

T.C.
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TEKSTİL ENDÜSTRİSİ ATIK SUYUNUN ELEKTROKİMYASAL ARITIMI
VE SİSTEM PERFORMANSININ İSTATİSTİKSEL OLARAK
OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN: Kübra GÖRAL
DANIŞMAN: Prof. Dr. Tekin ŞAHAN
II. DANIŞMAN: Dr. Öğr. Üyesi Şakir YILMAZ

VAN-2022

T.C.
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TEKSTİL ENDÜSTRİSİ ATIK SUYUNUN ELEKTROKİMYASAL ARITIMI
VE SİSTEM PERFORMANSININ İSTATİSTİKSEL OLARAK
OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN: Kübra GÖRAL

VAN-2022

KABUL VE ONAY SAYFASI

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Prof. Dr. Tekin ŞAHAN danışmanlığında, Kübra GÖRAL tarafından sunulan “Tekstil Endüstrisi Atık suyunun Elektrokimyasal Arıtımı ve Sistem Performansının İstatistiksel Olarak Optimizasyonu” isimli bu çalışma Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili hükümleri gereğince 22/12/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile başarılı bulunmuş ve yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Hilal DEMİR KIVRAK

İmza:

Üye: Prof. Dr. Tekin ŞAHAN

İmza:

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Dilara ÖZTÜRK

İmza:

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/....../..... tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

İmza

Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Kübra GÖRAL

ÖZET

TEKSTİL ENDÜSTRİSİ ATIKSUYUNUN ELEKTROKİMYASAL ARITIMI VE SİSTEM PERFORMANSININ İSTATİSTİKSEL OLARAK OPTİMİZASYONU

GÖRAL, Kübra

Yüksek Lisans Tezi, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Tekin ŞAHAN

II. Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Şakir YILMAZ

Aralık 2022, 75 sayfa

Tekstil endüstrisi yüksek oranda organik yük, yüzey aktif madde, kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), tuz, boya ve diğer bileşikleri içeren atıksu üretmesi nedeniyle önemli bir çevre sorunu oluşturmaktadır. Bu çalışmada, giderek arıtımı önem kazanan tekstil endüstrisi atıksularının arıtımında başarı ile uygulanan elektrokimyasal proseslerin etkinliğini incelemek ve sistem optimizasyonunu istatistiksel ve matematiksel olarak sağlamak amaçlanmıştır. Tekstil atıksuyu kesikli sistemde peroksi-koagülasyon prosesi ile arıtılmıştır. Elektrokimyasal sistem için grafit elektrot katot, demir elektrot ise anot olarak seçilmiştir. Optimizasyon, Design Expert programı ile Cevap Yüzey Yönteminin (CYY) yaygın bir kullanımı olan Merkezi Kompozit Tasarım (MKT) tarafından sağlanmıştır. Yüzey cevabı olarak KOİ giderimi seçilmiş olup, sistem performansını etkileyen önemli bağımsız parametreler akım şiddeti (A), atıksu başlangıç pH değeri, reaksiyon süresi (dk) ve destek elektrolit konsantrasyonu (NaCl) (M) olarak seçilmiştir. Program çıktılarından elde edilen optimum koşullar pH 6.10, NaCl konsantrasyonu 0.14 M, akım şiddeti 9.54 A ve reaksiyon süresi 84.60 dk olarak tespit edilmiştir. Bu koşullar altında elde edilen maksimum KOİ giderim verimi % 83.87 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç deneyler ile doğrulanmıştır. Optimizasyon sonuçları en çok bilinen kinetik modellere uygulanarak bu sonuçların, 0.9992 korelasyon katsayısı (R^2) değeri ile en çok BMG kinetik modeli ile uyum sağladığı saptanmıştır.

Anahtar kelimeler: Cevap yüzey yöntemi, Optimizasyon, Peroksi-koagülasyon, Tekstil atıksuyu.



ABSTRACT

ELECTROCHEMICAL TREATMENT OF TEXTILE INDUSTRY WASTEWATER AND STATISTICAL OPTIMIZATION OF SYSTEM PERFORMANCE

GÖRAL, Kübra

MSc. Thesis Chemical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Tekin ŞAHAN

II. Supervisor: Asst. Prof. Dr. Şakir YILMAZ

December 2022, 75 pages

The textile industry poses a crucial environmental problem as it produces wastewater containing high organic load, surfactant, chemical oxygen demand (COD), salt, dye and other compounds. This study, it is aimed to examine the effectiveness of successfully applied electrochemical processes in the treatment of textile industry wastewater, which is becoming increasingly important, and to provide system optimization statistically and mathematically. Textile wastewater was purified by a peroxy-coagulation process in batch system. For the electrochemical system, the graphite electrode was chosen as the cathode and the iron electrode as the anode. Optimization was provided by the Design Expert program and Central Composite Design (CCD), a common use of the Response Surface Method (RSM). COD removal was chosen as the surface response, and the independent variables affecting the system performance were selected as current intensity (A), wastewater initial pH value, reaction time (min) and supporting electrolyte concentration (M). The optimum conditions obtained from the program outputs were determined as pH 6.10, NaCl concentration 0.14 M, current intensity 9.54 A and reaction time 84.60 min. The maximum COD removal efficiency obtained under these conditions was calculated as 83.87%. This result has been confirmed by experiments. Optimization results were applied to the most known kinetic models and it was determined that these results were most compatible with the BMG kinetic model with a correlation coefficient (R^2) value of 0.9992.

Keywords: Optimization, Peroxi-coagulation, Response surface methodology, Textile wastewater.



ÖN SÖZ

Yüksek lisans eğitimim süresince ve tez çalışmasının hazırlanması sırasındaki ilham verici rehberliği, sürekli cesaretlendirmesi, teşvik edici yönlendirmeleri, değerli bilgi birikimi ve önerilerinden sürekli faydalandığım danışman hocam Sayın Prof. Dr. Tekin ŞAHAN'a içten ve derin şükranlarımı sunarım. Yaptığım çalışmada her türlü ilgi ve yardımlarını esirgemeyen, her konuda destek olan, akademik alandaki rehberliği ve bana kattıkları için eş danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Şakir YILMAZ'a sonsuz teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarım sırasında bilgi ve fikirlerinden yararlandığım, katkılarıyla beni yönlendiren, tez çalışmasının gerçekleşebilmesi için her türlü imkânı sağlayan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Dilara ÖZTÜRK'e yardımları ve nezaketi için minnettarım. Destekleri için Dr. Ümit ECER ve Zilan ŞİRP'e teşekkür ederim. Ayrıca yüksek lisans eğitimimi tamamlamama fırsat tanıyan kurumum Van Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü'ne ve yöneticilerine teşekkür ederim.

Hayatımın her alanında daima yanımda olan, ilgilerini, sevgilerini ve desteklerini hiç esirgemeyen, çaresizlik anlarında bana güç kaynağı olan, varlıklarından ilham aldığım canım ailem ve çok sevdiğim arkadaşlarıma, bu başarımda ve bugün bulunduğum konuma gelmeme katkı sağlayan, hayatıma dokunan herkese sonsuz teşekkür ederim.

2022

Kübra GÖRAL



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
ÖN SÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xv
EKLER DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tekstil Endüstrisinin Genel Özellikleri	3
1.2. Tekstil Sektörü Genel Üretim Süreçleri	3
1.2.1. Haşılama.....	5
1.2.2. Haşıl giderme ve yıkama.....	6
1.2.3. Ağartma	6
1.2.4. Merserizasyon	6
1.2.5. Boyama	6
1.2.6. Apreleme	7
1.2.7. Yün karbonizasyonu.....	7
1.2.8. Yün keçeleştirme.....	7
1.3. Tekstil Atıksuyu Karakteristiği.....	8
1.4. Tekstil Sanayi Atıksularının Alıcı Ortama Deşarj Standartları	9
1.5. Tekstil Endüstrisi Atıksularının Arıtım Yöntemleri	10
1.6. Peroksi-Koagülasyon Metodu	15
1.6.1. Peroksi-Koagülasyon metodunun avantaj ve dezavantajları.....	17
1.6.2. Elektrokoagülasyon prosesini etkileyen faktörler	18
1.6.2.1. Elektrot materyali.....	18
1.6.2.2. Elektrotların konumu	18
1.6.2.3. Akım yoğunluğu	19

	Sayfa
1.6.2.4. pH etkisi	20
1.6.2.5. Destek elektrolit konsantrasyonu (DEK)	20
1.6.2.6. Elektroliz süresi	20
1.7. Cevap Yüzey Yöntemi (CYY).....	20
2. KAYNAK BİLDİRİŞLERİ	25
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	31
3.1. Materyal.....	31
3.1.1. Kullanılan araç ve gereçler.....	31
3.1.2. Kimyasal maddeler.....	32
3.1.3. Atıksu temini ve özelliklerinin belirlenmesi	32
3.2. Peroksi-Koagülasyon Denemelerinin Yapıldığı Düzenek.....	33
3.3. Yöntem	35
3.3.1. Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) analizi	35
3.3.2. Toplam katı madde (TKM) analizi	36
3.3.3. Askıda katı madde (AKM) analizi	36
3.3.4. Amonyum (NH_4^+) analizi.....	36
3.3.5. Sülfat (SO_4^{-2}) analizi	36
3.3.6. Toplam azot (TN) analizi	37
3.3.7. Toplam sertlik analizi.....	37
3.3.8. Kalsiyum sertliği analizi	37
3.3.9. Fosfat (PO_4^{-3}) ve nitrat (NO_3^-) analizi.....	38
3.3.10. Diğer analizler	38
3.4. Deneysel Verilerin Hesaplanması İçin Kullanılan Eşitlikler.....	38
3.4.1. Giderim veriminin hesaplanması	38
3.4.2. Enerji tüketiminin hesaplanması	39
3.4.3. Oluşan çamur miktarının hesaplanması	39
3.4.4. Elektrot tüketiminin hesaplanması	39
3.5. Deneysel Dizayn ve Optimizasyon.....	40
3.5.1. Merkezi kompozit tasarım (MKT)	40
3.6. Kinetik Modeller.....	44

	Sayfa
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	47
4.1. Peroksi-koagülasyon Sisteminin Optimizasyonu	47
4.1.1. MKT deneyleri ve sonuçları.....	47
4.1.2. MKT quadratik model eşitliği ile numerik optimizasyon	58
4.2. Sonuçların Kinetik Denklemlere Uygulanması	59
4.3. Karakterizasyon Sonuçları	60
5. SONUÇ	63
KAYNAKLAR	65
EKLER	73
ÖZGEÇMİŞ	75

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Proses aşamalarında meydana gelen atıksu içerikleri	9
Çizelge 1.2. Tekstil sanayi (Açık elyaf, iplik üretimi ve terbiye)	10
Çizelge 1.3. Tekstil sanayi (Dokunmuş kumaş terbiyesi ve benzerleri)	10
Çizelge 1.4. Boya giderim yöntemlerinin avantaj ve dezavantajlarına genel bir bakış..	12
Çizelge 3.1. Çalışılan atıksuyun karakterizasyon sonuçları	32
Çizelge 3.2. KOİ analizleri için kullanılan çözeltilerin hazırlanması.....	35
Çizelge 3.3. Toplam sertlik analizleri için kullanılan çözeltilerin hazırlanması	37
Çizelge 3.4. Kalsiyum sertlik analizleri için kullanılan çözeltilerin hazırlanması	38
Çizelge 3.5. Sistem optimizasyonu için bağımsız parametrelerin değerleri ve aralıkları	43
Çizelge 3.6. MKT için önerilen deney tasarımı	43
Çizelge 4.1. Deneyler sonucu elde edilen % KOİ giderim sonuçları	48
Çizelge 4.2. Giderim için Design Expert programı tarafından önerilen fonksiyonlara ait istatistiksel parametreler.....	49
Çizelge 4.3. Giderim için ikinci derece polinom fonksiyonuna (Kvadratik Model) ait ANOVA analizi.....	49
Çizelge 4.4. Numerik analiz kullanılarak elde edilen optimum sonuçlar.....	58
Çizelge 4.5. Kinetik modellerle elde edilen sonuçlar	59
Çizelge 4.6. Arıtılmış atıksu karakterizasyonu ve giderim yüzdeleri.....	61



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Tekstil sektörü genel üretim prosesi.....	4
Şekil 1.2. Atıksuların arıtım metotları.....	11
Şekil 1.3. Peroksi-elektrokoagülasyon prosesi.....	17
Şekil 1.4. a) MP-P sistemi, (b) MP-S sistemi, (c) BP-S sistemi.....	19
Şekil 3.1. Deneyler süresince kullanılan katot (a) ve anot (b) elektrotlar.....	33
Şekil 3.2. Deneylerde kullanılan güç kaynağı (a) ve sıvı sirkülatörü (b).....	34
Şekil 3.3. Kesikli denemelerin yapıldığı deneysel düzenek (1-Sabit sıcaklık sıvı sirkülatörü, 2-Isı ceketli reaktör, 3-Elektrotlar, 4-Hava motoru, 5-Doğru akım güç kaynağı).....	34
Şekil 3.4. Deneylerde kullanılan termoreaktör (a) ve spektrofotometre (b).....	35
Şekil 3.5. Dört giriş değişkenli küçük tip CCD’de eksenel, faktöriyel ve merkez noktaların şematik gösterimi.....	41
Şekil 4.1. Deneysel olarak gözlemlenen ve program tarafından tahmin edilen değerlerin grafiği.....	51
Şekil 4.2. Artıkların (residuals) normal % olasılık grafiği.....	52
Şekil 4.3. Deney yapılış sırasına göre artıkların (residuals) grafiği.....	53
Şekil 4.4. Tahmin edilen değerlere karşılık artıkların (residuals) grafiği.....	54
Şekil 4.5. % KOİ giderimi için pH, akım şiddeti, zaman ve destek elektrolit konsantrasyonunun değerlerindeki değişimlerin simultane etkisini gösteren, MKT deneylerinden elde edilen ve program tarafından üretilen üç boyutlu grafikler.....	55
Şekil 4.6. BMG kinetik model eğilim grafiği.....	60



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
%	Yüzde
°C	Santigrat derece sıcaklığı
A	Amper
C	Coloumb
cm	Santimetre
C ₀	Başlangıç derişimi
dk	Dakika
F	Faraday sabiti
I	Akım şiddeti
k	Hız sabiti
kHz	Kilohertz
kWh	Kilowatt saat
L	Litre
M	Molar
M _a	Moleküler ağırlık
mg	Miligram
N	Deney sayısı
nm	Nanometre
R ²	Korelasyon katsayısı
V	Volt
X	Kodlu değişken
β _i	Regresyon katsayısı
δ _i	Bağımsız değişken
μm	Mikrometre

Kısaltmalar

Açıklama

AKM	Askıda Katı Madde
AOP	İleri Oksidasyon Prosesi
AOX	Halojenlenmiş Organik Bileşik
BOİ	Biyolojik Oksijen İhtiyacı
CMC	Karboksi Metil Selülöz
CNT	Karbon Nanotüp
CYY	Ceyap Yüzey Yöntemi
ÇKM	Çözülmüş Katı Madde
DEK	Destek Elektrolit Konsantrasyonu
EF	Elektrofenton
EK	Elektrokoagülasyon
ES	Elektrosorpsiyon
GSYH	Gayri Safı Yurtiçi Hâsıla
ICP-OES	İndüktif eşleşmiş plazma optik emisyon spektro
KOİ	Kimyasal oksijen ihtiyacı
NF	Nanofiltrasyon
PFO	Pseudo 1. Derece
PK	Peroksi-koagülasyon
Ppm	Part Per Milion (Milyonda Bir)
PSO	Pseudo 2. Derece
PTFE	Politetrafloroetilen
PVA	Poli Vinil Alkol
RES	Renklilik Sayısı
SKKY	Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği
TKM	Toplam Katı Madde
TOK	Toplam Organik Karbon
US	Ultrasonik
UV	Ultraviyole
YSA	Yapay Sinir Ağı

EKLER DİZİNİ

	Sayfa
Ek 1. Merkezi kompozit tasarım istatistiksel verileri	73





1. GİRİŞ

Hızlı nüfus artışı, endüstriyel faaliyetlerin çoğalması ve kaynakların bilinçsizce kullanımı ekosistem üzerinde geri dönülemez sorunlara yol açmaktadır. Bu bağlamda, çevrenin korunması gün geçtikçe daha büyük bir sosyal kaygı konusu haline gelmiştir.

Biyolojik olarak kolayca parçalanamayan, toksisiteleri yüksek kirleticilerin deşarjı çevre kirliliği seviyesini artırmakta ve canlı yaşamına büyük bir tehdit oluşturmaktadır. Bu etkileri sebebiyle çevre kirliliğinin kontrolü insanoğlunun karşı karşıya olduğu en büyük zorluklardan biridir. Son yıllarda maruz kaldığımız çevre problemleri arasında kaynakların uygunsuz kullanımı ve arıtılması nedeniyle su kirliliği alanı giderek daha geniş ve derin hale gelmiştir (Zamora-Ledezma ve ark., 2021).

Yeryüzündeki su kaynaklarının kalitesini etkileyen en önemli kirleticilerden biri endüstriyel atıksulardır. Tekstil, kozmetik, deri tabaklama, kağıt, ilaç ve gıda sektörü gibi birçok farklı endüstriyel alandan kaynaklanan atıksular, çok sayıda boya ve kirlilik faktörü bulundurur. Bu atıksular sahip oldukları toksik, mutajenik ve kanserojenik özellikleri sebebiyle etkili bir arıtma prosesine ihtiyaç duymakta ve atıksu deşarjına ilişkin yasalara uygun hale dönüştürülmek zorundadırlar (Arshad, 2017).

Çevresel etkisi açısından tekstil endüstrisinin dünya çapındaki herhangi bir endüstriden daha fazla su kullandığı tahmin edilmektedir. Ayrıca deşarj edilen atıksuların neredeyse tamamı oldukça kirlidir (Holkar ve ark., 2016).

Tekstil atıksularının boyanması ve bitirilmesi sırasında kullanılan yüksek kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) seviyeleri, kuvvetli renk, askıda katı madde (AKM), organik yük, yüzey aktif maddeler, tuzlar, klor bileşikleri ve diğer bileşikler atıksu karakterini kompleks bir yapıya dönüştürmektedir (Bahadur ve ark., 2020). Yüksek KOİ miktarı, atıksudaki inatçı bileşiklerin varlığına işaret eder ki bu da alıcı su ortamı için gerekli olan oksijeni tüketerek toksik bir yapıya neden olur ve atıksu arıtımını zorlaştırır (Castro ve ark., 2018).

Tekstil atıklarının karmaşıklığı ve değişkenliği nedeniyle, tüm tekstil atık türleri için uygun veya evrensel olarak uygulanabilir hiçbir özel arıtma metodolojisi yoktur. Bu atıksuların arıtılması ve yeniden kullanılmasına izin vermek için kimyasal oksidasyon,

membran prosesleri, biyolojik arıtmalar, koagülasyon/flokülasyon ve ileri oksidasyon prosesleri (AOP'ler) dahil olmak üzere farklı konfigürasyonlarda uygulamalar önerilmiştir (Paździor ve ark., 2019).

Ekosistemin işleyiş dengesine zarar vermeyen, alıcı ortam için uygun kaliteye sahip su kütleleri sağlamak adına atıksu deşarjı alanında daha katı yasalar dayatılmakta ve bu atıksuların arıtılması için uygun arıtma metodunun bulunması bilimsel arenada sıklıkla çalışılan kritik bir konu haline gelmiştir.

Bu çalışmada giderek arıtımı önem kazanan tekstil endüstrisi atıksularının arıtımında başarılı ile uygulanan elektrokimyasal proseslerin etkinliğini incelemek ve sistem optimizasyonunu istatistiksel ve matematiksel olarak sağlamak amaçlanmıştır. Yapılan çalışmada Malatya'da faaliyet gösteren bir tekstil endüstrisinden çıkan atıksuların kesikli sistemde peroksi-koagülasyon (PK) yöntemi ile giderimi incelenmiştir. Hedef kirletici olarak seçilen atıksuyun kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ)'nin giderimini etkileyen operasyonel parametrelerin optimum noktaları tespit edilmiştir. Aynı zamanda optimum noktaların 'yüksek giderim verimliliği-düşük enerji tüketimi' ni de sağlaması gerektiğinden birçok operasyonel parametre bağımsız değişken olarak çalışılmıştır. Bunlar; uygulanan akım şiddeti, atıksu başlangıç pH değeri, reaksiyon süresi ve destek elektrolit konsantrasyonu olarak seçilmiştir. Belirlenen 4 değişken için Design Expert versiyon 7.0.0. tarafından çalışma koşulları belirlenen 30 adet deney gerçekleştirilmiştir. Elektrokimyasal sistem için grafit elektrot katot olarak, demir elektrot ise anot olarak kullanılmıştır. Tekstil endüstrisi atıksuyu arıtmada oksidasyon ve koagülasyon proseslerinin performansı ortaya konulmuştur. Ayrıca, tekstil endüstrisi atıksuyunun peroksi-koagülasyon prosesi ile arıtımında, seçilen bağımsız parametrelerin ayrı ayrı ve birlikte etkisi incelenmiştir. Bu bilgiler ışığında çıkış suyu KOİ konsantrasyonlarının su kirliliği kontrol yönetmeliklerine uygun olması amaçlanmıştır.

1.1. Tekstil Endüstrisinin Genel Özellikleri

Dünya’da olduğu gibi tekstil endüstrisi, Gayri Safi Yurtiçi Hasıla (GSYH) payı, sürekli artan yatırım ve ihracat oranı ve sağladığı iş alanı imkanı ile ekonomik kalkınma açısından Türkiye’nin öncü sektörlerinin arasındadır (Uyanık ve ark., 2019). Giderek artan nüfus ile tekstil sanayisi hızla artmakta ve gelişmektedir. Çeşitli tekstil materyallerinin (doğal, sentetik, geri dönüştürülmüş lifler, iplikler, filamentler) elyafa dönüştürülmesi, elyafın ise dokunarak/örülerek ve çeşitli proseslerle kumaş haline getirildiği süreç tekstil sektörünü ifade etmektedir (Göknil ve ark., 1984). Gündelik hayatın her anında farklı ihtiyaçları gidermek adına kullandığımız tekstil ürünleri insan hayatına muazzam bir fayda sağlamıştır.

Endüstriyel alanda en uzun ve en karmaşık sürece sahip olan tekstil endüstrisi üretim prosesinde birçok farklı adımı içerir. Bu adımların hemen hemen hepsinde atıksu oluşur. Bu işlemlerden kaynaklanan atıksuların karakteri ve hacmi, proses çeşidi ve hammadde özelliği dahil olmak üzere çeşitli faktörlere bağlıdır. İnsanoğlunun temiz suya erişim hakkı göz önünde bulundurulduğunda tekstil sanayisinde oluşan yüksek miktardaki atıksuların ekolojik dengeyi korumak adına geri kazandırılması global alanda bir öneme sahiptir.

Tüm tekstiller istenen mukavemeti, dayanıklılığı, görünümü ve dokuyu oluşturmak için farklı şekillerde düzenlenen liflerden oluşur. Lifler karıştırma, temizleme, tarama, çekme, fitilleme ve eğirme gibi çeşitli işlemlerden geçirilerek iplik üretimi yapılır. İplikler ise dokuma ve örme adımlarından geçirilerek kumaş haline dönüştürülür. Üretim sürecinde yer alan aşamalar genel olarak benzer adımlar içermektedir. Fakat üretim süreci kullanılan hammaddeye göre değişik üretim süreçleri içerebilmektedir (Kırdar, 1995).

1.2. Tekstil Sektörü Genel Üretim Süreçleri

Tekstil sektöründe genel olarak yünlü, pamuklu ve sentetik elyaf çeşitlerine rastlanmaktadır. Aşağıda tekstil üretim sürecine ait adımlar gösterilmektedir (Şekil 1.1).

Şekil 1.1. Tekstil sektörü genel üretim prosesi (Dasgupta ve ark., 2015).

