
- Holt, P.K., Barton, G.W., Wark, M., Mitchell, C. A. (2002). A quantitative Comparison Between Chemical Dosing and Electrocoagulation. *Colloids Surf. A*, 221, 223-248.
- Jadhav, R., R., Chaudhari, A., U., Patil, D., N., Kodam, K., M., Jadhav, J., P. (2023). In Situ Treatment of Real Textile Effluent in Constructed Furrows Using Consortium of *Canna Indica* and *Saccharomyces Cerevisiae* and Subsequent Biochemical and Toxicity Evaluation. *Environmental Pollution*, 327.
- Jalife-Jacobo, H., Feria-Reyes, R., Serrano-Torres, O., Gutiérrez-Granados S., Peralta-Hernández, J. M. (2016). Diazo Dye Congo Red Degradation Using a Boron-doped Diamond Anode: An Experimental Study on The Effect of Supporting Electrolytes. *Journal of Hazardous Materials*, 319, 7883.
- Kahraman, Ö. (2019). Kot Kumaşı Üretim Tesisi Atıksularının Elektrokimyasal Yöntemlerle Arıtılabilirliği. Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray, 565225.
- Kalia, S., Dalvi, V., Nair, V., K., Samuchiwal, S., Malik, A. (2023). Hybrid Electrocoagulation and Laccase Mediated Treatment for Efficient Decolorization of Effluent Generated from Textile Industries. *Environmental Research*, 228.
- Kama, B. (2019). Tekstil Atıksularının Ti/Ru-Ir Elektrot Kullanılarak Elektrokimyasal Arıtımı. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 549001.
- Karabulut, H., Gülay, M.Ş. (2016). Serbest Radikaller. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, *Sağlık Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 4, 50-59.

- Kaur, P., Kushwaha, J., P., Sangal, V., K., 2017. Evaluation and Disposability Study of Actual Textile Wastewater Treatment by Electro-oxidation Method Using Ti/RuO₂ Anode. *Process Safety and Environmental Protection*, 111, 13-22.
- Kaur, P., Kushwaha, J., P., Sangal, V., K. (2018). Electrocatalytic Oxidative Treatment of Real Textile Wastewater in Continuous Reactor: Degradation Pathway and Disposability Study. *Journal of Hazardous Materials*, 346, 242-252.
- Kaygusuz, T. (2013). Elektrokimyasal Oksidasyon Yönteminin Tekstil Atıksularının Arıtılabilirliğine Etkilerinin Tam Ölçekli Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 332313.
- Kırlaroğlu, M. (2008). Tekstil Atıksularının Farklı Güç Kaynakları Kullanılarak Elektrokimyasal Arıtımında Optimum Şartların Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 179253.
- Kim, J., Ryu, B.G., Kim, K., Kim, B.K., Han, J.I., Yang, J.W. (2012). Continuous Microalgae Recovery Using Electrolysis: Effect of Different Electrode Pairs and Timing of Polarity Exchange. *Bioresour. Technol.*, 123, 164–170.
- Kim, M. Y., Jeon, Y. J., Lee, J. Y., Park, D. J., Lee, K. H., Lee, J. Y. (2023). Bifunctional Technology Involving RuO₂-IrO₂/Ti Electrode Decorated with Educated Graphene Oxide Aerogel with Pd Nanoparticles: Electrochemical Oxidative Decomposition and Detection of P-nitrophenol. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 940, 117471.
- Kim T., Park C., Yang J. and Kim S. (2004). Comparison of Disperse and Reactive Dye Removals by Chemical Coagulation and Fenton Oxidation. *Journal of Hazardous Materials*, 112 (1-2), 95-103.
- Kobyas, M., Demirbas, E., Ozyonar, F., Sirtbas, G., Gengec, E. (2017). Treatments of Alkaline Non-cyanide, Alkaline Cyanide and Acidic Zinc Electroplating Wastewaters by Electrocoagulation. *Process Saf. Environ. Prot.*, 105, 373–385.
- Kocaer, F., O. (2002). Boyar Madde İçeren Tekstil Atıksularının Arıtım Alternatifleri. Uludağ Üniversitesi, *Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 1(7), 47-55.
- Kore, V., S., Manjare, S., D., Taralkar, S., V. (2023). Intensified Degradation of Reactive Blue 222 (RB222) Textile Dye by A Hybrid AOP System of Hydrodynamic Cavitation Coupled with Inline UV and PMS Oxidant. *Journal of Water Process Engineering*, 56.
- Kul, S. (2015). Zeytin Karasuyunun Elektrokimyasal ile Arıtımının İncelenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 392162.
- Küni, G., Gül, Ş. (2009). Reaktif Kırmızı 195 Azo Boyar Maddesinin İleri Oksidasyon Yöntemleriyle Parçalanması. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. 67-71.

