

**REACTIVE BLUE 160 TEKSTİL
BOYARMADDESİNİN SULU ÇÖZELTİLERDEN
ELEKTROKOAGÜLASYON YÖNTEMİ İLE
GİDERİLMESİ**

GÜL SEREN AKKUŞ

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KİMYA MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MERSİN
HAZİRAN – 2012**

**REACTIVE BLUE 160 TEKSTİL
BOYARMADDESİNİN SULU ÇÖZELTİLERDEN
ELEKTROKOAGÜLASYON YÖNTEMİ İLE
GİDERİLMESİ**

GÜL SEREN AKKUŞ

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KİMYA MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Danışman
Yrd. Doç. Dr. Bahadır Kürşad KÖRBAHTİ**

**MERSİN
HAZİRAN – 2012**

Gül Seren AKKUŞ tarafından Yrd. Doç. Dr. Bahadır Kürşad KÖRBAHTİ danışmanlığında hazırlanan "Reactive Blue 160 Tekstil Boyarmaddesinin Sulu Çözeltilerden Elektrokoagülasyon Yöntemi ile Giderilmesi" başlıklı bu çalışma aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

İmza

Prof. Dr. Ayla ÖZER

Prof. Dr. A. Murat GİZİR

Yrd. Doç. Dr. Bahadır Kürşad KÖRBAHTİ



Yukarıdaki Jüri kararı Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 23./07./2012 tarih ve 2012.15./440 sayılı kararıyla onaylanmıştır.


Prof. Dr. A. Murat GİZİR
Enstitü Müdürü


Bu tezde kullanılan özgün bilgiler, şekil, çizelge ve fotoğraflardan kaynak göstermeden alıntı yapmak 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu hükümlerine tabidir.

REACTIVE BLUE 160 TEKSTİL BOYARMADDESİNİN SULU ÇÖZELTİLERDEN ELEKTROKOAGÜLASYON YÖNTEMİ İLE GİDERİLMESİ

Gül Seren AKKUŞ

ÖZ

Bu tezde Reactive Blue 160 (RB160) tekstil boyarmaddesinin sulu çözeltilerden elektrokoagülasyon yöntemiyle kesikli elektrokimyasal reaktörde demir elektrotlar ve NaCl elektrolit kullanılarak giderilmesi hedeflenmiştir. Kesikli reaktörde gerçekleştirilen deneylerde, akım yoğunluğu, elektrolit derişimi, başlangıç boyarmadde derişimi ve reaksiyon sıcaklığı işletim parametrelerinin kimyasal oksijen ihtiyacı giderim verimi, boyarmadde renk giderim verimi, akım verimi, enerji tüketimi, harcanan elektrot miktarı ve pH değişimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elektrokimyasal işletim koşulları cevap yüzey yöntemi (RSM) uygulanarak optimize edilmiş ve reaksiyon kinetiği optimum koşullarda belirlenmiştir. Çalışmada RB160 boyarmaddesinin elektrokoagülasyon yöntemiyle giderimi başarıyla sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Reactive Blue 160, Tekstil Boyarmaddesi, Elektrokoagülasyon, Cevap Yüzey Yöntemi (RSM).

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Bahadır Kürşad KÖRBAHTİ, Mersin Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı

THE TREATMENT OF TEXTILE DYE, REACTIVE BLUE 160 (RB160) FROM AQUEUS SOLUTIONS USING ELECTROCOAGULATION

Gül Seren AKKUŞ

ABSTRACT

In this thesis, the treatment of textile dye, Reactive Blue 160 (RB160) from aqueous solutions was investigated in the presence of NaCl electrolyte in a batch electrochemical reactor using iron electrodes. The effects of operating parameters of current density, electrolyte concentration, initial dye concentration and reaction temperature on COD removal efficiency, dye removal efficiency, current efficiency, energy consumption, electrode consumption and pH change were analyzed. Electrochemical treatment conditions were optimized using response surface methodology (RSM) and reaction kinetics was obtained at optimized reaction conditions. In this study, the treatment of RB160 from aqueous solutions was successfully accomplished by electrocoagulation.

Keywords: Reactive Blue 160, Textile Dye, Electrocoagulation, Response Surface Methodology (RSM).

Advisor: Assist. Prof. Dr. Bahadır Kürşad KÖRBAHTİ, Department of Chemical Engineering, University of Mersin

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında değerli fikirleriyle beni destekleyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Bahadır Kürşad Körbahti' ye, yüksek lisans eğitimim sırasında tanıma imkanı bulduğum Kimya Mühendisliği Bölümü' nün kıymetli hocalarına, bana her konuda yardımcı olan araştırma görevlisi arkadaşlarım Selin Karakaya, Öznur Sarıkcı ve Nazım Özkaya' ya, yüksek lisans eğitimim sırasında tanışım arkadaşım Esra Yıkar'a ve en zor zamanlarımda her zaman yanımda olan, gurur duyduğum sevgili babam Selahiddin Akkuş, annem Zeliha Akkuş, kardeşim Ecem Akkuş, amcam Prof. Dr. Baki Akkuş, sevgili Caner Eryılmaz, Eryılmaz ailesi ve Naime Akel'e

TEŞEKKÜR EDERİM.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZ	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix
1.GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. TEKSTİL ENDÜSTRİSİNDE ÜRETİM PROSESİ VE İŞLEMLER	3
2.2. BOYARMADDELER	5
2.3. TEKSTİL ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ ARITIMINDA KULLANILANYÖNTEMLER	7
2.4. ELEKTROKİMYASAL ATIKSU ARITIM YÖNTEMLERİ.....	14
2.4.1. Elektrokimyasal Proseslerin Çalışma Esasları	14
2.4.2. Faraday Yasaları ve Akım Verimi.....	16
2.5. ELEKTROKİMYASAL ATIKSU ARITIM PROSESLERİ	17
2.6. ELEKTROKOAGÜLASYON	18
2.6.1. Elektrokoagülasyonun Temel İlkeleri	19
2.6.2. Elektrokoagülasyon Prosesinde Elektrot Reaksiyonları.....	21
2.6.3. Elektrokoagülasyon Prosesinde Elektrolit Reaksiyonları	23
2.7. LİTERATÜRDE ELEKTROKOAGÜLASYON YÖNTEMİYLE GERÇEKLEŞTİRİLEN ATIKSU ARITIM ÇALIŞMALARI	24
2.8. CEVAP YÜZEY YÖNTEM	32
3. MATERYAL VE YÖNTEM	35
3.1. KESİKLİ SİSTEM DENEYLERİNİN PLANLANMASI.....	35
3.2. ELEKTROKİMYASALREAKTÖR.....	35
3.3. ÇALIŞMADA KULLANILAN KİMYASALLAR	37

3.4. ANALİZLER.....	37
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	39
4.1. KESİKLİ SİSTEM ÇALIŞMALARI.....	39
4.1.1. Akım Yoğunluğunun Etkisi.....	45
4.1.2. Elektrolit Derişiminin Etkisi	49
4.1.3. Boyarmadde Derişiminin Etkisi	53
4.1.4. Reaksiyon Sıcaklığının Etkisi	56
4.2. İŞLETİM PARAMETRELERİNİN CEVAP YÜZEY YÖNTEMİ İLE OPTİMİZASYONU	60
4.3. OPTİMUM İŞLETİM KOŞULLARINDA BOYARMADDE DERİŞİMİ VE SODYUM KLORÜR DERİŞİMİNİN PROSES VERİMİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ.....	71
4.4. REAKSİYON KİNETİĞİNİN BELİRLENMESİ	81
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	83
KAYNAKLAR.....	85
ÖZGEÇMİŞ.....	94

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Tekstil Sanayii Atık Sularının Alıcı Ortama Deşarj Standartları.....	5
Çizelge 2.2. Boyarmaddelerin sınıflandırılması.....	6
Çizelge 2.3. Tekstil endüstrisi atıksuyunun arıtımında uygulanan yöntemlerin avantajları ve dezavantajları	13
Çizelge 3.1. Deneysel tasarım	35
Çizelge 4.1. Kesikli elektrokimyasal reaktör deney sonuçları	41
Çizelge 4.2. Optimum koşullarda gerçekleştirilen deney sonuçlarının RSM modeli ile karşılaştırılması.....	75

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Elektrokimyasal hücre	15
Şekil 3.1. Kesikli reaktör sistemi	36
Şekil 3.2. Deney düzeneği.....	36
Şekil 3.3. Reactive Blue 160 tekstil boyarmaddesinin moleküler yapısı.....	37
Şekil 4.1. Farklı akım yoğunluğu değerlerinde kimyasal oksijen ihtiyacı gideriminin zamanla değişimi	45
Şekil 4.2. Farklı akım yoğunluğu değerlerinde renk gideriminin zamanla değişimi.....	46
Şekil 4.3. Enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi	47
Şekil 4.4. Farklı akım yoğunluklarında pH değişiminin zamanla değişimi	47
Şekil 4.5. Akım yoğunluğunun akım verimine etkisi	48
Şekil 4.6. Akım yoğunluğunun çözünen elektrot kütesine etkisi.....	49
Şekil 4.7. Farklı elektrolit derişimlerinde kimyasal oksijen ihtiyacı gideriminin zamanla değişimi	50
Şekil 4.8. Farklı elektrolit derişimlerinde renk gideriminin zamanla değişimi.....	51
Şekil 4.9. Enerji tüketiminin elektrolit derişimi ile değişimi	51
Şekil 4.10. Farklı elektrolit derişimlerinde pH değişiminin zamanla değişimi.....	52
Şekil 4.11. Elektrolit derişiminin akım verimine etkisi	53
Şekil 4.12. Farklı başlangıç boyarmadde derişimlerinde kimyasal oksijen ihtiyacı gideriminin zamanla değişimi	54
Şekil 4.13. Farklı başlangıç boyarmadde derişimlerinde renk gideriminin zamanla değişimi.....	54
Şekil 4.14. Enerji tüketiminin boyarmadde derişimi ile değişimi.....	55
Şekil 4.15. Farklı başlangıç boyarmadde derişimlerinde pH değişiminin zamanla değişimi.....	55
Şekil 4.16. Boyarmadde derişiminin akım verimine etkisi.....	56
Şekil 4.17. Farklı reaksiyon sıcaklıklarında kimyasal oksijen ihtiyacı gideriminin zamanla değişimi	57
Şekil 4.18. Farklı reaksiyon sıcaklıklarında renk gideriminin zamanla değişimi.....	57
Şekil 4.19. Enerji tüketiminin sıcaklık ile değişimi	58
Şekil 4.20. Farklı reaksiyon sıcaklıklarında pH değişiminin zamanla değişimi.....	58
Şekil 4.21. Reaksiyon sıcaklığının akım verimine etkisi	59
Şekil 4.22. Reaksiyon sıcaklığının KOİ giderimine etkisi.....	60
Şekil 4.23. Boyarmadde derişiminin ve akım yoğunluğunun KOİ giderimine etkisi.....	61
Şekil 4.24. Boyarmadde derişiminin KOİ giderimine etkisi.....	62
Şekil 4.25. Boyarmadde derişiminin ve akım yoğunluğunun renk giderimine etkisi.....	63
Şekil 4.26. Boyarmadde derişiminin ve elektrolit derişiminin KOİ giderimine etkisi.....	64

Şekil 4.27. Boyarmadde derişiminin ve elektrolit derişiminin renk giderimine etkisi.....	65
Şekil 4.28. Boyarmadde derişiminin ve sıcaklığın KOİ giderimine etkisi	66
Şekil 4.29. Boyarmadde derişiminin ve sıcaklığın renk giderimine etkisi	67
Şekil 4.30. Optimum işletim koşullarında KOİ giderimi.....	68
Şekil 4.31. Optimum işletim koşullarında boyarmadde renk giderimi	69
Şekil 4.32. Optimum işletim koşullarında enerji tüketimi	70
Şekil 4.33. Optimum işletim koşullarında pH değışimi.....	70
Şekil 4.34. Optimum koşullarda boyarmadde derişimi ve NaCl derişiminin renk giderimine etkisi (t = 10 dk)	72
Şekil 4.35. Optimum koşullarda boyarmadde derişimi ve NaCl derişiminin KOİ giderimine etkisi (t = 60 dk)	73
Şekil 4.36. Optimum koşullarda boyarmadde derişimi ve NaCl derişiminin enerji tüketimine etkisi (kWh/kg boyarmadde giderimi) (t = 10 dk).....	74
Şekil 4.37. Optimum koşullarda boyarmadde derişimi ve NaCl derişiminin enerji tüketimine etkisi (kWh/kg KOİ giderimi) (t = 60 dk).....	75
Şekil 4.38. Deneysel ve hesaplanan kimyasal oksijen ihtiyacı giderimi.....	77
Şekil 4.39. Normal olasılık dağılımı	78
Şekil 4.40. İç studentized artık değeri.....	79
Şekil 4.41. Dış studentized artık değeri	80
Şekil 4.42. Reaksiyon derecesinin belirlenmesi.....	82

SİMGE ve KISALTMALAR DİZİNİ

F	Faraday sabiti (96487 Coulomb/mol)
i	Akım (A)
J	Akım yoğunluğu (mA/cm ²)
k	Özgül reaksiyon hız sabiti (mg ^{0.5} /L ^{0.5} -dak) (Eşitlik 4.5)
k	Faktör sayısı (Eşitlik 2.19)
n	Reaksiyon derecesi (birimsiz) (Eşitlik 4.5)
R ²	Regresyon katsayısı (birimsiz)
T	Sıcaklık (°C)
M	Metalin molar kütlesi (kg/mol)
n	Metalin değeri (Eşitlik 2.1)
V _R	Reaksiyon hacmi veya elektrolit hacmi (L)
V _m	Ortalama uygulanan potansiyel fark (V)
t	Süre (sn)
A	Absorbans
C	Boyarmadde konsantrasyonu
Δt	Reaksiyon süresi
Δm	Elektrotta tüketilen madde miktarı
η	Cevap
β ₀	Sabit katsayı
β _j	Lineer etkileşim katsayısı
β _{jj}	İkinci derece etkileşim katsayısı
β _{ij}	İkinci dizi etkileşim katsayısı
X _i , X _j	Değişkenler

o	Başlangıç anındaki değer
t	t anındaki değer
m	Ortalama
R	Reaktör
A	Amper
BOİ	Biyokimyasal oksijen ihtiyacı (mg/L)
C	Coulomb
CCD	Merkezi kompozit tasarım (central composite design)
DC	Doğru akım
dak	Dakika
g	Gram
J	Joule
KOİ	Kimyasal oksijen ihtiyacı (mg/L veya g/L)
kWh	Kilowatt-saat
L	Litre
m	Metre
M	Molar
RSM	Cevap yüzey yöntemi (response surface methodology)
s	Saniye
TKM	Toplam katı madde (mg/L)
V	Volt

1. GİRİŞ

Günümüzde endüstriyel uygulamalar ve hızlı kentleşme sonucunda su kirliliği artmaktadır [1]. Denizler, nehirler, kanallar, haliçler ve diğer alıcı ortamlar endüstriyel atık suların deşarjıyla sürekli olarak kirletilmektedir [2].

Tekstil endüstrisi kesikli ve sürekli üretim proseslerinin birçok aşamasında çok fazla miktarda su tüketen bir sektördür. Ülkemizdeki tekstil boyama fabrikalarından kaynaklanan atıksuyun toplam hacmi yılda yaklaşık 150 milyon tondur ve bu miktarın üçte biri durulama banyolarındaki atık boyalardır [3].

Tekstil boyaları, elyaf baskı ve boyama, iplik ve dokuma malzemelerinin renklendirilmesinde kullanılır. Boyaların nispeten düşük fiksaj etkinliği sonucu olarak oluşan renkli atıksu geleneksel arıtım yöntemleriyle kolaylıkla giderilemez. Tekstil boyası içeren atıksuların atılmadan önce etkili ve verimli yöntemlerle arıtılması gerekmektedir [4].

Boyama işlemi, sürekli ve kesikli proseslerle üretim proseslerinde birçok aşamada yer almaktadır. Tekstil endüstrisi atık suyunun birincil kaynağını boya banyoları ve durulama prosesleri oluşturmaktadır. Bu prosesler artık boyarmadde, tuz ve yardımcı kimyasallar içerir ve yaklaşık olarak 1 kg ürün başına 125-150 L atıksu oluşur [5].

Boyarmadde içeren atıksular yüksek kimyasal oksijen ihtiyacı, biyolojik oksijen ihtiyacı ve askıda kalan madde miktarı ile bilinmektedir. Özellikle boyama prosesi sırasında eklenen boya ve yüksek miktarda tuz geleneksel arıtım sistemlerini etkisiz kılmaktadır [5].

Son yıllarda, elektrokimyasal prosesler atıksu arıtım uygulamalarında dikkatleri üzerine çekmiştir. Elektrokoagülasyon, gıda maddesi atıkları, yağ atıkları, boyalar, asılı parçacıklar, kimyasal ve metalik cilalama atığı, organik madde, sentetik deterjan atığı, maden atıkları, ağır metal içeren çözeltilerin arıtımında kullanılmaktadır [2]. Literatürde yer alan çalışmalar, elektrokoagülasyonun kimyasal oksijen ihtiyacı, çözünmüş katılar ve bulanıklılık giderimi bakımından tekstil endüstrisi atıksuyunun arıtımında yüksek performans sergilediğini göstermektedir.

Bu çalışmanın amacı, Reactive Blue 160 (RB 160) boyarmaddesinin elektrokoagülasyon yöntemi ile gideriminin araştırılmasıdır. Kesikli sistem çalışmasında akım yoğunluğu, elektrolit derişimi, reaksiyon sıcaklığı ve boyarmadde derişimi işletim parametrelerinin KOİ giderimi, boyarmadde renk giderimi, akım verimi, enerji tüketimi, harcanan elektrot miktarı ve pH değişimi üzerindeki etkileri incelenerek arıtım koşulları cevap yüzey yöntemi (response surface methodology, RSM) uygulanarak optimize edilmiştir. Reaksiyon kinetiği optimum koşullarda belirlenmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. TEKSTİL ENDÜSTRİSİNDE ÜRETİM PROSESİ VE İŞLEMLER

Tekstil endüstrisinde üretim prosesi, fiber üretimi, terbiye, boyama ve apreleme aşamalarından meydana gelir.

Fiber üretimi ve dokuma hazırlık işlemleri mekanik kuru işlemlerden oluşur ve temel kimyasal maddeler tüketilmemektedir [6]. Terbiye işlemleri mekanik olmaktan çok kimyasal işlemlerdir. Tekstil malzemesini boyama ve/veya baskıya hazırlama (ön terbiye) işlemleri, boyama/baskı ve apre işlemleri olarak gruplandırılabilir. Pamuğu boyama ve baskıya hazırlama amacıyla yapılan ön terbiye işlemleri; yakma, haşıl sökme, pişirme, merserizasyon, ağartma, nötralizasyon ve yıkamadır. Haşıl sökme ile dokuma aşamalarında asitler ve enzimler kullanılır. Pişirme işleminde bazlar kullanılarak pamuklu ürün temizlenir. Boyama aşamasında çeşitli boyarmadde türleri kullanılır. Boyama işlemleri tekstil malzemesini boya banyosu veya baskı patı ile muamele etmek, fiksaj ve yıkama olmak üzere üç aşamada yapılır. Tekstil malzemesini boya banyosu veya baskı patı ile muamele etmekteki amaç boya çözeltisi veya baskı patı içinde bulunan boyar maddeyi tekstil lifine nüfuz ettirmektir. Bu işlemi fiksaj takip eder ve amaç life nüfuz eden boyarmaddeyi lif içinde veya üzerinde sabitleştirmektir. Boyama ve baskı işlemlerinin son basamağı olan yıkama işleminde amaç life fikse olmamış boyarmadde fazlasını tekstil malzemesinden uzaklaştırmaktır. Apre işlemi tekstil malzemesini satışa hazır hale getirmek ve ürüne istenilen özellikleri kazandırmak için yapılan son işlemdir. Terbiye işlemleri ve boyama prosesleri çok fazla miktarda su gerektiren işlemlerdir ve boyama sırasında fazla miktarda atıksu üretilmektedir [6,7].

Yünlü tekstil endüstrisi üretim prosesi, yünün yıkanması aşaması dışında pamuklu tekstil endüstrisi üretim prosesi ile aynıdır. Tekstil endüstrisi atıksuyu, pamuklu tekstil endüstrisinde haşılama, hasıl sökme, pişirme ve ağartma, yıkama, boyama ve durulama aşamalarında; yünlü tekstil endüstrisinde pamuk yıkama ve

kurutma, karbonizasyon, dinkleme, yapak yıkama, baskı fiksaj, boyama ve durulama aşamalarından oluşmaktadır [8].

Tekstil endüstrisinde kimyasal lifler, boyarmaddeler, temel kimyasal maddeler ve yardımcı kimyasal maddeler kullanılmaktadır. Suni veya doğal ipliklerin kalıcı renklere boyanması kesikli veya sürekli çalışan üretim proseslerinin herhangi bir aşamasında boyarmaddeler kullanılarak gerçekleştirilmektedir [4]. Dokumada haşılama işlemi için kullanılanlar hariç tekstil endüstrisinde kullanılan temel kimyasal maddelerin hemen hepsi terbiye işletmelerinde kullanılmaktadır. Temel kimyasal maddeler; çeşitli organik asitler (asetik asit, sitrik asit), çeşitli inorganik asitler (H_2SO_4 , HCl), çeşitli bazlar (NaOH, NH_3), sodyum, potasyum, magnezyum gibi metallerin çeşitli tuzları, çinko ve titan oksitleri, çeşitli oksidasyon maddeleri, çeşitli organik çözücüler ve çeşitli organik maddelerdir [7].