Tekstil atıksuyu, haşıl sökme, yıkama, ağartma, merserize etme, boyama, baskı veya bitirme işlemlerinin herhangi bir kombinasyonundan gelebilir. Su kullanımı tamamen kullanılan ekipmana ve kumaşa bağlıdır ve prosesler ve malzemeler arasında büyük farklılıklar gösterir. İplik üretimi, dokuma (bazı makineler su kullanır) ve yakma (sadece biraz kirli soğutma suyu) gibi bazı işlemler neredeyse hiç atıksu üretmez. Haşılama gibi bir süreçte üretilen atıksu miktarı azdır, ancak çok yoğundur. Diğer bir taraftan, yıkama, boyama ve ağartma gibi işlemler, bileşimi kompleks bir yapıya sahip olan yüksek hacimlerde atıksu üretir. Önemli miktarda atıksu üreten prosesler aşağıda kısaca açıklanacaktır.

Pamuk ve bazı suni ve sentetik iplikler, mukavemet kazanmak ve liflerin kopmasını en aza indirmek için eğirmeden önce veya dokumadan önce boyutlandırılır. İpler silindirler arasından geçer, ebat elyafın içine bastırılır ve ardından iplikler kurutulur (Bisschops ve Spanjers, 2003).

1.2.1. Haşılama

Haşılama, çeşitli gerilme ve zorlamalarla muamele edilen liflerin, birbirine daha sıkı yapışarak dayanıklı hale gelmeleri ayrıca kayganlık seviyelerini artırarak dokumadaki sağlamlığın artması işlemidir. Ayrıca bu işlem ile beraber liflere antifungal ve antibakteriyel ilaçlar gibi koruyucu kimyasallar eklenerek yabancı maddeler uzaklaştırılır (Aytaç, 2011). Haşıl maddeler genelde doğal yollarla elde edilen nişasta, modifiye selüloz ve sentetik malzemelerdir. Haşıl operasyonlarının %75'inde nişasta veya nişasta türevleri kullanılmaktadır. Bu, nişastayı en önemli haşıl malzemesi yapar (Opwis ve ark., 1999). Haşılama için kullanılan diğer maddeler polivinil alkol (PVA), poliakrilatlar ve karboksimetil selülozdur (Correia ve ark., 1994). Bu tür sentetik bileşiklerin doğal yollarla elde edilen haşıl maddelerinin yerine kullanılması biyolojik oksijen ihtiyacının (BOİ) artmasına yol açmaktadır.

Haşılama prosesinden çıkan atıksu küçük hacimlere sahip olmasına rağmen yüksek oranda kirliliğe (KOİ, BOİ, AKM) sebep olmaktadır (Bisschops ve Spanjers, 2003). Haşılama prosesi atıksuları KOİ konsantrasyonları genellikle 950-20000 mg/L arasında değerlere sahiptir (Birgül, 2006).

1.2.2. Haşıl giderme ve yıkama

Dokumadan sonra, kumaşın daha fazla işlenmesinden önce haşıl çıkarılmalıdır. Haşılama sırasında kullanılan kimyasallar ipliği kaplar ve bu nedenle uygulanacak diğer kimyasallara karşı bir bariyer oluşturarak boyarmaddenin rengini değiştirebilir (Rucker ve ark., 1988). Haşıl sökmeye ortaya çıkan suda yüzey aktif maddeler, asit-baz düzenleyici bazı kimyasallar bulunmaktadır. Haşıl giderme ve yıkama basamakları atıksulardaki toplam kirlilik yükünün %50'sini oluşturmaktadır (Birgöl, 2006).

1.2.3. Ağartma

Ağartma prosesi kullanılan kimyasallar ile liflerin beyaz renge sahip olması ve yabancı maddelerin giderilmesi amacıyla kullanılır. Bu işlemde genelde güçlü yükseltgen kimyasallar kullanılır. Kullanılan kimyasallar arasında sodyum hipoklorit ve hidrojen peroksit ile optik parlaticılar bulunur. BOİ seviyeleri düşüktür, ancak atıksuyun katı içeriği yüksek olabilir (Tomasino, 1992). Atıksulardaki BOİ'nin %5 ve KOİ'nin %9'u bu işlemde kaynaklanmaktadır (Biroğlu, 2012).

1.2.4. Mersevizasyon

Mersevizasyon prosesi liflerin parlaklığını artırmak pürüzsüz bir izlenim sağlamak ve boyayı absorblama kapasitesini artırmak amacıyla yapılır. Liflerin şişmesine ve dairesel bir enine kesit almasına neden olan soğuk bir sodyum hidroksit çözeltisi uygulanır. Solüsyon asitle yıkanır. Atıksularda düşük BOİ ve askıda katı madde (AKM) içerir ayrıca bazik karakterli bir atıksu ortaya çıkmaktadır (Bisschops ve Spanjers, 2003).

1.2.5. Boyama

Boyama prosesi dokuma liflerine istenilen renklerin verilmesi amacıyla uygulanan işlemdir. Atıksuların arıtılması alanında çalışılan en önemli aşamalardan biridir. Bu işlem sırasında birçok yardımcı kimyasal kullanılmaktadır. Boyama

adımında üretilen tipik kirleticiler, renk ve organik asitler, sabitleyici maddeler, köpük gidericiler, oksitleyici/indirgeyici maddeler ve seyrelticiler gibi farklı yardımcı maddelerdir. Boyama atıksuları kullanılan boyarmaddeye göre değişkenlik göstermektedir. Bu atıksularda yüksek KOİ, BOİ, çözünmüş katı madde (ÇKM) ve sürfektan içerebilir (Uysal, 2017).

1.2.6. Apreleme

Tekstil üretiminin bir aşamasını tamamlayan ve ürünü bir sonraki üretim aşamasına hazırlayarak daha açık hale getiren çok çeşitli fiziksel ve kimyasal işlemleri içermektedir. Apreleme, ürüne değer katar ve onu son kullanıcı için daha çekici, kullanışlı ve işlevsel hale getirir. Bu aşamada ürüne dayanıklılık, buruşmazlık, su geçirmezlik, ateşe dayanıklılık, saydamlık gibi estetik ve gelişmiş özellikler kazandırılmaktadır. Bu aşamada kullanılan önemli malzemeler selülozik maddeler, nişasta türleri, doğal kauçuk, proteinler, alginatlar, ve yapay apre maddeleri olarak sıralanabilir (Serindağ ve Halefoğlu, 2003).

1.2.7. Yün karbonizasyonu

Kirli yün liflerindeki bitkisel ve diğer işlemlerde giderilemeyen artıklar karbonizasyonla giderilir. Bu işlem ile yün inorganik asitler veya ıslatıcı asidik özelliği gösteren tuzlarla yüksek sıcaklıklarda işleme tabi tutulur. Oluşan atıksular düşük organik madde içeriğine sahip olmakla birlikte, asit arıtımı nedeniyle yüksek miktarda çözünmüş katı içermektedir (Şimşeker, 2009).

1.2.8. Yün keçeleştirme

Yünlü kumaş, malzemenin matlaşması, çekmesi ve böylece daha yoğun hale gelmesi için işlenir. Keçeleme, sıcak soda külü veya sülfürik asit çözeltilerinin kullanılmasını içerir. Kumaş daha sonra iyice yıkanır. Bu aşamada oluşan atıksuyun çok yüksek BOİ içeriğine sahiptir çıkmaktadır (Bisschops ve Spanjers, 2003).

1.3. Tekstil Atıksuyu Karakteristiği

Kaynak ile ihtiyaçlar arasındaki açığı kapatmak için fiili kaynakların korunması ve yeni kaynak arayışları bir zorunluluk haline gelmiştir. Endüstriyel faaliyetler arasında tekstil en çok su tüketen faaliyetler arasındadır. Yapılan araştırmalara göre 1 kg bitmiş tekstil ürünü yaklaşık olarak 200 litre su tüketmektedir. Sonuç olarak yüksek miktarlarda oluşan atıksu nehirlerin kirlenmesi, yeraltı sularının kirlenmesi, epidemiyolojik riskler taşınması, kötü kokulara sebebiyet vermesi ve bunun gibi birçok nedenden ötürü çevre ve insan yaşamı için potansiyel rahatsızlık kaynağıdır (Hendaoui ve ark., 2022).

Tekstil endüstrisinden kaynaklanan atıksuların genel karakteristiği yüksek kimyasal oksijen ihtiyacı, bulanıklık, organik yük, renk, tuzlar, yüzey aktif maddeleri içermesidir. Özellikle yüksek derişimlerde renk ve KOİ içeren atıksu estetik bir problem oluşturur ayrıca atıksuyun arıtımı için direnç oluşturur (Dörtkol, 2014). Tekstil atıksularındaki başlıca kirleticiler son ürün maddeleri, yüzey aktifler, inhibe edici maddeler, klorlu bileşikler, tuzlar, boyama maddeleri, toplam fosfat, çözünmüş katılar, askıda ve toplam katılar gibi organik ve inorganik kimyasallardır. Renklendiriciler tekstil atıksularındaki ana kirletici maddedir ve su ekosistemlerine deşarj edilmeden önce arıtılması gerekmektedir. Boya içerikli atıksular, göllerin, nehirlerin veya lagünlerin sularına ışık girmesini kısıtlayarak fotosenteze dayanan biyolojik süreçleri engellemektedir. Ayrıca, bu atıksular içerdikleri kimyasallar açısından toksik, kanserojenik, mutajonik ya da teratojenik olduğu için mikrobiyal ve hayvan türlerini etkilemektedir (Khandegar ve Saroha, 2013). Bu bağlamda tekstil atıksuları sadece yasal standartları karşılamakla kalmamalı aynı zamanda estetik kaygıları da giderecek şekilde arıtılmalıdır.

Tekstil işlemlerinde, özellikle yaş proseslerde önemli miktarda kimyasal madde kullanılmaktadır. Bunlar halojenlenmiş organik bileşikler (AOX), alkilfenol etoksilatlar (APEOs), hidrokarbonlar, pestisitler, boyarmaddeler, tuzlar, asitler, alkaliler, metaller, nano-malzemeler gibi kimyasal maddeler olarak sıralanabilir (Altun Kurtoğlu, 2021). Tekstil kimyasalları, tekstil atıklarının geri kazanılmasında da önemli riskler

oluşturmaktadır. Bu riskler karşısında, bu tür kirliliklerin arıtılması ve kaynağında azaltılması bir zorunluluk haline gelmektedir (Norin ve ark., 2020).

Çeşitli tekstil prosesinde ortaya çıkan atıksuyunun karakterizasyonu çizelge 1.1’de gösterildiği gibidir.

Çizelge 1.1. Proses aşamalarında meydana gelen atıksu içerikleri (Yusuff ve ark., 2004)

Kirletici kaynağı	Atık Bileşimi	Kirletici Faktörü
Proses suyu	Metal çeşitleri, sülfür, siyanür	Düşük KOİ ve BOİ
Ham kumaş, iplik	Karboksimetil selüloz (CMC), mineral yağlar, yüzey aktif maddeler, nişasta, APEO, PVA, antimon	
Haşılama	Modifiye selüloz, nişasta, poliakrilikler, vakslar, PVA, CMC, ıslatıcı maddeler	KOİ, yüksek oranda BOİ
Piştirme	Yüzey aktif maddeler, dezenfeksiyon maddeleri, asit ve baz düzenleyiciler, çözücüler, sabunlar, yağlar, enzimler, antistatik maddeler, pektin, parafin	BOİ ve yüksek KOİ
Haşıl Sökme	Nişasta, CMC, PVA, enzimler, amonyak, parafinler	KOİ, AKM, ÇKM, yüksek oranda BOİ
Ağartma	H ₂ O ₂ , asit ve baz düzenleyiciler, NaClO, AOX, organik stabilizatör veya sodyum silikat	Yüksek alkalinite, yüksek askıda katı madde
Merserizasyon	Sodyum hidroksit, pamuk mumu	Düşük BOİ, çözünmüş katı madde, yüksek pH
Boyama	Renklendiriciler, yüzey aktif maddeler, metaller, indirgeyici ve oksitleyici maddeler, tuzlar, sülfür, CH ₂ O	Güçlü renk, yüksek BOİ, çözünmüş katı madde, ağır metaller
Baskı	Alkali nişastalar, çapraz bağlayıcı maddeler, üre, asitler, yağlar, bağlayıcılar, sakızlar, macunlar	Yüksek renklilik, yüksek BOİ, yağ, askıda katı madde, alkali, düşük BOİ
Apreleme	Klorlu bileşikler, reçineler, yumuşatıcılar, parafinler, asetat, solventler, stearat	BOİ ve daha düşük KOİ

1.4. Tekstil Sanayi Atıksularının Alıcı Ortama Deşarj Standartları

Endüstriyel atıksular ile ilgili Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği’nde (SKKY) yer alan alıcı ortamda kirliliği azaltmak için belirlenen kirlilik parametrelere ilişkin sınır değerler çizelge 1.2 ve çizelge 1.3’te belirtildiği gibidir (SKKY, 2004).

Çizelge 1.2. Tekstil sanayi (Açık elyaf, iplik üretimi ve terbiye)

PARAMETRE	BİRİM	KOMPOZİT NUMUNE 2 SAATLİK	KOMPOZİT NUMUNE 24 SAATLİK
Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)	(mg/L)	350	240
Serbest Klor	(mg/L)	0.3	-
Sülfür (S^{-2})	(mg/L)	0.1	-
Toplam Krom	(mg/L)	2	1
Amonyum Azotu (NH_4-N)	(mg/L)	5	-
Sülfat	(mg/L)	1	-
Yağ ve Gres	(mg/L)	10	-
pH		6-9	6-9
Balık Biyodeneyi (ZSF)		4	3

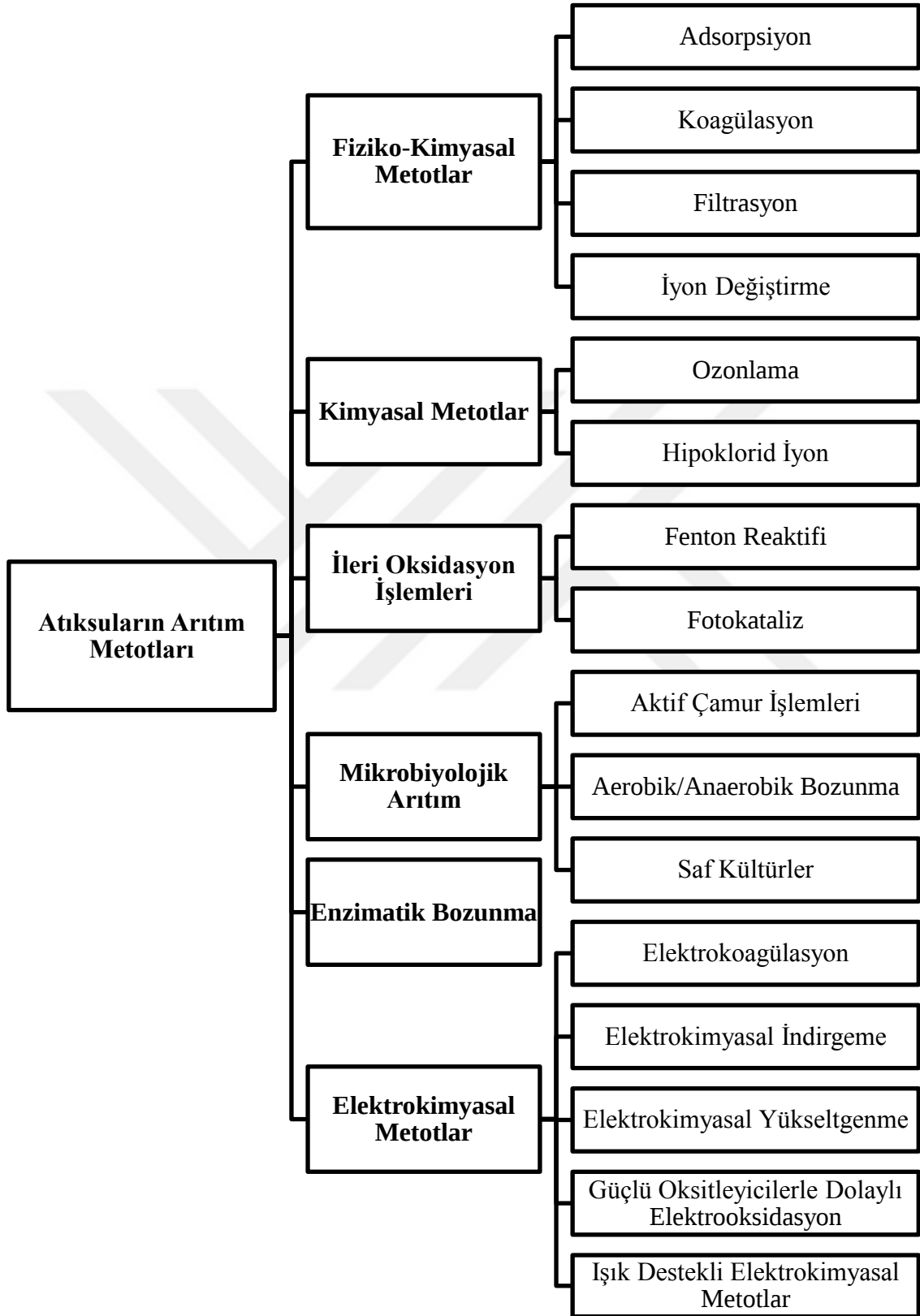
Çizelge 1.3. Tekstil sanayi (Dokunmuş kumaş terbiyesi ve benzerleri)

PARAMETRE	BİRİM	KOMPOZİT NUMUNE 2 SAATLİK	KOMPOZİT NUMUNE 24 SAATLİK
Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)	(mg/L)	400	300
Serbest Klor	(mg/L)	0.3	-
Sülfür (S^{-2})	(mg/L)	0.1	-
Toplam Krom	(mg/L)	2	1
Amonyum Azotu (NN_4-N)	(mg/L)	5	-
Sülfat	(mg/L)	1	-
Fenol	(mg/L)	1	0.5
Askıda Katı Madde (AKM)	(mg/L)	140	100
pH		6-9	6-9
Balık Biyodeneyi (ZSF)		4	3

1.5. Tekstil Endüstrisi Atıksularının Arıtım Yöntemleri

Çeşitli kirleticileri atıksulardan uzaklaştırmak için adsorpsiyon, kimyasal oksidasyon, iyon değiştirme, elektroliz, biyobozunma, membran filtrasyon, kimyasal koagülasyon, elektrokoagülasyon, elektrofenton, fotokataliz, enzimatik bozunma vb. gibi birçok metot uygulanmıştır (Lotito ve ark., 2012; Li ve ark., 2016; Li ve ark., 2019).

Aşağıda atıksulardan boyarmadde gideriminde kullanılan yöntemler özetlenmiştir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Atıksuların arıtım metotları.

Son zamanlarda yapılan çalışmalar öncelikle su ortamlarındaki canlı hayatın korunması için deşarj edilen tekstil endüstrisi atıksularının ekonomik ve etkili yöntemler geliştirilerek arıtılmasına odaklanmıştır. Bu tekniklerin her birinin kendine özgü avantajları ve sınırlamaları vardır.

Çizelge 1.4. Boya giderim yöntemlerinin avantaj ve dezavantajlarına genel bir bakış (Katherasan ve ark., 2018)

Fiziko-Kimyasal Metotlar			
Yöntem	Tanım	Avantajları	Dezavantajları
Adsorbsiyon	Biyolojik olarak parçalanması zor veya imkânsız organik maddeler adsorbanların yüzeyinde tutularak giderilirler.	Çeşitli boyalar için etkili, yüksek kaliteli arıtılmış su, rejenere adsorbent.	Adsorbent pahalılığı, bakım maliyetinin yüksek olması, askıda katı madde içeriğinin düşürülmesi gerekliliği.
Koagülasyon /Flokülasyon	Kirleticiler ajan maddelerle tortu oluşturarak çöktürülür. Tortular için filtrasyon yöntemi uygulanır.	Dispers ve kükürt boyaları için ekonomik olarak uygulanabilir, yüksek giderme verimi, ucuz olması.	Büyük miktarda konsantre çamur, pH bağımlılığı ve yüksek oranda çözünür boyalar için yetersiz uzaklaştırma.
Membran filtrasyonu	Atıksuyu temiz sudan ayıran bir tabakadan geçirilir.	Tüm boya türleri için etkili, yüksek kaliteli arıtılmış atıksu oluşur.	Yüksek çalışma basıncı, önemli miktarda enerji tüketimi, yüksek maliyet, nispeten kısa membran ömrü.
İyon değişimi	İyonların sabit bir katı yüzeye tutturulmuş benzer iyonlarla değiştiği geri dönüşümlü bir işlemdir.	Kullanımdan sonra solventin rejenerasyonunda ağırlık kaybı olmaz ve çözünür boyalar için etkilidir, yüksek kaliteli su oluşur.	Dispers boyalar için etkili değildir, yüksek maliyetli ve pahalı organik çözücüler.

Çizelge 1.5. Boya giderim yöntemlerinin avantaj ve dezavantajlarına genel bir bakış
(Katherasan ve ark., 2018) (devam)

Yöntem	Tanım	Avantajları	Dezavantajları
Kimyasal Yöntem			
Oksidasyon	Ositleyici reaktifler kullanılır, reaktifler boya moleküllerini karbondioksit ve suya parçalar, katalizör kullanılır.	Uygulama kolaylığı kısa reaksiyon süresi.	Pahalı, H ₂ O ₂ reaktifini aktive etmek zor, pH'a bağlı, etkili verim için katalizör ihtiyacı.
İleri oksidasyon prosesi	Çoklu oksidasyon prosesleri eş zamanlı giderim sağlar.	Toksik maddeleri giderme, olağandışı şartlarda çalışma, iyi boya giderim yöntemi.	Pahalı, esnek değil, istenmeyen son ürün üretimi, pH bağıllılığı.
Elektrokimyasal metotlar	İletken çözelti içerisinde transfer edilen iyonik bileşiklerin anot ve katot kısımlarında indirgendigi veya yükseltgendigi iyon transferi reaksiyonlarıdır.	Kolay ekipman gereksinimi ve işletme şartları, arıtılan atıksuyun berrak, renksiz ve kokusuz özelliğe sahip olması, oluşan çamurun sudan uzaklaştırılmasının kolay olması ve çamur üretiminin az olması.	Elektrotların oksidasyon sonucunda atıksuda çözünmesi nedeni ile düzenli olarak değiştirilme ihtiyacı, atıksuyun iletkenliğinin yüksek olması gereksinimi, elektrik kullanımı maliyeti.
Fenton reaksiyonu	Fe ⁺² ve H ₂ O ₂ varlığında gerçekleştirilen bir pıhtılaştırma-yumaklaştırma uygulamasıdır.	Çözünür olmayan boyalar için verimli renk giderme, toksisite, toplam organik karbon (TOK) ve KOİ'nin etkin şekilde azaltılması ve yüksek AKM ile bile uygulanabilir olması.	Dispers ve vat boylarını gidermez, çamur üretimi, dar pH aralığında etkinlik ve daha uzun reaksiyon süresi.

Çizelge 1.6. Boya giderim yöntemlerinin avantaj ve dezavantajlarına genel bir bakış
(Katherasan ve ark., 2018) (devam)

Biyolojik Yöntem			
Aerobik-anaerobik kombinasyon (geleneksel metot)	Hazırlanmış çamur kompleks boya moleküllerini parçalar	Çeşitli boya türleri için renk giderimine oldukça uygundur. Ucuzdur, köpük oluşumu olmaz.	Bütün boya parçacıklarını tamamıyla gidermez. Son ürün olarak metan ve hidrojen sülfat oluşur. Esnek olmayan bir yöntemdir. Geniş alan ihtiyaç vardır. Çamur üretir. Uzun zaman gerekir.
Algler bozunma	Algler atıksuyu büyümek için tüketirler	Ucuz, kolay ulaşılabilir, çevre dostudur.	Kararsız bir sisteme sahiptir.
Saf ve karışık kültürler	Kirlilik giderimi için alg, bakteri veya mantarın çeşitli kimyasallarla karışımı	Tekrar kullanılabilir, azo boyaların giderimine uygundur.	Renksiz toksik son ürün, çamur üretimi, arıtım sonrası uygun yöntemlere ihtiyaç vardır.

1.6. Peroksi-Koagülasyon Metodu

Tekstil endüstrisinde fiziksel, kimyasal ve biyolojik işlemler veya bunların kombinasyonu olan teknikler tekstil atıksuların arıtılmasında etkili olabilmektedir (Bhatia ve ark., 2017). Son yıllarda elektrokimyasal yöntemler çevre dostu, otomasyona uyarlanabilir ve oldukça etkili olan biyorefrakter organik kirleticiler için umut vaat eden alternatif bir teknoloji olarak kabul edilmektedir. Yüksek verimlilik, basit kullanım, az yer kaplama gibi avantajları nedeniyle atıksu arıtımında tercih sebebi olmaktadır (Martínez-Huitl ve ark., 2015). Tekstil atıksuyunun arıtılması için elektrokimyasal yöntemlerin uygulanması, elektro-oksidasyon, elektro fenton, elektrokoagülasyon, peroksi-koagülasyon gibi farklı tekniklerde gerçekleştirilebilir (Daneshvar ve ark., 2006).