- Lee, H., S., Jung, S., Lin, K., Y., Kwon, E., E., Lee, J. (2023). Upcycling Textile Waste Using Pyrolysis Process. *Science of The Total Environment*, 859(2).
- Lin, L., Wang, J., Zhao, Z., Zhu, J., Zhamaerding, A., Feng, L., Yang, D., Meng, L., He, C., Wang, W., Zhang, Y., Jin, W. (2023). Multi-dimensional Micro-nano Scale Manganese Oxide Catalysts Induced Chemical-based Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Environmental Applications: A Critical Review. *Chemical Engineering Journal*, 474.
- Liu, A., Fan, P., Han, F., Han, H., Li, Z., Wang, H., Fan, M., (2022). Effect of Electroflotation on Quartz and Magnetite and Its Utilization on The Reverse Flotation of Magnetic Separation Concentrate. *Minerals Engineering*, 175.
- Lotito, A.M., Fratino, U., Bergna, G., Di Iaconi, C. (2012). Integrated Biological and Ozone Treatment of Printing Textile Wastewater. *Chem. Eng. J.*, 195-196, 261-269.
- Ma, X., Chen, P., Zhou, M., Zhong, Z., Zhang, F., Xing, W. (2017). Tight Ultrafiltration Ceramic Membrane for Separation of Dyes and Mixed Salts (both NaCl/Na₂SO₄) in Textile Wastewater Treatment. *Ind. Eng. Chem. Res.* 56, 7070–7079.
- Malafaia, G., da Costa Estrela, D., Guimarães, A.T.B., de Araújo, F.G., Leandro, W.M., de Lima Rodrigues, A.S. (2015). Vermicomposting of Different Types of Tanning Sludge (Liming and Primary) Mixed With Cattle Dung. *Ecol. Eng.*, 85, 301–306.
- Mazotto, A.M., Silva, J.R., Brito, L.A.A., Rocha, N.U., Soares, A.S., (2021). How Can Microbiology Help to Improve Sustainability in the Fashion Industry?. *Environ. Technol. Innov.*, 23, 101760.
- Meghwal, K., Agarwal, R., Kumawat, S., Jangid, N., Ameta, C. (2019). Chemical and Biological Treatment of Dyes In.
- Mishra, S., Maiti, A., (2018). The Efficacy of Bacterial Species to Decolourize Reactive Azo, Anthroquinone and Triphenylmethane Dyes from Wastewater: A Review. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25, 8286–8314.
- Mishra, V., Mudgal, N., Deepak, R., Rawat, D., Poria, P., Mukherjee, P., Sharma, U., Kumria, P., Pani, B., Singh, M., Yadav, A., Farooqi, F., Sharma, R., S. (2023). Integrating Microalgae into Textile Wastewater Treatment Processes: Advancements and Opportunities. *Journal of Water Process Engineering*, 55.
- Mohapatra, T., Ghosh, P. (2023). Photo-Fenton Remediation of Textile Wastewater in Fluidized-bed Reactor Using Modified Laterite: Hydrodynamic Study and Effect of Operating Parameters. *Chemical Engineering Journal*, 473.
- Namal, O., Ö. (2017). Tekstil Endüstrisi Atıksularının Arıtımında Kullanılan Proseslerin Araştırılması. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6, 388-396.