Tekstil endüstrisinde renk, organik madde içeriği, yüksek pH, toksik madde içeriği, yüksek sıcaklık, deterjan ve sabun içeriği, yağ ve gres içeriği, kükürt içeriği ve katı madde içeriği atıksuların kirliliğini artıran önemli parametrelerdir [9].

Çizelge 2.1’de tekstil endüstrisinin farklı proseslerinde üretilen atıksuların en yüksek deşarj değerleri görülmektedir. Alıcı ortam deşarjı için atıksuların bu değerlerin altındaki niteliklerde olması gerekmektedir.

Çizelge 2.1. Tekstil Sanayii Atık Sularının Alıcı Ortama Deşarj Standartları (açık elyaf, iplik üretimi ve terbiye; dokunmuş kumaş terbiyesi ve benzerleri; pamuklu tekstil ve benzerleri; yün yıkama, terbiye, dokuma ve benzerleri; örgü kumaş terbiyesi ve benzerleri; halı terbiyesi ve benzerleri; sentetik tekstil terbiyesi ve benzerleri) [10]

Parametre	Birim	Kompozit Numune 2 Saatlik	Kompozit Numune 24 Saatlik
Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)	(mg/L)	250-400	200-300
Toplam Askıda Katı Madde	(mg/L)	140-400	100-300
Fenol	(mg/L)	1	0.5
Çinko (Zn)	(mg/L)	12	10
Amonyum Azotu (NH ₄ -N)	(mg/L)	5	
Serbest Klor	(mg/L)	0.3	
Toplam Krom	(mg/L)	2	1
Sülfür (S ²⁻)	(mg/L)	0.1	
Sülfit	(mg/L)	1	
Yağ ve Gres	(mg/L)	10-200	100
Balık Biyodeneyi (ZSF)		3-4	2-3
pH		6-9	6-9

2.2. BOYARMADDELER

Boyarmaddeler, tekstil malzemelerine kimyasal bağlarla bağlanarak malzemelerin renklendirilmesinde kullanılan organik bileşiklerdir. Organik bileşiklere renklendirme özelliğini veren doymamış kromofor gruplarıdır [6]. Boyarmaddeler çözünürlük özelliklerine, kimyasal yapılarına ve boyama özelliklerine göre üç kısımda sınıflandırılabilirler [11].

Çizelge 2.2. Boyarmaddelerin sınıflandırılması

Çözünürlük özelliklerine göre	Kimyasal yapılarına göre	Boyama özelliklerine göre
<ul style="list-style-type: none">• Suda çözünen boyarmaddeler• Suda çözünmeyen boyarmaddeler• Substratta çözünen boyarmaddeler	<ul style="list-style-type: none">• Azo boyarmaddeleri• Nitro ve nitrozo boyarmaddeleri• Polimetin boyarmaddeleri• Arilmetin boyarmaddeleri	<ul style="list-style-type: none">• Bazik boyarmadde• Asit boyarmadde• Direkt boyarmadde• Reaktif boyarmadde• Sülfür boyarmadde• Küpe boyarmadde• Mordan boyarmadde• Metal kompleks boyarmadde• Pigment boyarmadde• Dispers boyarmadde

Reaktif boyarmaddeler uygun koşullarda hızlı biçimde lif ile kimyasal reaksiyona girerek kovalent bağ yapar. Selüloz esaslı lifler, yün, ipek, orlon, akrilik ve karışımları için de reaktif boyarmaddeler kullanılmaktadır. Bir reaktif boyarmaddenin karakteristik yapısında suda çözünebilen grup, moleküle renk veren grup, moleküldeki renkli grup ile reaktif grubu birbirine bağlayan köprü bağları ve reaktif grup bulunmaktadır. Reaktif grup, elyafdaki fonksiyonel grup ile kovalent bağ oluşturan gruptur. Reaktif grubun elyaf ile yaptığı reaksiyonun mekanizmasına göre reaktif boyarmaddeleri; nükleofilik sübstitüsyonla reaksiyon veren reaktif boyarmaddeler ve nükleofilik addisyonla reaksiyon veren reaktif boyarmaddeler olmak üzere sınıflandırabiliriz. Nükleofilik sübstitüsyon reaksiyonu iki kademe gerçekleşir. Birinci kademe tekstil elyafın nükleofilik fonksiyonel grubu bazik ortamda katalizlenerek, reaktif grubun elektrofilik merkezine katılır. İkinci kademe ise nükleofilik yapıda bir başka grubun eliminasyonu gerçekleşir. Nükleofilik addisyonla reaksiyon veren boyarmaddeler, önce bazla katalizlenen bir eliminasyon reaksiyonu, ardından yine bazla katalizlenen bir katılma reaksiyonu verirler. Katılma reaksiyonu tekstil elyafın fonksiyonel grubuna olur. Elyaf, boyarmadde ile bir eter bağı ile bağlanır [12].

Reaktif boyarmaddeler yüksek pH değerlerinde hidrolize uğrar. Boyama prosesi bitiminde hidrolize uğrayan boyarmaddeyi uzaklaştırmak için sabunlama ve durulama prosesleri uygulanır. Reaktif boyarmaddelerin klor dayanımları düşüktür ve bu nedenle boyama proseste klor içermeyen ağartma maddeleri kullanılır [13].

Reaktif boyarmaddelerin günümüzde kullanılan en yaygın tipi pamuk boyamada fiksaj oranının % 60-90 olduğu boyama prosesidir. Bu uygulama fazla miktarda su gerektirmektedir. Atıksuyun birincil kaynağını boyama banyo suları ve durulama prosesleri oluşturmaktadır. Bu prosesler artık boya, tuz ve yardımcı kimyasallar içerir ve yaklaşık olarak 1 kg ürün başına 125-150 L atıksu oluşur [5].

2.3. TEKSTİL ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ ARITIMINDA KULLANILAN YÖNTEMLER

Literatürde tekstil endüstrisi atıksuyunun arıtımında ozonlama [14], adsorpsiyon [16, 22], elektrokimyasal oksidasyon [24], elektrokoagülasyon [25], fotokimyasal oksidasyon [17], mikrobiyal arıtım [17], anaerobik biyoarıtım [18], biyolojik arıtım [19, 20] membran filtrasyon [21] ve iyon değişimi [23] yöntemleri uygulanmıştır. Uygulanan yöntemlerin avantajları ve dezavantajları Çizelge 2.2'de özetlenmiştir.

Wu vd. [14], C.I. Reactive Blue 15 tekstil boyarmaddesinin sulu çözeltisini yarı kesikli reaktörde ozonlamışlardır. Ozon, klor ve hidrojen peroksit göre daha iyi bir oksitleyicidir ve ozonla oksidasyon klorlu hidrokarbonları, fenoller, pestisitleri ve aromatik hidrokarbonları indirgeyici özelliğe sahiptir. Boyarmadde içeren atığa uygulanan doz renk ve kalan kimyasal oksijen ihtiyacına bağlıdır. Ozonlama atığı, renksiz ve düşük KOİ ile deşarj edilebilir. Ozonun avantajı gaz halinde uygulanabilmesi ve böylece atıksu ve çamurun hacmini artırmamasıdır. Boyarmaddenin içindeki kromofor grupları genellikle konjuge çift bağlı organik bileşiklerdir; küçük moleküllere bölünebilir ve böylece renk azalır. Fakat bu küçük

moleküller kanserojen veya toksik özellikleri arttırabilir. Bu etkiyi önlemek için ozonlama fiziksel bir yöntemle birlikte kullanılabilir. Renk giderimi kısa sürede elde edilebilir. Alkali koşullarda ozonun bozulması hızlanır. Dezavantajları ise yüksek maliyet ve kısa ömürdür [15].

Wu vd. [14] kinetik çalışmanın sonucunda, sulu reaktif boyarmaddenin ozonlanmasının yalancı (pseudo) birinci dereceden reaksiyon ile gerçekleştiğini belirlemişlerdir. Görünen hız sabiti, uygulanan ozon dozu ve sıcaklıkla artmış, başlangıç derişiminin artmasıyla logaritmik olarak düşmüştür. Başlangıç boyarmadde derişimi, uygulanan ozon dozu ve sıcaklıkla ozonun kütle transfer katsayısı lineer olarak yükselmiştir. Araştırmacılar ozonlama ile kimyasal oksijen ihtiyacının etkili bir şekilde giderildiğini ve boyarmadde çözeltisinin biyobozunurluğunun artırıldığını belirtmişlerdir [14].

Hassan vd. [16], tekstil atıksularından Reactive Yellow 145, Reactive Red 194 ve Reactive Blue B boyarmaddelerinin giderimini Sorel çimentosu kullanarak araştırmışlardır. Çalışmada adsorpsiyon temas süresi, başlangıç derişimi ve pH parametreleri incelenmiş ve optimize edilmiştir. Boyarmadde adsorpsiyonu denge verilerinin Freundlich denge izoterminden daha çok Langmuir izotermine uygun olduğu belirlenmiştir. Adsorpsiyon izotermelerinden Sorel çimentosunun RY-145, RR-194, RB-B reaktif boyaları için adsorpsiyon kapasitelerinin sırasıyla 107.67, 120.89, 103.14 mg boyarmadde/g olduğunu belirlemişlerdir. Araştırmacılar % 96 KOİ gideriminin optimum koşullarda 30 dakikada sağlandığını belirtmişlerdir [16].

Basha vd. [17], Procion blue boyarmaddesi içeren tekstil atıksuyunun kimyasal oksijen ihtiyacı giderimini sağlayabilmek amacıyla elektrokimyasal, mikrobiyal degradasyon ve fotokatalitik oksidasyon yöntemlerinin kombinasyonunu uygulamışlardır. Fotokimyasal yöntem, UV ve hidrojen peroksit varlığında boyarmadde moleküllerini CO₂ ve H₂O'ya indirger. Degradasyon yüksek derişimlerde hidroksil radikallerinin üretimi ile sağlanır. UV ışığı, H₂O₂ gibi kimyasalları aktive etmek için kullanılabilir. Boyarmadde giderim verimi UV

radasyonunun yoğunluğu, boyarmaddenin yapısı, boyarmadde banyosu kompozisyonu ve pH değerlerinden etkilenir. Fotokimyasal arıtımın avantajları, proseste çamur üretilmemesi ve kötü kokuların az olmasıdır. UV ışığının H_2O_2 'yi aktive etmesiyle iki hidroksil radikali oluşur ve hidroksil radikalleri organik maddelerin kimyasal oksidasyonunu sağlar [15]. Çalışmada mikrobiyal degradasyon, aerobik kesikli reaktörde 5 gün süresince mantar ve bakteri kullanılarak uygulanmıştır. Mikrobiyal degradasyonun ardından beşer saat süresince elektroliz ve fotokataliz prosesi uygulanmıştır. Araştırmacılar elektrokimyasal, mikrobiyal degradasyon ve fotokatalitik oksidasyon yöntemlerinin kombinasyonu ile % 92-95 KOİ giderimi elde etmişlerdir [17].

Turgay vd. [18], tekstil endüstrisi atıksuyunda bulunan azo boyarmaddeleri içeren sentetik tekstil atıksuyunun arıtımını anaerobik biyolojik yöntem ve kimyasal oksidasyonla araştırmışlardır. Anaerobik biyoarıtım, azo ve diğer suda çözünen boyarmaddelerin renk giderimini hidrojenle oksidasyon reaksiyonunu ile gerçekleştirir. Anaerobik sistemin avantajı, çözünebilir boyarmaddelerin renk gideriminin yanı sıra biyogaz üretiminin sağlanmasıdır. Biyogaz endüstriyel proseslerde ısı ve güç sağlamak için yeniden kullanılabilir ve enerji maliyeti azaltılabilir [15]. Mikrobiyel proseste, alıkonma süresinin artması, maya ekstraktı ve mikroorganizmaların eklenmesiyle boyarmadde gideriminde olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Katalitik sulu peroksit oksidasyon prosesinde, reaksiyon koşulları 0.5 g/L aktif karbon ve 2 ml H_2O_2 /300 ml çözelti kullanılarak, 80°C sıcaklıkta ve pH 3' te 2 saat olarak uygulanmıştır. Araştırmacılar, genel olarak renk gideriminin % 60 adsorpsiyon ve % 40 oksidasyonla gerçekleştiğini belirtmişlerdir [18].

Khouni vd. [19], Blue Bezactive S-GLD 150 boyarmaddesinin renk giderimini sıralı kesikli reaktör (SBR) kullanarak biyolojik yöntemle incelemişlerdir. Renk giderimi, dört farklı hacimsel boyarmadde yükleme oranında 3-20 boyarmadde/ m^3 .d, oda sıcaklığında, aerobik koşullar altında ve pH=7'de çalışılmıştır. Araştırmacılar hacimsel boyarmadde yüklemesi 15 g boyarmadde/ m^3 .d olduğu zaman maksimum renk giderim oranlarını % 88-97 ve KOİ giderim oranlarını

% 95-98 olarak elde etmişlerdir. Hacimsel boyarmadde yüklemesi 20 g boyarmadde/m³d'ye yükseltildiğinde KOİ giderimi % 90'a, renk giderimi % 70'e düşmüştür [19].

Spagni vd. [20], Reactive Orange 16 (RO16) boyarmaddesi içeren sentetik tekstil atıksuyunun arıtımını anaerobik biyofiltre, anoksik reaktör ve aerobik membran biyoreaktörden oluşan deney sisteminde incelemiştir. Araştırmacılar, aromatik aminlerin aerobik koşullarda kolaylıkla parçalanabilir olduğunu, aerobik koşullar altında RO16'dan oluşan sülfonatlı aromatik aminlerin biyodegradasyona karşı dirençli olduğunu ve bu nedenle aromatik aminlerin tekstil atıksularının biyolojik arıtımında sorun oluşturduğunu belirtmişlerdir [20].

Akbari vd. [21], yedi farklı tekstil boyarmaddesinin giderimini membran filtrasyon yöntemiyle araştırmışlardır. Membran filtrasyon yöntemi sıcaklığa dirençli ve mikrobiyal degradasyon için etkilidir. Proseste ayırma işleminden sonra kalan konsantre çamurun atılması sorun oluşturur. Yüksek yatırım maliyeti, tıkanma olasılığı ve belli sürelerde membranın değiştirilmesi yöntemin dezavantajlarıdır. Filtrasyon yöntemi düşük derişimlerde boyarmadde içeren tekstil atıksuları için daha uygundur [15]. Araştırmacılar, başlangıç derişimi, pH, akım üzerindeki tuz ve alıkonma süresinin etkilerini incelemişler, anyonik boyarmaddeler için alıkonma süresinin pH 3'te pH 6'dan daha düşük olduğunu ve bu etkinin katyonik boyarmaddeler için tersi olduğunu açıklamışlardır. Membranın kirlenmeye karşı hassas olduğunu ve tekstil atıksuyundaki tuzun varlığının akıda azalmaya yol açtığını belirtmişlerdir [21].

Khaled vd. [22], düşük maliyetli ve çevre dostu adsorbanların kullanımını alternatif bir yöntem olarak araştırmışlardır. Doğal kil, mısır koçanı, pirinç gövdesi gibi doğal yüzeylerin kullanımı, yaygın kullanılabilirlik ve düşük maliyet nedeniyle boyarmadde gideriminde tercih edilmektedir. Doğal adsorbanlar aktif karbonla karşılaştırıldığında boyarmadde gideriminde ekonomik olarak avantajlıdır ve rejenerasyon gerekli değildir [15]. Çalışmada portakal kabukları düşük maliyetli

adsorbana dönüştürülmüş ve Direct Yellow 12 (DY12) içeren yapay tekstil boyarmadde atıksuyunun arıtımı portakal kabuğundan elde edilen aktiveleştirilmiş karbonla çalışılmıştır. Çalışma koşulları başlangıç boyarmadde derişimi 25-125 mg/L, portakal kabuğu karbonun derişimi 2.5-10.0 g/L ve sıcaklık 27°C olarak uygulanmıştır. Araştırmacılar, 5 g/L karbon derişimi ve 125 mg/L DY-12 derişimi için en yüksek % 96 giderim elde etmişlerdir. Araştırmacılar, portakal kabuğundan geliştirilen aktif karbonla arıtım yönteminin, boyarmadde gideriminde etkili bir malzeme olduğunu ve çok düşük maliyetli olduğunu belirtmişlerdir [22].

Raghu ve Basha [23], tekstil boyarmadde atıksuyunun arıtımını kimyasal koagülasyon ve elektrokoagülasyon prosesine ek olarak iyon değişim prosesi uygulayarak araştırmışlardır. Çalışmada, kimyasal ve elektrokimyasal arıtım renk ve KOİ giderimi sağlarken; iyon değişimi prosesi renk giderimi, KOİ giderimi, iletkenlik, alkalinite ve toplam çözünmüş madde giderimi verimini arttırmıştır. Kimyasal koagülasyonda, 300 mg/l koagülantla en yüksek % 81.3 KOİ giderimi; elektrokoagülasyon prosesinde en yüksek %92.31 KOİ giderimi elde edilmiştir. Demir elektrotlarla 1 A/ m² akım yoğunluğunda % 80 KOİ giderimi için enerji tüketimi 19.28 kWh/kg KOİ, alüminyum elektrotlarla 130.095 kWh/kg KOİ olarak hesaplanmıştır. Araştırmacılar, kimyasal yöntem veya elektrokoagülasyon ile arıttıktan sonra iyon değişimi yöntemi uygulanırsa çok verimli sonuçlar alınabileceğini belirtmişlerdir [23].

Kimyasal yöntemler renk gideriminde uygulama kolaylığı bakımından en çok kullanılan yöntemlerdir. Kimyasal oksidasyonda oksidasyonun sonucu olarak boyarmadde moleküllerinin aromatik halkalarının kırılmasıyla boyarmadde içeren atıktan boyarmadde renginin giderimi sağlanır. Elektrokimyasal degradasyonda, kimyasal kullanılmaz ve çamur oluşmaz. Parçalanmış metabolitler genellikle tehlikeli değildir ve alıcı ortamlara güvenli bir şekilde deşarj edilebilir. Boyarmadde gideriminde etkilidir ve yüksek verimlilik gösterir [15].

Chatzisyneon vd. [24], tekstil atıksuyunun elektrokimyasal oksidasyonunu titanyum, platin ve iridyum anot kullanarak araştırmışlardır. Araştırmacılar kesikli sistem deneylerini; 5, 10, 14, 20 A akım şiddetinde, % 0.5, 1, 2, 4 NaCl derişiminde, 0.81 ve 0.65 L/s sirkülasyon hızında, 361 mg/L ve 281 mg/L başlangıç KOİ koşullarında çalışmışlardır. Chatzisyneon vd. [24] arıtım performansının akım yoğunluğu ve elektrolitik iletkenliğin artmasıyla arttığını, çözelti pH' sinin artmasıyla azaldığını belirtmişlerdir [24].

Phalakornkule vd. [25], sentetik ve gerçek tekstil atıksuyundan renk giderim verimini elektrokoagülasyon prosesiyle incelemiştir. Çalışmada sentetik boyarmadde atıksuyu için Reaktif Blue 140 ve Disperse Red boyarmaddeleri kullanılmıştır. Giderim verimi ve enerji tüketim verilerinden belirli bir akım yoğunluğunda, reaktif ve dispers boyarmaddeler için demirin alüminyumdan daha üstün olduğu belirlenmiştir. Her iki boyarmadde için de 100 mg/L başlangıç boyarmadde derişiminde % 95' in üzerinde renk giderimi elde edilirken, enerji maliyeti 1 kWh/m³ boyarmadde olarak hesaplanmıştır. Araştırmacılar, sentetik atıksu için kullanılan tasarım parametrelerinin gerçek tekstil atıksuyunun arıtımında daha az etkili olduğunu belirtmişlerdir [25].

Çizelge 2.3. Tekstil endüstrisi atıksuyunun arıtımında uygulanan yöntemlerin avantajları ve dezavantajları [15]

Fiziksel/kimyasal/biyolojik yöntemler	Avantajlar	Dezavantajlar
Fenton reaktifi	Çözünebilen ve çözünemeyen boyarmaddelerde etkili renk giderimi	Çamur oluşumu
Ozonlama	Gaz halinde uygulanır: hacim değişikliği yok	Kısa yarı ömür
Fotokimyasal oksidasyon	Çamur oluşumu yok	Yan ürün oluşumu
NaOCl	Başlatıcı ve azo bağının kırılmasını hızlandırır	Serbest aromatik aminler
Aktif karbon	İyi boyarmadde giderimi	Yüksek maliyet
Membran filtrasyonu	İyi boyarmadde giderimi	Konsantre çamur oluşumu
İyon değişimi	Adsorban kaybı yok	Tüm boyarmaddelerde etkili değildir
Beyaz küf mantarı	Ekonomik	Enzim üretiminin kararsızlık göstermesi
Mikrobiyal kültürler	Ekonomik	Fermantasyon prosesi gerekir
Canlı/ölü mikrobiyal biyokütle	Toksik atık için kullanılabilir	Tüm boyarmaddelerde etkili değildir
Anaerobik biyoarıtım	Biyogaz üretimi	Tüm boyarmaddelerde etkili değildir
Elektrokimyasal degradasyon	Parçalanmış bileşikler zararsızdır	Yüksek enerji maliyeti
Elektrokoagülasyon	Ekonomik	Çamur oluşumu

2.4. ELEKTROKİMYASAL ATIKSU ARITIM YÖNTEMLERİ

Son yıllarda, elektrokimyasal yöntemler alternatif atıksu arıtım yöntemleri arasında umut vericidir ve geleneksel proseslerin yerini almaktadır. Geleneksel proseslerdeki sınırlamalar endüstriyel atıksuların arıtımında elektrokimyasal arıtım proseslerinin kullanımını gerektirmektedir [4].