- Elektro Fenton Prosesi

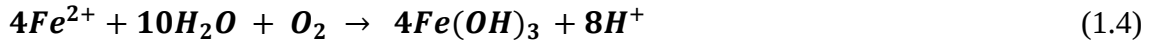
Elektrokimyasal ileri oksidasyon prosesleri arasında elektro fenton (EF) prosesi, sudaki hedef organik kirleticilerin hızlı ve tam olarak bozunmasını sağlayan en etkili teknolojiler arasındadır. Elektro fenton prosesinde, organik moleküller reaktif oksijen türlerinin bir karışımı tarafından, özellikle elektrikle üretilen H_2O_2 ve Fe^{+2} gibi bir metal katalizör arasındaki reaksiyon sonucu oluşan serbest hidroksil radikallerinin baskın olduğu ortamda yok edilir. Fenton tabanlı prosesler H_2O_2 'nin elektrokimyasal olarak üretimine bağlıdır. Proseste, su ortamında bulunan çözünmüş oksijen indirgemeye uğrayarak katot üzerinde sürekli H_2O_2 üretir (Eş. 1.1). Bu reaksiyon EF işleminde hidroksil radikali üretimi için kullanılır (Eş. 1.2). Hidroksil radikalleri ikinci en güçlü oksitleyici ajandır ve su ortamında bulunan organik kirleticileri hidroksilasyon, dehidrojenasyon ve redoks reaksiyonları yoluyla parçalayabilirler (Sir'es ve Brillas, 2021).



- Elektrokoagülasyon Prosesi

Elektrokoagülasyon prosesi metalik hidroksit flokların kurban anot üzerindeki reaksiyonlar sonucunda (Eş 1.3), (Eş. 1.4) elektro çözünme yoluyla üretildiği bir süreç

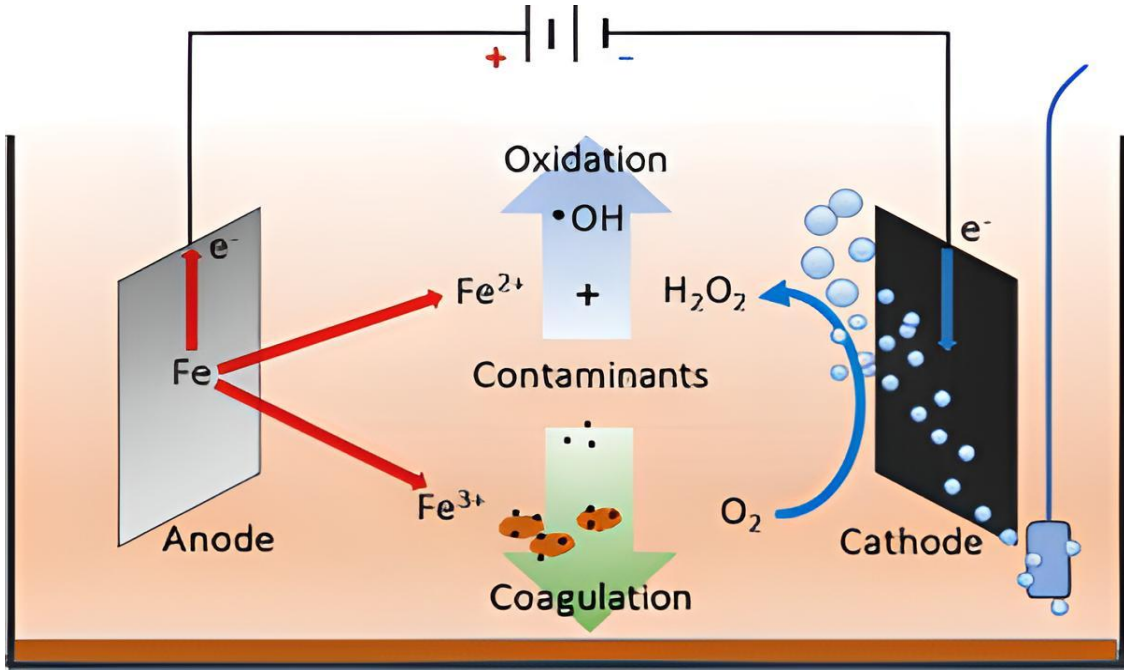
olan, elektrokimyasal yöntemler arasında rekabetçi bir su arıtma teknolojisidir. Bu tür metalik hidroksit floklar geniş yüzey alanına sahiptir ve elektrostatik çekim yoluyla hedef kirleticileri destabilize ederek çökmesini sağlar (Ren ve ark., 2019; Tanyol ve ark., 2021).



Elektro fenton ve elektrokoagülasyon yönteminin birleşmesi ile peroksi-koagülasyon (PK) prosesi oluşur. PK prosesi koagülasyon ve oksidasyonun güçlü kombinasyonu olması nedeniyle kompleks atıksuların arıtımında gittikçe büyüyen bir ilgiye sahiptir (Ren ve ark., 2019). PK, atıksuya stokiometrik miktarlarda Fe^{2+} sağlayan elektro-çözünmüş bir Fe anodunun kullanımına dayanan koagülasyon tekniği ile H_2O_2 üretimini birleştirerek atıksularda bulunan organik kirleticileri oksitlemek için uygun bir yöntem olarak ortaya çıkmaktadır. Fe^{2+} , demir anot tarafından sürekli olarak sağlanabilir (Eş. 1.3) ve elektrikle üretilen H_2O_2 (Eş. 1.1) ile reaksiyona girerek Fe^{3+} ile doymuş bir çözelti verir (Eş. 1.5). Bu şekilde katotta Fe^{3+} indirgenir ve sonuç olarak Fe^{2+} yeniden üretilir (Eş. 1.6). Demir iyonunun fazlalığı, işlemin verimliliğini artıran $Fe(OH)_3$ çökeltisi oluşturur (Sir'es ve Brillas, 2021).



Genel olarak, peroksi-koagülasyon prosesinde anotta oluşan demirli iyon miktarı, hidrojen peroksit miktarı oluşumundan daha fazladır. Bu, kirleticilerin pıhtılaşmasına yol açan elektrokoagülasyon işleminde olduğu gibi çözelti pH'ında bir artışa sebebiyet verir (Nidheesh 2018). Bu nedenle peroksi-koagülasyon sürecinde, kirleticilerin uzaklaştırılmasından hem koagülasyon hem de bozunma sorumludur.



Şekil 1.3. Peroksi-elektrokoagülasyon prosesi (Liu ve ark., 2022).

1.6.1. Peroksi-Koagülasyon metodunun avantaj ve dezavantajları

Avantajlar (Reilly ve ark., 2019)

- Sistemin çalışması için basit ekipmanlar ve işletme şartları gerektirir.
- Enerji ihtiyacı düşüktür.
- Zararlı kimyasallara ihtiyaç duyulmaz.
- Arıtılan atıksularda renk ve koku problemi olmaz ve berrak sular elde edilir.
- Kolloidal partiküller bu prosesle giderilebilir çünkü sistemdeki elektrik akımı daha kısa sürede pıhtılaşma sağlar.
- İlave kimyasal madde eklenmediği sürece kimyasallardan kaynaklı kirlilik ihtimali düşüktür.
- Proses yatırım maliyeti ve işletme gereksinimleri azdır.
- Arıtma sonrası oluşan çamur miktarı azdır ve oldukça kararlı yapıya sahiptir, oluşan çamur toksik değildir.
- Uygulama sırasında oluşan gaz kabarcıkları kirleticiyi çözeltinin üst kısmına taşıyarak daha kolay toplanmasını sağlamaktadır.
- Pek çok kirletici için kullanılabilir.

Dezavantajlar (Reilly ve ark., 2019)

- Anot ve katotlar elektrotlar belirli aralıklarla değiştirilmek zorundadır.
- Elektrokoksizasyon işleminin gerçekleşebilmesi için güç kaynağına ihtiyaç duymaktadır.
- Zamanla katot elektrot üzerinde oluşabilecek geçirimsiz tabaka prosesin verimini düşürebilir.

1.6.2. Elektrokoagülasyon prosesini etkileyen faktörler

Elektrokogülasyon prosesinde verimliliği ve atıksudan kirlenici giderimini etkileyen birçok parametre bulunmaktadır fakat aşağıda en önemli parametrelere yer verilmektedir.

1.6.2.1. Elektrot materyali

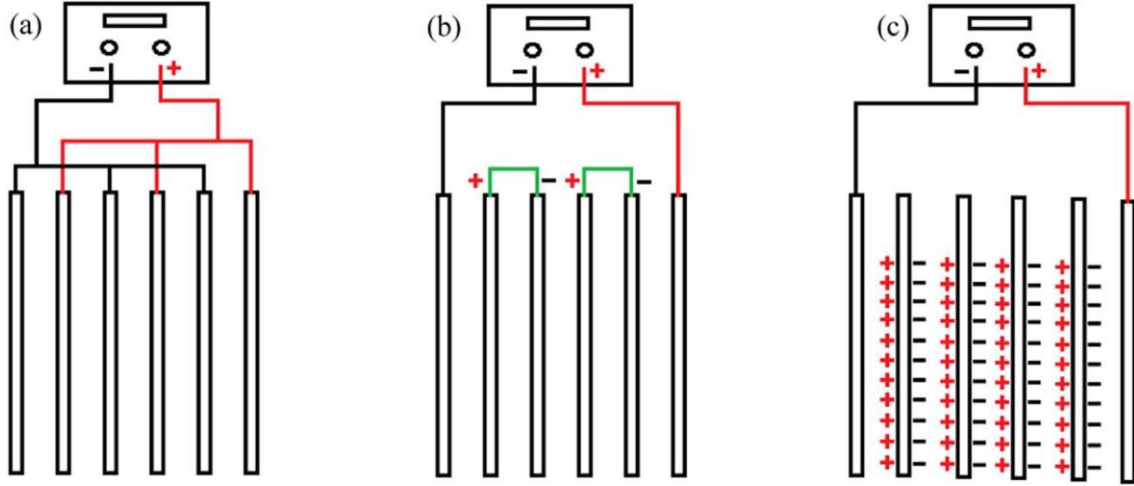
Doğru elektrot seçimi arıtma verimini doğrudan etkilemektedir. Kullanılan elektrot seçimine bağlı olarak atıksu ile elektrot arasında oluşan reaksiyonda farklı ürünler oluşabilir. Elektrot seçimi yaparken elektriği iletme kabiliyeti, fiziksel ve termal olarak dayanıklı olması, kimyasal olarak istikrarlı olması, uygun maliyete sahip olması gibi çeşitli faktörlere dikkat edilmelidir.

Elektrokoagülasyon prosesinde kullanılan elektrot çeşitlerinden demir ve alüminyum elektrot en çok tercih edilenlerdir. Maliyet açısından uygun olmaları, kolay temin edilebilmeleri, metalik iyonların yüksek giderme sağlaması ve bu elektrotlar ile oluşan çamurun kararlı yapıda olması yaygın olarak kullanılmasının öncelikli sebeplerindendir. Çelik, grafit ve titanyum gibi farklı materyaller kullanılan elektrotlar arasındadır.

1.6.2.2. Elektrotların konumu

Kullanılan elektrotlar kadar elektrotların bağlantı şekilleri proses verimi ve maliyet analizinde önemli rol oynamaktadır. Anot ve katot materyalinden oluşan elektrokimyasal hücreler elektrotların paralel bağlı monopolar (MP-P), seri bağlı bipolar

(BP-S), seri bağılı monopolar (MP-S), olmasına göre farklı verimlere sahiptirler. Yapılan çalışmalarda monopolar bağılı elektrotların bipolar dizilime sahip olanlara göre daha yüksek giderme verimine sahip olduğu belirlenmiştir (Akarsu, 2014).



Şekil 1.4. a) MP-P sistemi, (b) MP-S sistemi, (c) BP-S sistemi (Öztürk, 2019).

Elektrotlar arası mesafe anot ve katot arasında oluşan elektrostatik alanı etkilediğinden proses için önemli olan diğer bir faktördür. Elektrot arasındaki mesafe azaldıkça giderme verimi azalır. Bunun nedeni, kirlilikleri gidermeye yardımcı olan metal hidroksitlerin yüksek elektrostatik çekicilik sebebiyle birbirlerine çarpışarak bozunmalarıdır. Diğer bir taraftan fazla mesafe ise iyonların hareket etme süresini artırdığından giderim verimliliğini düşürmektedir (Khandegar ve Saroha, 2013).

1.6.2.3. Akım yoğunluğu

Birim elektrot materyal alanına denk gelen akım miktarı, akım yoğunluğu olarak tanımlanmaktadır. Akım yoğunluğu, koagülant dozaj oranını, kabarcık üretim hızını, boyutlarını ve flok büyümesini belirlediği için proses verimi için çok önemlidir. Mevcut yoğunluğun artmasıyla, anot çözünme hızı artmaktadır. Bu, giderim sağlayan iyon üretim verimini yükseltmektedir. Fazla akım ise çökelmeyi sağlayan gerekli iyon elde edildiğinden verime etki etmemektedir (Khandegar ve Saroha, 2013). Akım yoğunluğu işletme için maliyet oluşturmaktadır. Proseste uygulanan akım yoğunluğunun

arttırılması elektrot ve enerji tüketimi ile çamur oluşumunu arttırmaktadır. Elektrokogülasyon üzerine yapılan çalışmalarda akım yoğunluğunun işletme ve verim üzerine etkisi diğer işletme şartlarına bağlı olarak çalışılmıştır (Koby ve ark., 2016).

1.6.2.4. pH etkisi

Çözelti iletkenliği, elektrot çözünmesini etkileyen pH dikkat edilmesi gereken bir diğer parametredir. Bunun yanı sıra çözelti pH'ı ve verim arasında doğrudan bir bağlantı kurmak zordur çünkü elektrotlar üstünde gerçekleşen tepkimeler pH'ı değiştirmektedir (Gatsions ve ark., 2015).

1.6.2.5. Destek elektrolit konsantrasyonu (DEK)

Çözelti iletkenliği atıksu kirleticisi giderme verimi ve işletme maliyetini etkilemektedir. İletkenlik proste iyon oluşumunu hızlandırmaktadır. Verimi yükseltmek ve iletkenliği ayarlamak için Na_2SO_4 , NaCl , KBr gibi destek elektrolit malzemeleri kullanılmaktadır. Yapılan araştırmalarda NaCl 'nin renk giderimi ve elektrik tüketimi bakımından uygun sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir (Chen, 2004).

1.6.2.6. Elektroliz süresi

Proseslerde süre en önemli parametrelerden biridir. Atıksu kirleticisi giderim verimi elektrotlardaki iyon miktarını ve flok oluşumunu etkilemesi sebebiyle elektroliz süresinden etkilenmektedir. Ancak, optimum elektroliz süresinde sabit hale gelen giderme verimi fazla süreden etkilenmez (Khandegar ve Saroha., 2013).

1.7. Cevap Yüzey Yöntemi (CYY)

Deneysel tasarım, çeşitli girdi değişkenlerinin etkisini ve birbirleriyle olan etkileşimlerini süreçlerin performansını artırmak için optimize etmeye izin veren bir tekniktir. Aynı zamanda etkili değişkenleri dikkate alarak sürecin davranışını da tahmin

edebilir (Gasemloo ve ark. 2019). Bu özellikleri sebebiyle deneysel tasarım uygulamaları çeşitli endüstrilerde ve bilimsel araştırmalarda farklı amaçlarla kullanılmaktadır.

Geleneksel olarak, ekstra deneyler gerektiren bir yanıtı etkileyen parametrelerin eşzamanlı etkisini gözlemlemek zordur. Cevap yüzeyi yöntemi (CYY), bağımlı değişken değerlerini çeşitli bağımsız değişkenlerle optimize ederken istatistiksel ve matematiksel yöntemler kullanarak teorik ve deneysel verileri karşılaştırmaya yarar (Şahan, 2019).

Çok değişkenli bir optimizasyon tekniği olan CYY, bir seferde tek değişkeni değiştirmeye olanak veren sistemlere kıyasla istatistiksel yöntemler kullanarak çok değişkenli bir sistemdeki faktörlerin etkileşimini değerlendirir ve optimum çalışma koşullarının minimum hatayla verimli bir şekilde belirlenmesine imkan tanır (Şahan, 2019). Bu teknikle süreç değişkenlerini ekonomik olarak uygulanabilir hale getirmek ve yanıtı en üst düzeye veya en aza indirmek mümkündür (Merma ve ark. 2020). CYY'nin uygulamalı araştırmalarda kullanımı çok önemlidir çünkü istatistiksel bir prosedür olmadan araştırma daha çok deneysel tekrar, daha yüksek maliyet ve uzun süre gerektirdiği için etkisiz olacaktır.

Deneysel çalışmada, istenen cevap (bağımlı değişken y) sistem içerisindeki çeşitli parametrelerden etkilenmektedir. CYY problemlerinde, bağımsız değişkenler ile cevap arasında ilişki çoğunlukla öngörülemezdir. Bu ilişkinin anlaşılabilmesi için istatistiksel deneysel tasarım, doğrusal regresyon modellemesi ve optimizasyon metotları kullanılmaktadır. CYY'nin bir optimizasyon aracı olarak kullanılabilmesi için farklı adımlar uygulanmaktadır.

Bu adımlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Bağımsız değişkenler ve bu değişkenlerin uygulama aralıkları belirlenir.
- Çalışılacak alan için en uygun olan deneysel tasarım metodu belirlenerek program tarafından önerilen deneysel çalışmalar gerçekleştirilir.
- Elde edilen deney sonuçlarına göre en uyumlu regresyon modeline ait model eşitliği oluşturulur.
- Model eşitliğinin uygunluğu kontrol edilir.

➤ Model eşitliğinden elde edilen veriler ışığında oluşturulan, parametrelerin ayrı ayrı ve simultane etkilerini gösteren grafikler ve yüzey cevap performansının en yüksek olduğu çalışma koşulları elde edilir.

CYY’de istenen cevabın veriminin en yüksek olduğu deney koşullarını tespit etmek için kullanılan istatistiksel yöntemler regresyon ve korelasyon analizleridir. Optimum koşullar bütün bağımsız parametrelerin aynı anda istenen cevaba uyum sağlaması ile bulunmaktadır (Nair ve ark., 2014).

Bağımsız değişkenlerin değiştirilmesi ile cevap yüzeyinde oluşan değişim program tarafından önerilen yaklaşım modelinin temelini oluşturmaktadır. Elde edilen matematiksel eşitlik, prosese etki eden değişkenlerin olduğu ve bu değişkenlerin etkilerinin istatistiksel yöntemlerle analiz edilerek ulaşıldığı deneysel sonuçları temsil eden ifadedir.

Seçilen bağımsız değişkenlerin yanıt üzerinde etkili olduğu değişime bağlı olarak model eşitliği birinci dereceden veya daha yüksek dereceli bir polinom şeklinde oluşabilir. Eğer istenen cevap, bağımsız değişkenlere bağlı olarak doğrusal bir değişime sahipse birinci dereceden polinom denklemi, model eşitliği olarak kullanılabilir. Aksine, sistemden elde edilen cevaplarda bir eğrilik varsa daha yüksek dereceden denklemler tercih edilmektedir. Bu esnekliği sayesinde farklı fonksiyonel formlara uyum sağladığı için en iyi cevap fonksiyonunun öngörülmesine yardım etmekte ve cevap yüzeyinde bulunan eğriliği tahmin etmek için kullanılmaktadır (Koç, 2009; Tanyıldızı ve ark., 2015). Doğrusal bir modeli temsil eden fonksiyonel ifade aşağıda gösterilmektedir (Eş. 1.7) (Öztürk, 2013).

$$y = \beta_0 + \beta_1\delta_1 + \beta_2\delta_2 + \beta_3\delta_3 + \cdots \dots + \beta_k\delta_k \quad (1.7)$$

Burada;

y : Cevap (bağımlı değişken)

β_i : Regresyon katsayısı

δ_i : Bağımsız değişken olarak tanımlanır.

Eşitlik 1.7’de bağımsız değişkenler (δ_i) doğal birimleri cinsinden verilmiştir. Birçok CYY’de uygun olan bu doğal değişkenler kodlanmış formlarında da kullanılır.

Aşağıdaki eşitlikler doğal değişkenlerin kodlanmış formlara dönüşümlerini göstermektedir.

$$\text{Kodlanmış Form } (X_i) = \frac{\delta_i - \delta_{i0}}{\Delta \delta_i} \quad (1.8)$$

$$\Delta \delta_i = \delta_i^{\max} - \delta_i^{\min} \quad (1.9)$$

$$\delta_i^0 = \frac{(\delta_i^{\max} + \delta_i^{\min})}{2} \quad (1.10)$$

Eşitlik 1.10 kodlanmış formda yazılırsa,

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_k X_k \quad (1.11)$$

olur.

CYY’de her bağımsız değişkenin düzeyi üç kısma ayrılmıştır. Bunlar merkez noktalar, iki düzey noktalar ve aksiyal noktalar (iki düzey ötesi, α) olarak tanımlanmaktadır. Boyutsuz koordinat sisteminde en düşük kodlu düzey (-1), merkez nokta (0) ve en yüksek kodlu düzey (+1) şeklinde gösterilmektedir. Sistem değiştirilen bağımsız parametrelere göre kavislenen bir cevap veriyorsa cevap fonksiyonunun daha iyi bir uyum sağlaması için yüksek dereceden polinomlarla ifade edilmeye ihtiyacı vardır. Diğer bir taraftan bağımsız değişkenlerin birbirleriyle olan etkileşimleri de cevap üzerinde bir etkiye sebep olabilir. Bu koşullarda, model eşitliğinin daha yüksek uyumlulukla tanımlanabilmesi için birçok faktör göz önünde bulundurulmalıdır. Quadratik modellerle tanımlanabilen bu faktörler iç etkileşim terimlerini, bağımsız değişkenlerin lineer terimlerini ve yüksek dereceden terimlerini göz önünde bulundurur. k sayıdaki bağımsız değişkenli, iç etkileşimlerin olduğu ve cevabın ikinci dereceden bir polinom olduğu quadratik model eşitlik 1.12’de verilmektedir.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} X_i X_j \quad (1.12)$$

y : Tahmin edilen yanıt

β_o : Sabit katsayı

X_i : Çalışılan değişkenler

β_i : Lineer katsayı

β_{ii} : Quadratik katsayı

β_{ij} : İnteraksiyon katsayısı

k : Parametre sayısı olarak ifade edilir.

Deneysel tasarım yapılırken kaç tane deneyin yapılacağı aşağıdaki eşitliklere göre belirlenir.

$$N = 2^k + 2k + n^0 \quad k < 5 \quad (1.13)$$

$$N = 2^{k-1} + 2k + n^0 \quad k > 5 \quad (1.14)$$

Bu eşitliklerde;

N : Deney sayısını

n^0 : Merkezdeki deney sayısı

k : Bağımsız değişken sayısını göstermektedir.

Deney koşullarının optimizasyonu iş gücü ve zaman tasarrufu açısından önemli bir yere sahiptir. Geleneksel yöntemlerle gerçekleştirilen deney sistemlerini etkileyen parametrelerin optimizasyonu için yüzlerce deney yapılması gerekmektedir. Ancak cevap yüzey yöntemi gibi optimizasyon prosedürlerini kullanarak deney sayısını önemli ölçüde azaltmak (kimyasal tüketim, zaman ve işçilikle paralel olarak) ve sonucu maksimize etmek mümkündür. Sayısal optimizasyon kullanılarak, her bir girdi faktörü ve yanıt için istenen değer seçilebilir. Burada, seçilebilecek olası optimizasyon girişleri şunları içerir: aralık, maksimum, minimum, hedef, hiçbir (yanıtlar için) ve belirli bir dizi koşul için optimize edilmiş bir çıktı değeri üretecek şekilde ayarlanmıştır.