- Norrahma, S., S., Hamid, N., H., Hairom, N., H., Jasmani, L., Sidik, D., A. (2023). Industrial Textile Wastewater Treatment Using Neolamarckia Cadamba NFC Filter Paper via Cross-Flow Filtration System. *Journal of Water Process Engineering*, 55.
- Oduncu, E. (2017). Elektrokoagülasyon ve Elektrokoksasyon Yöntemi ile Katı Atık Düzenli Depolama Sahası Sızıntı Suyunun Arıtımı. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 458962.
- Olabi, A., Yıldız, S. (2021). İleri Oksidasyon Prosesleri Kentsel ve Endüstriyel Atıksu Arıtım Temelleri ve Uygulamaları. *II. International Halich Congress on Multidisciplinary Scientific Research, Proceeding Book*, 580-598.
- Okur, M., C., Akyol, A., Nayir, T., Kara, S., Öztürk, D., Civas, A. (2022), Performance of Ti/RuO₂-IrO₂ Electrodes and Comparison with BDD Electrodes in The Treatment of Textile Wastewater by Electro-oxidation Process. *Chemical Engineering Research and Design*, 183, 398-410.
- Özcan, A. (2016). Tekstil Atıksularından Toksik Azo Boyaların Mikroreaktör Jel ile Giderimi. Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray, 447074.
- Öztürk, A. (2022). Kirlenmiş Topraklardan Tekstil Boyar Maddesinin Elektrokoksasyon ile Giderimi. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bursa, 734927.
- Panhwar, A., Jatoi, A., S., Mazari, S., A., JKandhro, A., Rashid, U., Qaisar, S. (2024). Water Resources Contamination and Health Hazards by Textile Industry Effluent and Glance at Treatment Techniques: A Review. *Waste Management Bulletin*, 1(4), 158-163.
- Patel, D., Nair G., Patel F., Soni B. (2023), Electrochemical Degradation of Reactive Dyes Mixture Over DSA Electrodes: A Sustainable Approach. *Materials Today: Proceedings*.
- Paul, S., Pegu, R., Das, S., Kim, K., H., Bhattacharya, S., S. (2023). Eco-geological Consequences of Textile Processing Wastes: Risk Assessment, Elemental Dissolution Kinetics, and Health Hazard Potential. *Environmental Research*, 216(6).
- Phan, H., N., Leu, H., J., Nguyen, V., N. (2024). Enhancing Pharmaceutical Wastewater Treatment: Ozone-assisted Electrooxidation and Precision Optimization via Response Surface Methodology. *Journal of Water Process Engineering*, 58, 104782.
- Pinto, C., Fernandes, A., Lopes, A., Nunes, M., J., Baia, A., Ciriaco, L., Pacheco, M., J. (2022). Reuse of Textile Dyeing Wastewater Treated by Electrooxidation. *Water*, 14, 1-15.

- Ponnusami, A., B., Sinha, S., Ashokan, H., Paul, M., Hariharan, S., P., Arun, J., Gopinath, K., P., Le, Q., H., Pugazhendhi, A. (2023). Advanced Oxidation Process (AOP) Combined Biological Process for Wastewater Treatment: A Review on Advancements, Feasibility and Practicability of Combined Techniques. *Environmental Research*, 237.
- Punzi, M., Mattiasson, B., Jonstrup, M. (2012). Treatment of Synthetic Textile Wastewater by Homogeneous and Heterogeneous Photo-Fenton Oxidation. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 248, 30–35.
- Rajkumar, D, Palanivelu, K. (2007). Electrochemical Treatment of Industrial Wastewater. *J Hazard Materials*, 113, 123-129.
- Ramanan, M., Palanisamy, S., Sakthivel, P. (2023). Role of Nanoparticles as Oxidation Catalyst in The Treatment of Textile Wastewater: Fundamentals and Recent Advances. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 4.
- Rodriguez-Narvaes, O., M., Picos, A., R., Bravo-Yumi, N., Pacheco-Alvarez, M., Martinez-Huitile, C., A., Peralta-Hernandez, M. (2021). Electrochemical Oxidation Technology to Treat Textile Wastewaters. *Current Opinion in Electrochemistry*, 29(1), 1-13.
- Saeed, O., F., Hameed, K., W., Abbar, A., H. (2023). Treatment of Vegetable Oil Refinery Wastewater by Sequential Electrocoagulation-Electrooxidation Process. *Journal of Environmental Management*, 342.
- Saleh, I., A., Zouari, N., Al-Ghouti, M., A. (2020). Removal of Pesticides from Water and Wastewater: Chemical, Physical and Biological Treatment Approaches. *Environmental Technology & Innovation*, 19.
- Salehi, E., Daraei, P., Shamsabadi, A., A. (2016). A Review on Chitosan-based Adsorptive Membranes. *Carbohydrate Polymers*, 152, 419–432.
- Samsami, S., Mohamadi, M., Sarrafzadeh, M.H., Rene, E.R., Firoozbahr, M. (2020). Recent Advances in The Treatment of Dye-containing Wastewater from Textile Industries: Overview and Perspectives. *Process Saf. Environ. Prot.*, 143, 138–163.
- Santos, M., C., Antonin, V., S., Souza, F., M., Averio, L., R., Pinherio, V., S., Gentil, T., C., Lima, T., S., Mour, J., Silva, C., R., Lucchetti, L., Codognoto, L., Robles, I., Lanza, M. (2022). Decontamination of Wastewater Containing Contaminants of Emerging Concern by Electrooxidation and Fenton-based processes – A Review on The Relevance of Materials and Methods. *Chemosphere*, 307, 135763.
- Sarıgöz, Y. (2023). Tekstil Endüstrisi Atıksularının Yeniden Kullanımına Yönelik Membran Teknolojilerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 819061.