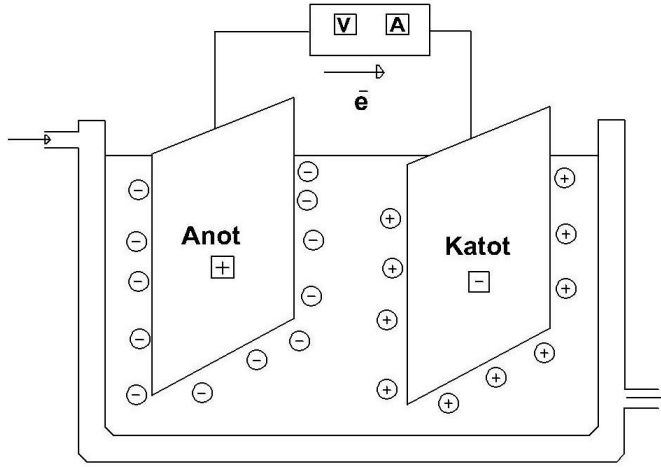
Elektrokimyasal yöntemlerin atıksu arıtımında sağladığı avantajlar aşağıdaki biçimde sıralanabilir [26]:

- Çevre uyumluluğu: Temel reaktantı elektrondur ve elektron temiz bir reaktiftir.
- Çok yönlülük: Elektrolitik arıtmalar katı, sıvı veya gaz kirleticilerden nötr, pozitif veya negatif yüklü organik veya inorganik ürünler meydana getirebilir.
- Güvenlik: Elektrokimyasal yöntemler ılımlı koşulları, küçük miktarda ve zararsız doğası olan kimyasalların eklenmesinden dolayı güvenlidirler.
- Enerji verimliliği: Elektrokimyasal prosesler düşük sıcaklık ve basınç altında çalışır. Genellikle ortam koşulları altındadır. Elektrotlar ve hücreler güç kayıplarını minimize etmek üzere dizayn edilebilir. Gerekli ekipmanlar ve işletimler basittir. Uygun bir şekilde tasarlanırsa nispeten daha ucuz bir hale gelir [26].

2.4.1. Elektrokimyasal Proseslerin Çalışma Esasları

Elektrokimyasal hücre, katı, sıvı veya çözünerek iyonlarına ayrılmış olan kimyasal maddelerin oluşturduğu elektrolit ve elektrotlardan meydana gelen sistemdir. Potansiyel fark uygulanarak iyonlar elektrotlara taşınır ve elektrolitteki iyonların ayrışmaları sağlanır [27]. Elektrokimyasal reaksiyonlar, elektrolitten gelen iyonik bileşiklerin anotta yükseltildiği ve katotta indirildiği iyon transfer

reaksiyonlarıdır. Elektroliz hücresinde, yükseltgenme yarı-tepkimesiyle serbest elektronlar anottan uzaklaştığından anot pozitifdir. İndirgenme yarı-tepkimesiyle elektronlar katoda yönlendirildiğinden, elektroliz hücresinde katot negatifdir [28]. Anot ve katotta genellikle metal, karbon veya bir yarı iletken elektrotlar kullanılmaktadır [11].



Şekil 2.1. Elektrokimyasal hücre [11]

Elektroliz işleminde kendiliğinden gerçekleşmeyen bir tepkime elektrik enerjisi kullanılarak yürütülür [28]. Elektrokimyasal prosesler dolaylı elektroliz ve doğrudan elektroliz prensibine dayanır [26].

Doğrudan elektroliz, elektrokimyasal reaktörlerde potansiyel farkının uygulamasıyla kirleticilerin elektrotta doğrudan kimyasal oksidasyonu veya indirgenmesiyle su içinden uzaklaştırılması prensibidir. Oksidasyon ve indirgenme prosesleri elektrotlarda aracı elektron olmadan doğrudan meydana gelir. Doğrudan elektroliz metodu anodik ve katodik prosesleri içerir [29].

Doğrudan meydana gelen prosesler genellikle difüzyon ile sınırlanır. Bu nedenle yüksek verimlilik elde edilmesi için düşük akım yoğunluklarının kullanımına

gereksinim duyulur. Ayrıca, yüksek aşırı gerilim için proses soymetaller veya benzer pahalı bileşiklerle işletilmelidir. Alternatif olarak, genellikle düşük basınç ve sıcaklık altında homojen veya heterojen, katodik veya anodik redoks aracılı prosesler bu zorlukların üstesinden gelmek için öngörülmektedir. Kimyasal reaktant olarak üretilen redoks reaktifi, kirleticileri daha az zararlı ürünlere dönüştürmek için kullanılır. Redoks reaktifi, kirletici substrat ve elektrot arasında elektronları taşıyan aracı gibi davranır. Bu proses dolaylı elektroliz olarak adlandırılır. Dolaylı prosesler tersinir ve tersinmez prosesler olarak gerçekleştirilebilir [29].

2.4.2. Faraday Yasaları ve Akım Verimi

Elektroliz sırasında devreden geçirilen elektrik enerjisi ile elektroliz esnasında oluşan kimyasal maddeler arasındaki bağıntılar Faraday yasaları ile açıklanır.

Faraday yasalarına göre, elektrotlarda açığa çıkan madde miktarı devreden geçen yük miktarına bağlıdır. Elektroliz hücrelerinden aynı miktarda elektrik geçirildiğinde elektrotlarda biriken maddelerin eşdeğer gram sayıları birbirine eşittir [27]. Elektrotta tüketilen madde miktarı Eşitlik 2.1 ile hesaplanır [30].

$$\Delta m = (i \cdot M \cdot t) / (n \cdot F) \quad (2.1)$$

Eşitlik 2.1’de ; M, metalin molar kütlesi (kg/mol), F, Faraday sabiti (96487 C/mol), i, akım şiddeti (amper), t, süre (saniye), n, metalin değerliğini belirtmektedir.

Elektrokimyasal proseslerde elektrotlarda aynı anda bir veya birden çok reaksiyon gerçekleşir. Akım verimi, elektrokimyasal reaksiyonlar ile ilişkilidir ve elektrokimyasal prosesin verimini belirlemedeki en önemli parametredir [27]. Akım verimi Eşitlik 2.2 ile hesaplanır [27].

$$akım\ verimi = ([KOİ_{t+\Delta t} - KOİ_t] \cdot F \cdot V_R) / (8 \cdot i \cdot \Delta t) \quad (2.2)$$

Eşitlik 2.2’de; t ve t+Δt, süre (saniye), KOİ_t ve KOİ_{t+Δt}, sırasıyla t ve t+Δt zamanlarındaki kimyasal oksijen ihtiyacı (gO₂/L), i, akım şiddeti (amper), F Faraday sabiti (96487 C/mol), V_R elektrolit hacmini (L) belirtmektedir [27].

2.5. ELEKTROKİMYASAL ATIKSU ARITIM PROSESLERİ

Literatürde elektrokimyasal atıksu arıtımı için elektroflotasyon, elektrokoagülasyon ve elektrooksidasyon prosesleri uygulanmaktadır. Elektroflotasyon, suyun elektrolizi sonucu oluşan hidrojen ve oksijen gazlarının kabarcıkları ile kirleticileri adsorblayarak su yüzeyine taşıyan bir prosestir. Flotasyon yönteminin verimi küçük ve eşit dağılımlı kabarcıkların oluşturulmasına bağlıdır. Flotasyon prosesinde ayırma verimi kabarcık boyutu ile ilişkilidir. Küçük kabarcıkların büyük yüzey alanı sağlaması partiküllerin tutunmasını kolaylaştırmaktadır. Elektroflotasyon veriminde kabarcıkların hızlı dispersiyonu, küçük kabarcıkların oluşumu kadar önemli bir parametredir. Elektroflotasyon sistemi elektrot, güç kaynağı ve çamur toplama ünitesinden oluşmaktadır. Genellikle bu yöntem başka bir elektrokimyasal prosesle birlikte uygulanır [31].

Elektrokoagülasyon prosesi bazen elektroflotasyonla birlikte uygulanarak elektrokoagülasyon/elektroflotasyon prosesi olarak değerlendirilmektedir. Elektroliz prosesi aracılığıyla metal hidroksit gibi koagülasyon ajanları üretilir. Koagülasyon ajanları kirleticiyle birleşerek küme oluşturur. Kabarcıklar reaktörde en üst seviyeye ulaşırken suda asılı olan parçacıklar kabarcıklara yapışır ve yüzeye çıkar. Proseste koagülant üretimi, kirletici kümelenmesi ve kirletici uzaklaştırılması aşamaları gerçekleşir [32]. Elektrokoagülasyon prosesi, doğru akım uygulanarak demir veya alüminyum anotta elektrolitik oksidasyon ve çökelti oluşumunu içerir. Metal iyonları elektrokoagülasyon reaktörü içinde metal hidroksit iyonları ve nötral M(OH)₃ oluşturmak üzere hidrolize olur. Nötral M(OH)₃’ün düşük çözünürlüğü ile küme

oluşumu gerçekleşir. Elektrokoagülasyon prosesi koagülasyon, adsorpsiyon, çöktürme ve yüzdürme prensipleriyle kirleticiyi uzaklaştırır [33].

Elektrooksidasyon prosesinde çözünmeyen inert elektrotlar kullanılarak oksidasyon gerçekleştirilir. Anotta oluşan reaksiyonlar katoda göre daha fazladır ve anodun katalitik aktivitesi en önemli parametredir. Yüksek giderim verimi ve çamur oluşmaması prosesin avantajlı yönüdür [34].

2.6. ELEKTROKOAGÜLASYON

Elektrokoagülasyon, gıda maddesi atıkları, yağ atıkları, boyalar, asılı katı parçacıklar, kimyasal ve mekanik cilalama atığı, organik madde, sentetik deterjan atığı, maden atıkları, ağır metal içeren çözeltiler gibi endüstriyel atıksuların arıtımında uygulanmaktadır. Elektrokoagülasyon üzerinde etkili temel işletim parametrelerini tanımlamak için deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Bu teknoloji elektrik enerjisi tüketimini en aza indirmek ve atıksu arıtım verimini en üst düzeye çıkarmak için optimize edilir [2].

Elektrokoagülasyon prosesi etkili ve verimli bir yöntemdir. Diğer arıtım teknolojilerine oranla yatırım maliyeti yüksektir. Elektrokoagülasyon yöntemi kullanım suyu, besin ve protein atıksuyu, mayalı atıksu, restoran atık suyu, katran kumu atık suyu, kentsel atıksu, nitrat içeren atıksu çözeltileri ve arsenik içeren atıksu arıtımında başarıyla uygulanmıştır [3]. Bu teknoloji farklı türde atıksuların arıtımında da kullanılır. Elektrokoagülasyon prosesi basit ekipman, kolay işletim, kısa reaktif alıkonma süresi, indirgenme veya ekipman için kimyasal eklenmemesi ve hızlı çöken çamur miktarının azalması gibi özelliklerine sahiptir [33]. Elektrokoagülasyon prosesinde:

- Ekipman karmaşık değildir ve işletimi kolaydır.
- Arıtılan atıksu berrak, renksiz ve kokusuzdur.

- Oluşan çamur süzülerek kolayca ayrılabilir. Az çamur üreten bir yöntemdir.
- Oluşan yığınlar kimyasal yığınlara benzer fakat elektrokoagülasyon yığınları daha büyüktür, daha az bağlı su içerir, asit dirençli ve daha kararlıdır. Filtrasyonla daha hızlı ayrılır.
- Kimyasal arıtımla karşılaştırıldığında daha az çözünmüş katı madde ihtiva eden sıvı atık üretir. Suyun yeniden kullanılması durumunda daha az toplam çözünmüş katı madde ihtiva ettiği için yeniden kazanım maliyeti daha düşük olur.
- Küçük koloidal parçacıkların uzaklaştırılmasında avantajlıdır. Uygulanan elektrik alanı küçük parçacıklara hızlı hareket verir ve koagüle olmaları kolaylaşır.
- Kimyasal kullanımını gerektirmez. Böylece ayrı bir kimyasal nötralizasyon sorunu yoktur. Kimyasal maddelerden oluşan ikinci bir kirlenmeye neden olmaz.
- Elektroliz sırasında oluşan gaz kabarcıkları, kirleticiyi çözeltilerin yüzeyine taşır. Böylece kirletici daha kolay bir şekilde toplanır ve uzaklaştırılır.
- Hücredeki elektrolitik prosesler hareketli parça olmadan elektriksel olarak kontrol edilir.
- Elektriğin olmadığı yerlerde kullanılabilir. Güneş paneli bu üniteyi işletebilmek için yeterlidir [2].

2.6.1. Elektrokoagülasyonun Temel İlkeleri

Elektrokoagülasyon prosesi birbirini izleyen üç aşamadan meydana gelir [2]:

1. Anodun (kurban elektrot) elektrolitik oksidasyonu ile koagülantların oluşumu
2. Kirletici maddenin destabilizasyonu, partikül süspansiyonu ve emülsiyonların kırılması
3. Destabil fazların agregasyonu ile kümelerin oluşması

Kirleticilerin destabilizasyonu, partikül süspansiyonu ve emülsiyonların kırılması aşağıdaki biçimde açıklanabilir:

1. Çözelti üzerinden akım geçişiyle anodun çözünmesi ve iyonların etkileşimiyle oluşan yüklü türlerin etrafında oluşan çift katman difüzyonu.
2. Atıksu içinde bulunan iyonik türlerin yük nötralizasyonu. Nötralizasyon anodun elektrokimyasal çözünmesiyle zıt yüklü iyonların oluşumunun sonucudur. Zıt yüklü iyonlar, partiküller arası elektrostatik itmeyle azaltılır. Van der Waals kuvveti sonucunda koagülasyon oluşur. Proses sıfır net yük ile sonuçlanır.
3. Kümelerin oluşumu. Koagülasyonun sonucudur. Kompleks olmayan kolloidal partiküllerin bağlanmasıyla çamur yatağı oluşur [2].

Koagülasyon, kolloidal süspansiyon içerisindeki yüklü parçacıkların çökme işlemidir. Zıt yüklü iyonlar çarpışır, nötralleşir ve çöker. Koagülasyon, önceden elektrostatik itme ile stabilize edilmiş kolloidal parçacıkların net yüzey yükünün indirgenmesiyle, yeterince Van der Waals kuvvetiyle bir arada tutulması ve çökme işlemine izin vermesi olarak kabul edilmektedir. Yüzey yükünün indirgenmesi, elektriksel çift katmanın itici potansiyelini zıt yüke sahip elektrolitin varlığıyla düşürmesidir. Elektrokoagülasyon prosesinde koagülant uygun anot malzemesinin elektrolitik oksidasyonu ile oluşturulur. Bu süreçte, yüklü iyonik türler atıksudan karşı yüke sahip iyonlarla reaksiyona izin vererek metal hidroksitlerin kümelenmesiyle atıksudan uzaklaştırılır. Bu teknoloji metalleri, kolloidal katıları, partikülleri ve çözünür inorganik kirleticileri sulu ortamdan yüksek yüklü polimerik metal hidroksit türleri meydana getirerek uzaklaştırır. Bu türler askıdaki katılar ve yağ damlacıkları üzerindeki elektrostatik yükleri nötralleştirir, yığılmayı ve koagülasyonun ayrılmasını kolaylaştırır. Bu arıtım belirli tuzlar ve metallerin çökmesiyle sonuçlanır [2].

Elektrokoagülasyon reaktörü harici bir güç kaynağına bağlandığında anot oksidasyonla elektrokimyasal olarak aşınırken, katot pasivasyona uğrar. Fakat bu

değişim atıksu arıtımı için uygun değildir çünkü geniş yüzey alanında elektrot gereksinim duyacaktır. Bu durum, monopolar elektrotların seri ve paralel bağlantılarla hücrede kullanılması ile çözülebilir. Hücrede, bir çift anot ve bir çift katot paralel olarak düzenlenir. Anotlar çözünme potansiyelini düşürür ve katottaki pasivasyonu en aza indirir. Anotlar (kurban elektrotlar) aynı veya farklı malzemeden yapılabilir [2].

Seri bağlı monopolar elektrokoagülasyon reaktöründe her bir çift anot birbiriyle içten bağlantılı olup, dış elektrotlarla bağlantısı yoktur. Seri bağlı hücrelerin direnci yüksek olduğundan verilen akım için yüksek potansiyel farkına ihtiyaç duyulur. Paralel bağlı hücre düzenlemesinde ise elektrik akımı, hücrelerin kendi dirençleriyle bağlantılı olarak tüm elektrotlara bölünür. Paralel hücrelerde bipolar elektrotlar kullanılır ve bu durumda anotlar iki paralel elektrotun arasına yerleştirilir. Sadece monopolar elektrot güç kaynağına bağlanır ve anotlar arasında iç bağlantı bulunmaz. Bu hücre düzenlemesi kolay kurulum sağlar ve kullanım sırasında bakımı kolaylaştırır [2].

Paralel bağlı bipolar elektrokoagülasyon reaktöründe elektrik akımı iki elektrot arasından geçtiğinde iletken plakaların nötr tarafı yüklü tarafa dönüşür. Bu yüklü taraf paralel taraftaki zıt yüke sahiptir. Kurban elektrotlar bu durumda bipolar elektrotlardır. Böylece elektroliz sırasında pozitif taraf anodik reaksiyona uğrarken negatif taraf katodik reaksiyona uğrar [2].

2.6.2. Elektrokoagülasyon Prosesinde Elektrot Reaksiyonları

Elektrokoagülasyon mekanizması sulu ortamın kimyasına bağlıdır. İletkenlik, pH, partikül büyüklüğü ve kimyasal bileşen konsantrasyonları elektrokoagülasyon prosesini etkiler.

Elektrokoagülasyon prosesinde demirin elektrolitik oksidasyonu sonucunda demir hidroksitler oluşur. Fe(OH)_n üretiminde $n=2$ veya $n=3$ olmak üzere iki mekanizma öngörülmektedir [2]:

Mekanizma 1

Anot reaksiyonu:



Katot reaksiyonu:

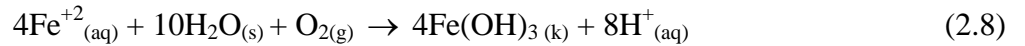
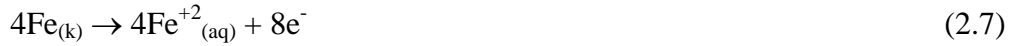


Toplam reaksiyon:



Mekanizma 2

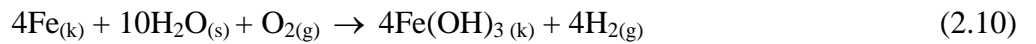
Anot reaksiyonu:



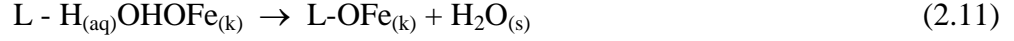
Katot reaksiyonu:



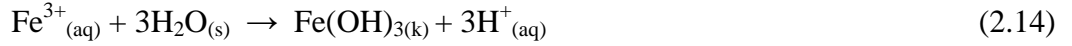
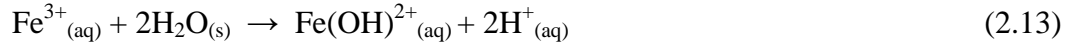
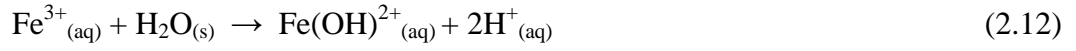
Toplam reaksiyon:



Sulu ortam içinde Fe(OH)_n (k) jelatinimsi süspansiyon olarak oluşur ve kompleksleştirme veya elektrostatik çekim yoluyla atıksudan kirleticileri uzaklaştırır. Bu aşamayı koagülasyon izler. Reaksiyon ortamında kirletici, ligand gibi davranır ve sulu demir kimyasal olarak bağlanır [2].



Redoks reaksiyonunun sonucu olarak üretilen H₂, çözünmüş organikleri veya flotasyon ile askıdaki maddeleri uzaklaştırabilir. Ancak Fe⁺³ iyonları hidrasyona uğrayabilir ve çözeltinin pH' sine dayanarak Fe(OH)⁺², Fe(OH)₂⁺ ve Fe(OH)₃ türleri asidik koşullar altında oluşabilir. Alkali koşullar altında ise Fe(OH)₆⁻ ve Fe(OH)₄⁻ iyonlarının üretimi gerçekleştirilebilir [2].



2.6.3. Elektrokoagülasyon Prosesinde Elektrolit Reaksiyonları

Tekstil endüstrisi boyama prosesi atıksuyunda NaCl derişiminin yüksek olduğu bilinmektedir. Elektrokimyasal proseslerde destek elektrolit olarak NaCl kullanıldığında, elektroliz sırasında anotta Cl₂ gazı açığa çıkar. Cl₂ gazı sulu ortamda kararlı olmadığından hidroliz ve iyonizasyon reaksiyonları sonucunda su içinde serbest kloro dönüşür. HOCl ve OCl⁻ bileşenlerinin reaksiyon ortamındaki bağlı dağılımı ortamın pH değerlerine bağlıdır [5,35].



2.7. LİTERATÜRDE ELEKTROKOAGÜLASYON YÖNTEMİYLE GERÇEKLEŞTİRİLEN ATIKSU ARITIM ÇALIŞMALARI

Elektrokoagülasyon prosesi, literatürde deri endüstrisi atıksuyunun [61], ağır metallerin [62], ilaç ve kozmetik atıksuyunun [63], arsenik içeren içme suyunun [64], organik madde içeren yağlı sinitine suyunun [65], bitkisel yağ rafinerisi atıksuyunun [66], petrol rafinerisi atıksuyunun [67], kağıt fabrikası atıksuyunun [68, 69], yağ süspansiyonlarının [70], patates cipsi imalathanesi atıksuyunun [71], badem endüstrisi atıksuyunun [72] ve tekstil endüstrisi atıksuyunun [36, 35, 37-60] arıtımında uygulanmıştır.