Bu çalışmada deneysel çalışmalar Design-Expert versiyon 7.0.0. programı kullanılarak tasarlanmıştır. Sistem optimizasyonu, Cevap Yüzey Yönteminin (CYY) yaygın olarak kullanılan bir formu olan Merkezi Kompozit Tasarım (MKT) ile sağlanmıştır. Deneysel çalışmalarda, olabildiğince minimum kimyasal ve enerji sarfiyatı maksimum verimlilik elde edilmesi hedeflenmiştir.

2. KAYNAK BİLDİRİŞLERİ

Özyonar ve Karagözoğlu (2012), yaptıkları çalışmada tekstil atıksuyunun elektrokoagülasyon (EK) metodu ile arıtılabilirliğini araştırmışlardır. Ön denemeler sonucunda elde ettikleri verilere dayanarak optimum çalışma koşulları akım yoğunluğu 100 A/m^2 , pH:3 ve elektroliz süresi 20 dakika olarak seçilmiştir. Bu şartlar altında gerçekleştirilen deney sonuçlarında atıksudan KOİ, TOK ve renk giderim yüzdeleri sırasıyla % 72.5, % 82.6 ve % 98.7 olarak bulunmuştur. Diğer bir taraftan bu giderme verimi oranlarıyla KOİ miktarı Yönetmelikte bulunan deşarj limiti kısıtlamalarına uyum sağlamaktadır.

Mohammed ve Yılmaz (2018), elektrokimyasal oksidasyon metotla gerçek tekstil atıksuyundan organik madde ve renk giderim verimini incelemişlerdir. Elektrokimyasal oksidasyon prosesinde kullanılacak elektrot platin olarak belirlenmiştir. Bağımsız çalışma parametreleri olarak elektrolit konsantrasyonu, akım yoğunluğu, başlangıç pH' ı ve elektrotlar arası mesafe seçilmiştir. Bu parametrelerin Renk ve KOİ gideriminde etkisi incelenmiştir. Maksimum çalışma koşulları elektrolit derişimi için 100 mg/L , akım yoğunluğu 25 belirlenmiştir. Bu koşullar altında ulaşılan giderme miktarları renk için % 99.9 ve KOİ % 90.54 olarak bulunmuştur. Organik maddelerin giderimi için asidik koşulların daha verimli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Brillas ve ark., (2002), peroksi-koagülasyon ve elektrofenton (EF) metotlarının anilin bozunumundaki etkisini araştırmışlardır. Proseste kullanılacak elektrot Ti/Pt olarak seçilmiştir. Katot elektrotta oksijenin 2 elektron indirgemesi ile hidrojen peroksit üretimi sağlanmıştır. 2 saat süren elektrooksidasyon işlemi sonucunda elektrofenton prosesinde TOK giderimi % 61'e ulaşmıştır. Peroksi-koagülasyon metodunda ise; kurban Fe anot kullanılarak daha yüksek bozunum sağlanması hedeflenmiştir. Bu koşullarda kirlilik faktörlerinin % 95'den fazlası giderilmiştir. Fe^{2+} , yerinde oluşan H_2O_2 ile reaksiyona girdiği ve fazla Fe^{3+} formlarının $\text{Fe}(\text{OH})_3$ olarak çöktüğü gözlemlenmiştir.

Boye ve ark., (2003), peroksi-koagülasyon yöntemiyle 2,4,5-triklorofenoksi asetik asitin elektrokimyasal bozunumunu araştırmışlardır. Bu çalışmada, peroksi-

koagülasyon prosesine ultraviyolenin (UV) ve pH'ın nasıl etki edeceği incelenmiştir. 35 °C sıcaklığa ve pH 2-6 aralığında 2,4,5-triklorofenoksi asetik asitin peroksi-koagülasyonla kolaylıkla bozunduğu gözlenmiştir. O₂ difüze katot ve Fe anot proseste kullanılacak elektrotlar olarak seçilmiştir. Asidik ortamda ve düşük akım şiddeti şartlarında; organik maddenin % 90'dan fazlası bozunmuştur. UV ışınması kullanımında ise 2,4,5-triklorofenoksi asetik asitin çok hızlı bozundukları sonucuna ulaşılmıştır.

Martins ve ark., (2006), tekstil atıksularından ve çözeltilerden nonil fenol etoksilatın elektrokimyasal yollarla giderimi araştırılmıştır. Tekstil atıksularında alüminum elektrot kullanıldığında hem elektrokoagülasyon prosesi hemde elektrofenton prosesi % 95 giderim oranıyla yüksek bir verim sağlamıştır. Diğer taraftan, demir elektrot kullanıldığı zaman elektrofenton % 95 giderme oranıyla daha iyi giderme verimi sağlamıştır (10 dakika elektrooksidasyon süresi ile tekstil atıksuyunda, 5 dakika süre ile çözeltide). KOİ ise her iki arıtma metodunda % 50 giderim oranına ulaşmıştır.

Hendaoui ve ark., (2018), indigo boya içeren atıksuların arıtılması için elektrokoagülasyon etkinliğini araştırmışlardır. Demir elektrotların kullanıldığı arıtma prosesinde optimum çalışma şartları pH 7.58, uygulanan voltaj 101 V ve giriş debisi 1 L/dk olarak bulunmuştur. Optimizasyon sonucunda ulaşılan verim KOİ giderimi için % 92.07 iken renk giderim verimi % 93.77 olarak bulunmuştur. Bu çalışma sonucunda elektrokoagülasyon prosesinin yüksek giderme verimi sağlaması sonucunda renkli atıksuların arıtılmasında etkin bir proses olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Gündüz ve Atabey (2019), RR195 boyarmaddesinin elektrokoagülasyon (EK) ile giderimine pH değerinin, uygulanan akım yoğunluğunun ve kullanılan elektrot çeşidinin etkisini incelemişlerdir. Akım yoğunluğu uygulama aralığı 10-20 ve 40 mA/cm² olarak seçilmiştir. Asidik ve bazik şartlarda, alüminyum, demir ve çinko elektrotların performansı değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda, 10 mA/cm² akım yoğunluğu, 5 dakika EK süresi ve demir elektrot varlığında RR195 boyarmaddesinin arıtılması, asidik koşullarda %97.67 verime sahipken, bazik koşullarda %95.57 giderim oranı sağlamıştır.

Özyonar ve ark., (2020), yaptıkları araştırmada boyarmaddelerin (RR241 ve DB60) ultrases destekli elektrokoagülasyon ve elektrokoagülasyon metotlarını

kullanarak atıksulardan renk giderimini araştırmışlardır. Her iki numune aynı koşullar altında arıtıma tabi tutulmuştur. Sistem için kullanılan elektrot türü demir olarak belirlenmiştir. 40 kHz sabit frekans, 180 W ve 4 dakika süre ile başlangıç boyarmadde konsantrasyonu 100 mg/L olan numuneler elektrokoagülasyon ile arıtmaya çalışılmıştır. 50 A/m², 75 A/m² olan akım yoğunlukları sırasıyla DB60 ve RR241 boyarmaddelerine uygulanmıştır. Elde edilen veriler ışığında elektrokoagülasyon prosesi için elde edilen verim her iki boyarmadde için yaklaşık olarak % 92 civarındadır. Ultrases destekli çalışmalarda ise renk giderim verimi sırasıyla RR241 için %99.9 ve DB60 boyarmaddesi için % 100 olarak bulunmuştur.

Zarei ve ark., (2009), katot olarak karbon-PTFE (politetrafloroetilen) ve karbon nanotüp (CNT)-PTFE elektrotlarının kullanıldığı sulu çözeltilerde C.I. Basic Yellow 2 (BY2) boyarmaddesinin elektrokimyasal yöntemlerle renk giderimini çalışmışlardır. Kullanılan CNT-PTFE elektrotu yüzeyinde elde edilen H₂O₂ miktarı karbon-PTFE elektrotundakinden yaklaşık üç kat daha fazladır. BY2'nin peroksi-koagülasyon prosesinde renk giderme verimliliği, 100 mA'da ilk 10 dakikada sırasıyla %62 ve %96'ya ulaşmıştır. TOK ölçümlerinin sonuçları, karbon-PTFE ile peroksi-koagülasyonun 6 saatlik elektrolizden sonra %81 olduğu; CNT-PTFE ile ise aynı koşullar altında %92 mineralizasyon sağladığı gözlemlenmiştir.

Zarei ve ark., (2010) yaptıkları bir diğer çalışmada ise Peroksi-koagülasyon işlemi, farklı yapılara sahip dört boyanın Malachite green, C.I. Basic Yellow 2 (BY2) , C.I. Basic red 46 (BR46), C.I. Basic blue 3 (BB3) ve pH 3.0'de sulu çözeltilerden arıtımı için kullanılmıştır. Boyaların her birinin %90'a varan renk giderimi 10 dakikadan daha kısa bir sürede meydana gelmiştir. BY2, işlem parametrelerinin etkisinin incelenmesi, sürecin yapay sinir ağları (YSA) ile modellenmesi ve işletme maliyetlerinin hesaplanması için boyalar arasında bir model olarak kullanılmıştır. BY2 ve karışık boyaların TOC ölçümleri, 6 saatte sırasıyla %92 ve %93 dekontaminasyon göstermiştir. YSA modeli ile $R^2 = 0.989$ 'luk bir belirleme katsayısı elde edilmiştir. Sonuçlar, katot olarak CNT-PTFE elektrotlu peroksi-koagülasyon işleminin, gerçek bir atıksudan 40 dakikada BY2 ve karışık boyaların %95 ve %90'ını giderebildiğini göstermiştir. BY2 içeren boya solüsyonunun renk giderimi için işletme maliyeti hesaplanmıştır ($\approx 21.7 \text{ US\$ (kg}_{\text{giderilen boya}})^{-1}$).

Zazou ve ark., (2019) yaptıkları çalışmada metilen mavisi içeren gerçek bir atıksuyun elektrokoagülasyonla birleştirilmiş ileri oksidasyon prosesleri (peroksi-koagülasyon, elektrofenton, anodik oksidasyon) ile arıtılmasını incelemiştir. Doğru arıtma sürecini seçmek için temel kriterler, daha yüksek bozunma verimliliği ve minimum enerji tüketimi olarak belirlenmiştir. Optimum çalışma koşullarında organik kirleticilerin etkili bir şekilde parçalanmasında elektrokimyasal süreçlerin yüksek verimliliğe ulaştığı gözlenmiştir. Bu prosesler arasında EK/EF kombinasyonu en iyi giderme verimine sahiptir. TOK, bulanıklık ve renk giderimi için elde edilen giderme verimleri sırasıyla %97, %100 ve %100'dür. Tekstil atıksuyundan renk giderimi için enerji tüketim değerleri $0.45\text{--}1.5 \text{ kWh kg}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, EK-EF kombine prosesi atıksuyun arıtılması ve geri kazanılması konusunda umut vadeden birçok avantaj sağlayabilir.

Zhala (2019) yaptığı çalışmada, dispers boyar madde içeren tekstil atıksularının fenton ve peroksielektrokoagülasyon metoduyla arıtılabilirliğini incelemiştir. Çalışmasında akım yoğunluğunun, elektrolit konsantrasyonunun, H_2O_2 konsantrasyonunun, başlangıç pH değerinin ve temas süresinin KOİ ve renk giderimine etkisi araştırılmıştır. Fenton oksidasyon metodu için deneysel çalışmalar optimum pH, H_2O_2 konsantrasyonu, Fe^{+2} iyon konsantrasyonu ve temas süresi sırasıyla 3, 5g/L, 3 g/L ve 120 dk olarak rapor edilmiştir. Farklı dalga boylarındaki renklilik sayısı (RES) ve KOİ değerleri sonucunda ulaşılan en yüksek giderme verimi sırasıyla RES_{620} : % 99.84, RES_{525} : % 99.63, RES_{436} : % 99.40 ve % 87.79 KOİ olarak bulunmuştur. Peroksielektrokoagülasyon metodunda ise optimum pH, H_2O_2 konsantrasyonu, akım yoğunluğu ve temas süresi sırasıyla 3, 5g/L, 0.08 mA/cm^2 ve 30 dk olarak rapor edilmiştir. En yüksek renk giderme verimi RES_{620} : % 99.78 RES_{525} : % 99.6, RES_{436} : % 99.51 ve KOİ giderme verimi % 86.55 olarak bulunmuştur.

Yang ve ark., (2021) yaptığı çalışmada, organiklerin giderilmesi için elektrosorpsiyon (ES) ve peroksi-koagülasyon (PK) işlemlerinin entegrasyonuna sahip bir akış reaktörü tasarlanmıştır. Orange II'nin giderme verimliliği üzerindeki temel parametrelerin (çözelti pH'ı, akış hızı, organiklerin başlangıç konsantrasyonu, uygulanan voltaj) etkileri araştırılmıştır. Optimize edilmiş koşullar altında, Orange II'nin renk giderme verimi %93 ve renk giderme kapasitesi 1043 mg/g olarak

bulunmuştur. Entegre akış sisteminin verimliliği, geleneksel ES sisteminin 10 katından fazla bulunmuştur ve bu nedenle atıksu arıtımının pratik uygulaması için daha fazla potansiyel sağlamaktadır. Akış sisteminin ayrıca 2,4-diklorofenoksiasetik asit, fenol ve metilen mavisi dâhil olmak üzere diğer organik kirleticilerin yüksek giderme verimlilikleriyle giderilmesi için avantajlı olduğu doğrulanmıştır. Bu çalışma, entegre akış sürecinin atıksu arıtımı için verimli, karşılaştırmalı ve uygulanabilir bir yöntem olduğunu kanıtlamıştır.

Pacheco ve ark., (2022) gerçekleştirdikleri çalışmada, tekstil atıksularının alüminyum ve demir elektrotlar varlığında elektrokoagülasyon prosesi ile arıtılmasını araştırmışlardır. Deneysel sonuçlar Cevap yüzey yöntemi kullanılarak optimize edilmiştir. Proses bağımsız değişkenlerinin (pH, akım yoğunluğu ve reaksiyon süresi) bulanıklık ve KOİ giderimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Seçilen parametrelerin etkileri Box-Behnken matematiksel yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Programdan elde edilen optimum koşullarda yapılan deneyler sonucunda Al ve Fe elektrotlar için KOİ gideriminde %89.92 ve %86.38 ve bulanıklık gideriminde %99.75 ve %97.67 verime ulaşılmıştır. Ayrıca, tekstil atıksuyundan U, As, V, Si, P ve Pb ağır metallerinin giderimi her iki elektrotta da %90 verimle sağlanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, CYY ve Box-Behnken modelinin tekstil atıksularını elektrokoagülasyon prosesi ile arıtmak ve süreci optimize etmek için uygun olduğunu ve EK'nin farklı organik ve inorganik kirleticileri gidermek için etkili bir teknoloji olduğu gözlemlenmiştir.

Soltani ve ark., (2020) yaptıkları çalışmada boya ile kirletilmiş sulu çözeltilerin elektrokoagülasyonunu (EK), demkir elektrotlar aracılığıyla gerçekleştirmişlerdir. Daha önce yapılanlardan farklı olarak EK prosesine, eş zamanlı olarak ultrasonik (US) ve kurban anot tarafından manyetik nanopartiküllerin elektrojenerasyonunu sağlayan H_2O_2 entegre edilmiştir. DR31 boyası 20 dakika reaksiyon süresinde US/ H_2O_2 /EK işlemiyle, US/EK (%65.3) ve H_2O_2 /EK (%54.1) işlemlerine göre %93.3 oranıyla en yüksek renk giderim verimliliği sağlamıştır. Yapılan çalışmada gerçek tekstil atıksu numunesi, US/ H_2O_2 /EK işlemiyle etkili bir şekilde arıtılmış ve mineralleştirilmiştir. (KOİ giderimi: %86.7; TOK giderimi: %58.7).



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Kullanılan araç ve gereçler

Deneysel çalışmalarda kullanılan araç ve gereçler aşağıda sıralanmıştır.

- Dijital kontrollü doğru akım güç kaynağı (TTI/QPX1200S, Birleşik Krallık) (0-60 V, 0-50 A); elektrooksidasyon sistemi için gerekli olan elektrik sağlaması için kullanılmıştır.
- Sıcaklık kontrollü bir sıvı sirkülatörü (Labo C200-H13, Türkiye) (-20, +80 °C); reaktör içeriğini sabit sıcaklıkta tutmak için kullanılmıştır.
- Spektrofotometre (Wtw PhotoLab 7100 VIS, Almanya); karakterizasyon analizlerinde kullanılmıştır.
- pH metre ve iletkenlik ölçer (WTW 7110, Almanya); çözeltilerin pH değerlerini ayarlamak için kullanılmıştır.
- Hassas terazi (Shimadzu ATX224, Japonya); deneysel çalışmalarda istenilen miktarda destek elektrolit miktarlarını tartmak için kullanılmıştır.
- İndüktif olarak eşleşmiş plazma optik emisyon spektrometresi (ICP-OES) (The ThermoFisher Scientific iCAP 6300, ABD); elektrooksidasyon öncesinde ve sonrasında tekstil atıksuyu içerisindeki ağır metalleri analiz etmek için kullanılmıştır.
- Saf su cihazı (Merck Milli-Q, Almanya); deneysel çalışmalarda kullanılan deiyonize su elde etmek için kullanılmıştır.
- Etüv (Memmert, Almanya); deneysel çalışmalarda kurutma işlemlerinin gerçekleştirilmesi için kullanılmıştır.

Kullanılan cam malzeme olarak ise; balon joje, erlen, beher, piset, mikro pipet, mezür, cam huni, magnet, spatül, petri kabı kullanılmıştır.

3.1.2. Kimyasal maddeler

Çalışmada kullanılan bütün kimyasal maddeler ticari olarak (Merck ve Sigma) temin edilmiştir. Kullanılan kimyasallar; NaCl (%99 saflıkta), Na₂SO₄ (%95 saflıkta), HgSO₄ (%99.5 saflıkta), NaOH (%99 saflıkta), NaNO₃ (%95 saflıkta), Ag₂SO₄ (%99.5 saflıkta), HNO₃ (%98 saflıkta), K₂Cr₂O₇ (%99 saflıkta), H₃PO₄ (%85 saflıkta) ve C₈H₅KO₄ (%99.95 saflıkta)'tür.

3.1.3. Atıksu temini ve özelliklerinin belirlenmesi

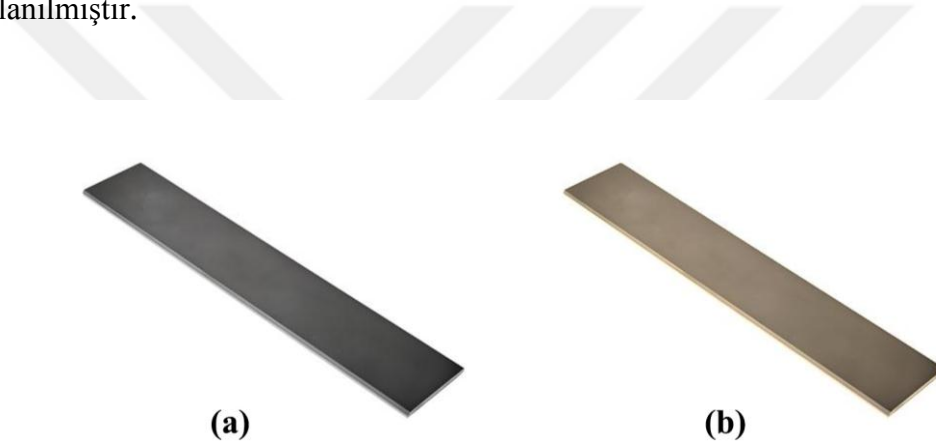
Çalışılan atıksu Malatya ili organize sanayi bölgesinde bulunan bir tekstil endüstriden alınmıştır. Belirtilen atıksu hiçbir arıtma işlemine tabi tutulmamıştır.

Çizelge 3.1.Çalışılan atıksuyun karakterizasyon sonuçları

PARAMETRELER	BİRİM	SONUÇ
Elektriksel iletkenlik (Eİ)	mS/cm	54.50
pH		6.92
Nitrat (NO ₃ ⁻)	mg/L	7
Sülfat (SO ₄ ⁻²)	mg/L	1896
Fosfat (PO ₄ ⁻³)	mg/L	136
Amonyum (NH ₄ ⁺)	mg/L	170
Toplam Sertlik	mg/L	2250
Kalsiyum Sertliği	mg/L	1500
Toplam Azot (TN)	mg/L	9000
Toplam KOİ	mg/L	3330.1
Toplam katı madde (TKM)	mg/L	1000
Askıda katı madde (AKM)	mg/L	717.5
Arsenik (As)	mg/L	1.07
Kadmiyum (Cd)	mg/L	0.13
Kobalt (Co)	mg/L	0.69
Krom (Cr)	mg/L	0.27
Bakır (Cu)	mg/L	0.18
Nikel (Ni)	mg/L	1.54
Kurşun (Pb)	mg/L	0.13
Demir (Fe)	mg/L	7.04
Çinko (Zn)	mg/L	1.02

3.2. Peroksi-Koagülasyon Denemelerinin Yapıldığı Düzenek

Bu çalışmada peroksi-koagülasyon prosesi ile tekstil endüstrisi atıksularından KOİ giderimini araştırmak için kesikli sistemde denemeler yapılmıştır. Kesikli denemeler için; atıksu başlangıç pH'ı, destek elektrolit konsantrasyonu (DEK), reaksiyon süresi ve akım yoğunluğu (J) parametrelerinin etkileri incelenmiştir. Tekstil endüstrisi atıksuyunun elektrooksidasyon prosesi ile arıtımı için kullanılan elektrolitik hücre 7 cm iç çap ve 22 cm derinliğe sahip ısı ceketli reaktör camdan yapılmıştır. Şekil 3.1'de gösterilen grafit ve demir plaka sırasıyla katot ve anot materyali olarak kullanılmıştır.



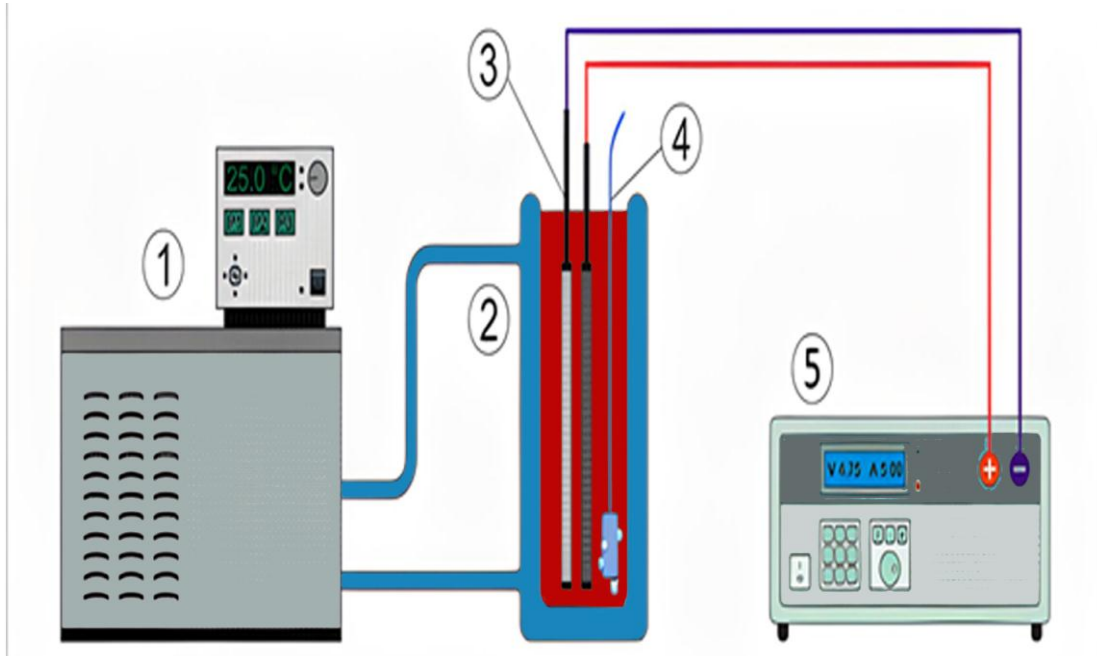
Şekil 3.1. Deneyler süresince kullanılan katot (a) ve anot (b) elektrotlar.