- Sánchez-Arévalo, C., M., García-Suarez, L., Camilleri-Rumbau, M., S., Vogel, J., Álvarez-Blanco, S., Cuartas-Uriba, B., Vincent-Vela, M., C. (2024). Treatment of Industrial Textile Wastewater by Means of Forward Osmosis Aiming to Recover Dyes and Clean Water. *Heliyon*, 10(23), 40742.
- Särkkä, H., Bhatnagar, A., Sillanpää, M. (2015). Recent Developments of Electrooxidation in Water Treatment-A Review. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 754, 46–56.
- Selki, S. (2023). Elektrooksidasyon Prosesinde Elektrot Seçimi ve Proses Performansı Üzerine Etkilerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 826968.
- Shaikh, M., A. (2009). Water Conservation in Textile Industry. *Pakistan Text. J.*, 58(11), 48–51.
- Shamsuzzaman, M., Islam, M., M., Hasan, H., M., Khan, A., M., Sayem, A., S. (2023). Mapping Environmental Sustainability of Knitted Textile Production Facilities. *Journal of Cleaner Production*, 405.
- Shang, Y., Xu, X., Gao, B., Wang, S., Duan, X. (2021). Single-atom Catalysis in Advanced Oxidation Processes for Environmental Remediation. *Chem. Soc. Rev.*, 50, 5281–5322.
- Sharma, M., Tyagi, V.V., Chopra, K., Kothari, R., Singh, H., M., Pandey, A.K. (2023). Advancement in Solar Energy-based Technologies for Sustainable Treatment of Textile Wastewater: Reuse, Recovery and Current Perspectives. *Journal of Water Process Engineering*, 56.
- Shokri, A. (2018). Employing Electro Coagulation for The Removal of Acid Red 182 in Aqueous Environment Using Box-Behenken Design Method. *Desalination Water Treat.*, 115, 281–287.
- Solak, M. (2019). Hibrit Elektrokoagülasyon/Elektrooksidasyon Prosesleri ile Denim Ürün Üretim Atıksularının Arıtımı. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23(3), 780-786.
- Soni, B. D., Patel, U. D., Agrawal, A., & Ruparelia, J. P. (2017). Application of BDD and DSA electrodes for the removal of RB 5 in batch and continuous operation. *Journal of Water Process Engineering*, 17, 11–21.
- Soylu, M. (2023). İlaç Etken Maddelerin Elektrooksidasyon Prosesi ile Gideriminde Farklı Elektrot Türlerinin Etkilerinin Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 812885.
- Sözüdoğru, O. (2022). Ti/IrO₂/RuO₂ Anot ve Paslanmaz Çelik Katot Kullanılarak Elektrooksidasyon Prosesi ile Metilen Mavisi Giderimi: İşletme Parametrelerin Rolü. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12(4), 2054-2063.