Koby vd. [36], sulu çözeltideki Levafix Orange tekstil boyarmaddesinin renk giderimini alüminyum anot kullanarak elektrokoagülasyon yöntemiyle araştırmışlardır. Çalışmada elektrot tüketimi ve enerji gereksinimi, renk giderim verimi ve maliyet ile ilgili parametreler pH, iletkenlik, akım yoğunluğu, başlangıç boyarmadde derişimi ve elektroliz süresinin fonksiyonu olarak analiz edilmiştir. Araştırmacılar, akım yoğunluğunu 100 A/m^2 , işletim süresini 12 dk ve başlangıç pH' sini 6.4 olarak belirlemiş ve uygun işletme koşulları altında % 95 renk giderimi elde etmişlerdir. Elektroliz sırasında elektrot tüketimi ve enerji gereksinimi 1.8 kg Al/kg boyarmadde giderimi ve 35 kWh/kg boyarmadde giderimi olarak hesaplanmıştır [36].

Körbahti ve Tanyolaç [35], sentetik tekstil atıksuyunun elektrokoagülasyonla arıtımını NaCl destek elektrolit varlığında demir elektrotlar kullanarak kesikli elektrokimyasal reaktörde araştırmışlardır. Sentetik tekstil atıksuyu gerçek merserize ve merserize olmayan pamuk ve viskon prosesi baz alınarak endüstriyel bileşenlerden hazırlanmıştır. En yüksek KOİ, renk ve bulanıklık giderimi sırasıyla % 93.9, % 99.5 ve % 82.9 olarak % 40 kirlilik yükünde, 35.5 mA/cm^2 akım yoğunluğu uygulandığında, 37.5 g/L elektrolit derişiminde ve 30°C reaksiyon sıcaklığında elde edilmiştir [35].

Merzouk vd. [37], Disperse Red 14 boyarmaddesini içeren çözeltiden KOİ, TOK, renk ve bulanıklık giderimlerini elektrokoagülasyon yöntemi ile incelemişlerdir. Araştırmacılar, boyarmadde çözeltilerinin arıtımında, Al derişiminin 500 mg/L' nin üzerinde olması durumunda yüksek seviyede renk, organik kirlilik ve bulanıklık giderimi elde etmişlerdir. 30 dakikalık reaksiyon süresinde 200 A/m² akım yoğunluğu uygulandığında enerji tüketimi 41 kWh/ kg boyarmadde olarak hesaplanmıştır [37].

Chafi vd. [38], Orange II ve mono azo asit boyarmaddesinden oluşan sentetik tekstil atıksuyunun renk giderimini elektrokoagülasyon yöntemi ile kesikli elektrokimyasal reaktörde Al ve Fe anot kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, başlangıç boyarmadde derişimi, akım yoğunluğu ve elektroliz süresi işletim parametrelerinin etkilerini incelemiş ve en yüksek renk giderimini % 98 olarak elde etmişlerdir. Chafi vd. [38] demir elektrotların renk giderim verimini maksimize ettiğini; enerji ihtiyacını, koagülant miktarını ve işletme giderlerini minimize ettiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar, benzer renk giderim verimine ulaşılması için Al elektrota daha yüksek akım verilmesi gerektiğini belirlemişlerdir [38].

Daneshvar vd. [39], C.I. Yellow 28 içeren çözeltiden renk giderimi için elektrokoagülasyon prosesini kullanmışlardır. Araştırmacılar, akım yoğunluğu, çözeltilerin başlangıç pH'si, başlangıç boyarmadde derişimi, elektrotlar arası uzaklık, reaksiyon süresi ve çözelti iletkenliği gibi işletme parametrelerinin etkisini araştırmışlardır. Çalışmada elektroliz süresi 7 dakika, pH aralığı 5-8, çözeltilerin iletkenliği 10 mS/cm ve boyarmadde başlangıç derişimi 50 mg/L olarak belirlenmiş, 80 mA/m² akım yoğunluğu uygulandığında en yüksek renk giderim verimi elde edilmiştir [39].

Kabdaşlı vd. [40], alüminyum ve paslanmaz çelik kullanarak sentetik reaktif boyarmadde içeren tekstil banyosu atıksuyunun arıtımı için elektrokoagülasyon yöntemi uygulamışlardır. Araştırmacılar, paslanmaz çelik elektrotların

elektrokoagülasyonla renk gideriminde daha etkili olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada, Na₂CO₃'ün renk ve KOİ gideriminde proses verimini önemli ölçüde azalttığı belirlenmiş, NaCl derişiminin artırılmasının renk ve KOİ giderim verimini artırdığı belirlenmiştir. Kabdaşlı vd. [40] elektrokoagülasyonla reaktif boyama banyosu atıksuyunun arıtımında renk ve KOİ giderimi için pH değerinin 11'in üzerinde olduğu durumda baskın mekanizmanın koagülasyon ve adsorpsiyon olduğunu belirtmişlerdir [40].

Zidane vd. [41], C.I. Reactive Red 141 (C.I. RR141) tekstil boyarmaddesi içeren atıksuyun arıtımını kimyasal koagülasyon ve elektrokoagülasyon ile incelemiştir. Araştırmacılar, 60 dakikalık arıtımın sonunda, C.I. Reactive Red 141 boyarmaddesinin elektrokoagülasyonla tamamen çözeltiden uzaklaştırıldığını, kimyasal koagülasyon yöntemi uygulandığında ise % 96.4 renk giderimi elde edildiğini belirtmişlerdir [41].

Merzouk vd. [42], sentetik tekstil atıksuyunun arıtımında elektrokoagülasyon ve elektroflotasyon proseslerini araştırmışlar, pH, başlangıç derişimi, arıtım süresi, akım yoğunluğu, elektrot mesafesi ve iletkenlik işletim parametrelerinin kesikli sistemde etkilerini incelemiştir. Araştırmacılar, akım yoğunluğunu 11.55 ile 91.5 mA/cm² arasında değiştirmiş ve optimum koşullarda asılı kalan katı madde giderimini % 85.5, bulanıklılık giderimini %76.2, biyolojik oksijen ihtiyacı giderimini %88.9, kimyasal oksijen ihtiyacı giderimini %79.7 ve renk giderimini %93 olarak elde etmişlerdir [42].

Daneshvar vd. [43], C.I. Basic Red 46 (BR46) ve CI Basic Blue 3 (BB3) içeren çözeltilerin renk giderimi için elektrokoagülasyon yöntemini kullanmışlar ve akım yoğunluğunun artırılması ile renk giderim veriminin artırılabilirliğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar, optimum elektroliz süresini 5 dk, pH aralığını 5.5-8.5 arasında, iletkenliği 8 mS/cm ve başlangıç derişimini en yüksek 800 mg/L olarak belirlemişlerdir. Daneshvar vd. [43] optimum koşullarda KOİ giderimini BB3 ve BR46 için sırasıyla % 75 ve % 99 olarak elde etmiş, elektrik enerjisi tüketimini BB3

ve BR46 ve için sırasıyla 7.57 kWh/kg boyarmadde ve 4.70 kWh/kg boyarmadde olarak hesaplamışlardır [43].

Martins vd. [44], sulu çözeltide nonilfenol polietoksilat (NP9EO) ve tekstil atıksuyu degradasyonunu Fe ve Al elektrotlar kullanarak elektrokoagülasyon ve elektrokimyasal Fenton yöntemleri ile incelemişlerdir. Araştırmacılar elektrokoagülasyon prosesinde en iyi giderim verimine Al elektrotlar kullanarak 200 mg/L sulu NP9EO için 1.5 A uygulayarak ulaşmışlardır. Martins vd. [44] 15 dk süreyle uyguladıkları elektrokoagülasyon prosesinde NP9EO degradasyonunu ve KOİ giderimini sırasıyla %95 ve %50 olarak elde etmişlerdir. NP9EO degradasyonu, demir elektrotlarla elektrokoagülasyon ve elektro Fenton prosesi uygulandığında 5 dakikada %95 giderime ulaşmıştır. Araştırmacılar sulu çözeltide 5 dakika ve atıksuda 10 dakika arıtımla KOİ gideriminin her iki proseste de %55'i aşamadığını belirtmişlerdir [44].

Pajootan vd. [45], Acid Black 52 ve Acid Yellow 220 boyarmaddelerinden oluşan ikili boyarmadde atıksuyunun arıtımını alüminyum elektrot kullanarak elektrokoagülasyon prosesi ile gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, akım yoğunluğunun 40 A/m²'ye yükseltilmesi ile boyarmadde renk giderim veriminin arttığını belirtmişlerdir. Pajootan vd. [45] elektrolit derişiminin 0'dan 8 g/L'ye yükseltilmesinin renk gideriminde ihmal edilebilir etkisi olduğunu, ancak elektrik enerjisi tüketimini düşürdüğünü belirtmişlerdir [45].

Merzouk vd. [46], Disperse Red boyarmadde içeren sentetik tekstil atıksuyunun renk giderimini elektrokoagülasyon ve kimyasal koagülasyon yöntemleri ile incelemişlerdir. Elektrokoagülasyon için alüminyum elektrotlar ve kimyasal koagülasyon için demir klorür ve alüminyum sülfat koagülantlar kullanılmıştır. Araştırmacılar, Al₂(SO₄)₃'ün FeCl₃'ten daha verimli olduğunu belirtmiş, 40 mg/L Al₂(SO₄)₃.18H₂O ile pH 4-8 ve 235 mg/L boyarmadde derişiminde % 90'dan fazla renk giderimi elde etmişlerdir. Merzouk vd. [46] elektrokoagülasyon prosesinin işletme maliyetinin yüksek olduğunu; bununla birlikte

elektrokoagülasyon ve kimyasal koagülasyon prosesleri karşılaştırıldığında elektrokoagülasyonun pH değişikliğine karşı daha güçlü olduğunu ve ekipman maliyetinin daha düşük olduğunu belirtmişlerdir [46].

El-Ashtoukhy ve Amin [47], Acid Green Red 50 boyarmaddesinin anodik oksidasyon ve elektrokoagülasyon yöntemleriyle arıtımını karşılaştırmışlardır. Uygun koşullar altında KOİ giderimi, elektrokimyasal oksidasyon ve elektrokoagülasyon yöntemleri için sırasıyla %68 ve %87 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar elektrokoagülasyon yönteminin anodik oksidasyondan daha ekonomik olduğunu göstermiştir. Araştırmacılar, enerji tüketiminin elektrokoagülasyon prosesinde 2.8 ile 12.8 kWh/kg boyarmadde arasında, anodik oksidasyonda 3.31 ile 16.97 kW/kg boyarmadde arasında değiştiğini belirtmişlerdir [47].

Yıldız [48], Bomaplex Red CR-L boyarmaddesini içeren atıksuyun arıtımını alüminyum elektrot kullanarak elektrokoagülasyon yöntemi ile araştırmıştır. Optimum koşullar başlangıç boyarmadde derişimi 100 mg/L, çözeltinin başlangıç pH'si 3 ve akım yoğunluğu 0.50 mA/cm² olarak belirlenmiştir. Yıldız [56] optimum koşullar altında enerji tüketimini NaCl destek elektrolit ile 0.397 kWh/kg boyarmadde, CaCl₂ destek elektrolit ile 0.607 kWh/kg boyarmadde olarak hesaplamıştır [48].

Şengil ve Özacar [49], Reactive Black 5 içeren sentetik atıksudan renk giderimini demir elektrotlar kullanarak elektrokoagülasyon prosesi ile incelemişlerdir. Başlangıç derişimi 100 mg/ L, başlangıç pH'si 5, akım yoğunluğu 4.575 mA/cm², tuz derişimi 3000 mg/L, sıcaklık 20°C ve elektrot uzaklığı 2.5 cm olduğunda renk giderim verimi % 98.8, enerji tüketimi 4.96 kWh/kg boyarmadde olarak elde edilmiştir [49].

Aoudj vd. [50], Direct Red 81 içeren çözeltinin renk giderimini elektrokoagülasyonla araştırmışlardır. Araştırmacılar, optimum koşulları başlangıç pH'si 6, akım yoğunluğu 1.875 mA/cm^2 ve elektrot uzaklığı 1.5 cm olarak belirlemiş, optimum koşullarda % 98 renk giderimini NaCl destek elektroliti ile elde etmişlerdir [50].

Balla vd. [51], alüminyum ve demir elektrotlar kullanarak gerçek tekstil atıksuyunun ve sentetik atıksuyun renk giderimini elektrokoagülasyon ve elektroflotasyon yöntemleri ile incelemişlerdir. Çalışmada Yellow Terasil 4G, Red Terasil 343 % 150 ve Blue Terasil 3RO2'den oluşan dispers boyarmadde karışımı ile Red S3B 195, Yellow SPD ve Blue BRFS'den oluşan reaktif boyarmadde karışımı kullanılmıştır. Dispers boyarmadde için giderim verimi alüminyum elektrotlarla daha iyi sonuç verirken, demir elektrotlar reaktif boyarmadde ve karışık sentetik boyarmadde renk gideriminde daha yüksek verim göstermiştir. Optimum işletim koşulları dispers, reaktif ve karışım boyarmaddeleri için, akım yoğunluğu 40 mA/cm^2 , elektrolit süresi 20 dk, reaktif ve karışık sentetik boyarmadde için başlangıç pH'si 7.5, dispers boyarmadde için 6.2 olarak belirlenmiştir. Dispers, reaktif ve karışım boyarmaddelerini içeren tekstil atıksuyu kullanıldığında, renk giderim verimi %70 ile %90 arasında ve KOİ giderimi %78 olarak elde edilmiştir. Araştırmacılar, elektrik enerjisi tüketimini reaktif boyarmadde için 170 kWh/kg boyarmadde giderimi, dispers boyarmadde için 120 kWh/kg boyarmadde ve karışım boyarmaddesi için 50 kWh/kg boyarmadde olarak hesaplamışlardır [51].

Kim vd. [52], sürekli elektrokoagülasyon prosesi ile tekstil atıksuyunun arıtımında akım yoğunluğu, elektrot sayısı, elektrolit derişimi, boyarmadde derişimi, çözeltinin pH'si ve atıksu debisi işletim parametrelerinin etkilerini incelemişlerdir. Araştırmacılar, boyarmadde gideriminde Al elektrotların daha verimli olduğunu ve Fe elektrotların ortam pH'si 4-10 arasında olduğunda arıtım veriminin önemli ölçüde etkilenmediğini belirtmişlerdir. Kim vd. [52] güç tüketiminin boyarmadde derişimi, akış hızı ve başlangıç pH'sinden bağımsız olduğunu, akım yoğunluğunun, elektrot uzaklığının ve elektrolit derişiminin artmasıyla arttığını ve elektrot sayısının

artmasıyla azaldığını belirlemişlerdir. Araştırmacılar, reaktif boyarmaddelerin KOİ gideriminin dispers boyarmaddelerden daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir [52].

Zodi vd. [53], kesikli elektrokoagülasyon reaktöründe alüminyum elektrot kullanarak endüstriyel tekstil atıksuyundan KOİ giderimini araştırmışlardır. Akım yoğunluğu 80 mA/cm^2 , başlangıç pH'si 7 ve elektroliz süresi 70 dk olarak uygulandığında KOİ, toplam çamur ve bulanıklık giderim verimlerini sırasıyla % 70, % 50 ve % 90 olarak elde etmişlerdir [53].

Secula vd. [54], Indigo Carmine boyarmaddesinin sulu çözeltilerden giderimini kesikli karıştırıcılı elektrokoagülasyon reaktöründe araştırmışlardır. Araştırmacılar, çelik elektrotlar kullanarak sentetik atıksuyun arıtımında pH, başlangıç boyarmadde derişimi, elektroliz süresi, akım yoğunluğu ve destek elektrolit derişimi işletim parametrelerinin etkisini incelemişler ve pH kontrolünün Indigo Carmine arıtımında etkili olmadığını belirtmişlerdir. Secula vd. [54], en yüksek giderim verimini 54.57 A/m^2 akım yoğunluğu, 25 mg/L başlangıç boyarmadde derişimi, başlangıç pH'si 8 ve 77 mM elektrolit derişimi koşullarında elde etmişlerdir. Akım yoğunluğu artırıldıkça arıtım oranının hızla arttığını, ancak arıtım veriminin artmasının yanı sıra enerji tüketiminin de arttığını belirlemişlerdir [54].

Alinsafi vd. [55], Reactive Blue (Drimarene K2LR CDG Blue) çözeltisinin elektrokoagülasyonunu incelemişler ve optimum işletim koşullarında elektrokoagülasyon prosesinin reaktif boyarmadde içeren tekstil atıksuyundan renk giderimi ve toplam organik karbon gideriminde verimli olduğunu belirtmişlerdir. Reaktif boyarmadde içeren çözeltilere uygulanan optimum elektroliz süresi ve akım yoğunluğunda renk giderim verimini % 90 ile % 95 arasında, KOİ giderimini % 30 ile % 36 arasında elde etmişlerdir [55].

Mollah vd. [56], Orange II boyarmadde çözeltisinin artırımında Fe elektrotlar kullanarak elektrokoagülasyon yöntemini uygulamışlar ve NaCl varlığında optimum işletim koşullarında % 98.5 boyarmadde giderimi elde etmişlerdir [56].

Daneshvar vd. [57], C.I. Acid Yellow 23 içeren boyarmadde çözeltisinin elektrokoagülasyon prosesi ile renk giderim veriminde işletme parametrelerinin etkilerini incelemişlerdir. Optimum işletme koşulları 112.5 A/m^2 akım yoğunluğu, pH 8, elektroliz süresi 5 dk ve başlangıç boyarmadde derişimi 50 mg/L AY23 olarak belirlenmiş ve optimum koşullarda % 98 renk giderimi ile % 69 KOİ giderimi elde edilmiştir. Araştırmacılar, iletkenliğin ve elektrot yüzey alanının artırılması ve elektrot uzaklığının azaltılması ile hücre voltajının ve elektrik enerjisi tüketiminin azaldığını belirlemişlerdir [57].

Song vd. [58], C.I. Reactive Blue 19 içeren boyarmadde çözeltisinin renk giderim verimini ozanla geliştirilmiş elektrokoagülasyon prosesinde demir elektrotlar kullanarak araştırmışlardır. Araştırmacılar, laboratuvar ölçekli reaktörde başlangıç pH, başlangıç boyarmadde derişimi, akım yoğunluğu, tuz derişimi, sıcaklık, ozon akış hızı ve elektrotlar arası uzaklığın boyarmadde giderim verimi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Başlangıç pH'si 10, başlangıç boyarmadde derişimi 100 mg/L , akım yoğunluğu 10 mA/cm^2 , tuz derişimi 3000 mg/L , sıcaklık 30°C , ozon akış hızı 20 mL/dk ve elektrotlar arası uzaklığın 3 cm olduğu koşullarda 10 dakika reaksiyon süresi sonunda % 96 renk giderimi ve % 80 toplam organik karbon (TOK) giderimi elde etmişlerdir [58].

Arslan-Alaton vd. [59], reaktif boyarmadde içeren gerçek boyama banyosu atıksuyu ile kullanılmış boyama banyosu atıksuyunun artırımını alüminyum ve paslanmaz çelik elektrotlar kullanarak elektrokoagülasyon yöntemi ile araştırmışlardır. Araştırmacılar alüminyum elektrotlar kullanıldığında artım veriminin uygulanan akım yoğunluğunun artmasıyla arttığını belirlemişler, paslanmaz çelik elektrotlarla artım verimini arttırabilmek için uygulanan akım yoğunluğunun $33\text{-}65 \text{ mA/cm}^2$ aralığında olması gerektiğini belirtmişlerdir.

Paslanmaz çelik elektrot kullanılarak elektrokoagülasyon prosesi uygulandığında 10-15 dk reaksiyon süresi sonunda % 99-100 renk giderimi elde edilmiştir [59].

Arslan-Alaton vd. [60], reaktif boyarmadde içeren sentetik boyama banyosu atıksuyunun arıtımını (KOİ=300 mg/L) alüminyum ve paslanmaz çelik elektrotlar kullanarak elektrokoagülasyon yöntemi ile araştırmışlardır. Araştırmacılar, iki elektrot malzemesi için de optimum işletim koşullarını pH 5, akım yoğunluğu 22 mA/cm² ve 300 mg/L başlangıç boyarmadde derişimi olarak belirlemişler, paslanmaz çelik elektrot kullanarak 60 dakikalık reaksiyon sonunda % 99 boyarmadde renk giderimi, Al elektrot kullanarak 90 dakikalık reaksiyon sonunda % 86 boyarmadde renk giderimi elde etmişlerdir. Arslan-Alaton vd. [60] reaktif boyarmadde içeren boyama banyosu atıksularının elektrokoagülasyonla arıtımında KOİ ve renk giderim verimlerinin elektrolit tipine bağlı olduğunu belirlemişler, alüminyum ve paslanmaz çelik elektrotlar kullanarak gerçekleştirilen elektrokoagülasyon prosesinin ileri kimyasal oksidasyon yöntemlerine göre daha az elektrik enerjisi gerektirdiğini belirtmişlerdir [60].

2.8. CEVAP YÜZEY YÖNTEMİ

Tez kapsamında, deneysel tasarım ve proses optimizasyonu için cevap yüzey yöntemi uygulanmıştır. Matematiksel ve istatistiksel yöntemlerden oluşan cevap yüzey yöntemi, deney tasarımı için model oluşturma, değişkenlerin etkisini değerlendirme ve hedeflenen cevaplardan değişkenlerin optimum koşullarını tahmin etme amacıyla kullanılır [5].