Elektrot boyutları her iki materyal için 4 cm en 22 cm boya sahiptir. Grafit elektrotun et kalınlığı 5 mm iken Fe elektrotun kalınlığı 2 mm'dir. Elektrotlar arası mesafe 2 cm olarak seçilmiştir. Bütün deneylerde kullanılacak atıksuyun hacmi 700 mL olup deneysel çalışmalarda kullanılan anot ve katot sisteme mono polar paralel olarak bağlanmıştır. Dijital kontrollü doğru akım güç kaynağı (TTI/QPX1200S) (0-60 V, 0-50 A) kullanılarak sisteme elektrik akışı sağlanmıştır (Şekil 3.2 (a)). Peroksi-koagülasyon işleminde sisteme verilen elektrik enerjisinin bir kısmı çeşitli sebeplerden dolayı ısı enerjisine dönüştüğünden dolayı reaktör içeriğini sabit sıcaklıkta tutmak için sıcaklık kontrollü bir sıvı sirkülatörü (Labo C200-H13) (-20, +80 °C) kullanılmıştır (Şekil 3.2 (b)).



Şekil 3.2. Deneylerde kullanılan güç kaynağı (a) ve sıvı sirkülatörü (b).

Katot elektrot çevresinde reaktöre atmosferik basınçta sürekli olarak (yaklaşık 1 L/dk) hava sağlanmıştır, bu akış sabit bir O_2 konsantrasyonuna ulaşmak için peroksi-koagülasyon işleminden 10 dakika önce başlatılmıştır. Bu, oksijenin elektrokimyasal indirgenmesiyle yerinde H_2O_2 üretimi için gerçekleştirilmiştir. Kesikli denemelerin yapıldığı deneysel düzenek şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Kesikli denemelerin yapıldığı deneysel düzenek (1-Sabit sıcaklık sıvı sirkülatörü, 2-Isı ceketli reaktör, 3-Elektrotlar, 4-Hava motoru, 5-Doğru akım güç kaynağı) (Öztürk, 2019, değiştirilerek alınmıştır).

3.3. Yöntem

3.3.1. Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) analizi

Atıksuların organik kirlilik derecesini belirlemek amacıyla kullanılan önemli parametrelerden biri Kimyasal oksijen ihtiyacıdır (KOİ). Bu çalışmada KOİ, standart ölçüm yöntemlerine göre kapalı reflüks kolorimetrik yöntemle ölçülmüştür (Federation 2005). Analizler için çizelge 3.2’de hazırlanışı verilen çözeltiler kullanılmıştır.

Çizelge 3.2. KOİ analizleri için kullanılan çözeltilerin hazırlanması

Potasyum hidrojen fitalat (KHP)	850 mg potasyum hidrojen fitalat 105°C’de kurutulmuştur. Kurutulan potasyum hidrojen fitalat saf su ile 1 L’ye tamamlanmış ve çözelti hazır hale getirilmiştir.
Parçalama çözeltisi	K ₂ Cr ₂ O ₇ , 2 saat boyunca 105 °C’de etüvde kurutulmuştur. 10.216 g K ₂ Cr ₂ O ₇ 500 mL saf su içerisinde çözülmüş, daha sonra sırasıyla 167 mL derişik H ₂ SO ₄ ve 33 g HgSO ₄ ilave edilmiştir. Elde edilen bu çözelti saf su ile bir litreye tamamlanmış ve çözelti hazır hale getirilmiştir.
Asit çözeltisi	5.5 g Ag ₂ SO ₄ /kg H ₂ SO ₄ olacak şekilde Ag ₂ SO ₄ , 1 L derişik H ₂ SO ₄ içerisinde çözülmüş ve 1 gün beklenmiş ve çözelti hazır hale getirilmiştir.

1.5 mL numune borosilikat tüplere konulmuştur. Üzerine 1 mL parçalama çözeltisi, 2 mL asit çözeltisi ilave edildikten sonra 148°C’de bir termoreaktörde (WTW CR 4200) (Şekil 3.4 (a)) 2 saat kaynatılmış ve oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra 600 nm dalga boyunda spektrofotometre (Wtw photoLab 7100 VIS) (Şekil 3.4 (b)) yardımıyla absorbans değerleri okunarak KOİ verisi elde edilmiştir.



Şekil 3.4. Deneylerde kullanılan termoreaktör (a) ve spektrofotometre (b).

3.3.2. Toplam katı madde (TKM) analizi

TKM, filtre edilebilen ve filtre edilemeyen katıların toplamıdır ve TKM miktarı numunenin 103-105 °C'de etüvde kurutulmasından sonra geriye kalan maddenin mg/L cinsinden ifade edilir. Yapılan analizde porselen numune kabı etüvde 1 saat kurutularak desikatörde sabit tartıma gelmesi sağlanmıştır. 10 mL atıksu porselen numune kabına alınarak etüvde tamamen kurutulmuştur. Sabit tartıma gelmesi beklenen kurutulmuş numune hassas terazide tartılarak TKM miktarı hesaplanmıştır.

3.3.3. Askıda katı madde (AKM) analizi

AKM, filtreden geçmeyen katı maddelerin miktarı olarak ifade edilmektedir. Numune 0.45 µm'lik filtre kağıdından süzölmüştür. 103 – 105 °C'de etüvde 1 saat kurutulan filtre kağıdı desikatörde soğutularak hassas terazide tartılmıştır. Elde edilen veriler ile AKM miktarı hesaplanmıştır.

3.3.4. Amonyum (NH₄⁺) analizi

Amonyum miktarı fotometrik yöntemle hücre test kiti kullanılarak belirlenmiştir. Numuneye test kitinde bulunan potasyum ve sodyum tartarat çözeltisi ilave edilmiştir. Daha sonra nessler ayırıcı ilave edilerek spektrofotometrede ölçüm yapılmıştır.

3.3.5. Sülfat (SO₄⁻²) analizi

Sülfat analizini gerçekleştirmek için gravimetrik metot kullanılmıştır. Numuneye HCl eklenerek pH 4.5 – 5.0 aralığına getirilmiş ve kaynama noktasına kadar ısıtılmıştır. Yavaşça karıştırılan numuneye ılık BaCl₂ çözeltisi ilave edilerek baryum sülfat çökeltilmiştir. 2 saat bekletilen çözelti 0.45 µm'lik membran filtre kağıdı ile filtrelenmiştir. Çökelti klorür içermeyene kadar saf su ile yıkanmıştır. Klorürü giderilen çökelti kurutulmuş ve hassas terazide tartılmıştır. Hesaplamalar yapılarak numunedeki sülfat miktarı belirlenmiştir.

BaCl₂ çözelti hazırlanması: 100 g BaCl₂.2H₂O, 1 litre distile suda çözülmüştür. Çözelti membran filtre kâğıdından süzölmüştür.

3.3.6. Toplam azot (TN) analizi

Toplam azot analizini gerçekleştirmek için 0.5 g üre tartılmıştır. Üzerine 10 mL saf su ve 0.5 mL H₂SO₄ eklenerek 15 dk ısıtılmıştır. Soğuduktan sonra 2 damla fenolftalein intikatörü eklenerek % 8'lik NaOH'tan renk pembe oluncaya kadar 5 mL'lik ilaveler yapılmıştır. Çözelti tekrar ısıtılarak 0.1 M 50 mL HCl eklenir. 0.1 M NaOH ile 2 damla fenolftalein damlatılarak titrasyon yapılmıştır. Elde edilen sarfiyat ile hesaplamalar yapılarak toplam azot miktarı belirlenmiştir.

3.3.7. Toplam sertlik analizi

100 mL numune pH'ı 10'da tutmak için gerekli tampon çözeltisi (NH₄Cl⁺NH₄OH) ilave edilmiştir. 0.1 g toplam sertlik indikatörü (Eriochrome Black T+NaCl) eklendikten sonra, renk maviye dönene kadar 0.01 M EDTA ile titrasyon yapılmıştır. Elde edilen verilerle yapılan hesaplamalar sonucunda toplam sertlik miktarı bulunmuştur.

Çizelge 3.3. Toplam sertlik analizleri için kullanılan çözeltilerin hazırlanması

Tampon çözeltisi (NH₄Cl⁺NH₄OH)	65 g NH ₄ Cl (amonyum klorür) 400 mL amonyak içerisinde çözümlenerek distile su ile litreye tamamlanmıştır.
Eriochrome Black T	0.2 g Eriochrome Black T. 80 g NaCl ile bir havanda toz haline getirilmiştir.
EDTA	3.75 g EDTA tartılmıştır. Çözeltinin pH' ını yaklaşık 10.5 civarına ayarlamak için 17 mL 1 M NaOH ile birlikte çözümlenerek balon jode 1 litreye distile su ile tamamlanır.

3.3.8. Kalsiyum sertliği analizi

100 mL numune alınarak 2 - 4 mL 1 M NaOH çözeltisi ilave edilmiştir. Ortamın pH'ını 11 civarında tutmak için 0.1 g müreksit ilave edilmiştir.

Daha sonra 0.01 M EDTA ile renk pembeden menekşeye dönene kadar titre edilmiştir.

Çizelge 3.4. Kalsiyum sertlik analizleri için kullanılan çözeltilerin hazırlanması

NaOH	40 – 50 g NaOH suda çözülerek distile su ile litreye tamamlanmıştır.
Müreksit indikatörü	0.2 g müreksit 100 g NaCl ile bir havanda toz haline getirilmiştir.
EDTA	3.75 g EDTA tartılmıştır. Çözeltinin pH'ını yaklaşık 10.5 civarına ayarlamak için 17 mL 1 M NaOH ile birlikte çözülerek balon jojede 1 litreye distile su ile tamamlanır.

3.3.9. Fosfat (PO_4^{3-}) ve nitrat (NO_3^-) analizi

Fosfat ve nitrat miktarı fotometrik yöntemle hücre test kiti kullanılarak belirlenmiştir. Fosfat analizinde numune analiz yapılmadan önce süzölmüştür. Süzme işleminden sonra asitle parçalamaya sabit tutularak spektrofotometre ile okuma yapılmıştır.

3.3.10. Diğer analizler

Tekstil atıksuyunun karakterizasyonu için literatür araştırmaları sonucu belirlenen arsenik, kadmiyum, kobalt, krom, bakır, nikel, kurşun, demir ve çinko analizleri Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Merkezi Laboratuvarda indüktif olarak eşleşmiş plazma optik emisyon spektrometresi (ICP-OES) (The ThermoFisher Scientific iCAP 6300, ABD) ile yapılmıştır.

3.4. Deneyisel Verilerin Hesaplanması İçin Kullanılan Eşitlikler

3.4.1. Giderim veriminin hesaplanması

Kirletici parametrelerin giderim verimi aşağıda gösterildiği gibi hesaplanmaktadır (Eş. 3.1).

$$\eta (\%) = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (3.1)$$

Burada, C_0 başlangıçta atıksudaki kirletici konsantrasyonunu (mg/L), C_t t anında atıksuda kalan kirletici konsantrasyonunu (mg/L) göstermektedir.

3.4.2. Enerji tüketiminin hesaplanması

Enerji tüketim değerleri reaksiyon süresinde kaydedilen parametrelerin yardımı ile kullanılarak hesaplanmıştır (Eş. 3.2).

$$E \left(\frac{kW-saat}{m^3} \right) = \frac{V \times I \times t}{v} \quad (3.2)$$

Burada, E: enerji tüketim değerini (kW-saat/m³), I: uygulanan akım şiddetini (A), V: sistemde oluşan potansiyel farkı (Volt), t: zamanı (saat) ve v: reaktördeki toplam çözelti hacmini göstermektedir (m³). Ayrıca kg KOİ başına harcanan enerji tüketimi aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Eş. 3.3).

$$E \left(\frac{kW-saat}{kg \text{ KOİ}} \right) = \frac{V \times I \times t}{(C_0 - C_t) \times v} \quad (3.3)$$

Burada, C_0 başlangıçta atıksudaki KOİ konsantrasyonunu (mg/L), C_t t anında atıksuda kalan KOİ konsantrasyonunu (mg/L) göstermektedir.

3.4.3. Oluşan çamur miktarının hesaplanması

Peroksi-koagülasyon işleminden sonra oluşacak çamur miktarını hesaplamak için deneysel çalışma tamamlandıktan sonra 500 mL'lik atıksu numunesi 2 saat doğal çökelmeye bırakılmıştır. Çökelen çamur porsolen krezeye alınarak 105 °C'de etüvde kurutulmuştur. Sabit tartıma gelen numune hassas terazide tartılarak çamur miktarı kg/m³ olarak hesaplanmıştır (Eyvaz, M., 2020).

3.4.4. Elektrot tüketiminin hesaplanması

Çözünmüş elektrot miktarına teorik olarak Faraday yasası ile ulaşılabilir (Deveci ve ark., 2019).

Reaksiyon süresinde kaydedilen parametrelerin yardımı ile çözünmüş elektrot miktarı hesaplanmıştır (Eş. 3.4).

$$C_{elektrot} = \frac{IxtxM_a}{zxFxV} \quad (3.4)$$

Burada;

$C_{elektrot}$: Elektrot tüketimi (kg/m^3),

I : Akım şiddeti (A),

t : Arıtım süresi (s),

M : Anodun (Fe) moleküler ağırlığı (Fe: 55.845 g/mol),

z : Reaksiyona katılacak elektron sayısı (z_{Fe} : 2)

F : Faraday sabiti (96485 C/mol),

V : Hacim (m^3) olarak tanımlanmaktadır.

3.5. DeneySEL Dizayn ve Optimizasyon

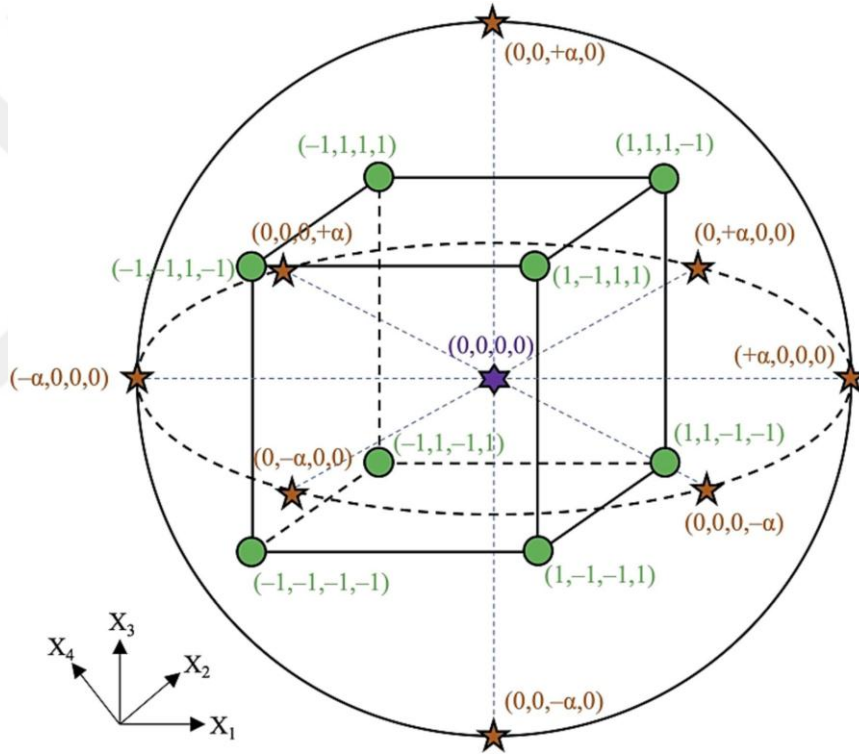
İstatistiksel ve matematiksel verileri bir arada değerlendiren çok etkili bir algoritmaya sahip olan CYY, hem endüstriyel alanda hem de bilimsel arenada yapılan literatür çalışmalarında özellikle bir sürecin özelliklerini etkileyen çok sayıda faktörün olduğu durumlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. CYY'nin amacı, optimum çalışma koşullarını veya belirli çalışma özelliklerinde faktörler için bir bölge belirlemektir. Ayrıca CYY, doğruluğu artırmaya yardımcı olan ve deney sayısını azaltan deneyler tasarlamak için güçlü bir istatistik tabanlı tekniktir. (Şahan ve Öztürk, 2015; Myers ve ark., 2016).

3.5.1. Merkezi kompozit tasarım (MKT)

CYY analizinde farklı model türleri bulunurken, daha az sayıda deneyle yanıtları tahmin etme ve belirtilen aralıklar içindeki tüm değişkenleri yakalama yeteneğinden dolayı en yaygın kullanılan Merkezi Kompozit Tasarım (MKT) yöntemidir (Adamu ve ark., 2021). MKT yönteminde, üç tasarım noktası grubu vardır (Şekil 3.5).

- Eksenler üzerinde $\pm \alpha$ mesafe ile konumlanan yıldız noktaları olarak sembolize edilen eksenel noktalar,
- Küpün köşelerinde yer alan nokta noktaları olarak bilinen kodlanmış değerlerde +1 ve -1 olan faktöriyel noktaları,
- Küpün merkezinde bulunan tüm değişkenler için 0 kodlu olan merkez nokta (Ferdosian ve ark., 2017).

Standart bir MKT’de giriş değişkenlerinin sayısının k olması durumunda, eksenel noktaların ve faktörlerin sayısı sırasıyla 2^k ve $2k$ olur.



Şekil 3.5. Dört giriş değişkenli küçük tip CCD’de eksenel, faktöriyel ve merkez noktaların şematik gösterimi (Du ve ark., 2022).

MKT’de, α seçimi, modelin dönebilirliğini korumayı, yani tahmin hatasının tekdüzeliğini sağlamayı amaçlamaktadır (Amiri ve ark., 2022). Eğer istenirse α değerleri kullanılmayabilir. Bu değerler program tarafından aşağıdaki eşitlik ile belirlenir (Eş. 3.5).

$$\alpha = 2^{k/4} \quad (k = \text{çalışılan bağımsız değişken sayısı}) \quad (3.5)$$

Diğer bir taraftan merkez noktalar için model üzerindeki rastgele hataların etkilerini azaltmak ve ortogonalliği korumak için genellikle birkaç tekrar vardır (Du ve ark., 2022).

Bu çalışmada deneysel çalışmalar Design-Expert versiyon 7.0.0. programı kullanılarak tasarlanmıştır. Sistem optimizasyonu, Cevap Yüzey Yönteminin (CYY) yaygın olarak kullanılan bir formu olan Merkezi Kompozit Tasarım (MKT) ile sağlanmıştır. Akım yoğunluğu, atıksu başlangıç pH değeri, reaksiyon süresi ve destek elektrolit konsantrasyonu bağımsız parametre olarak seçilmiştir. Ön deneyler sonucunda belirlenen alt ve üst sınırlar programa girilmiştir. Hedef kirletici olarak seçilen KOİ giderimi yanıt olarak belirlenmiştir. Sistem optimizasyonunu sağlamak için eşitlik 3.6'ya göre 4 bağımsız parametre ve 6 merkez noktası dâhil 30 deney tasarlanmıştır.

CYY'de cevaplar ve değişkenler arasındaki matematiksel ilişki lineer, faktöriyel ve quadratik şeklinde olabilir (Amiri ve ark., 2022). Çoğu durumda, doğrusal etkiler ve ikinci dereceden etkilerin yanı sıra doğrusal etkiler arasındaki etkileşim de dikkate alınmalıdır. Bu bağlamda, ikinci dereceden bir polinom modeli daha uygun sonuçlar vermektedir (Adamu ve ark., 2018). Bir quadratik model eşitliği 4 parametre için aşağıdaki gibi verilebilir (Şahan ve ark., 2010; Du ve ark., 2022).

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^4 \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=i+1}^4 \beta_{ij} X_i X_j \quad (3.6)$$

y : Tahmin edilen yanıt (Bu çalışma için % Hg(II) Adsorpsiyonu)

β_0 : Sabit katsayı

X_i : Çalışılan değişkenler

β_i : Lineer katsayı

β_{ii} : Quadratik katsayı

β_{ij} : İnteraksiyon katsayısı olarak tanımlanmaktadır.

Yapılan çalışmada, bağımsız değişkenler ve yanıt arasındaki etkileşimleri incelemek adına ANOVA analizi ile model uygunluğu değerlendirilmiştir. Sistem optimizasyonunda kullanılan bağımsız parametrelerin değerleri ile MKT tarafından önerilen deney tasarımı aşağıda gösterilmektedir (Çizelge 3.5).

Çizelge 3.5. Sistem optimizasyonu için bağımsız parametrelerin değerleri ve aralıkları

Bağımsız Parametreler	Seviyeler		
	-1	0	+1
pH	3.50	6.50	9.50
Destek Elektrolit Konsantrasyonu (NaCl) (M)	0.050	0.125	0.20
Akım Şiddeti (A)	5.00	10.00	15.00
Zaman (dk)	10.00	60.00	110.00

Çizelge 3.6. MKT için önerilen deney tasarımı

Deney no	pH	NaCl (M)	Akım (A)	t (dk)
1	3.50	0.05	5.00	10
2	9.50	0.05	5.00	10
3	3.50	0.20	5.00	10
4	9.50	0.20	5.00	10
5	3.50	0.05	15.00	10
6	9.50	0.05	15.00	10
7	3.50	0.20	15.00	10
8	9.50	0.20	15.00	10
9	3.50	0.05	5.00	110
10	9.50	0.05	5.00	110
11	3.50	0.20	5.00	110
12	9.50	0.20	5.00	110
13	3.50	0.05	15.00	110
14	9.50	0.05	15.00	110
15	3.50	0.20	15.00	110
16	9.50	0.20	15.00	110
17	3.50	0.13	10.00	60
18	9.50	0.13	10.00	60
19	6.50	0.05	10.00	60
20	6.50	0.20	10.00	60
21	6.50	0.13	5.00	60
22	6.50	0.13	15.00	60
23	6.50	0.13	10.00	10
24	6.50	0.13	10.00	110
25	6.50	0.13	10.00	60
26	6.50	0.13	10.00	60
27	6.50	0.13	10.00	60
28	6.50	0.13	10.00	60
29	6.50	0.13	10.00	60
30	6.50	0.13	10.00	60

3.5.2. Sonuçların optimizasyonu

Design Expert programı tarafından elde edilen grafikler optimizasyon çalışmaları için büyük bir öneme sahiptir. Deneysel çalışmalarda bu tarz yazılım programları çalışmayı gerçekleştirenlere grafikler yardımıyla optimum noktayı belirleme ve yüzeyin şeklini karakterize etme fırsatı sağlar (Ghorbani ve ark, 2008). Yapılan çalışmada, her bir parametre için program tarafından yapılan numerik analiz sonucunda optimum noktalar belirlenmiştir. Optimum koşullarda gerçekleştirilen deney sonuçları kullanılarak kinetik çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

3.6. Kinetik Modeller

Tekstil atıksuyundan peroksi-koagülasyon yöntemiyle optimum çalışma koşullarında KOİ giderimi için kinetik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. KOİ konsantrasyonları peroksi-koagülasyon sisteminin kirlilik giderim mekanizması için temel olarak kullanıldı. Bu bağlamda, en uygun kinetik modelin belirlenmesi için zamana bağlı KOİ giderim verim değerleri hesaplanmıştır.

Bu çalışmada, kinetik modeller arasında iyi bilinen sıfırıncı derece, pseudo birinci derece (PFO) ve pseudo ikinci derece (PSO) kinetik modellemesi yapılmıştır (Bener ve ark., 2019). Ayrıca, Behnajady ve arkadaşları tarafından geliştirilen BMG modeli uygulanmıştır (Behnajady ve ark., 2007; Argun, 2012).

- 0. Derece kinetik denklemi

$$\frac{dC_{KOİ}}{dt} = -k_0 \quad (3.7)$$

- Pseudo 1. Derece kinetik denklemi

$$\frac{dC_{KOİ}}{dt} = -k_1 C_{KOİ} \quad (3.8)$$

- Pseudo 2. Derece kinetik denklemi

$$\frac{dC_{KOİ}}{dt} = -k_2 C_{KOİ}^2 \quad (3.9)$$

Bahsedilen kinetik model denklemlerine integrasyon uygulandığında;

$$C_t = (C_{KOI})_0 - k_0 t \quad (3.10)$$

$$\ln \frac{(C_{KOI})_t}{(C_{KOI})_0} = -k_1 t \quad (3.11)$$

$$\frac{1}{(C_{KOI})_t} = \frac{1}{(C_{KOI})_0} + k_2 t \quad (3.12)$$

- **BMG modeli** (Behnajady ve ark., 2007)

$$\frac{t}{1 - \frac{(C_{KOI})_t}{(C_{KOI})_0}} = m + bt \quad (3.13)$$

denklemleri elde edilir.