- Stefan, M. I. (2017). *Advanced Oxidation Processes for Water Treatment: Fundamentals and Applications: IWA publishing.*
- Süren, E., T. (2019). *Tekstil Atıksularının Elektrodializ Arıtma Yöntemi ile Tuzsuzlaştırılması ve Geri Kullanılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Cerrahpaşa Lisansüstü Enstitüsü, İstanbul, 616182.*
- Şahin, Y. (2006). *Asit Boya Banyosu Atıksularının Kimyasal Prosesler ile Ön Arıtılabilirliğinin İncelenmesi. Yüksek lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.*
- Tabish, M., Tabinda, A., B., Mazhar, Z., Yasar, A., Ansar, J., Wasif, I. (2024). Physical, chemical and biological treatment of textile wastewater for removal of dyes and heavy metals. *Desalination and Water Treatment, 320*, 100842.
- Tanrıseven, Altun, Y. (2013). *Applicability of Advanced Oxidation Process for The Decolorization of Textile Wastewater, Master of Science, Fatih University, Graduate School of Sciences and Engineering, İstanbul, 342814.*
- Tao, P., Wang, Y. (2023). Enhanced Photocatalytic Performance of W-doped TiO₂ Nanoparticles for Treatment of Procion Red MX-5B Azo Dye in Textile Wastewater. *International Journal of Electrochemical Science, 18*, 9, 1-12.
- Tosun, D. (2022). *Sentetik Atıksuda Elektrokoksidadasyon Yöntemi ile Boyar Madde Giderimi. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 757507.*
- Tochetto, G., A., Aragão, A., M., Oliveira, D., Immich, A., P. (2022). Can Enzymatic Processes Transform Textile Processes? A Critical Analysis of the Industrial Application. *Process Biochemistry, 123*, 27-35.
- Türkay, Ö., Barışçı, S., Ulusoy, E., Dimoglo, A. (2018). *Kanser İlaçları Atıksularının Elektrokoksidadasyon Prosesi ile Giderimi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 22(2)*, 913-917.
- Türkmenoğlu, M., B. (2020). *Tekstil Endüstrisi Ağırlıklı Organize Sanayi Bölgesi Atıksuyu ve Gerçek Tekstil Endüstrisi Atıksuyunun Fizikokimyasal Yöntemlerle Arıtılmasının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 653035.*
- UNCTAD, (2019). *Environmental Impact of Fashion Industry. Available from. https://news.un.org/en/story/2019/03/1035161. (Accessed 30 January 2021).*
- Van Hege, K. (2002). *Bottlenecks of Sustainable Water Reuse: Advanced Treatment of Municipal Wastewater and Membrane Concentrates.*
- Visigalli, S., Barberis, M., G., Turolla, A., Canziani, R., Zrimec, M., B., Reinhardt, R., Ficara, E. (2021). *Electrocoagulation–Flotation (ECF) for Microalgae Harvesting – A review. Separation and Purification Technology, 271.*

- Wu, W., Huang, Z.H., Lim, T.T. (2014). Recent Development of Mixed Metal Oxide Anodes for Electrochemical Oxidation of Organic Pollutants in Water. *Appl. Catal., A*, 480, 58–78.
- Xie, Z.H., He, C.S., Pei, D.N., Dong, Y., Yang, S.R., Xiong, Z., Zhou, P., Pan, Z., C., Lai, B. (2023). Review of Characteristics, Generation Pathways and Detection Methods of Singlet Oxygen Generated in Advanced Oxidation Processes (AOPs). *Chemical Engineering Journal*, 468.
- Xie, Z.-H., Zhou, H.-Y., He, C.-S., Pan, Z.-C., Yao, G., Lai, B. (2021). Synthesis, Application and Catalytic Performance of Layered Double Hydroxide Based Catalysts in Advanced Oxidation Processes for Wastewater Decontamination: A Review. *Chem. Eng. J.*, 414, 128713.
- Xu, J., Olvera-Vargas, H., Teo, F.Y.H., Lefebvre, O. (2021). A Comparison of Visible-light Photocatalysts for Solar Photoelectrocatalysis Coupled to Solar Photoelectro-Fenton: Application to The Degradation of The Pesticide Simazine. *Chemosphere*, 276, 130138.
- Yadav, S. and Kamsonlian, S. (2023). A review of electrochemical methods for treatment of wastewater. *Materialstoday: Proceedings*, 78(1), 36-39.
- Yalabık, A., B. (2010). K-Asit'in Foto-Fenton İleri Oksidasyonunun Modellenmesi, Optimizasyonu ve Toksikiteilerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 292066.
- Yakamercan, E., Bhatt, P., Aygun, A., Adesope, A., W., Simsek, H. (2023). Comprehensive Understanding of Electrochemical Treatment Systems Combined with Biological Processes for Wastewater Remediation. *Environmental Pollution*, 330.
- Yakut, Ş., M. (2017). Tekstil Atıksularının İleri Oksidasyon Metodları ile Arıtımı. Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Nevşehir, 483679.
- Yanık, S. (2023). Iğdır İli Katı Atık Düzenli Depolama Sahası Sızıntı Sularının Elektrokoksidasyon Yöntemiyle Arıtımı. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 786843.
- Yıldırım, R. (2022). Tekstil Boya Banyo Sularının Elektrokoksidasyon Yöntemi ile Arıtımının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin, 762488.
- Yıldız, M., A. (2011). Tekstil Endüstrisi Atıksuyunun Elektrokimyasal Yöntemler ile Arıtılabilirliğinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 290429.
- Yılmaz, T., Sahinkaya, E. (2023). Performance of Sulfur-based Autotrophic Denitrification Process for Nitrate Removal from Permeate of an MBR Treating