Cevap yüzey yönteminin uygulamaları girdi değişkenlerinin (faktörün) ürünün veya prosesin karakteristik özelliklerini veya ölçümün performansını etkilediği durumlarda kullanılır. Bu performans cevap olarak adlandırılır ve cevap değişkeni deneysel hata olmaması durumunda η şeklinde gösterilir. Girdi değişkenlerinin seviyelerinin değişiminden etkilenen değer cevap değişkenidir ve

uygulamalar birden fazla cevap içerebilir. Girdi değişkenleri bağımsız değişkenler olarak adlandırılır ve araştırmacıların kontrolündedir. Girdi değişkenlerindeki bir değişiklik cevap değişkeninin değerini değiştirir. Girdi değişkenleri (faktör) ve seviyeleri $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ biçiminde gösterilir [73,74].

Cevap yüzey yönteminde model regresyon analizi yardımıyla oluşturulur. Bir girdi değişkeninin etkisinin cevap değişkeni değerlerinde ne derece önemli bir etkiye sahip olduğuna regresyon katsayıları ile karar verilir [74].

Cevap yüzey yöntemi, deneysel tasarımda ve yeni proseslerin geliştirilmesinde önemli bir alandır. Özellikle fazla sayıda değişkenin sistemi etkilediği durumlarda kullanılır ve optimum işletim koşullarının belirlenmesini sağlar. İkinci derece tasarımlar olan merkezi kompozit tasarım (CCD) Box ve Wilson tarafından 1951 yılında geliştirilmiştir. Merkezi kompozit tasarımlar ardışık denemeler için etkili bir tasarımdır ve ikinci dereceden yüzeylere çok iyi uyum sağlar [5].

Optimizasyon prosesinde cevaplar, faktörlerle lineer veya ikinci derece modellerle ilişkilendirilir ve ikinci derece model Eşitlik 2.19 ile tanımlanır [5]. Eşitlik 2.19'da; η , cevap, X_i ve X_j , değişkenler, β_0 , sabit katsayı, β_i , β_{ij} , β_{ii} sırasıyla lineer, ikinci derece ve ikinci dizi olmak üzere etkileşim katsayılarıdır.

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_{j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (2.19)$$

İkinci derece modellerin esnek olması, değişik fonksiyonel formların tanımlanması ile doğru cevap yüzeyine iyi bir yaklaşım sağlanması ve etkileşim katsayılarının kolay tahmin edilmeleri cevap yüzey yönteminde yaygın olarak kullanılmalarını sağlamıştır [74]. Cevap yüzey yöntemi optimizasyonu maksimum, minimum veya eğer noktalarından oluşur. Bu noktaların konumunun saptanması

ikinci derece analizlerin önemli bir kısmıdır ve üç boyutlu grafikler cevap yüzeyinin belirlenmesine yardımcı olur [74].

Çalışmada merkezi kompozit tasarım Design-Expert® 8.0 yazılımı kullanılarak dört bağımsız değişken (faktör) ile beş seviyede -2 ve +2 aralığında kodlanmıştır. Dört faktörlü deney tasarımında tasarım merkezinde altı tekrarlamayla hata minimize edilmiş ve birçok tasarım işleminde gerekli olan rastgele sıralama ile tasarım güçlendirilmiştir. Elektrokoagülasyon prosesinin performansı KOİ giderimi, renk giderimi ve enerji tüketimi cevaplarıyla değerlendirilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. KESİKLİ SİSTEM DENEYLERİNİN PLANLANMASI

Optimum koşulların belirlenmesinde, deneyler cevap yüzey yönteminin (RSM) kullanıldığı Design-Expert® 8.0 istatistiksel paket programı yardımıyla tasarlanmış ve değişkenlerin sınır değerleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Deneysel planlamada merkezi kompozit tasarım kullanılmıştır.

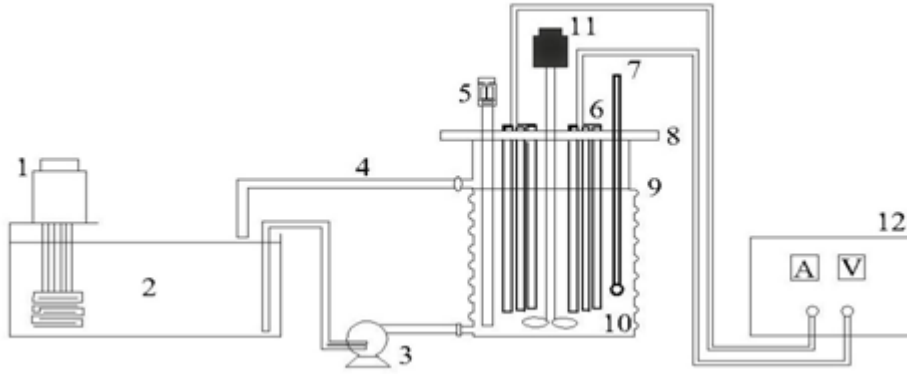
Çizelge 3.1. Deneysel tasarım

Bağımsız Değişkenler	Kodlanmış Değişkenler				
	-2	-1	0	+1	+2
Boyarmadde derişimi (mg/L)	200	400	600	800	1000
Elektrolit derişimi (g/L)	0	2.5	5.0	7.5	10.0
Akım yoğunluğu (mA/cm ²)	3	6	9	12	15
Reaksiyon sıcaklığı (°C)	25	30	35	40	45

3.2. ELEKTROKİMYASAL REAKTÖR

Elektrokoagülasyon deneyleri, DURAN® camdan imal edilmiş ısıtma soğutma ceketli 600 mL net reaksiyon hacmine sahip kesikli reaktörde gerçekleştirilmiştir. Dört demir elektrot seri bağlı olarak anotta, dört demir elektrot seri bağlı olarak katotta kullanılmıştır. 12 mm çapında demir elektrotlar Poliamid reaktör kapağı üzerine 15 mm aralıklarla yerleştirilmiştir. Reaktör kapağı üzerinde ayrıca numune alma enjektörü ile termometre bulunmaktadır. Karıştırma işlemi mekanik karıştırıcı (Heidolph RZR-2021) ile 500 rpm’ de yapılmıştır. Reaktörde sıcaklık kontrolü sıcaklığı programlanabilir su banyosunda (Memmert WB-22) bulunan suyun Heidolph PD 5206 model peristaltik pompa ile reaktör ceketinde dolaştırılması ile sağlanmıştır. Akım, Goodwill PST-3201 programlanabilir doğru akım güç kaynağı ile sağlanmıştır. Destek elektrolit NaCl ve Reactive Blue 160

boyarmaddesi içeren 600 ml boyarmadde çözeltisi reaktöre konularak elektrotlar yerleştirilmiştir. Elektrotların bağlantıları yapıldıktan sonra güç kaynağı üzerinde gerekli akım ayarlanmış ve elektrokoagülasyon prosesi başlatılmıştır. Belirlenen sürelerde reaktörden 10 ml örnekler alınmıştır. Örnekler 5000 rpm’de 10 dakika süresince santifüjlenerek analizler için hazırlanmıştır. Şekil 3.1 ve 3.2’de kesikli elektrokimyasal reaktör sistemi görülmektedir [5].



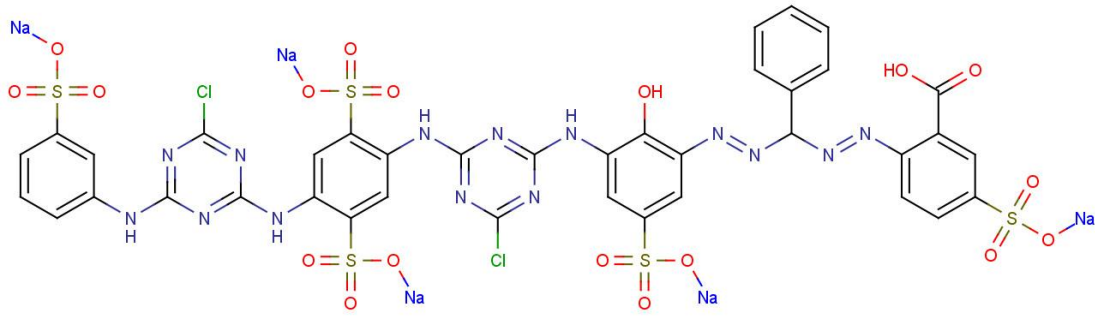
Şekil 3.1. Kesikli reaktör sistemi (1: ısıtıcı; 2: ısıtma/soğutma tankı; 3: ısıtma/soğutma pompası; 4: besleme hattı; 5: örnekleme hücresi; 6: elektrotlar; 7: termometre; 8: poliamid reaktör kapağı; 9: elektrokimyasal reaktör; 10: mekanik karıştırıcı; 11: bağlantılar; 12: doğru akım güç kaynağı)



Şekil 3.2. Deney düzeneği

3.3. ÇALIŞMADA KULLANILAN KİMYASAL MADDELER

Reactive Blue 160 (RB160) (Şekil 3.3) (DyStar) tekstil boyarmaddesi, sodyum klorür (Merck-06404) ve civa sülfat (Merck-04480) yüksek saflıkta temin edilmiştir. RB160 tekstil boyarmaddesi içeren çözeltiler laboratuvarımızda üretilen saf su kullanılarak hazırlanmıştır. Reaksiyon ortamından alınan örneklerin kimyasal oksijen ihtiyacı analizi için Merck Spectroquant® 14541 test kitleri kullanılmıştır.



Şekil 3.3. Reactive Blue 160 tekstil boyarmaddesinin moleküler yapısı

3.4. ANALİZLER

Renk analizi için UNICO 4802 UV-Vis double beam spektrofotometre kullanılmıştır. Boyarmaddenin maksimum absorbanı yaptığı dalga boyu 620 nm olarak tespit edilmiştir. Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), numunedeki organik maddenin kuvvetli kimyasal oksidasyon maddeleri yardımı ile oksidasyonu sırasında harcanan oksijen miktarını ifade eder [7]. Kimyasal oksijen ihtiyacı, su ve atıksuların karakterizasyonunda önemli ve çabuk sonuç veren bir parametredir [7]. Kimyasal oksijen ihtiyacı analizleri Merck Spectroquant® 14541 kodlu test kitleri ile yapılmıştır. Reaksiyon ortamından alınan örneklerde bulunan Cl⁻ iyonlarının test kitlerinde bulunan Ag⁺ katalizörü ile etkileşimlerini önlemek amacıyla, örneklere 1:10 HgSO₄:Cl oranında HgSO₄ tartılarak eklenmiştir. Örnekler vorteks karıştırıcıda 10 dk süreyle karıştırılarak 3 ml'lik kısmı test kitine alınmıştır. Test kiti karıştırılarak

148°C 'de 2 saat süresince termoreaktörde tutulmuştur. Merck Spectroquant® TR420 termoreaktörden alınan kitler oda sıcaklığına soğutulduktan sonra Merck Spectroquant® Nova 60 su-atıksu fotometresinde kimyasal oksijen ihtiyacı derişimleri ölçülmüştür.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Kesikli sistem çalışmasında akım yoğunluğu, elektrolit derişimi, reaksiyon sıcaklığı ve boyarmadde derişimi işletim parametrelerinin KOİ giderim verimi, boyarmadde renk giderim verimi, pH, enerji tüketimi, akım verimi ve harcanan elektrot miktarı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar cevap yüzey yöntemi ile optimize edilmiş ve reaksiyon kinetiği optimum koşullarda belirlenmiştir.

4.1. KESİKLİ SİSTEM ÇALIŞMALARI

Kesikli sistem çalışmasında elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1’de verilmiştir. Çizelge 4.1’de J akım yoğunluğu (mA/cm^2), T reaksiyon sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$) ve E tüketilen enerji miktarı ($\text{kWh/kg KOİ giderimi}$, $\text{kWh/kg boyarmadde giderimi}$)’dır. Kimyasal oksijen ihtiyacı giderimi ve boyarmadde renk giderimi Eşitlik 4.1 ve 4.2, enerji tüketimleri Eşitlik 4.3 ve 4.4 kullanılarak hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında kimyasal oksijen ihtiyacı giderimi %52,5 ile %86,7 aralığında, boyarmadde renk giderimi %53,5 ile %99,5 aralığında ve pH değerleri 9,9 ve 11,9 aralığında elde edilmiştir. Elektrokoagülasyon prosesinde akım verimi 0,149 ile 1,000 aralığında, anotlarda çözünen madde miktarı 0,812 ile 4,060 g aralığında, tüketilen enerji miktarı 19,6 ile 377,8 kWh/kg KOİ giderimi ve 3,4 ile 67,8 kWh/kg boyarmadde giderimi aralığında hesaplanmıştır. Eşitlik 4.1-4.4’te A_0 , başlangıç anındaki absorbans, A_t , t anındaki absorbans, C_0 , başlangıç anındaki boyarmadde derişimi, C_t , t anındaki boyarmadde derişimi, V_m , ortalama uygulanan potansiyel farkını (V), i, akım şiddetini (A), Δt , reaksiyon süresini (saat), KOİ_0 , başlangıç anındaki KOİ derişimini (mg/L), KOİ_t , t anındaki KOİ derişimini (mg/L), V_R , reaksiyon hacmini, d%, renk giderim yüzdesini ifade eder [4,27].

$$\text{Renk Giderimi (\%)} = \frac{(A_0 - A_t) \times 100}{A_0} \quad (4.1)$$

$$\text{KOİ Giderimi (\%)} = \frac{(KOİ_0 - KOİ_t) \times 100}{KOİ_0} \quad (4.2)$$

$$\text{Enerji tüketimi (kWh/kg KOİ giderimi)} = \frac{i \cdot V_m \cdot \Delta t}{(KOİ_0 - KOİ_t) V_R} \quad (4.3)$$

$$\text{Enerji tüketim (kWh/kg boyarmadde giderimi)} = \frac{i \cdot V_m \cdot \Delta t}{C_0 (0.01d\%) V_R} \quad (4.4)$$

Çizelge 4.1. Kesikli elektrokimyasal reaktör deney sonuçları

Deney No	RB160 (mg/L)	NaCl (mg/L)	J (mA/cm ²)	T (°C)	pH (t =60 dk)	Renk gid. (%) (t =10 dk)	KOİ gid. (%) (t =60 dk)	E (kWh/kg KOİ gid.) (t =60 dk)	E (kWh/kg BM gid.) (t =10 dk)	Akım Verimi (t =60 dk)	Çözünen Elektrot Kütlesi (g) (t =60 dk)
1	600	5,0	15	35	11,2	98,0	79,8	222,4	34,2	0,289	4,060
2	800	7,5	12	40	10,6	98,4	58,1	92,3	10,5	0,345	3,248
3	600	5,0	9	35	11,5	97,0	66,2	100,8	12,9	0,380	2,436
4	600	5,0	9	35	11,6	98,2	76,5	102,0	14,7	0,448	2,436
5	800	2,5	6	30	11,0	97,5	65,5	57,7	6,9	0,722	1,624
6	800	7,5	6	40	10,5	98,5	60,3	35,0	4,2	0,722	1,624
7	600	5,0	9	35	11,3	98,8	74,3	98,3	12,2	0,430	2,436
8*	600	0,0	3,5	35	11,2	53,5	68,8	97,8	67,8	1,000	0,958
9	400	2,5	6	30	10,4	98,6	78,2	101,8	14,9	0,447	1,624
10	800	2,5	6	40	10,6	98,6	52,5	67,9	7,3	0,653	1,624

Çizelge 4.1. Kesikli elektrokimyasal reaktör deney sonuçları (devamı)

Deney No	RB160 (mg/L)	NaCl (mg/L)	J (mA/cm²)	T (°C)	pH (t =60 dk)	Renk gid. (%) (t =10 dk)	KOİ gid. (%) (t =60 dk)	E (kWh/kg KOİ gid.) (t =60 dk)	E (kWh/kg BM gid.) (t =10 dk)	Akım Verimi (t =60 dk)	Çözünen Elektrot Kütlesi (g) (t =60 dk)
11	400	7,5	12	40	10,6	98,7	79,3	160,1	27,2	0,259	3,248
12	400	2,5	6	40	10,6	98,2	75,3	103,5	16,5	0,483	1,624
13	600	5,0	9	25	11,2	97,9	76,1	99,6	14,1	0,451	2,436
14	400	2,5	12	30	11,2	97,0	86,7	295,9	48,8	0,247	3,248
15	400	7,5	6	30	10,3	99,5	75,2	59,9	6,6	0,340	1,624
16	200	5,0	9	35	10,2	97,6	67,7	341,6	45,0	0,149	2,436
17	600	5,0	9	45	11,4	98,5	63,1	101,4	12,8	0,401	2,436
18	800	7,5	6	30	10,7	97,6	70,6	26,4	3,4	0,772	1,624
19	600	5,0	3	35	9,9	97,0	63,5	19,6	4,0	1,000	0,812
20	400	7,5	6	40	10,8	99,0	58,2	53,9	7,3	0,414	1,624

Çizelge 4.1. Kesikli elektrokimyasal reaktör deney sonuçları (devamı)

Deney No	RB160 (mg/L)	NaCl (mg/L)	J (mA/cm²)	T (°C)	pH (t =60 dk)	Renk gid. (%) (t =10 dk)	KOİ gid. (%) (t =60 dk)	E (kWh/kg KOİ gid.) (t =60 dk)	E (kWh/kg BM gid.) (t =10 dk)	Akım Verimi (t =60 dk)	Çözünen Elektrot Kütlesi (g) (t =60 dk)
21	600	5,0	9	35	11,4	98,8	75,3	90,0	11,9	0,470	2,436
22	800	7,5	12	30	11,6	98,4	73,6	82,1	12,4	0,459	3,248
23	1000	5,0	9	35	11,0	96,8	55,7	79,5	7,3	0,537	2,436
24	800	2,5	12	40	10,5	98,6	67,5	158,4	22,1	0,425	3,248
25	600	5,0	9	35	11,1	97,9	76,5	88,2	13,7	0,484	2,436
26	800	2,5	12	30	11,9	98,0	68,0	196,2	25,3	0,390	3,248
27	400	7,5	12	30	10,9	98,7	81,8	149,7	25,0	0,255	3,248
28	600	5,0	9	35	11,5	98,0	78,7	93,2	15,6	0,476	2,436
29	600	10,0	9	35	11,0	96,9	68,9	63,8	8,0	0,412	2,436
30	400	2,5	12	40	10,7	98,1	57,9	377,8	41,9	0,168	3,248

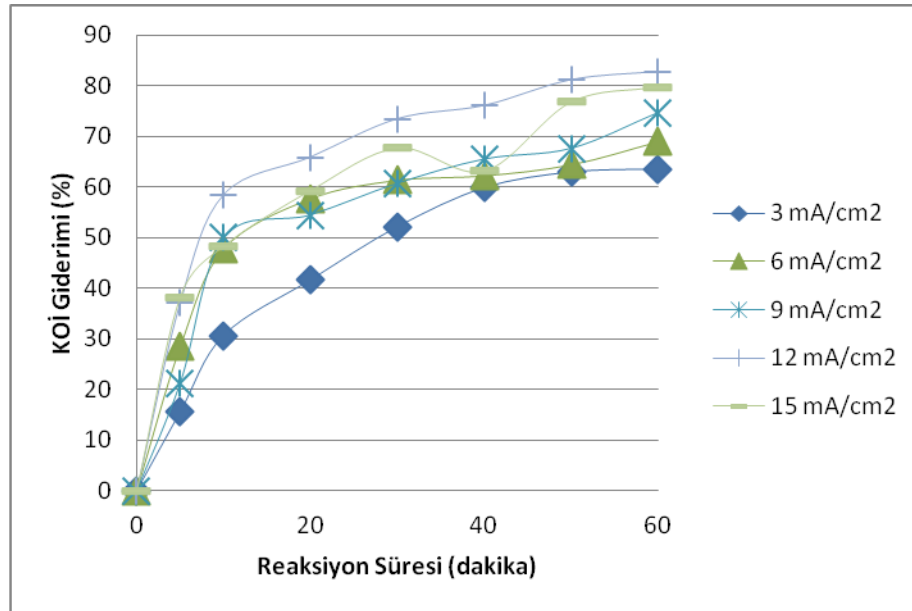
Çizelge 4.1. Kesikli elektrokimyasal reaktör deney sonuçları (devamı)

Deney No	RB160 (mg/L)	NaCl (mg/L)	J (mA/cm²)	T (°C)	pH (t =60 dk)	Renk gid. (%) (t =10 dk)	KOİ gid. (%) (t =60 dk)	E (kWh/kg KOİ gid.) (t =60 dk)	E (kWh/kg BM gid.) (t =10 dk)	Akım Verimi (t =60 dk)	Çözünen Elektrot Kütlesi (g) (t =60 dk)
31	600	2,5	9	35	11,4	98,2	60,2	157,5	19,2	0,356	2,436
32	600	7,5	9	35	11,3	99,0	78,5	83,5	11,6	0,486	2,436
33	600	5,0	6	35	11,5	99,1	69,0	54,3	13,4	0,607	1,624
34	600	5,0	12	35	11,2	98,4	82,7	152,6	26,8	0,367	3,248
35	600	5,0	9	30	11,1	98,7	71,9	109,6	14,0	0,448	2,436
36	600	5,0	9	40	11,2	97,0	73,6	93,3	13,9	0,448	2,436
37	400	5,0	9	35	11,1	97,8	83,1	116,4	20,2	0,356	2,436
38	800	5,0	9	35	11,2	97,8	60,0	94,5	10,4	0,503	2,436

* 8 numaralı deneyde destek elektrolit eklenmediği için reaksiyon ortamında ortalama 3.5 mA/cm² akım yoğunluğu uygulanabilmiştir.