Burada;

$(C_{KOI})_0$: başlangıç zamanındaki KOİ konsantrasyonu (mg/L),

$(C_{KOI})_t$: t zamanındaki KOİ konsantrasyonu (mg/L),

k_0, k_1, k_2 : reaksiyon kinetiği için görünen hız sabiti (sırasıyla mg/L.dk, 1/dk, L/mg.dk)

m, b : BMG modelinin karakteristik sabitleri,

t : reaksiyon süresidir (dk).

En uygun kinetik modelin seçimini elde etmek için denklemlere göre zamanın verilere karşı doğrusal grafiği çizildi. Elde edilen grafik denkleminde hata oranının en düşük olduğu kinetik model tespit edilmiştir.



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Peroksi-koagülasyon Sisteminin Optimizasyonu

4.1.1. MKT deneyleri ve sonuçları

Tekstil atıksularından peroksi-koagülasyon yöntemi ile KOİ giderimini etkileyen en önemli parametrelerin değer aralıkları detaylı literatür araştırmaları ve ön deneyler sonucunda belirlenmiştir. Bu çalışmada, cevap olarak belirlenen KOİ giderimini etkileyen değişkenler pH, destek elektrolit konsantrasyonu (M), reaksiyon süresi (dk) ve akım yoğunluğu (A) olarak seçilmiştir. Destek elektrolit olarak sıkça kullanılan sodyum klorür (NaCl) tercih edilmiştir. Tekstil atıksuyu başlangıç pH değeri aralıkları 3.50-9.50, DEK (NaCl) aralığı 0.05-0.20 (M), akım yoğunluğu aralığı 5.00-15.00 (A) ve zaman aralığı 10-110 (dk) olarak belirlenmiştir.

Deneysel çalışmalar Design Expert 7.0.0 programı ile belirlenen koşullarda gerçekleştirilmiştir. Bağımsız değişkenlerin optimizasyonu için dört değişkenli bir MKT uygulanmıştır. Program 30 deney içeren bir set oluşturulmuştur. MKT için gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve elde edilen sonuçlar çizelge 4.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.2'de deneysel verilerin quadratik modelle uyum sağladığı görülmektedir. Quadratik modelde, hem öngörülen hemde ayarlanan korelasyon katsayısı (R^2)'nin birlikte en yüksek değere sahip olduğu gözlemlenmektedir. Bu nedenle özellikle ikili etkileşimleri incelemek açısından quadratik model tercih edilmiştir.

Çizelge 4.3'te bağımsız değişkenler ve yanıt arasındaki etkileşimleri incelemek için varyans (ANOVA) analizi kullanılmıştır. Program tarafından önerilen modelin uygunluğu ise korelasyon katsayısı (R^2) değeri ile değerlendirilmiştir. Program tarafından önerilen modelin sahip olduğu F değerinin 17.80 çıkması modelin anlamlı olduğuna işaret etmektedir. Bu bağlamda, F-değerinin kirlilikten dolayı yalnızca % 0.01'lik bir değişim içerebileceği sonucuna varılmıştır. p değerinin 0.0500 değerinden

daha düşük olması ise modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. Program çıktılarına göre quadratik modelin p değerinin çok küçük olduğu (< 0.0001) gözlenmektedir. Bu model eşitliğinin istatistiksel olarak yüksek oranda güven verdiğini göstermektedir (Liu ve ark., 2011). Bu durumda R^2 değeri 0.94 olarak bulunmuştur. Bu bağlamda, programdan elde edilen model eşitliği ile yapılan çalışmalar arasında %94 oranında uyum bulunduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çizelge 4.1.Deneyler sonucu elde edilen % KOİ giderim sonuçları

Deney no	pH	NaCl (M)	Akım (A)	t (dk)	KOİ Giderim (%)
1	3.50	0.05	5.00	10	62.16
2	9.50	0.05	5.00	10	49.67
3	3.50	0.20	5.00	10	64.44
4	9.50	0.20	5.00	10	58.03
5	3.50	0.05	15.00	10	67.28
6	9.50	0.05	15.00	10	64.16
7	3.50	0.20	15.00	10	68.19
8	9.50	0.20	15.00	10	66.37
9	3.50	0.05	5.00	110	78.22
10	9.50	0.05	5.00	110	76.66
11	3.50	0.20	5.00	110	79.86
12	9.50	0.20	5.00	110	75.09
13	3.50	0.05	15.00	110	72.40
14	9.50	0.05	15.00	110	69.18
15	3.50	0.20	15.00	110	75.12
16	9.50	0.20	15.00	110	74.65
17	3.50	0.13	10.00	60	77.85
18	9.50	0.13	10.00	60	79.28
19	6.50	0.05	10.00	60	77.60
20	6.50	0.20	10.00	60	78.30
21	6.50	0.13	5.00	60	74.78
22	6.50	0.13	15.00	60	76.19
23	6.50	0.13	10.00	10	73.32
24	6.50	0.13	10.00	110	78.05
25	6.50	0.13	10.00	60	82.94
26	6.50	0.13	10.00	60	83.13
27	6.50	0.13	10.00	60	83.22
28	6.50	0.13	10.00	60	84.46
29	6.50	0.13	10.00	60	82.95
30	6.50	0.13	10.00	60	83.30

Çizelge 4.2. Giderim için Design Expert programı tarafından önerilen fonksiyonlara ait istatistiksel parametreler

Model	Sequential (Ardışık) p- değeri	Lack of fit (Uyum eksikliği) p- değeri	Adjusted (Ayarlanan) R ²	Predicted (Öngörülen) R ²	
Lineer	0.0224	<0.0001	0.2525	0.0697	
2FI	0.7671	<0.0001	0.1611	-0.9829	
Quadratik	<0.0001	0.0005	0.8902	0.7113	Önerilen
Kübik	0.3290	0.0003	0.9102	-1.9383	

Çizelge 4.3. Giderim için ikinci derece polinom fonksiyonuna (Quadratik Model) ait ANOVA analizi

Kaynak	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F-değeri	P-değeri	
Model	1906.04	14	136.15	17.80	< 0.0001	önemli
A-pH	58.43	1	58.43	7.64	0.0145	
B-NaCl	28.68	1	28.68	3.75	0.0719	
konsantrasyonu						
C-Akım şiddeti	11.89	1	11.89	1.55	0.2316	
D-Zaman	619.64	1	619.64	81.00	< 0.0001	
AB	2.99	1	2.99	0.39	0.5411	
AC	17.22	1	17.22	2.25	0.1543	
AD	11.94	1	11.94	1.56	0.2308	
BC	0.023	1	0.023	2.941E-003	0.9575	
BD	1.89	1	1.89	0.25	0.6263	
CD	157.38	1	157.38	20.57	0.0004	
A ²	6.94	1	6.94	0.91	0.3560	
B ²	13.13	1	13.13	1.72	0.2098	
C ²	57.63	1	57.63	7.53	0.0150	
D ²	52.85	1	52.85	6.91	0.0190	
Artık	114.75	15	7.65			
R ² = 0.94						

ANOVA analizinden sonra % KOİ giderimi için çalışılan bağımsız parametrelerin (pH (A), NaCl konsantrasyonu (B), akım (C) ve zaman (D)) bir fonksiyonu olarak veren quadratik model eşitliği (model tarafından önerilen) kodlu ve gerçek değerler için eşitlik 4.1 ve 4.2’de verilmiştir.

KOI giderimi kodlu değerler:

$$\begin{aligned} \text{KOİ Giderimi (\%)} = & +81.77 - 1.80 * [A] + 1.26 * [B] + 0.81 * [C] + 5.87 * \\ & [D] + 0.43 [A] * [B] + 1.04 * [A] * [C] + 0.86 * [A] * [D] + 0.038 * [B] * \\ & [C] - 0.34 * [B] * [D] - 3.14 * [C] * [D] - 1.64 * [A]^2 - 2.25 * [B]^2 - \\ & 4.72 [C]^2 - 4.52 [D]^2 \end{aligned} \quad (4.1)$$

A: pH

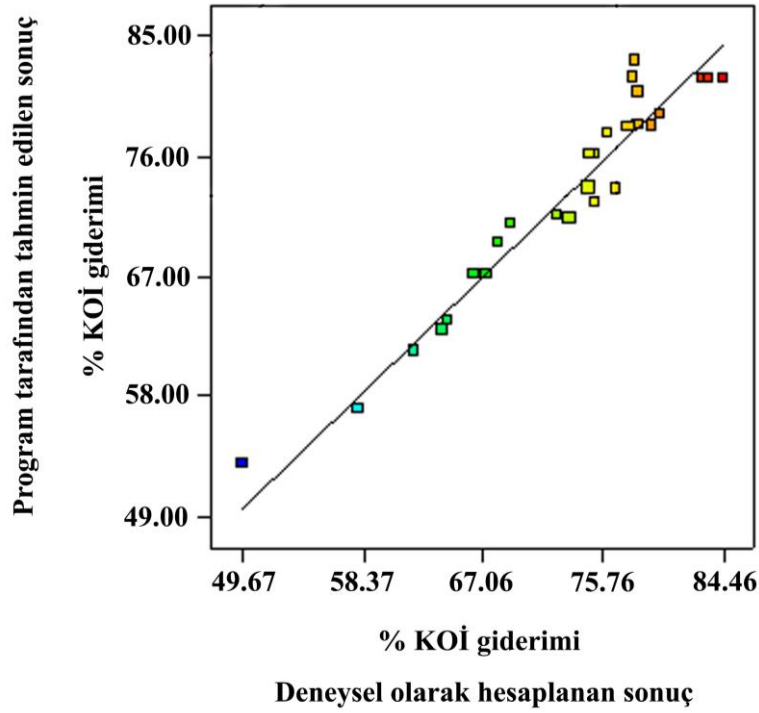
B: NaCl konsantrasyonu

C: Akım şiddeti

D: Zaman

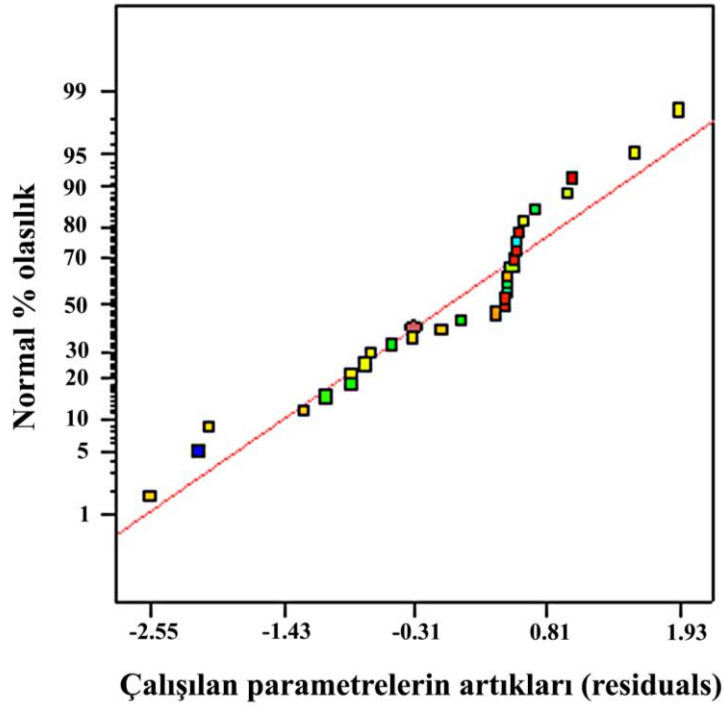
KOI giderimi gerçek değerler:

$$\begin{aligned} \text{KOİ Giderimi (\%)} = & +35.80980 + 0.48569 * [\text{pH}] + 108.89756 * \\ & [\text{NaCl kons.}] + 4.22630 * [\text{Akım şid.}] + 0.43361 * [\text{Zaman}] + 1.92222 * \\ & [\text{pH}] * [\text{NaCl kons.}] + 0.069167 * [\text{pH}] * [\text{Akım şid.}] + 5.75833 * 10^{-3} * \\ & [\text{pH}] * [\text{Zaman}] + 0.10000 * [\text{NaCl kons.}] * [\text{Akım şid.}] - 0.091667 * \\ & [\text{NaCl kons.}] * [\text{Zaman}] - 0.012545 * [\text{Akım şid.}] * [\text{Zaman}] - 0.18182 * \\ & [\text{pH}]^2 - 400.24951 * [\text{NaCl kons.}]^2 - 0.18866 * [\text{Akım şid.}]^2 - \\ & 1.80656 * 10^{-3} * [\text{Zaman}]^2 \end{aligned} \quad (4.2)$$



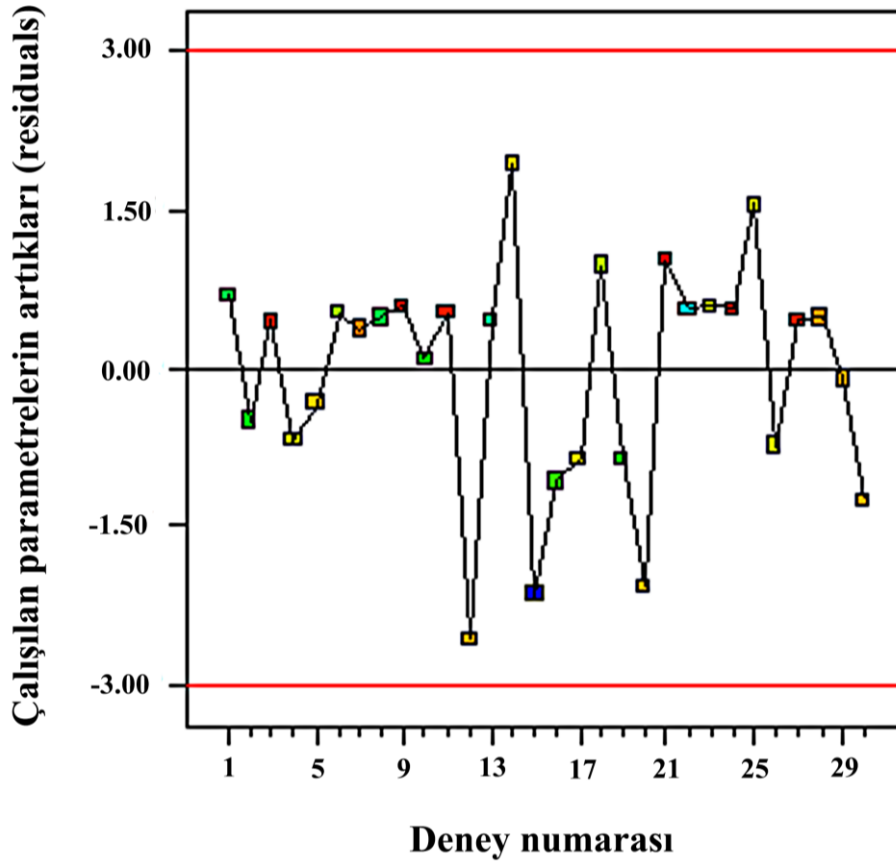
Şekil 4.1. Deneysel olarak gözlemlenen ve program tarafından tahmin edilen değerlerin grafiği.

Şekil 4.1 deneysel olarak bulunan KOİ giderim yüzdelerine karşılık program tarafından önerilen quadratik model eşitliğinden (Eş. 4.2) elde edilmiş tahmin edilen değerler arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Şekil 4.1'den görüleceği üzere deneysel olarak elde edilen veriler ile hesaplanan veriler büyük bir oranda birbirleri ile uyum içindedir. Sonuçlar düz bir çizgi üzerinde dağılımı takip etmişlerdir. Program tarafından korelasyon katsayısı (R^2) değeri 0.94 olarak verilmiştir. Bu değer, yanıt ve değişken değerlerinin değişimlerinin deneysel etkilerle açıklanabilirlik ölçüsünü gösteren model uygunluk derecesi olarak tanımlanmaktadır. 0-1 arasında bir değere sahip olan R^2 değeri, 1'e yaklaştıkça modelin uygunluğunu arttırmaktadır (Dargahi ve ark., 2019). Elde edilen veriler ışığında, deneysel olarak ulaşılan sonuçlar ile hesaplanan sonuçlar arasındaki uyumun %94 olduğu gözlenmektedir. Bu bağlamda, Design Expert programı tarafından önerilen ikinci dereceden denklem modelinin deneysel sistem üzerinde başarıyla uygulanabileceği sonucuna ulaşılmıştır.



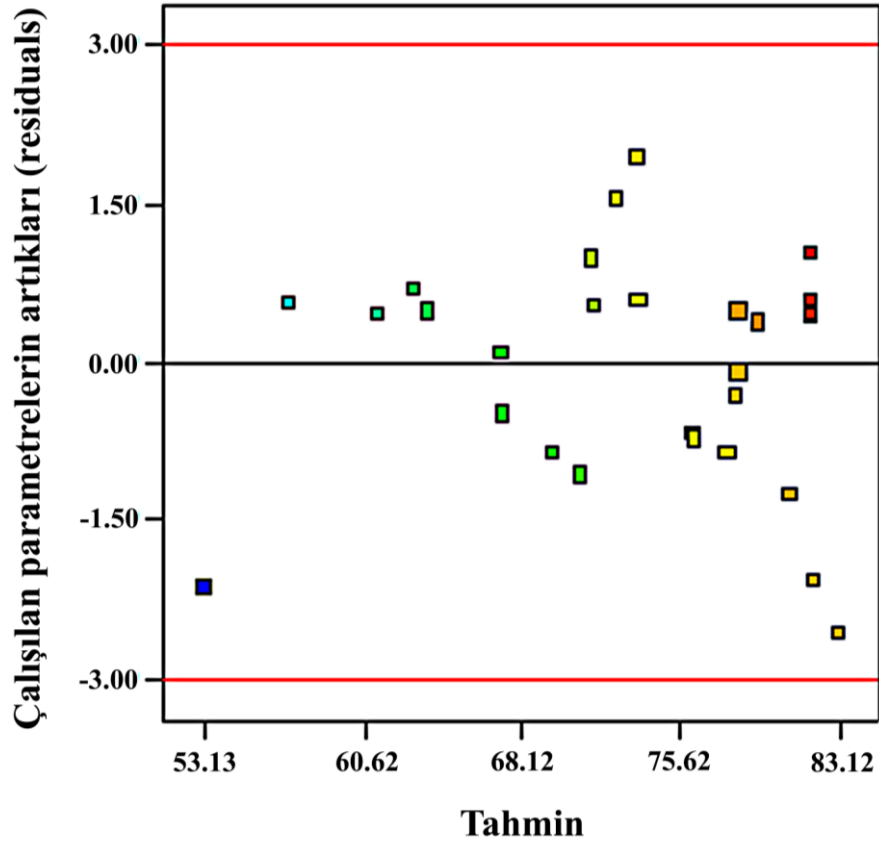
Şekil 4.2. Artıkların (residuals) normal % olasılık grafiği.

Program tarafından elde edilen deneysel artıklara (residuals) karşılık normal % olasılık grafiği yukarıda gösterilmektedir (Şekil 4.2). Grafikte gözlenen sonuçlara göre doğrusal çizgi üzerinde sapmaların çok az miktarda olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, tekstil atıksuyundan KOİ giderimi için geliştirilen kuadratik regresyon modelinden elde edilen deneysel verilerin tahmini beklenen şekilde ve tatmin edicidir. Bu bağlamda, deneysel veriler ile program tahmin değerleri arasındaki artıkların p değerleri oldukça uyumludur.



Şekil 4.3. Deney yapılış sırasına göre artıkların (residuals) grafiği.

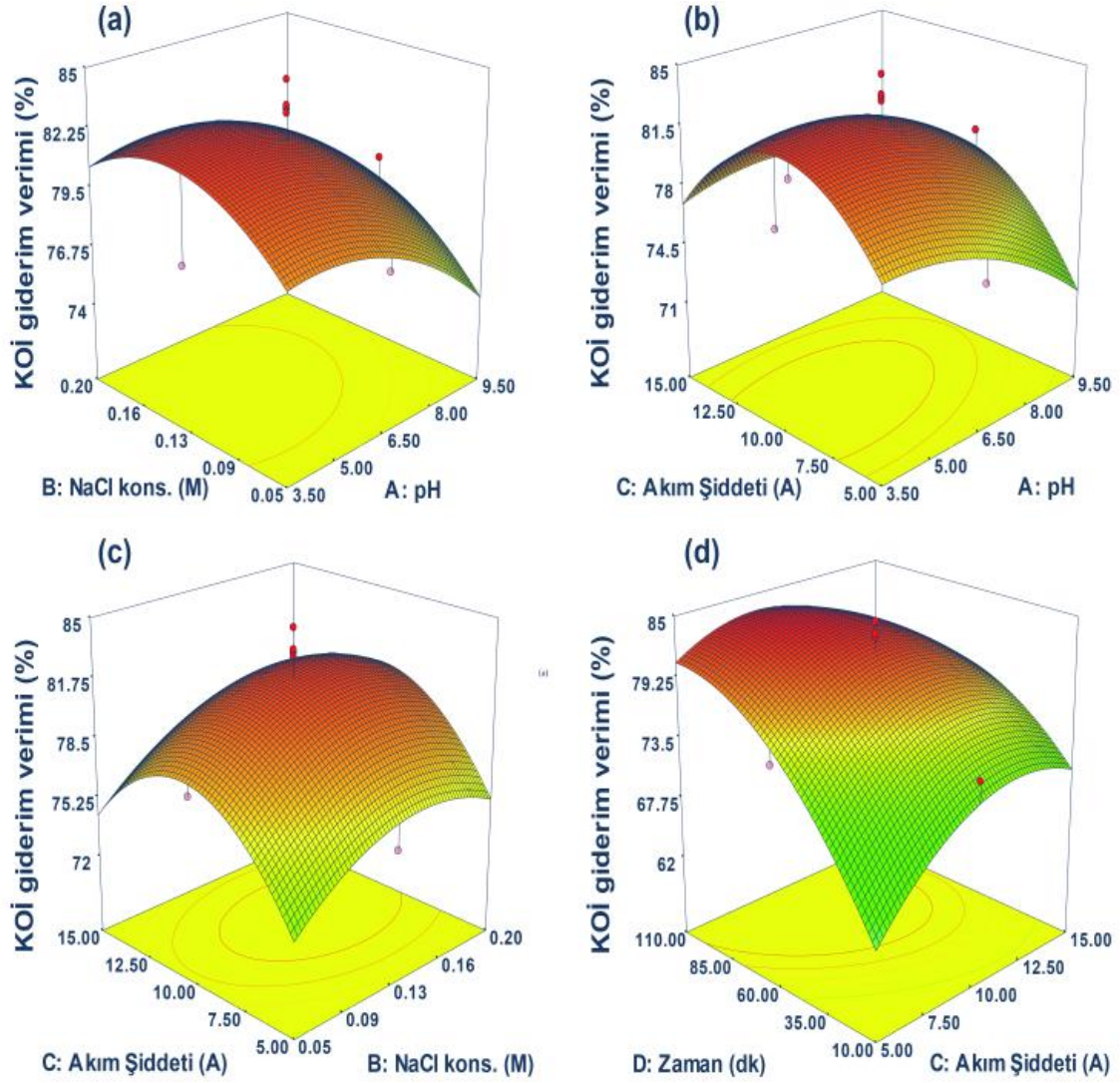
Şekil 4.3 artıkların deneysel sırasına karşılık artıkların grafiğini temsil eder. Bu grafik, deneysel çalışma sırasında yanıtı etkileyebilecek gizlenen ve gözlemlenmeyen değişkenleri kontrol eder (Erinosho ve Akinlabi, 2016). Grafikten görüleceği üzere çizgi her noktayı birleştiren rastgele bir dağılıma sahiptir. İlk deneyden 30. deneye kadar olan veriler ± 3 kırmızı çizgi ile sınırlanan alan içerisinde bulunmaktadır. Bu durum program tarafından kurulacak varsayımları kanıtlar niteliktedir.



Şekil 4.4. Tahmin edilen değerlere karşılık artıkların (residuals) grafiği.

Çalışılan parametrelerin artıkları ve tahmini sonuçlar arasındaki ilişki yukarıda gösterilmektedir (Şekil 4.4). Bu grafik kullanılan modelin sisteme uygunluğunun kontrol edilmesini sağlamaktadır. Artıkların büyük bir çoğunluğu ± 1.5 aralığında konumlandığı gözlenmektedir. Bu veriler ışığında, artıkların geniş bir aralığa yayılmamış olması deneysel verilerden elde edilen sonuçların uygunluğunu ortaya koymaktadır (Myers ve Montgomery, 2002; Öztürk, 2013; Ecer, 2015).