Textile Wastewater and Concentrate of a Real Scale Reverse Osmosis Process. *Journal of Environmental Management*, 326(B).

Zazou, H., Afanga, H., Akhouairi, S., Ouchtak, H., Addi, A., A., Akbour, R., A., Hamdani, M. (2019). Treatment of Textile Industry Wastewater by Electrocoagulation Coupled With Electrochemical Advanced Oxidation Process. *J. Water Process Eng.*, 28, 2014–2221.

Zengin, M., A., *Sektörel Çevre Sorunları*, <https://avys.omu.edu.tr/storage/app/public/mehmetali.zengin/129499/Sekt%C3%B6rel%20%C3%87evre%20Sorunlar%C4%B1.pptx>.

Zhai, C., Chen, Y., Huang, X., Isaev, A., B., Zhu, M. (2022). Recent Progress on Single-atom Catalysts in Advanced Oxidation Processes for Water Treatment. *Environmental Functional Materials*.

Zhang, G., Huang, X., Ma, J., Wu, F., Zhou, T. (2021). Ti/RuO₂-IrO₂-SnO₂ Anode for Electrochemical Degradation of Pollutants in Pharmaceutical Wastewater: Optimization and Degradation Performances. *Sustainability*, 13, 126.

Zou, J., Penh, X., Li, M., Xiong, Y., Wang, B., Dong, F., Wang, B (2017). Electrochemical Oxidation of COD from Real Textile Wastewater: Kinetic Study and Energy Consumption. *Chemosphere*, 171, 332-338.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- Kuş, B.**, Sezer, M., İşgören, M., Veli, S., (2024). Elektrokimyasal Proseslerde Metal Oksit Kaplamalı Anot Elektrotların Kullanımı. *Imascon 2024 Autumn, 13. International Marmara Science And Social Sciences Congress/Sciences Proceedings Book*, Kocaeli, 284-294, 29 Kasım 2024.
- Kuş, B.**, Sezer, M., İşgören, M., Veli, S., (2025). Anodic Electrooxidation of Textile Wastewater by Using Spray Coating Ti/TiO₂-RuO₂-IrO₂ Anode: Response Surface Optimization of The Process. *Journal of the Indian Chemical Society*, 102(2), Kocaeli, 284-294, 101595, 20 Ocak 2025.
- Kuş, B.**, Karacıl, G., Varınca, K., (2021). Üniversitede Çevre Yönetim Oryantasyon Programı Uygulaması: Adıyaman Üniversitesi Örneği. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Adıyaman, 8(14), 127-141, 30 Haziran 2021.

ÖZGEÇMİŞ

Lise öğrenimini Adıyaman Bilgi Anadolu Lisesi'nde 2015 yılında tamamladı. Aynı yıl Kocaeli Üniversitesi Çevre Mühendisliği bölümüne başladı. 2017'de yatay geçiş ile Adıyaman Üniversitesi'nde Çevre Mühendisliği bölümüne devam ederek 2020 yılında Çevre Mühendisi unvanı ile mezun oldu. 2022 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programı'nda öğrenim görmeye başladı. 2023 yılında özel bir çevre danışmanlığı firmasında çevre mühendisi olarak çalıştı. İyi derecede İngilizce ve başlangıç düzeyinde Almanca bilmektedir.