4.1.1. Akım Yoğunluğunun Etkisi

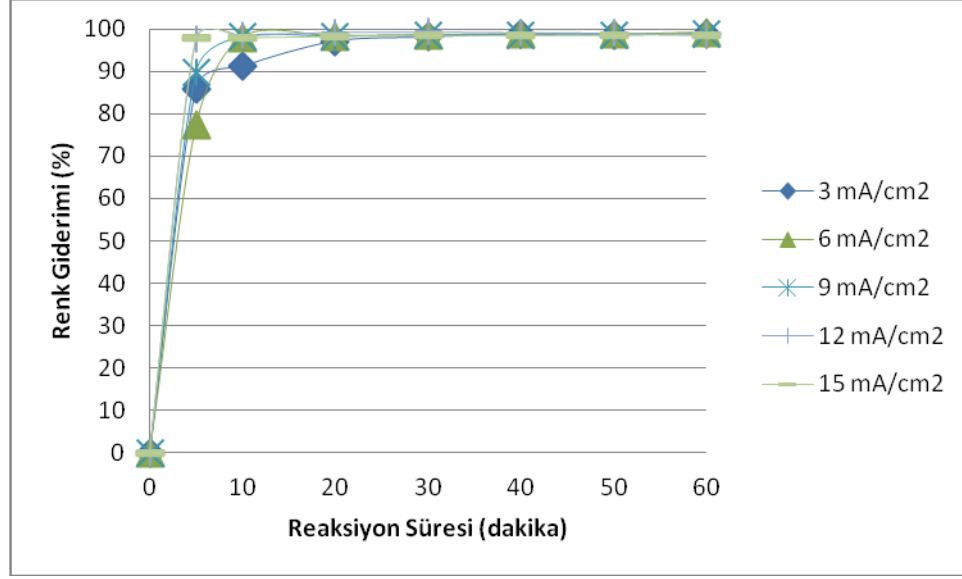
Akım yoğunluğunun elektrokoagülasyon prosesinde renk ve KOİ giderimi verimleri, pH, enerji tüketimi, akım verimi ve çözünen elektrot kütlesi üzerindeki etkilerinin araştırılması amacıyla akım yoğunluğu 3-15 mA/cm² aralığında değiştirilmiştir. Deneyler 600 mg/L boyarmadde derişimi, 5.0 g/L elektrolit derişimi ve 35°C reaksiyon sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Renk ve KOİ giderimleri, pH, enerji tüketimi, akım yoğunluğu ve çözünen elektrot miktarı ile ilgili deneysel sonuçlar Şekil 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.1. Farklı akım yoğunluğu değerlerinde kimyasal oksijen ihtiyacı gideriminin zamanla değişimi (boyarmadde derişimi 600 mg/L, elektrolit derişimi 5.0 g/L, reaksiyon sıcaklığı 35°C)

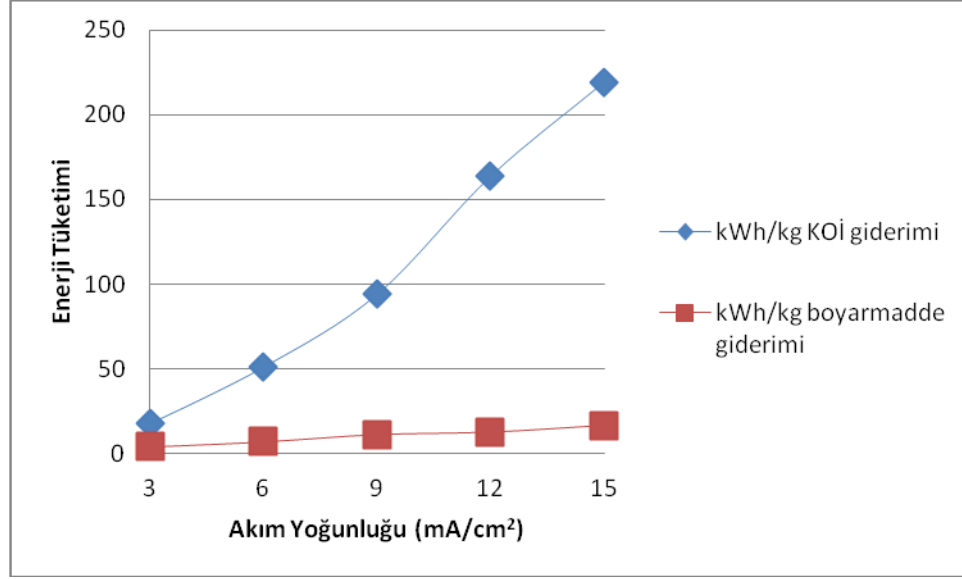
Şekil 4.1’de en yüksek KOİ gideriminin % 82,7 ile 12 mA/cm² de gerçekleştiği görülmektedir. Elektrokimyasal proseslerde akım yoğunluğu koagülantın üretim hızını belirlemekte, köpük üretiminin boyutunu ve hızını düzenlemektedir. Akım yoğunluğunun artmasıyla, anodun çözünmesi sonucunda oluşan demir hidroksit üretimi arttığından kirleticilerin giderimini gerçekleştiren koagülant miktarı artmış ve dolayısıyla KOİ ve boyarmadde renk giderim verimi yükselmiştir [39].

Akım yoğunluğunun artması aynı zamanda hidrojen üretim hızının artmasına neden olmakta ve kümelenmiş maddelerin yüzmesine olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte çok yüksek akım yoğunluğunda hücre gerilimi artmakta ve elektrik enerjisinin büyük bir kısmı suyun ısıtılmasına harcanmaktadır. Çok yüksek akım yoğunluğu mevcut akım verimini düşürmektedir [45].



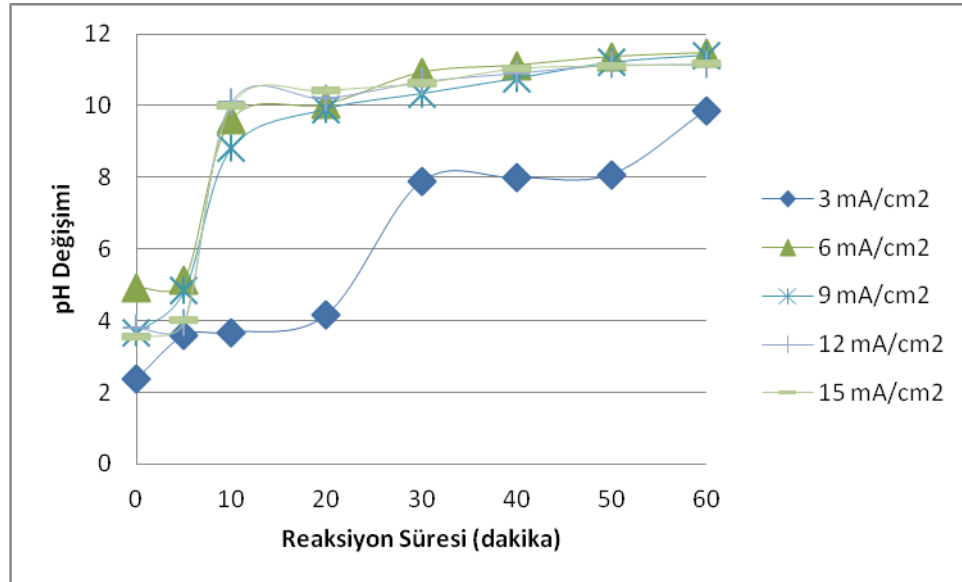
Şekil 4.2. Farklı akım yoğunluğu değerlerinde renk gideriminin zamanla değişimi (boyarmadde derişimi 600 mg/L, elektrolit derişimi 5.0 g/L, reaksiyon sıcaklığı 35°C)

Elektrokoagülasyon prosesinde gerçekleşen reaksiyonların sonucu olan iyon hareketlerinden dolayı sistemin işletilmesinde akım yoğunluğu önemli bir parametredir. Şekil 4.2’de ilk 20 dakikada tüm akım yoğunluğu değerlerinde renk giderimi tamamen sağlanmıştır. Daneshvar vd. [43], akım yoğunluğunun artırılması ile renk giderim veriminin artırılabilirdiğini belirtmişlerdir [43].



Şekil 4.3. Enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi (boyarmadde derişimi 600 mg/L, elektrolit derişimi 5.0 g/L, reaksiyon sıcaklığı 35°C)

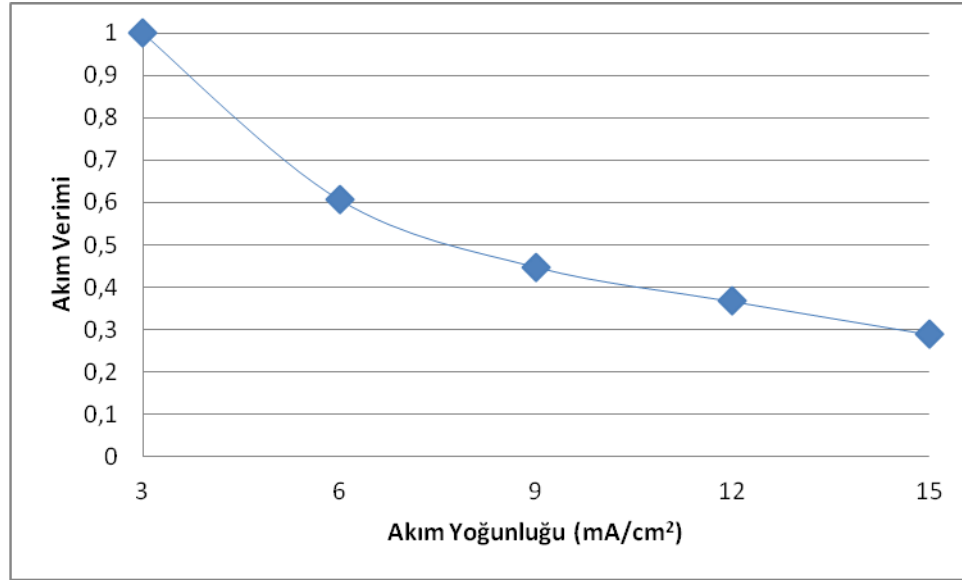
Şekil 4.3’de akım yoğunluğu 3 mA/cm²’den 15 mA/cm²’ye artarken, elektrotlar arası ortalama potansiyel farkının 6,2 V’dan 18,9 V’a artması, enerji tüketimini 19,6 kWh/kg KOİ giderimi’nden 222,4 kWh/kg KOİ giderimi’ne yükseltmektedir.



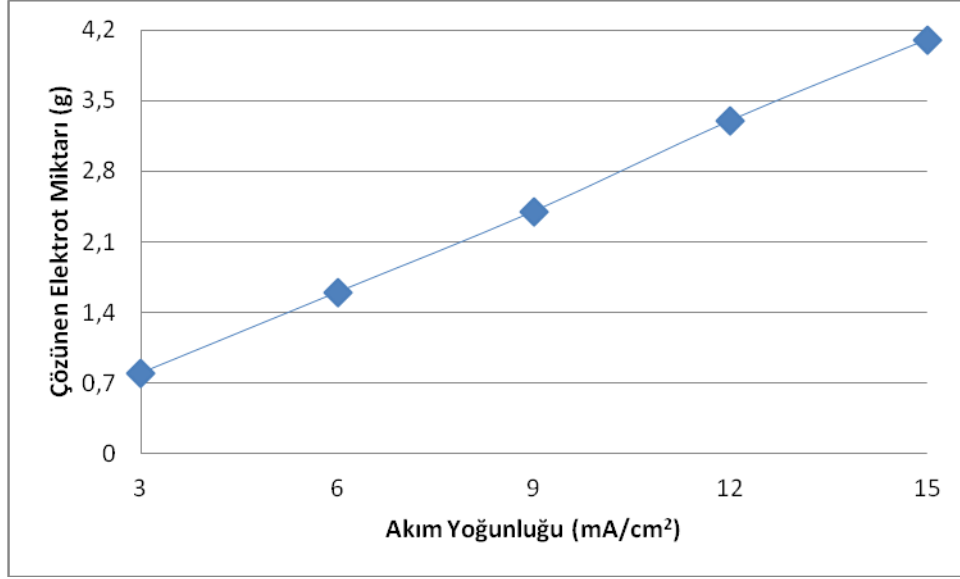
Şekil 4.4. Farklı akım yoğunluklarında pH değişiminin zamanla değişimi (boyarmadde derişimi 600 mg/L, elektrolit derişimi 5.0 g/L, reaksiyon sıcaklığı 35°C)

pH, elektrokoagülasyon prosesinin performansını etkileyen önemli bir parametredir. Fe^{+2} kinetiğinin Fe^{+3} 'e dönüşmesi çözelti pH'sinden etkilenmektedir. Koagüle partiküllerin yüzey yükü de pH ile değişmektedir. Düşük pH'lerde çözeltideki protonlar katotta H_2 'ye indirgenmekte ve hidroksit iyonları oluşmamaktadır. Düşük pH'lerde $Fe(OH)_2^+$ ve $Fe(OH)^{+2}$ üretilmesi çöktürme mekanizmasında dezavantaj oluşturmaktadır [49].

Boyarmadde molekülleri sulu demir kısmına çökme ve adsorpsiyon mekanizmalarıyla bağlanmaktadır. Bu mekanizma reaksiyonlarının sonucu olarak elektrokoagülasyon sırasında pH yükselmektedir [49].



Şekil 4.5. Akım yoğunluğunun akım verimine etkisi (boyarmadde derişimi 600 mg/L, elektrolit derişimi 5.0 g/L, reaksiyon sıcaklığı 35°C)

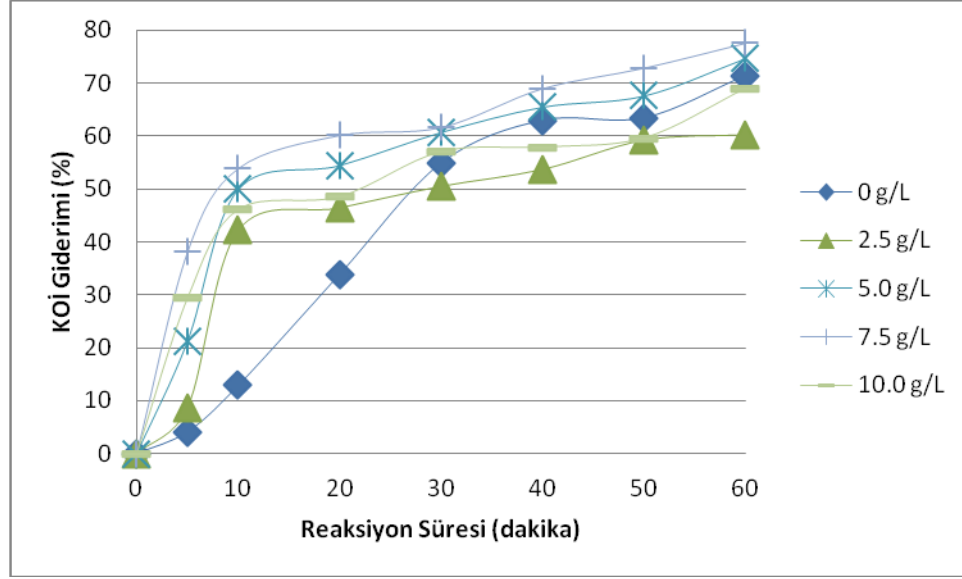


Şekil 4.6. Akım yoğunluğunun çözünen elektrot kütlesine etkisi (boyarmadde derişimi 600 mg/L, elektrolit derişimi 5.0 g/L, reaksiyon sıcaklığı 35°C)

Harcanan elektrot materyali ve elektrik enerjisi tüketimi işletme maliyetine iki önemli etkindir. Çözünen elektrot miktarı Eşitlik 2.1’de görüldüğü gibi akım ile doğru orantılıdır ve akım yoğunluğunun artmasıyla artış göstermektedir. Ancak akım yoğunluğunun artması harcanan elektrot miktarını ve enerji tüketimini artırarak maliyeti de artırmaktadır [39].

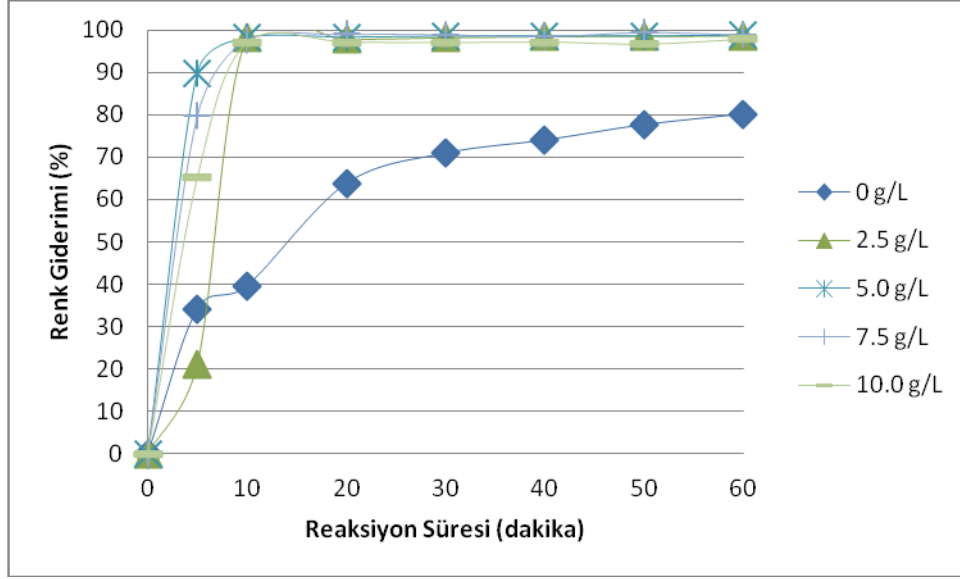
4.1.2. Elektrolit Derişiminin Etkisi

Elektrolit derişiminin elektrokoagülasyon prosesinde renk ve KOİ giderimi verimleri, pH, enerji tüketimi ve akım verimi üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla elektrolit derişimi 0-10.0 g/L aralığında değiştirilmiştir. Deneyler 600 mg/L boyarmadde derişimi, 9 mA/cm² akım yoğunluğu ve 35°C reaksiyon sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Renk ve KOİ giderimleri, pH, enerji tüketimi ve akım yoğunluğu ile ilgili deneysel sonuçlar Şekil 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11’de verilmiştir.



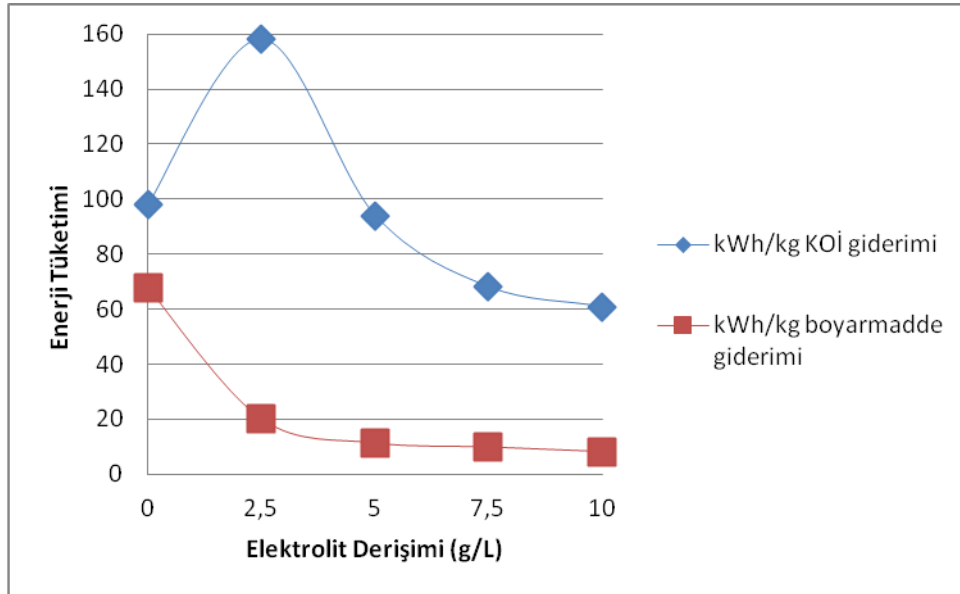
Şekil 4.7. Farklı elektrolit derişimlerinde kimyasal oksijen ihtiyacı gideriminin zamanla değişimi (boyarmadde derişimi 600 mg/L, akım yoğunluğu 9 mA/cm², reaksiyon sıcaklığı 35°C)

Elektrolit olarak kullanılan NaCl, atıksuyun iletkenliğini arttırmak için özellikle iyonik olmayan kirleticilerin bulunduğu atıksulara eklenmektedir. İyonik iletkenlik zeta potansiyelini düşürmekte ve elektrik yükünü etkilemektedir. Koagülasyon böylece daha kolay hale gelmektedir. NaCl kullanılarak çözeltinin iletkenliğinin yükseltilmesinin avantajı klorür anyonun koagülasyondaki diğer negatif anyonların etkilerini azaltmasıdır. Elektrokoagülasyon prosesinde NaCl eklenmesi yaygındır çünkü tuz eklenmesi atıksuyun iletkenliğini arttırmakta ve güç ihtiyacını azaltmaktadır [46].