Design Expert programından elde edilen CYY grafikleri, test edilen bağımsız değişkenlerin farklı değerleri için KOİ giderme etkinliğini tahmin etmek için bir yöntem sağlar ve grafik, bu değişkenler arasındaki etkileşim türlerinin tanımlanmasına yardımcı olur (Zarei ve ark., 2010). % KOİ giderimi için pH, akım şiddeti, zaman ve destek elektrolit konsantrasyonunun değerlerindeki değişimlerin simultane etkisini gösteren, MKT deneylerinden elde edilen ve program tarafından üretilen üç boyutlu grafikler şekil 4.5'te verilmektedir.



Şekil 4.5. % KOİ giderimi için pH, akım şiddeti, zaman ve destek elektrolit konsantrasyonunun değerlerindeki değişimlerin simultane etkisini gösteren, MKT deneylerinden elde edilen ve program tarafından üretilen üç boyutlu grafikler.

Araştırmacılar tarafından pH'ın peroksi-koagülasyon süreci üzerindeki baskın etkisine işaret eden birçok çalışma yapılmıştır. Başlangıç pH'ı kimyasal çöktürme proseslerinde etkili olduğu kadar elektrokimyasal sistemlerin performansını etkileyen önemli bir çalışma parametresidir (Lee ve ark., 2014; Venu ve ark., 2016; Moradi ve ark., 2021). Çünkü proste etkin olan metal hidroksit türleri ile oluşacak adsorpsiyon ve koagülasyon mekanizması, pH ile doğrudan ilişkilidir. Ayrıca Fe^{+2} 'den Fe^{+3}

oluşumunu sağlayan pH pıhtılaştırıcı parçacıkların yüzey yükünü etkilemesi sebebiyle önemli bir parametredir (Atabey, 2019). Şekil 4.5 (a)'da KOİ giderimi üzerine NaCl konsantrasyonu ve pH'ın simultane etkisi gösterilmiştir. Şekil 4.5(b) ise tekstil atıksuyundan KOİ giderimi üzerine akım şiddeti ve pH'ın simultane etkisi gösterilmiştir. Tekstil atıksuyu pH değerinin etkisini incelemek için pH değeri 3.50 ve 9.50 aralığında çalışılmıştır. Atıksuyun başlangıç pH değeri 3.50 - 6.50 aralığında iken KOİ gideriminin verimi kademeli olarak artmıştır. 6.50 - 9.50 aralığında ise verimde düşüş gözlenmiştir. 3.50, 6.50 ve 9.50 pH değerlerinde KOİ giderim verimleri sırasıyla % 77.85, % 82.94 ve % 79.28 olarak ölçülmüştür (Şekil 4.5 (a)). Farklı pH koşullarında demir iyonları Fe^{+2} , Fe^{+3} olarak çeşitlenir ve bu durumda peroksikoagülasyon prosesinin performansını etkiler. Düşük ve yüksek pH'larda Pourbaix diagramına göre demir iyonlarının çözünür demir hidroksit türleri oluşur. Asidik pH'ta katotta üretilen hidroksit iyonları çöker ve yetersiz demir hidroksit oluşumuna yol açar. Bu durum ise düşük giderme verimine neden olur (Eryuruk ve ark., 2018). Bunu aksine; yüksek pH değerlerinde ise flok oluşumu için uygun olmayan çözünebilir $Fe(OH)_4^-$ 'ün baskın oluşumu ve anot üzerinde demir çözünmesini azaltan tabaka oluşumu sebebiyle giderim verimliliği düşmüştür (Nidheesh 2018; Eryuruk ve ark., 2018; Ghurfan ve ark., 2020; Ünal Yılmaz, 2021). Peroksikoagülasyon boyunca üretilen farklı tür demir bileşikleri üretilmektedir. Yapılan çalışmalarda, koagülasyon üzerinde etkili olan ana türün $Fe(OH)_3$ olduğu nötr ve bazik (6.00 – 9.80) pH aralığında üretildiği belirtilmiştir. Bu pH aralığında yüksek giderim verimliliği sağlamaktadır (Hendaoui ve ark., 2022). Nötr pH aralığında oluşan demir bileşiklerine $Fe_2(H_2O)_8(OH)_2^{4+}$ ve $Fe_2(H_2O)_6(OH)_4^{2+}$ örnek verilebilir. Bu bileşikler adsorpsiyon ve koagülasyon performansını önemli ölçüde artırırlar (Şengül ve ark., 2009). Bu veriler ışığında elde edilen deneysel çalışma sonuçlarına göre pH 6.50 değerinde pıhtılaştırıcı demir bileşiklerinin çoğu oluşmuştur bu nedenle daha yüksek giderme verimi elde edilmiştir.

Elektrokimyasal arıtma metodu kullanılan proseslerde reaktör voltajı, akım verimliliği ve güç tüketimi atıksuyun iletkenliğinden etkilenmektedir (Moradi ve ark., 2021). Elektrokimyasal sistemlerde elektrik ve işletme maliyetlerinden tasarruf etmek için çözelti iletkenliği önemli bir parametredir. Çözeltinin elektriksel iletkenliği düşük olduğunda, anot ve katot arasındaki yüksek çözelti direncinin üstesinden gelmek için

daha fazla enerji gerekir. Destek elektrolit konsantrasyonunun (NaCl) KOİ giderme verimi üstündeki etkisi Şekil 4.5(c)'de gösterilmektedir. Elektrolit konsantrasyonu arttıkça giderme veriminin arttığı gözlenmektedir. Bu durum daha fazla Cl^- iyonunun daha iyi bir oksitleyici ajan olan OCl^- ve klor gazı olarak hareket etmesine bağlanabilir. Klorür iyonları elektrot üstündeki oksijeni OCl^- iyonu oluşturmak için kullanırken pasivasyon etkisini azaltır ve akım verimini artırır (Sridhar ve ark., 2011). Deneysel çalışmalarda NaCl konsantrasyonları 0.05 - 0.20 (M) aralığında uygulanmıştır. Şekil 4.5(c)'den görüleceği üzere en yüksek giderme veriminin (% 82.94) gerçekleştiği NaCl konsantrasyonu 0.13 (M) olarak ölçülmüştür. Daha yüksek konsantrasyonlarda gözlemlenen KOİ verimindeki performans düşüşü elektrotlar üzerinde hücre direncine yol açan birikmiş pasif ferrik hidroksit filminin oluşmasıyla açıklanabilir (Eryuruk ve ark., 2018).

Akım şiddeti, elektroliz esnasında çözünen anot metal iyonlarının miktarını, katotta üretilen kabarcık hızını, koagülant dozaj hızını, flokların boyutunu ve büyümesini ayrıca giderim etkinliğini doğrudan etkileyen bir paramteredir (Liu ve ark., 2019). Akım şiddeti, anot çözünme hızını belirgin şekilde artırır ve metal hidroksit floklarında artışı sağlayarak kirleticilerin uzaklaştırılmasındaki etkinliği artırır. Bu eğilim, bir çözeltiden geçen elektrik yükünün çözünmüş metal iyonuyla doğru orantılı olduğunu gösteren Faraday yasası ile açıklanabilir (Ratna Kumar ve ark., 2004). Bu çalışmada akım şiddeti 5.00 – 15.00 (A) değerleri arasında uygulanmıştır. Şekil 4.5 (b), (c) ve şekil 4.5(d)'deki grafikler birlikte değerlendirildiğinde akım şiddeti arttıkça KOİ giderim verimi artmıştır ve en yüksek giderimi sağlayan akım şiddetinin 10 (A) olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Akım şiddeti optimum değere ulaştığında kirleticilerin çökmesini sağlayan yeterli miktarda metal hidroksit iyonları bulunduğundan daha yüksek akım şiddeti değerlerinde, kirletici giderim etkinliğinde bir artışa sebep olmaz (Khandegar ve ark., 2013).

Elektrokimyasal proseslerde giderim verimini etkileyen diğer önemli bir parametre zamandır. Daha fazla metal hidroksit oluşumu sağladığı için reaksiyon süresi arttıkça giderim verimi de artmaktadır (Shadedi ve ark., 2020). Bu çalışmada peroksikoagülasyon işleminin uygulama süresi 10 – 110 dakika aralığı olarak belirlenmiştir. Reaksiyon süresi arttıkça KOİ giderim verimi artmıştır (Şekil 4.5 (d)).

Diğer bir taraftan uzun sürelerin yüksek enerji tüketimi oluşturduğu ve elektrot aşınmasının tekstil atıksularının arıtılması için artan maliyetlere yol açtığı düşünüldüğünde, reaksiyon süresinin optimize edilmesi son derece önemlidir.

4.1.2. MKT quadratik model eşitliği ile numerik optimizasyon

Proses verimliliğini sağlamak adına ‘düşük maliyet, maksimum verim’ ilkesi benimsenmektedir. Bu ilkeyi prosese uygulayabilmek çalışılan parametrelerin optimum koşullarda olmasına bağlıdır. Optimizasyon çalışmaları, bilimsel araştırmalar ve endüstriyel uygulamalarda yüksek verime sahip sonuçların düşük maliyetlerle elde edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, prosese etki eden parametrelerin (pH, konsantrasyon, sıcaklık, iletkenlik vs.) optimum noktaları belirlenerek hedeflenen verime ulaşılabilir. Geleneksel yöntemler ile optimum noktaların belirlenmesi deney sayısını çoğaltması nedeniyle işgücü, zaman ve maliyeti arttırmakta ve dolayısıyla endüstriyel ölçekli çalışmalarda uygulanabilir olmaktan çıkmaktadır.

Optimizasyon uygulamalarında seçilen parametreler ve uygulanacak aralıkların seçimi zaman ve maliyet açısından ekonomik olmalıdır. Optimizasyon işlemlerinin gerçekleştirildiği programlar tarafından önerilen model eşitlikleri, deneysel verilerle program verilerinin uygunluğunu kontrol edebilmek adına önem arz etmektedir. Yapılan araştırmada, Design Expert programı MKT deneyleri sonucunda elde edilen quadratik model eşitliği ile nümerik optimizasyon çalışmalarının yapılması hedeflenmiş ve bütün parametrelerin belirlenen aralıkta olduğu, cevap yüzey yanıtının maksimum olduğu optimizasyon prosedürü seçilmiştir. KOİ giderimi için en yüksek verimin elde edildiği program tarafından önerilen optimum koşullar çizelge 4.4’te yer almaktadır.

Çizelge 4.4. Nümerik analiz kullanılarak elde edilen optimum sonuçlar

Parametreler	Optimum Koşullar	% KOİ Giderimi
pH	6.10	83.87
NaCl konsantrasyonu (M)	0.14	
Akım Şiddeti (A)	9.54	
Zaman (dk)	84.60	

Önerilen quadratik model eşitliğini doğrulamak adına KOİ giderimi için belirlenen optimum koşullarda doğrulama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel veriler sonucunda elde edilen KOİ verimi % 85.79 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçların program tarafından önerilen sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.

Ayrıca optimum koşullarda bulunan enerji tüketimi 222.61 kW-st/m^3 olarak hesaplanmıştır. KOİ başına harcanan enerji tüketimi ise $77.92 \text{ kW-st/kg-KOİ}$ olarak hesaplanmıştır. Diğer bir taraftan arıtma işlemleri sonrasında oluşan çamur miktarının 21.30 kg/m^3 olduğu gözlemlenmiştir. Bu işlemler sırasında harcanan elektrot tüketimi ise 20.11 kg/m^3 olarak hesaplanmıştır.

4.2. Sonuçların Kinetik Denklemlere Uygulanması

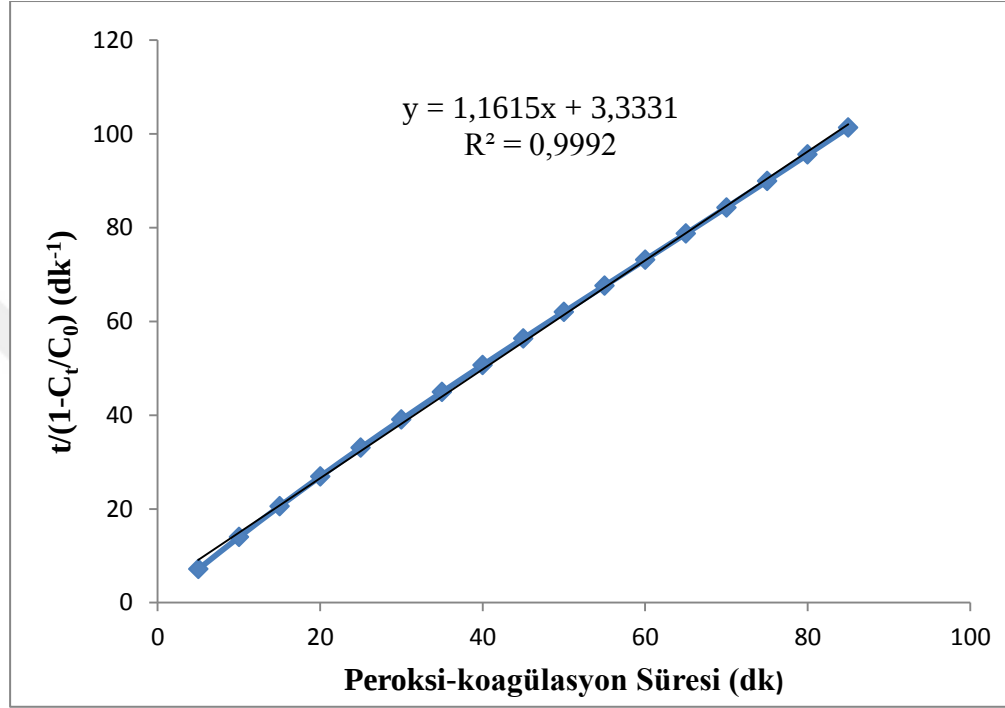
Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda optimum deneysel koşullarda kinetik çalışmalar yürütülmüş ve peroksi-koagülasyon sistemi için en uygun kinetik model belirlenmiştir. Çizelge 4.5'te tekstil atıksuyunun elektrokimyasal yöntemlerle arıtımında en uygun KOİ giderim veriminin elde edilmesinde kullanılan kinetik modellerin R^2 değerleri ve kinetik katsayıları verilmiştir.

Çizelge 4.5. Kinetik modellerle elde edilen sonuçlar

Kinetik Model	R^2 Değeri	Kinetik Katsayı (k)	Birim
0. Derece	0.9511	5.7822	mg/L.dk
1. Derece (PFO)	0.9782	0.008	dk ⁻¹
2. Derece (PSO)	0.9930	10^{-5}	L/mg.dk
BMG	0.9992	1.1615	dk ⁻¹

Elde edilen kinetik model sonuçlarına göre pseudo 2. derecenden kinetik modeli ve Behnajady ve arkadaşları tarafından geliştirilen BMG modeli büyük bir uyum sağlamıştır. Hesaplanan sonuçlara göre korelasyon katsayısı (R^2) %99.92'lik değerle en yüksek olan BMG kinetik modeli tekstil atıksuyundan KOİ giderimi için en uygun kinetik modeldir.

Şekil 4.6'da zamana karşı KOİ giderim verimlerinin BMG kinetik modeline uygunluğu gösterilmiştir.



Şekil 4.6. BMG kinetik model eğilim grafiği.

4.3. Karakterizasyon Sonuçları

Arıtımı yapılmış tekstil atıksuyu karakterizasyon sonuçları aşağıda gösterilmektedir (Çizelge 4.6). Elde edilen veriler ışığında, hedef parametre olarak seçilen KOİ giderimi % 85.79 giderim oranına sahiptir. Kullanılan peroksi-koagülasyon yöntemi yüksek oranda KOİ giderimi sağlamış olsa da ağır metaller ve kirlilik parametrelerinde de önemli bir giderme oranına sahiptir.

Çizelge 4.6. Arıtılmış atıksu karakterizasyonu ve giderim yüzdeleri

PARAMETRELER	BİRİM	ATIKSU GİRİŞ	ATIKSU ÇIKIŞ	GİDERİM YÜZDESİ
Elektriksel iletkenlik (Eİ)	mS/cm	54.50	32.80	
pH		6.92	12.44	
Nitrat (NO_3^-)	mg/L	7	0	100
Sülfat (SO_4^{2-})	mg/L	1896	1000	47.25
Fosfat (PO_4^{3-})	mg/L	136	15	88.97
Amonyum (NH_4^+)	mg/L	170	147	13.53
Toplam Sertlik	mg/L	2250	1500	33.33
Kalsiyum Sertliği (CaCO_3)	mg/L	1500	800	46.67
Toplam Azot (TN)	mg/L	176	154	13.53
Toplam KOİ	mg/L	9000	473.19	85.79
Askıda katı madde (AKM)	mg/L	717.5	0.46	99.94
Arsenik (As)	mg/L	1.07	0.73	31.78
Kadmiyum (Cd)	mg/L	0.13	0.076	41.54
Kobalt (Co)	mg/L	0.69	0.53	23.19
Krom (Cr)	mg/L	0.27	0.18	33.33
Bakır (Cu)	mg/L	0.18	0.087	51.67
Nikel (Ni)	mg/L	1.54	1.11	27.92
Kurşun (Pb)	mg/L	0.13	0.084	35.38
Demir (Fe)	mg/L	7.04	2.37	66.34
Çinko (Zn)	mg/L	1.02	0.47	53.92



5. SONUÇ

Gerçekleştirilen çalışmada giderek arıtımı önem kazanan Tekstil endüstrisi atıksularının arıtımında başarılı ile uygulanan elektrokimyasal proseslerin etkinliği incelenmiş ve sistem optimizasyonunu istatistiksel ve matematiksel olarak sağlanmıştır. Malatya’da faaliyet gösteren bir tekstil endüstrisinden çıkan atıksuların kesikli sistemde peroksi-koagülasyon yöntemi ile arıtımı sağlanmıştır. Hedef parametre olarak seçilen KOİ’nin bu prosesle giderim verimliliği araştırılmıştır. Tekstil atıksuyu karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. Geniş literatür çalışmaları ve ön denemeler sonucunda elde edilen veriler sonucunda giderme verimine etki eden bağımsız parametreler akım şiddeti (A), atıksu başlangıç pH değeri, reaksiyon süresi (dk) ve destek elektrolit konsantrasyonu (M) olarak seçilmiştir. Belirlenen 4 değişken için Design Expert versiyon 7.0.0. tarafından çalışma koşulları MKT tarafından belirlenen 30 adet deney gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel veriler sonucunda program tarafından quadratik model önerilmiş ve ANOVA tabloları oluşturularak model terimlerinin model üstündeki etkileri incelenmiştir. Daha sonra nümerik optimizasyon uygulanarak bağımsız parametrelerin optimum koşullar pH 6.10, NaCl konsantrasyonu 0.14 M, akım şiddeti 9.54 A ve reaksiyon süresi 84.60 dk olarak tespit edilmiştir. Optimum koşullarda elde edilen KOİ verimi % 83.87 olarak hesaplanmıştır. Optimum koşullarda gerçekleştirilen doğrulama deneyi sonucunda elde edilen KOİ verimi % 85.79 olarak bulunmuştur. Bu veriler ışığında deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçların program tarafından hesaplanan sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Optimum koşullarda bulunan enerji tüketimi 222.61 kW-st/m^3 olarak hesaplanmıştır. KOİ başına harcanan enerji tüketimi ise $77.92 \text{ kW-st/kg-KOİ}$ olarak hesaplanmıştır. Diğer bir taraftan arıtma işlemleri sonrasında oluşan çamur miktarının 21.30 kg/m^3 olduğu gözlemlenmiştir. Bu işlemler sırasında harcanan elektrot tüketimi ise 20.11 kg/m^3 olarak hesaplanmıştır.

Ayrıca MKT tarafından elde edilen optimum koşullarda kinetik çalışmalar yürütülmüştür. Kinetik modeller arasında 0. Derece, pseudo birinci derece (PFO), pseudo ikinci derece (PSO) ve BMG kinetik modellerinin uygunluğu araştırılmıştır.

Elde edilen verilerin bu modeller arasında 0.9992 korelasyon katsayısı (R^2) değeri ile en çok BMG kinetik modeline uyduğu saptanmıştır. KOİ giderim veriminin kinetik katsayısı (k) 1.1615 dk^{-1} olarak belirlenmiştir. Ayrıca Peroksi- koagülasyon yöntemi ile arıtılan tekstil atıksuyunun karakterizasyon çalışmaları yapılarak kirlilik parametreleri giderim oranları hesaplanmıştır.

Bu çalışma tekstil atıksuyunun arıtılması ve optimizasyon uygulamasıyla proses verimini artırarak maliyet azalmasını sağlaması açısından geliştirilebilecek bir çalışma olmuştur. Yüksek KOİ giderimine ulaşılması sonucunda peroksi-koagülasyon prosesinin giderim çalışmaları yapılabilmesi için uygun olduğu düşünülmektedir. Diğer bir taraftan giderim verimini arttırmak amacıyla proses şartları değiştirilerek denemeler sağlanabilir. Çalışmada kullanılan peroksi-koagülasyon prosesi ile yerinde H_2O_2 üretimi sağlanarak kullanılan giderim mekanizmasının daha çevreci ve çalışmanın daha özgün olması sağlanmıştır. Ayrıca bu yöntemle elektrokoagülasyon, elektro-fenton ve elektrokoksidayon proseslerinin birleştirilmesi sonucu sadece organik kirleticilerin değil aynı zamanda inorganik kirleticilerin giderimi de sağlanmıştır.

Design Expert programı kullanılarak yapılan deney tasarımı geleneksel yöntemlere kıyasla işgücü, maliyet ve zaman açısından büyük bir fayda sağlamasıyla ayrıca bağımsız parametrelerin birbirleri arasındaki etkileşimleri incelemeye fırsat tanınması sebebiyle büyük bir kolaylık sağlamıştır. Model optimizasyonu en doğru değerlerin seçilmesini sağlayarak, çevre kirliliğine yüksek oranda sebebiyet veren tekstil endüstrisi uygulamalarında kullanılabilmesi açısından önemli bir kılavuz olmuştur.

KAYNAKLAR

- Adamu, M., Trabanpruek, P., Jongvivatsakul, P., Likitlersuang, S., Iwanami, M., 2021. Mechanical performance and optimization of high-volume fly ash concrete containing plastic wastes and graphene nanoplatelets using response surface methodology. **Construction and Building Materials**, **308**: 125085.
- Adamu, M., Mohammed, B.S., Shafiq, N., 2018. Abrasion Resistance of Nano Silica Modified Roller Compacted Rubbercrete: Cantabro Loss Method and Response Surface Methodology Approach. **Journal of Earth and Environmental Sciences**, **140**: 012119.
- Akarsu, C., 2014. Elektrokoagülasyon Prosesi ile Endüstriyel Atıksu Arıtımı. **TÜRKİYE Dergisi**, 1450-1456.
- Altun Kurtoglu, Ş., 2021. Case Study:Textiles. **Life Cycle Assessment: A Metric for the Circular Economy**. (Editors: Aiduan Borrión, Mairi J. Black and Onesmus Mwabonje). The Royal Society of Chemistry, Cambridge. 178-221.
- Amiri, H., Azadi, S., Karimaei, M., Sadeghi, H., Dabbaghi, F., 2022. Multi-objective optimization of coal waste recycling in concrete using response surface methodology, **Journal of Building Engineering**, **45**: 103472.
- Argun, Y.A., 2012. **Reaktif Mavi 114 Boyasının Fenton Prosesi ile Giderimi** (Yüksek Lisans Tezi). Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- Arshad, A., Iqbal, J., Siddiq, M., Ali, M.U., Ali, A., Shabbir, H., Nazeer, U. Bin, Saleem, M.S., 2017. Solar light triggered catalytic performance of graphene-CuO nanocomposite for waste water treatment. **Ceramics International**, **43**: 10654-10660.
- Atabey, M., 2019. **Reaktif red 195 içeren tekstil atıksularının elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımı** (Yüksek Lisans Tezi). Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir.
- Aytaç, E., 2011. **Elektrokoagülasyon Yöntemi Kullanılarak Tekstil Atıksularının Arıtımı** (Yüksek lisans tezi, basılmamış). Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- Bahadur, N., Das, P., Bhargava, N., 2020. Improving energy efficiency and economic feasibility of photocatalytic treatment of synthetic and real textile wastewater using bagasse fly ash modified TiO₂. **Chemical Engineering Journal**, **2**: 100012.
- Behnajady, M.A., Modirshahla, N., Ghanbary, F., 2007. A kinetic model for the decolorization of C.I. Acid Yellow 23 by Fenton process. **Journal of Hazardous Materials**, **148**: 98–102.
- Bener, S., Bulca, Ö., Palas, B., Tekin, G., Atalay, S., Ersöz G., 2019. Electrocoagulation process for the treatment of real textile wastewater: effect of operative conditions on the organic carbon removal and kinetic study. **Process Safety and Environmental Protection**, **129**: 47-54.
- Bhatia, J., Sharma, J., Prerna Anand, S., Pruthi, V., Chaddha, A.S., Kaith, B.S., 2017. RSM-CCD optimized adsorbent for the sequestration of carcinogenic rhodamine-B: Kinetics and equilibrium studies. **Materials Chemistry and Physics**, **196**: 270-283.
- Birgül, A., 2006. **Tekstil Endüstrisi Atıksu Arıtımında İleri Oksidasyon Proseslerinin Kullanımı** (Yüksek lisans tezi, basılmamış). Uludağ Üniversitesi, Bursa.