Şekil 4.8. Farklı elektrolit derişimlerinde renk gideriminin zamanla değişimi (boyarmadde derişimi 600 mg/L, akım yoğunluğu 9 mA/cm², reaksiyon sıcaklığı 35°C)

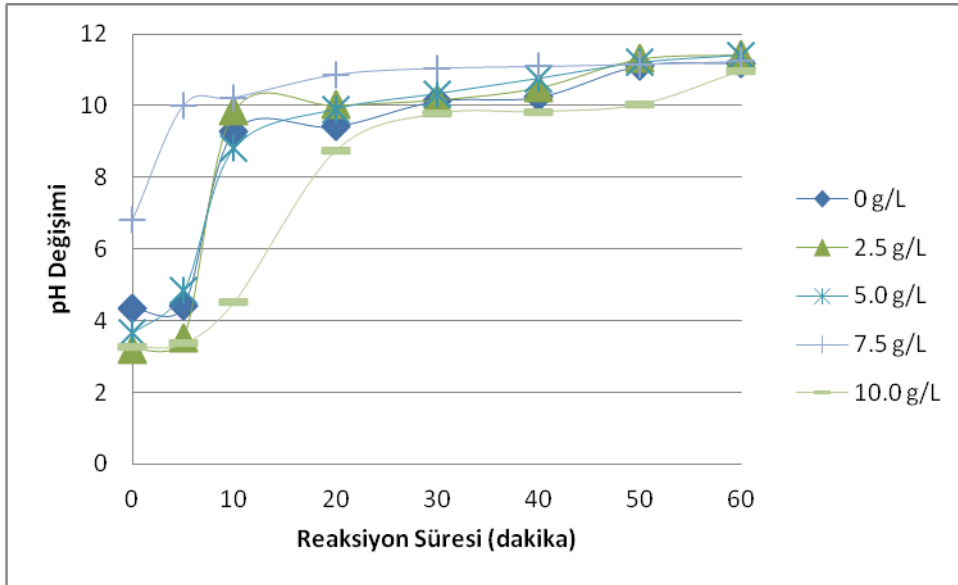
Boyarmadde çözeltilerinin iletkenliğinin yükseltilmesinin renk giderim verimi üzerinde çok fazla etkisi görülmemiştir. Yüksek renk giderimi, düşük hücre voltajında ve düşük enerji tüketiminde sağlanmalıdır [49]. Kabdaşlı vd. [40], NaCl derişiminin artırılmasının, renk ve KOİ giderim verimini artırdığını belirtmişlerdir [40].



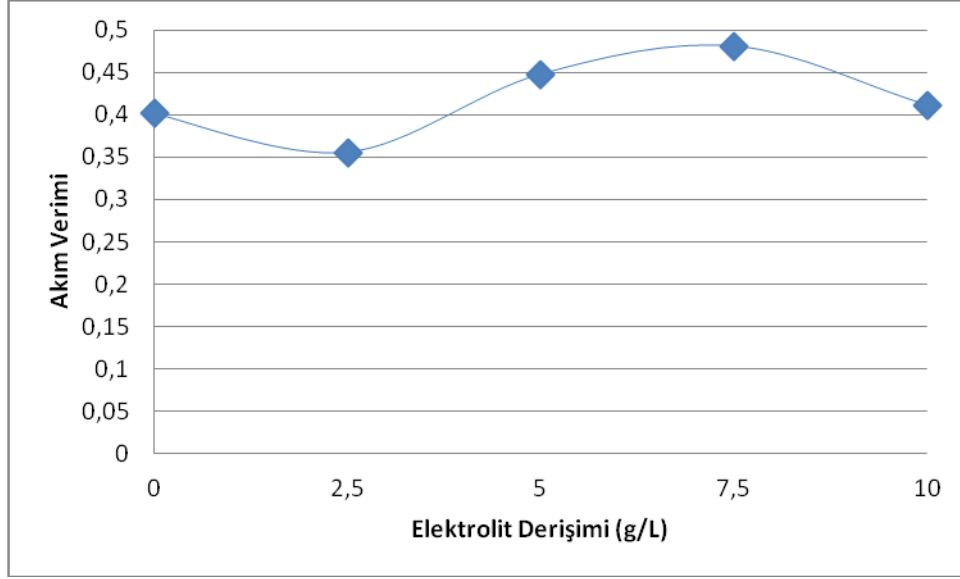
Şekil 4.9. Enerji tüketiminin elektrolit derişimi ile değişimi (boyarmadde derişimi 600 mg/L, akım yoğunluğu 9 mA/cm², reaksiyon sıcaklığı 35°C)

Çözelti iletkenliği akım verimini, hücre voltajını ve elektrik enerjisi tüketimini etkilemektedir. NaCl derişiminin artmasıyla iyonik iletkenliğin artması, aynı hücre voltajında yüksek akım yoğunluğu ve sabit akım yoğunluğunda hücre voltajının düşmesini sağlamaktadır. Belirli bir akım yoğunluğunda gerekli voltajın sağlanması enerji tüketimini düşürmektedir [49].

Pajootan vd. [45] elektrolit derişiminin 0'dan 8 g/L' ye yükseltilmesinin renk gideriminde ihmal edilebilir etkisi olduğunu, ancak elektrik enerjisi tüketimini düşürdüğünü belirtmişlerdir [45].



Şekil 4.10. Farklı elektrolit derişimlerinde pH değişiminin zamanla değişimi (boyarmadde derişimi 600 mg/L, akım yoğunluğu 9 mA/cm², reaksiyon sıcaklığı 35°C)



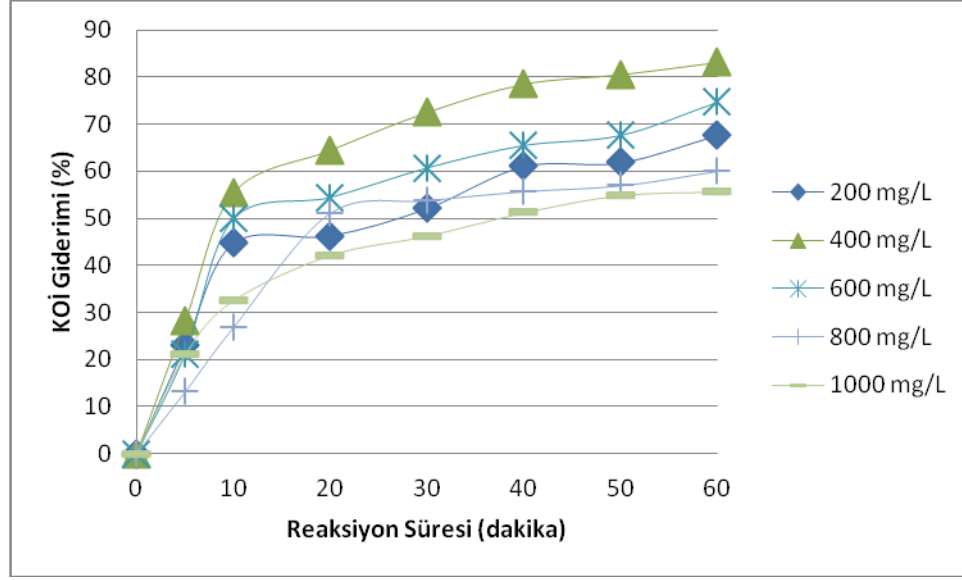
Şekil 4.11. Elektrolit derişiminin akım verimine etkisi (boyarmadde derişimi 600 mg/L, akım yoğunluğu 9 mA/cm², reaksiyon sıcaklığı 35°C)

Şekil 4.7’de en yüksek KOİ giderim verimi % 77,6 olarak 7,5 g/L elektrolit derişiminde elde edilmiştir. Renk giderimi destek elektrolit varlığında ilk 10 dakika içinde hızlı biçimde gerçekleşmiştir. Destek elektrolit kullanılmadığında ilk 10 dakikada %35,9 renk giderimi elde edilmiş 60 dakika sonunda %74,1 renk giderim verimine ulaşılmıştır. Elektrolit derişiminin 0 g/L’den 2,5 g/L’ye artması durumunda enerji tüketimi 97,8 kWh/kg KOİ giderimi’den 157,5 kWh/kg KOİ giderimi’ne yükselmektedir. Elektrolit derişiminin 2,5 g/L’den 10 g/L’ye artması ile enerji tüketiminin azaldığı belirlenmiştir. En düşük enerji tüketimi 10 g/L elektrolit derişiminde 63,8 kWh/kg KOİ giderimi olarak elde edilmiştir. Akım veriminin, elektrolit derişiminin 0 g/L’den 2,5 g/L’ye artışı ile azaldığı, 2,5g/L’den 7,5 g/L’ye artışı ile arttığı belirlenmiştir. En yüksek akım verimi 7,5 g/L elektrolit derişiminde 0,486 olarak elde edilmiştir.

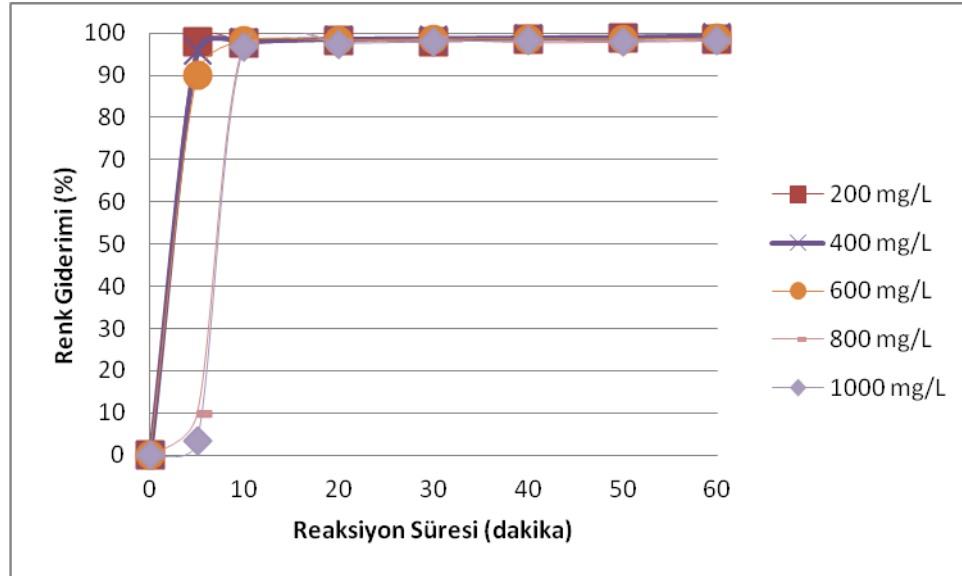
4.1.3. Boyarmadde Derişiminin Etkisi

Boyarmadde derişiminin elektrokoagülasyon prosesinde renk, KOİ giderimi verimleri, pH, enerji tüketimi ve akım verimi üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla boyarmadde derişimi 200-1000 mg/L aralığında değiştirilmiştir. Deneyle 9

mA/cm^2 akım yoğunluğu, 5.0 g/L elektrolit derişimi ve 35°C reaksiyon sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Renk ve KOİ giderimleri, pH, enerji tüketimi ve akım yoğunluğu ile ilgili deneysel sonuçlar Şekil 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16’da verilmiştir.

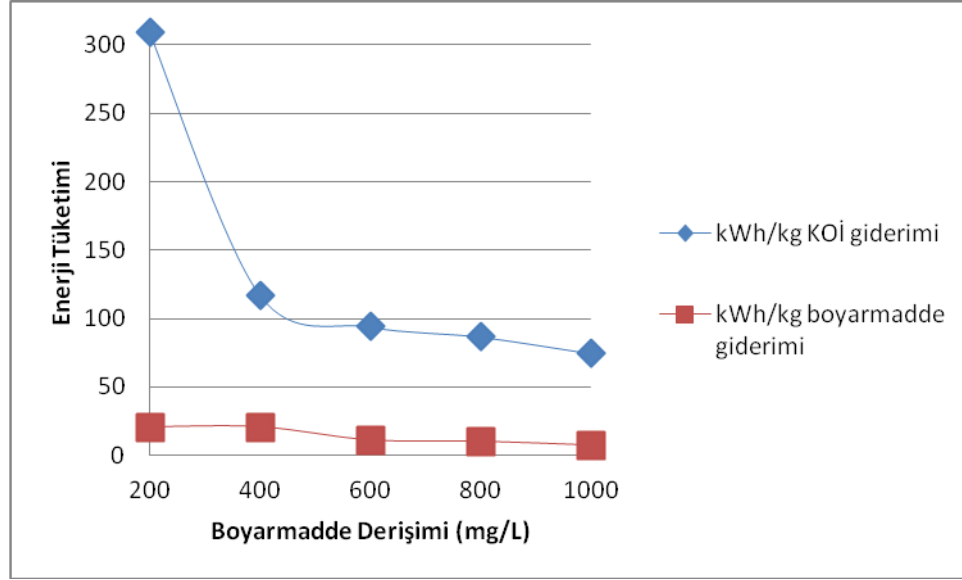


Şekil 4.12. Farklı başlangıç boyarmadde derişimlerinde kimyasal oksijen ihtiyacı gideriminin zamanla değişimi (akım yoğunluğu 9 mA/cm^2 , elektrolit derişimi 5.0 g/L, reaksiyon sıcaklığı 35°C)

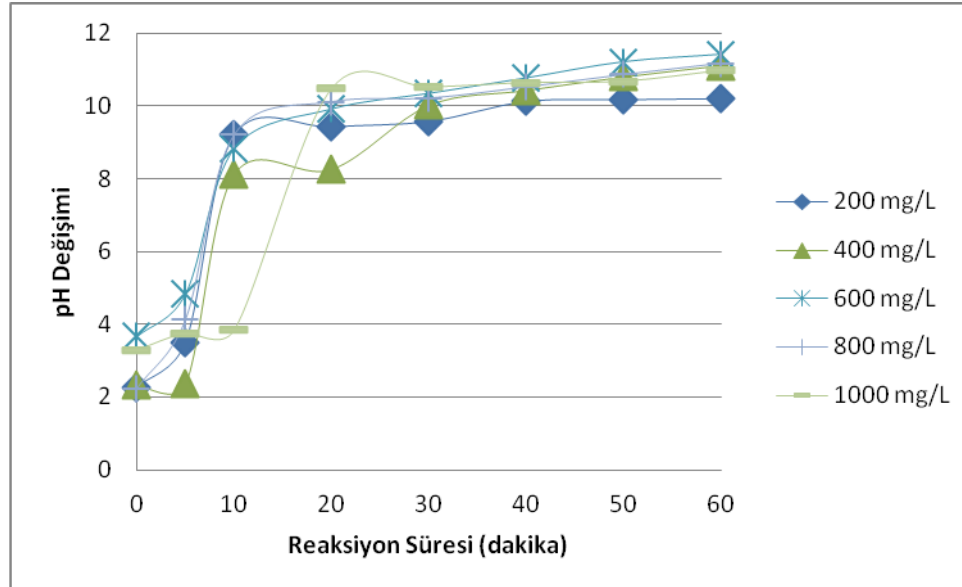


Şekil 4.13. Farklı başlangıç boyarmadde derişimlerinde renk gideriminin zamanla değişimi (akım yoğunluğu 9 mA/cm^2 , elektrolit derişimi 5.0 g/L, reaksiyon sıcaklığı 35°C)

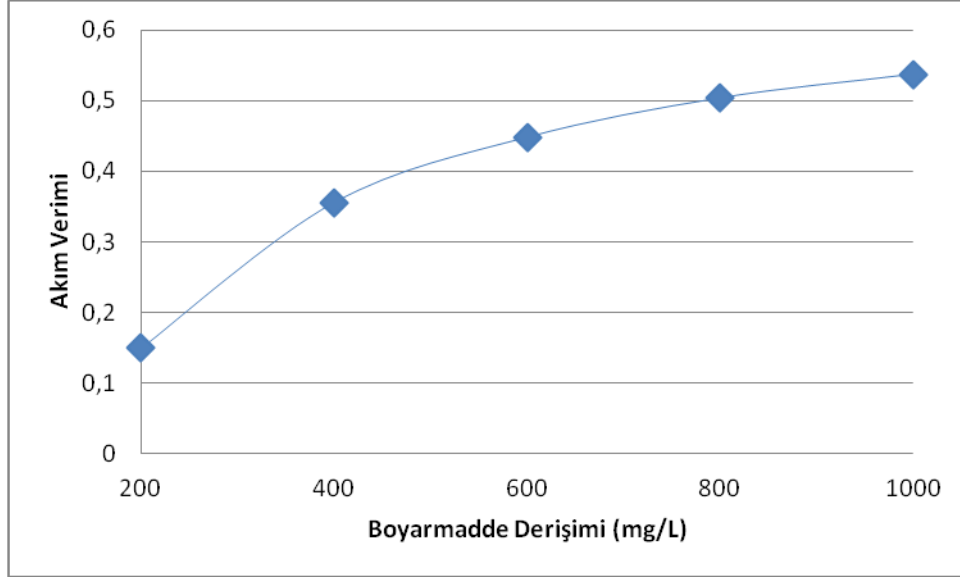
Aynı akım yoğunluğunda sistemde oluşan Fe^{+2} iyonları miktarı sabit ve çözeltide oluşan çamur oluşumu aynı olmaktadır. Yüksek boyarmadde derişimlerinde oluşan çamur, boyarmadde molekülerini verimli bir şekilde adsorplamamaktadır. Bu nedenle boyarmadde derişiminin yükselmesiyle renk giderim verimi düşmektedir [45].



Şekil 4.14. Enerji tüketiminin boyarmadde derişimi ile değişimi (akım yoğunluğu 9 mA/cm², elektrolit derişimi 5.0 g/L, reaksiyon sıcaklığı 35°C)



Şekil 4.15. Farklı başlangıç boyarmadde derişimlerinde pH değişiminin zamanla değişimi (akım yoğunluğu 9 mA/cm², elektrolit derişimi 5.0 g/L, reaksiyon sıcaklığı 35°C)

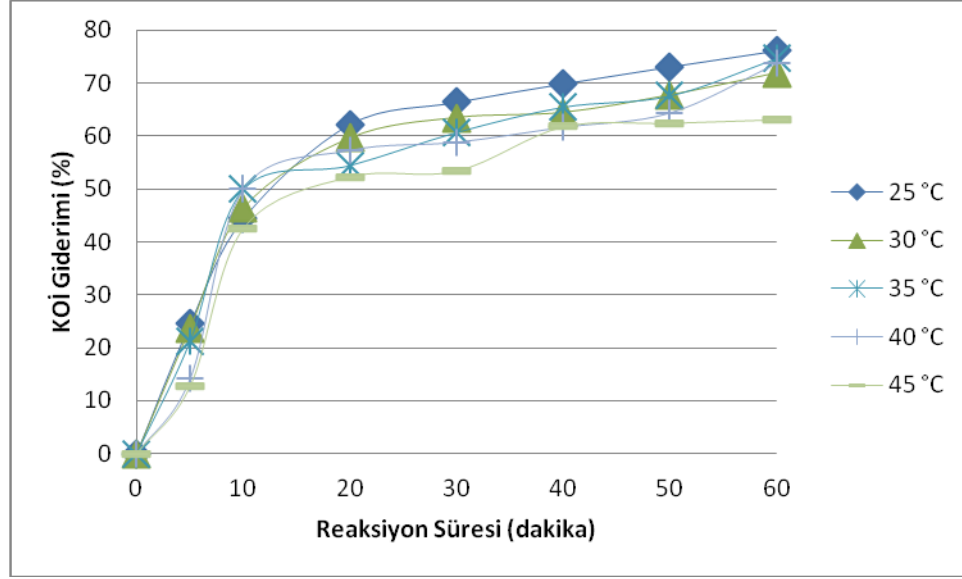


Şekil 4.16. Boyarmadde derişiminin akım verimine etkisi (akım yoğunluğu 9 mA/cm², elektrolit derişimi 5.0 g/L, reaksiyon sıcaklığı 35°C)

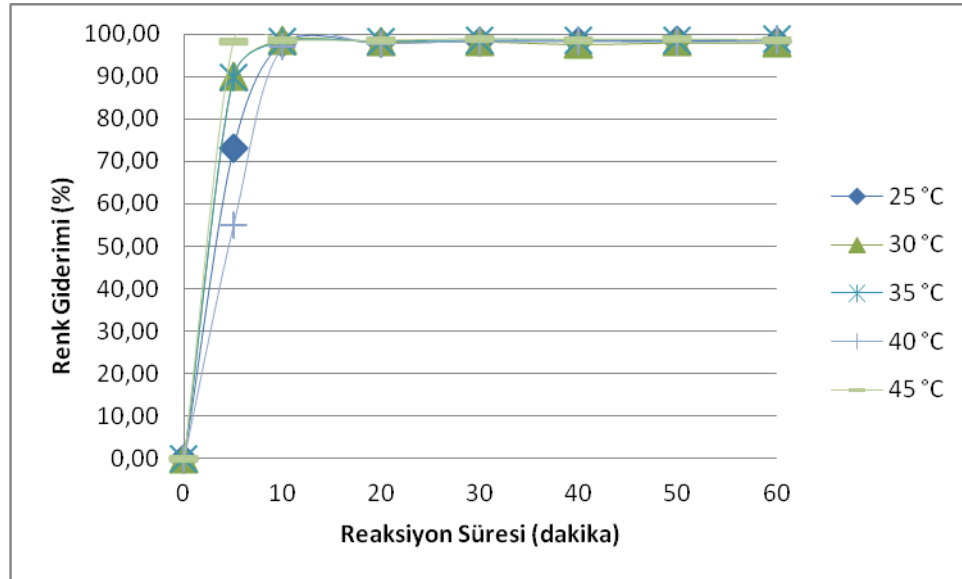
Deneysel sonuçlardan en yüksek KOİ giderim veriminin 400 mg/L boyarmadde derişiminde %83,1 olarak gerçekleştiği görülmektedir. Renk giderimi tüm başlangıç derişimlerinde ilk 10 dakikada hızlı biçimde tamamen sağlanmıştır. Enerji tüketimi boyarmadde derişiminin artmasıyla azalmıştır. Boyarmadde derişiminin artmasıyla renk ve KOİ giderim miktarlarının artmasının sonucu olarak enerji tüketimi azalmaktadır. Akım verimi boyarmadde derişimin artmasıyla artmıştır.

4.1.4. Reaksiyon Sıcaklığının Etkisi

Reaksiyon sıcaklığının elektrokoagülasyon prosesinde renk ve KOİ giderimi verimleri, pH, enerji tüketimi ve akım verimi üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla sıcaklık 25-45 °C aralığında değiştirilmiştir. Deneysel sonuçlar 9 mA/cm² akım yoğunluğu, 5,0 g/L elektrolit derişimi ve 600 mg/L boyarmadde derişiminde gerçekleştirilmiştir. Renk ve KOİ giderimleri, pH, enerji tüketimi ve akım yoğunluğu ile ilgili deneysel sonuçlar Şekil 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21 'de verilmiştir.