- Birgöl, A., Akal Solmaz, S.K., 2007. Tekstil Endüstrisi Atıksuları Üzerinde İleri Oksidasyon ve Kimyasal Arıtma Prosesleri Kullanılarak KOİ ve Renk Gideriminin Arastırılması. *Ekoloji*, **15** (62): 72-80.
- Biroğlu, N., 2012. *Bir Tekstil Atık Suyunun Koagülasyon-Flokülasyon-Membran Filtrasyon Süreçleri ile Arıtilabilirliğinin İncelenmesi* (Yüksek lisans tezi, basılmamış). Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.
- Bisschops, I., Spanjers, H., 2003. Literature Review On Textile Wastewater Characterisation. *Environmental Technolog*, **24**: 1399-1411.
- BM. 2006. *Human Development Report, United Nations Development Programme*.
- Boye, B., Dieng, M.M., Brillas, E., 2003. Electrochemical degradation of 2,4,5-trichlorophenoxyacetic acid in aqueous medium by peroxicoagulation. Effect of pH and UV light. *Electrochimica Acta*, 781-790.
- Brillas, E., Casado, J., 2002. Aniline degradation by Electro-Fenton and peroxi-coagulation processes using a flow reactor for wastewater treatment. *Chemosphere*, **47**: 241-248.
- Castro, M., Nogueira, V., Lopes, I., Vieira, M.N., Rocha-Santos, T., Pereira, R., 2018. Treatment of a textile effluent by adsorption with cork granules and titanium dioxide nanomaterial. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, **53**(6): 524-536.
- Chen G., 2004. Electrochemical Technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, **38**: 11-41.
- Correia, V.M., Stephenson, T., Judd, S.J., 1994. Characterisation of textile wastewaters – A review. *Environmental Technology*, **15**: 917-929.
- Daneshvar, N., Oladegaragoze, A., Djafarzadeh, N., 2006. Decolorization of basic dye solutions by electrocoagulation: an investigation of the effect of operational parameters. *Journal of Hazardous Materials*, **129**: 116-122.
- Dargahi, A., Ansari, A., Nematollahi, D., Asgari, G., Shokoohia, R., Samarghandi, M.R., 2019. Parameter optimization and degradation mechanism for electrocatalytic degradation of 2,4-diclorophenoxyacetic acid (2,4-D) herbicide by lead dioxide electrodes. *The Royal Society of Chemistry*, **9**: 5064-5075.
- Dasgupta, J., Sikder, J., Chakraborty, S., Curcio, S., Drioli, E., 2015. Remediation of textile effluents by membrane based treatment techniques: a state of the art review. *Journal of Environmental Management*, **147**: 55-72.
- Deveci, E.Ü., Akarsu, C., Gönen, Ç., Özay, Y., 2019. Enhancing treatability of tannery wastewater by integrated process of electrocoagulation and fungal via using RSM in an economic perspective. *Process Biochemistry*, **84**: 124-133.
- 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.
- Du, S., Ge, X., Zhao, Q., 2022. Central composite design-based development of eco-efficient high-volume fly ash mortar. *Construction and Building Materials*, **358**: 129411.
- Ecer, Ü., 2015. *Sulu Ortamlarda Bulunan Pb(II) İyonlarının Doğal Polyporus Squamosus Biyosorbenti İle Uzaklaştırılması ve Biyosorpsiyon Koşullarının Cevap Yüzey Yöntemi (CYY) İle Optimizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.

- Erinosho, M.F., Akinlabi, E.T., 2016. Central composite design on the volume of laser metal deposited.
- Eryuruk, K., Un, U.T., Ogutveren, U.B., 2018. Electrochemical treatment of wastewaters from poultry slaughtering and processing by using iron electrodes. *Journal of Cleaner Production*, **172**: 1089-1095.
- Eyvaz, M., 2020. Bira Endüstrisi Atıksularının Elektrokoagülasyon ile Arıtımı ve Hibrit Elektrot Bağlantısının Etkisi. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, **8-(1)**: 91-101.
- Federation, W.E., 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater, Washington DC: American Public Health Association (APHA).
- Ferdosian, I., Camões, A., 2017. Eco-efficient ultra-high performance concrete development by means of response surface methodology. *Cement and Concrete Composites*, **84**: 146-156.
- Garcia-Segura, S., Eiband, M. M. S., de Melo, J. V., & Martínez-Huitle, C. A. 2017. Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **801**: 267-299.
- Gasemloo, S., Khosravi, M., Sohrabi, M.R., Dastmalchi, S., Gharbani, P., 2019. Response surface methodology (RSM) modeling to improve removal of Cr (VI) ions from tannery wastewater using sulfated carboxymethyl cellulose nanofilter. *Journal of Cleaner Production*, **208**: 736-742.
- Gatsions, E., Hahladakis, J.N., Gidarakos, E., 2015. Optimization of electrocoagulation (EC) process for the purification of a real industrial wastewater from toxic metals. *Journal of Environmental Management*, **154**: 117-127.
- Ghorbani, F., Younesi, H., Sharifzadeh, M., Zinatizadeh, A.A., Amini, M., Daneshi, A., Bahramifar, N., 2008. Application of RSM for optimization of lead biosorption in an aqueous solution by aspergillus niger. *Journal of Hazardous Materials*, **154**(1-3): 694-702.
- Ghurfan, K., Mariah, I., Kamal S., 2020. Removal of brilliant green dye from aqueous solution by electrocoagulation using response surface methodology. *Materials Today: Proceedings*, **20** (4): 488-492.
- Göknil, H., Toröz, I., Çimşit, Y., 1984. *Endüstriyel Atıksuların Kontrol ve Kısıtlama Esasları Projesi-Tekstil Endüstrisi*. İTÜ, Çevre ve Şehircilik Uygulama ve Araştırma Merkezi, İstanbul.
- Gündüz, Z., and Atabey, M., 2019. Effects of Operational Parameters on the Decolourisation of Reactive Red 195 Dye from Aqueous Solutions by Electrochemical Treatment. *International Journal Of Electrochemical Science*, 5868-5885.
- Hendaoui K., Ayari, F., Rayanaa I. B., Amar R. B., Darragi F., Trabelsi-Ayadi M., 2018. Real indigo dyeing effluent decontamination using continuous electrocoagulation cell: Study and optimization using Response Surface Methodology. *Process Safety and Environmental Protection*, **116**: 578-589.
- Hendaoui, K., Trabelsi, M., Ayari, A.F., 2022. Optimization of continuous electrocoagulation-adsorption combined process for the treatment of a textile effluent. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **44**: 310-320.

- Holkar, C.R., Jadhav, A.J., Pinjari, D.V., Mahamuni, N.M., Pandit, A.M., 2016. A critical review on textile wastewater treatments: Possible approaches. *Journal of Environmental Management*, **182**: 351-366.
- Katherasan, V., Kansedo, J., Lau, S. Y., 2018. Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **6**: 4676-4697.
- Khandegar, V., Saroha, A.K., 2013. Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent - a review. *Journal of Environmental Management*, **128**: 949–963.
- Kırdar, E., 1995. *Tekstil Atıksularında Renk Giderimi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kobyas, M., Can, O.T., Demirbaş, E., Bayramoğlu, M., 2006. Treatment of the textile wastewater by combined electrocoagulation. *Chemosphere*, **62**: 181-187.
- Kobyas, M., Gengec, E., Demirbas, E., 2016. Operating parameters and costs assessments of a real dyehouse wastewater effluent treated by a continuous electrocoagulation process. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, **101**: 87 -100.
- Koç, B., Kaymak Ertekin, F., 2009. *Yanıt Yüzey Yöntemi ve Gıda İşleme Uygulamaları*. Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Bornova, İzmir.
- Lee, C.S., Robinson, J., Chong, M.F., 2014. A review on application of flocculants in wastewater treatment. *Process Safety and Environmental Protection*, **92**: 489–508.
- Li, H., Liu, S., Zhao, J., Feng, N., 2016. Removal of reactive dyes from wastewater assisted with kaolin clay by magnesium hydroxide coagulation process. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **494**: 222-227.
- Li, W., Mu, B., and Yang, Y., 2019. Feasibility of industrial-scale treatment of dye wastewater via bio-adsorption technology. *Bioresource Technology*, **277**: 157-170.
- Liu, D., Yuan, Y., Wei, Y., Zhang, H., Si, Y., Zhang, F., 2022. Removal of refractory organics and heavy metals in landfill leachate concentrate by peroxi-coagulation process. *Journal of Environmental Sciences*, **116**: 43-51.
- Liu, F., Zhang, Z., Wang, Z., Li, X., Dai, X., Wang, L., Wang, X., Yuan, Z., Zhang, J., Chen, M., Wang, S., 2019. Experimental study on treatment of tertiary oil recovery wastewater by electrocoagulation. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, **144**: 107640.
- Liu, Y., Zhao, Q., G.Cheng, G., Xu, H., 2011. Exploring the mechanism of lead(II) adsorption from aqueous solution on ammonium citrate modified spent *Lentinus edodes*. *Chemical Engineering Journal*, **173**: 792–800.
- Lotito, A.M., Fratino, U., Mancini, A., Bergna, G., Di Iaconi, C., 2012. Effective aerobic granular sludge treatment of a real dyeing textile wastewater. *International Biodeterioration & Biodegradation*, **69**: 62-68.
- Martínez-Huitle, C.A., Rodrigo, M.A., Sirés, I., Scialdone, O., 2015. Single and coupled electrochemical processes and reactors for the abatement of organic water pollutants: a critical review. *Chemical Reviews*, **115**: 13362–13407.

- Martins, A.F., Wilde, M.L., Vasconcelos, T.G., Henriques, D.M., 2006. Nonylphenol polyethoxylate degradation by means of electrocoagulation and electrochemical Fenton. *Separation and Purification Technology*, **50** (2): 249-255.
- Merma, A.G., Santos, B.F., Rego, A.S.C., Hacha, R.R., Torem, M.L., 2020. Treatment of oily wastewater from mining industry using electrocoagulation: fundamentals and process optimization. *Journal of Materials Research and Technology*, **9** (6): 15164–15176.
- Mohammed, N.A., Yılmaz, T., 2018. Elektrokimyasal oksidasyon yöntemi ile tekstil endüstrisi atıksularından renk ve organik madde gideriminin araştırılması. *Ç.Ü Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **35** (1).
- Moradi, M., Vasseghian, Y., Arabzade, H., Mousavi Khaneghah, A., 2021. Various wastewaters treatment by sono-electrocoagulation process: a comprehensive review of operational parameters and future outlook. *Chemosphere*, **263**: 128314.
- Myers, R.H., Montgomery, D.C., 2002. *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments* (Editors: John Wiley&Sons).
- Myers, R.H., Montgomery, D.C., Anderson-Cook, C.M., 2016. *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments* (John Wiley & Sons)
- Nair, A.T., Makwana, A.R., Ahammed, M.M., 2014. The Use of Response Surface Methodology for Modelling and Analysis of Water and Wastewater Treatment Processes: A Review. *Water Science and Techonolgy*, **69** (3): 464-478.
- Nidheesh, P.V., 2018. Removal of organic pollutants by peroxicoagulation. *Environmental Chemistry Letters*, **16**: 1283-1292.
- Norin, H., Oskarsson, H., Brodin, M., Sallermo, R., 2020. *Control of Substances of Very High Concern in Recycling*. The Swedish Environmental Protection Agency.
- Opwis, K., Knittel, D., Kele, A., Schollmeyer, E., 1999. Enzymatic recycling of starch-containing desizing liquors. *Starch/Stärke*, **51**: 348-353.
- Öztürk, D., 2013. *Ağrı Dağı Eteğinden Toplanan Pomza Örnekleri Üzerine Kurşun (II) Adsorpsiyonunun İncelenmesi ve Ortam Koşullarının CYY (Cevap Yüzeyi Yöntemi) İle Optimizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
- Öztürk, D., 2019. *Mezbaha Atıksularının Elektrooksidasyon Prosesi İle Kesikli Ve Sürekli Sistemde Arıtımının İncelenmesi* (Doktora Tezi, basılmamış). Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Özyonar F., Karagözoğlu B., 2012. Elektrokoagülasyon prosesi ile tekstil sanayi atıksuyunun arıtımı. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **28** (1): 29-37.
- Özyonar, F., Gökkuş, Ö., and Sabuni, M., 2020. Removal of disperse and reactive dyes from aqueous solutions using ultrasound-assisted electrocoagulation. *Chemosphere*, **258**.
- Pacheco, H. G. J., Elguera, N. Y. M., Sarka, H. D. Q., Ancco, M., Eguiluz, K. I. B., Salazar-Banda, G. R., 2022. Box-Behnken Response Surface Design for Modeling and Optimization of Electrocoagulation for Treating Real Textile wastewater. *International Journal of Environmental Research*, **16**: 43

- Paździor, K., Bilińska, L., Ledakowicz, S., 2019. A review of the existing and emerging technologies in the combination of AOPs and biological processes in industrial textile wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, **376**: 120597.
- Ratna Kumar, P., Chaudhari, S., Khilar, K.C., Mahajan, S.P., 2004. Removal of arsenic from water by electrocoagulation. *Chemosphere*, **55** (9): 1245-1252.
- Reilly, M., Cooley, A. P., Tito, D., Tassou, S. A., Theodorou, M. K., 2019. Electrocoagulation treatment of dairy processing and slaughterhouse wastewaters. *Energy Procedia*, **161**: 343-351.
- Ren, G., Zhou, M., Zhang, Q., Xu, X., Li, Y., Su, P., Paidar, M., Bouzek, K., 2019. Costefficient improvement of coking wastewater biodegradability by multi-stages flow through peroxi-coagulation under low current load. *Water Research*, **154**: 336-348.
- Rucker, J.W., Smith, C.B., 1988. *Troubleshooting in Preparation - A Systematic Approach*. North Carolina State University, Textile Chemistry Department, Raleigh, North Carolina, USA.
- Serindağ, O., Halefoğlu, Y.Z., 2003. *Tekstil Kimyası*. Nobel Tıp Kitabevi, Adana.
- Shahedi, A., Darban, A.K., Taghipour, F., Jamshidi-Zanjani, A., 2020. A review on industrial wastewater treatment via electrocoagulation processes. *Current Opinion in Electrochemistry*, **22**: 154-169.
- Sir'es, I., Brillas, E., 2021. Upgrading and expanding the electro-Fenton and related processes. *Current Opinion in Electrochemistry*, **27**.
- Soltani, R.D.C., Jorfi, S., Alavi, S., Astereki, P., Momeni, F., 2020. Electrocoagulation of textile wastewater in the presence of electro-synthesized magnetite nanoparticles: simultaneous peroxi- and ultrasonic-electrocoagulation. *Separation Science and Technology*, **55**: 945-954.
- Sridhar, R., Sivakumar, V., Prince Immanuel, V., Prakash Maran, J., 2011. Treatment of pulp and paper industry bleaching effluent by electrocoagulant process. *Journal of Hazardous Materials*, **186**: 1495–1502.
- Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY), 31.12.2004, Resmi Gazete sayısı: 25687
- Şahan, T. 2019. Application of RSM for Pb(II) and Cu(II) adsorption by bentonite enriched with single bondSH groups and a binary system study. *Journal of Water Process Engineering*, **31**: 100867.
- Şahan, T., Ceylan, H., Şahiner, N., Aktaş, N., 2010. Optimization of removal conditions of copper ions from aqueous solutions by *Trametes versicolor*. *Bioresource Technology*, **101** (12): 4520-4526.
- Şahan, T., Öztürk, D., 2015. Design and optimization of Cu(II) adsorption conditions from aqueous solutions by low-cost adsorbent pumice with response surface. *Policy Journal of Environmental Studies*, **24** (4): 1749-1756.
- Şengül, I.A., Ozacar, M., 2009. The decolorization of C.I. Reactive Black 5 in aqueous solution by electrocoagulation using sacrificial iron electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, **161** (2–3): 1369-1376.
- Şimşeker, M., 2009. *Tekstil Endüstrisi İndigo Atıksularının Elektrokoagülasyon ve Diğer Fiziksel-Kimyasal Yöntemler ile Arıtımı* (Yüksek lisans tezi, basılmamış). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Tanyıldızı, M.Ş., Elçiçek, S., Demirci, Y., 2015. Buğday kepeğiyle asidik boya gideriminin cevap yüzey yöntemiyle modellenmesi. *Adıyaman Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi*: 21-30.

- Tanyol, M., Cıkıcıoğlu Yıldırım, N., Alparslan, D., 2021. Electrocoagulation induced treatment of indigo carmine textile dye in an aqueous medium: the effect of process variables on efficiency evaluated using biochemical response of *Gammarus pulex*. *Environmental Science and Pollution Research*, **28**: 55315-55329.
- Tomasino, C., 1992. *Chemistry & Technology of Fabric Preparation & Finishing*. North Carolina State University, Department of Textile Engineering, Chemistry & Science College of Textiles, Raleigh, North Carolina, USA.
- Uyanık, S., Çelikel, D.C., 2019. Türk Tekstil Endüstrisi Genel Durumu. *Teknik Bilimleri Dergisi*, **9** (1): 32-41.
- Uysal, M., 2017. *Tekstil Atıksuyunda Kimyasal Renk Giderim Yöntemleri* (Yüksek lisans tezi, basılmamış). Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Ünal Yılmaz, E., 2021. *Tekstil Endüstrisi Atıksularının İleri Oksidasyon Yöntemleri ile Arıtımı* (Yüksek Lisans Tezi). Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Venu, D., Gandhimathi, R., Nidheesh, P.V., Ramesh, S.T., 2016. Effect of solution pH on leachate treatment mechanism of peroxicoagulation process. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, **20**: 4-7.
- Yang W., Zhou M., Ma L., 2021. A continuous flow-through system with integration of electrosorption and peroxi-coagulation for efficient removal of organics. *Chemosphere*, **274**: 129983.
- Yusuff, R.O., Sonibare, J.A., 2004. Characterization Of Textile Industries Effluents In Kaduna, Nigeria And Pollution Implication. *Global Nest Journal*, **6** (3): 212-221.
- Zamora-Ledezma, C., Negrete-Bolagay, D., Figueroa, F., Zamora-Ledezma, E., Ni, M., Alexis, F., Guerrero, V.H., 2021. Heavy metal water pollution: A fresh look about hazards, novel and conventional remediation methods. *Environmental Technology & Innovation*, 101504.
- Zarei, M., Salari, D., Niaei, A., Khataee, A.R., 2009. Peroxi-coagulation degradation of C.I. Basic Yellow 2 based on carbon-PTFE and carbon nanotube-PTFE electrodes as cathode. *Electrochimica Acta*, **54** (1): 6651-6660.
- Zarei, M., Niaei, A., Salari, D., Khataee, A., 2010. Application of response surface methodology for optimization of peroxi-coagulation of textile dye solution using carbon nanotube-PTFE cathode. *Journal of Hazardous Materials*, **173**: 544-551.
- Zarei, M., Niaei, A., Salari, D., Khataee, A.R., 2010. Removal of four dyes from aqueous medium by the peroxi-coagulation method using carbon nanotube-PTFE cathode and neural network modeling. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **639**: 167-174.
- Zazou H., Afanga, H., Akhouairi, S., Ouchtak, H., Addi, A. A., Akbour, R. A., Assabbane, A., Douch, J., Elmchaouri, A., Duplay, J., Jada, A., Hamdani, M., 2019. Treatment of textile industry wastewater by electrocoagulation coupled with electrochemical advanced oxidation process. *Journal of Water Process Engineering*, **28**: 214-221.
- Zhala A., 2019. *Dispers Boyar Madde İçeren Tekstil Atıksularının İleri Oksidasyon Yöntemi İle Arıtılabilirliğinin İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.



EKLER

Ek 1. Merkezi kompozit tasarım istatistiksel verileri

(Design-Expert 7.0.0 Orijinal çıktısı)

Response: % KOİ giderim miktarı

ANOVA for Response Surface Quadratic Model						
Analysis of variance table [Partial sum of squares Type-III]						
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	1906.04	14	136.15	17.80	< 0.0001	Significant
A-pH	58.43	1	58.43	7.64	0.0145	
B-NaCl conc.	28.68	1	28.68	3.75	0.0719	
C-Akim Siddeti	11.89	1	11.89	1.55	0.2316	
D-Zaman	619.64	1	619.64	81.00	< 0.0001	
AB	2.99	1	2.99	0.39	0.5411	
AC	17.22	1	17.22	2.25	0.1543	
AD	11.94	1	11.94	1.56	0.2308	
BC	0.023	1	0.023	2.941E-003	0.9575	
BD	1.89	1	1.89	0.25	0.6263	
CD	157.38	1	157.38	20.57	0.0004	
A ²	6.94	1	6.94	0.91	0.3560	
B ²	13.13	1	13.13	1.72	0.2098	
C ²	57.63	1	57.63	7.53	0.0150	
D ²	52.85	1	52.85	6.91	0.0190	
Residual	114.75	15	7.65			Significant
Lack of Fit	113.13	10	11.31	34.78	0.0005	
Pure Error	1.63	5	0.33			
Cor Total	2020.79	29				

The Model F-value of 17.80 implies the model is significant. There is only a 0.01% chance that a "Model F-Value" this large could occur due to noise. Values of "Prob > F" less than 0.0500 indicate model terms are significant. In this case A, D, CD, C², D² are significant model terms. Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant. If there are many insignificant model terms (not counting those required to support hierarchy), model reduction may improve your model. The "Lack of Fit F-value" of 34.78 implies the Lack of Fit is significant. There is only a 0.05% chance that a "Lack of Fit F-value" this large could occur due to noise. Significant lack of fit is bad we want the model to fit.



ÖZGEÇMİŞ

Kübra GÖRAL, ilk, orta ve lise eğitimini Van'da tamamladıktan sonra 2012 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü'nde lisans öğrenimine başladı. 2016 yılında mezun oldu ve 2020 yılında Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisansa başladı ve hala yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.



T.C.
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
LİSANSÜSTÜ TEZ ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 26/12/2022

Tez Başlığı / Konusu:

Tekstil Endüstrisi Atıksuyunun Elektrokimyasal Arıtımı Ve Sistem Performansının İstatistiksel Olarak Optimizasyonu

Yukarıda başlığı/konusu belirlenen tez çalışmamın Kapak sayfası, Giriş, Ana bölümler ve Sonuç bölümlerinden oluşan toplam 101 sayfalık kısmına ilişkin, 26/12/2022 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtreleme uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı **%6 (yüzde altı)** dır.

Uygulanan filtreler aşağıda verilmiştir:

- Materyal ve yöntem hariç,
- Kaynaklar hariç,
- Tezden çıkan yayınlar hariç,
- 7 kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç (Eşleme boyutunu 7 kelimeyle sınırlayın)

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Lisansüstü Tez Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılmasına İlişkin Yönergeyi inceledim ve bu yönergede belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini bilgilerinize arz ederim.

Kübra GÖRAL
26/12/2022

Adı Soyadı: Kübra GÖRAL

Öğrenci No: 19910001344

Anabilim Dalı: Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Programı: Kimya Mühendisliği/Yüksek Lisans

Statüsü: ☒ Yüksek Lisans

☐ Doktora

DANIŞMAN ONAYI
UYGUNDUR

Prof. Dr. Tekin ŞAHAN

ENSTİTÜ ONAY
UYGUNDUR