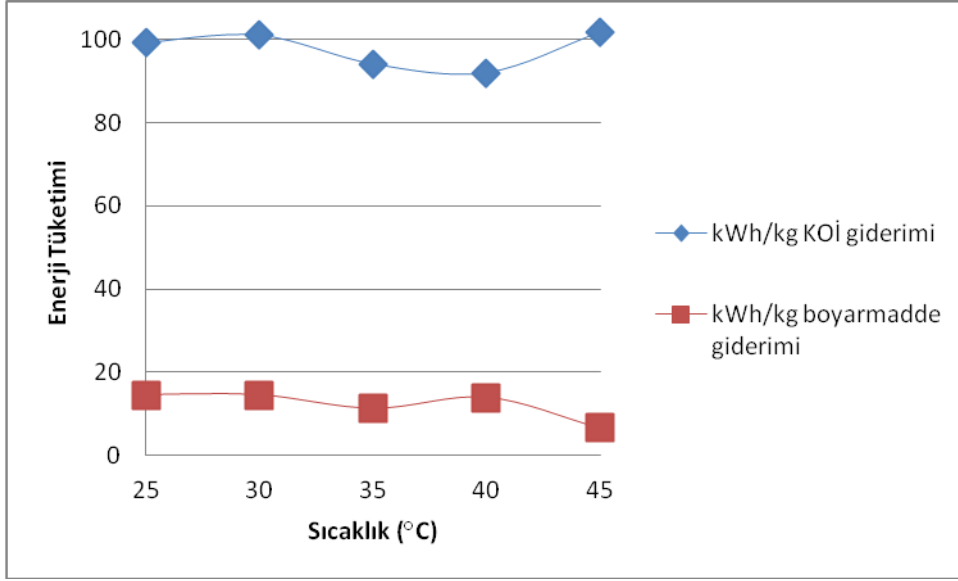


Şekil 4.17. Farklı reaksiyon sıcaklıklarında kimyasal oksijen ihtiyacı gideriminin zamanla değişimi (akım yoğunluğu 9 mA/cm², elektrolit derişimi 5.0 g/L, boyarmadde derişimi 600 mg/L)

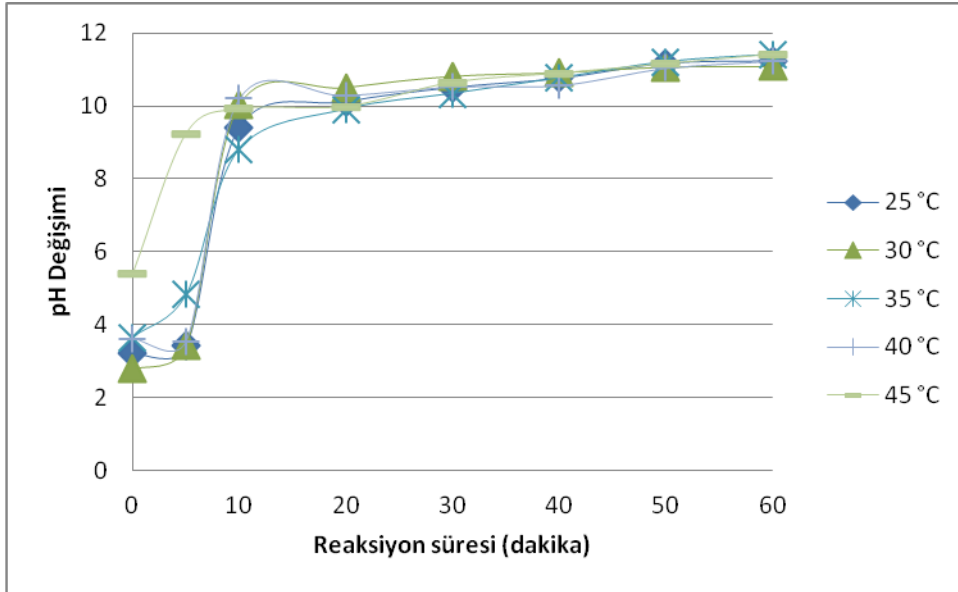


Şekil 4.18. Farklı reaksiyon sıcaklıklarında renk gideriminin zamanla değişimi (akım yoğunluğu 9 mA/cm², elektrolit derişimi 5.0 g/L, boyarmadde derişimi 600 mg/L)

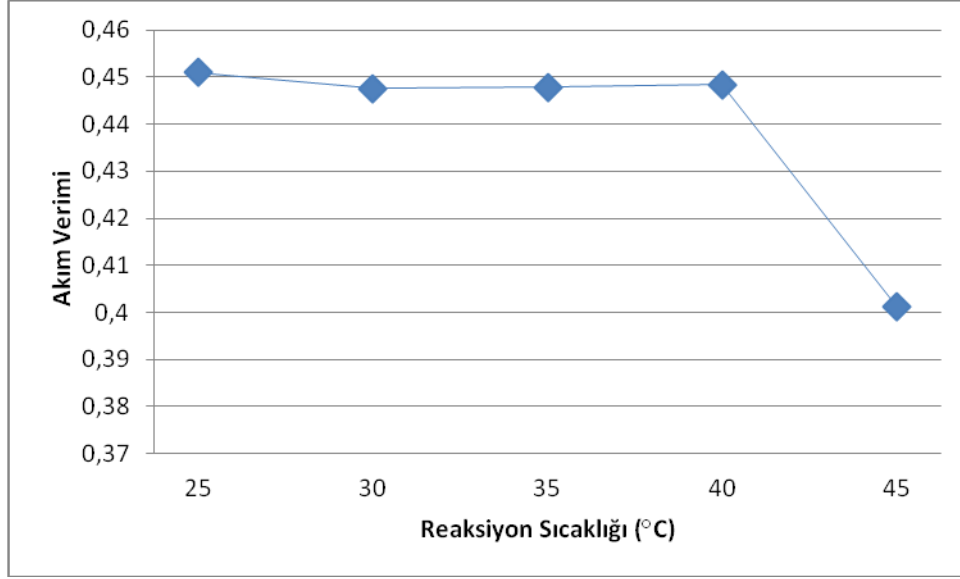
Elektrokoagülasyon yönteminde, reaksiyon sıcaklığı 30 °C'ye kadar yükseltildiğinde boyarmadde renk giderim verimi hidroksil polimerleri ile iyonların çarpışması ve hareketliliğin artmasından dolayı yükselmektedir. 30 °C'den yüksek sıcaklıklarda giderim verimi uygun olmayan kümelenmeler oluşması ve kümelerin çözünürlüğünün artmasından dolayı düşmektedir [45].



Şekil 4.19. Enerji tüketiminin reaksiyon sıcaklığı ile değişimi (akım yoğunluğu 9 mA/cm², elektrolit derişimi 5.0 g/L, boyarmadde derişimi 600 mg/L)



Şekil 4.20. Farklı reaksiyon sıcaklıklarında pH değişiminin zamanla değişimi (akım yoğunluğu 9 mA/cm², elektrolit derişimi 5.0 g/L, boyarmadde derişimi 600 mg/L)

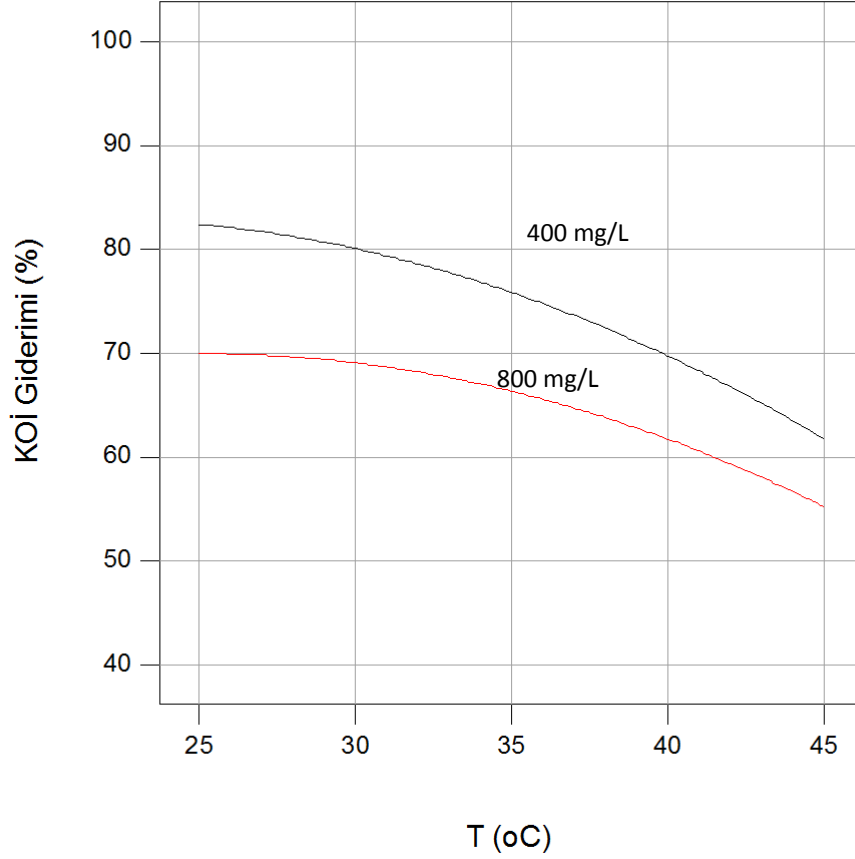


Şekil 4.21. Reaksiyon sıcaklığının akım verimine etkisi (akım yoğunluğu 9 mA/cm², elektrolit derişimi 5.0 g/L, boyarmadde derişimi 600 mg/L)

Deneysel sonuçlardan sıcaklık değişiminin 25°C'den 45°C'ye artmasıyla KOİ giderim veriminin azaldığı görülmektedir. En yüksek KOİ giderim verimi 25°C'de % 76.1 olarak elde edilmiştir. Renk giderim verimi bütün reaksiyon sıcaklığı değerlerinde ilk 10 dakika içinde hızlı biçimde tamamen sağlanmıştır. Akım verimi reaksiyon sıcaklığının 25°C'den 40°C'ye yükseltilmesi ile değişmemiş, 45°C'de ise reaksiyon sıcaklığının artışı ile akım verimi düşmüştür.

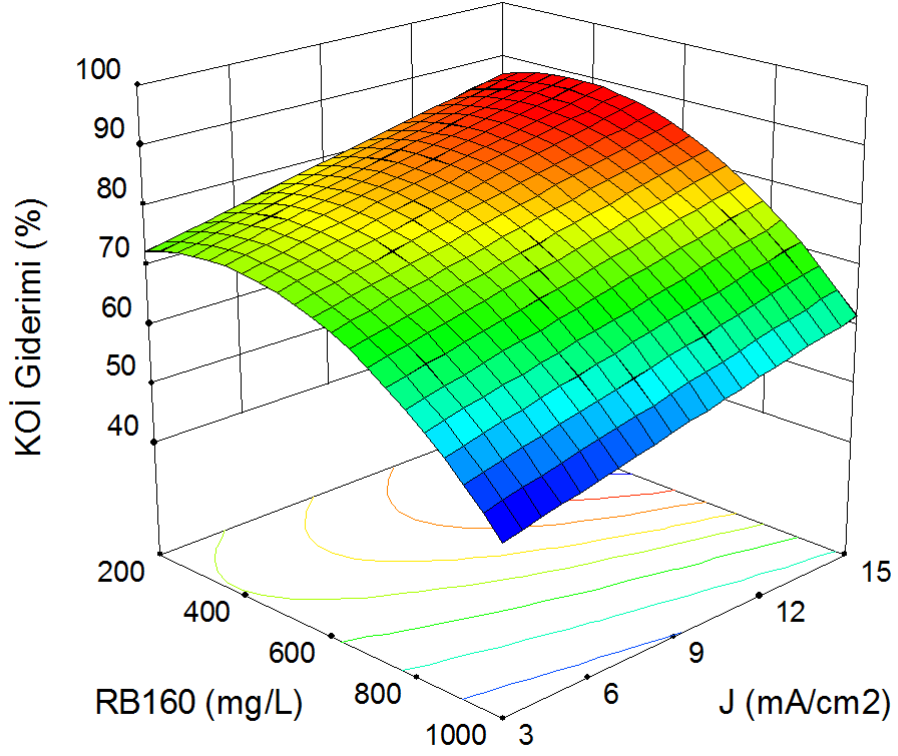
4.2. İŞLETİM PARAMETRELERİNİN CEVAP YÜZEY YÖNTEMİ İLE OPTİMİZASYONU

Deneysel çalışmada işletim parametreleri cevap yüzey yöntemi uygulanarak Design-Expert[®] 8.0 paket programı ile optimize edilmiştir.



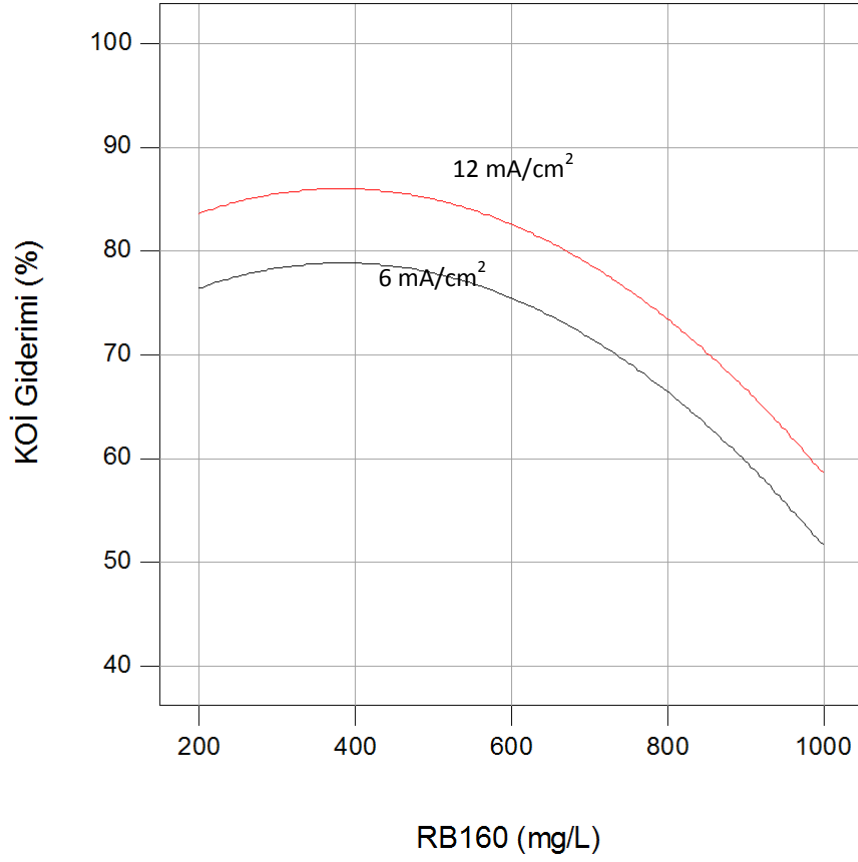
Şekil 4.22. Reaksiyon sıcaklığının KOİ giderimine etkisi (Boyarmadde derişimi: 400 mg/L ve 800 mg/L; elektrolit derişimi: 5 g/L; akım yoğunluğu: 9 mA/cm²)

Şekil 4.22’de KOİ gideriminin reaksiyon sıcaklığı ile değişimi görölmektedir. Reaksiyon sıcaklığının artmasıyla KOİ giderimi azalmış ve en yüksek KOİ giderimi 25°C’ de sağlanmıştır. RB160 boyarmaddesinin elektrokoagülasyon yöntemi ile giderimi çalışmalarında optimum reaksiyon sıcaklığı 25°C olarak belirlenmiştir.



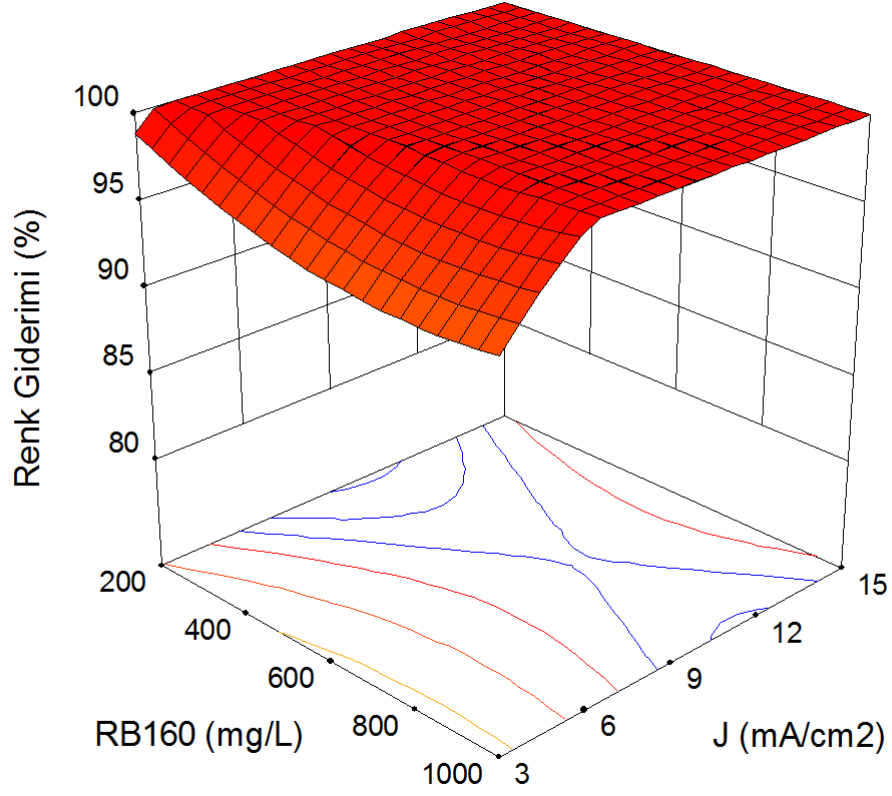
Şekil 4.23. Boyarmadde derişiminin ve akım yoğunluğunun KOİ giderimine etkisi (Sıcaklık: 25°C; elektrolit derişimi: 5 g/L)

Şekil 4.23'de boyarmadde derişiminin ve akım yoğunluğunun KOİ giderimine etkisi görülmektedir. Optimum sıcaklık değerinde en yüksek KOİ giderimi 400 mg/L başlangıç boyarmadde derişiminde elde edilmiştir. RB160 boyarmaddesinin elektrokoagülasyon yöntemi ile giderimi çalışmalarında optimum başlangıç boyarmadde derişimi 400 mg/L olarak belirlenmiştir.



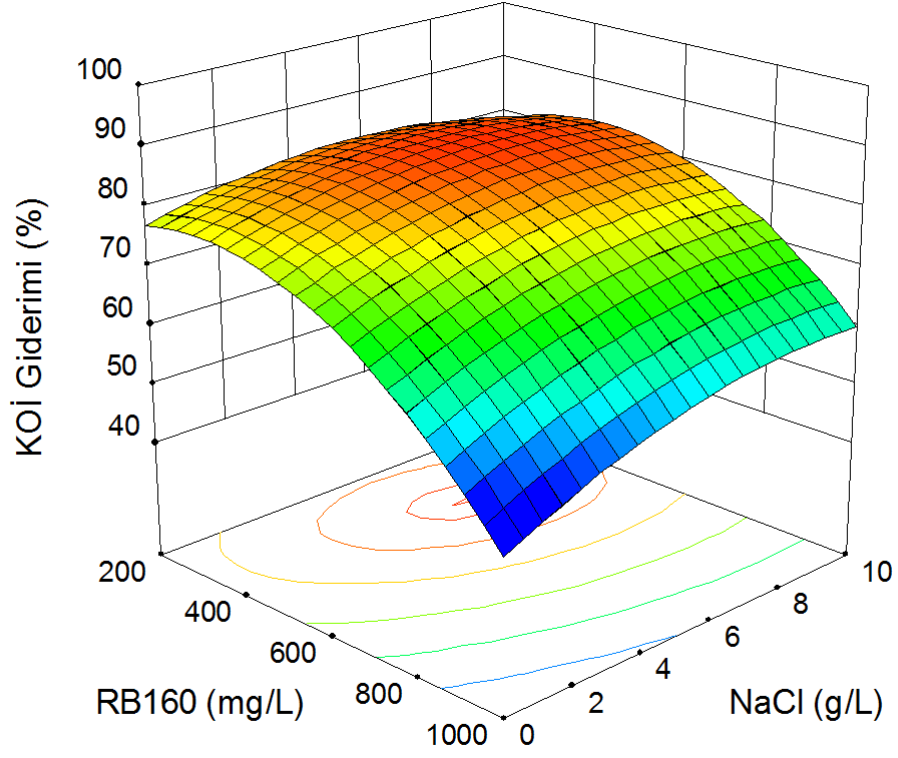
Şekil 4.24. Boyarmadde derişiminin KOİ giderimine etkisi (Akım yoğunlukları: 12 mA/cm² ve 6 mA/cm²; elektrolit derişimi: 5 g/L; sıcaklık:25°C)

Şekil 4.24’de boyarmadde başlangıç derişiminin KOİ giderimine etkisi görülmektedir. Deneysel sonuçlardan optimum sıcaklık değerinde en yüksek kimyasal oksijen ihtiyacı giderimi % 87 olarak elde edilmiştir (Çizelge 4.1). Şekil 4.24’de % 85 KOİ giderimine 11 mA/cm² akım yoğunluğunda ulaşıldığı görülmektedir. RB160 boyarmaddesinin elektrokoagülasyon yöntemi ile giderimi çalışmalarında optimum akım yoğunluğu 11 mA/cm² olarak belirlenmiştir.



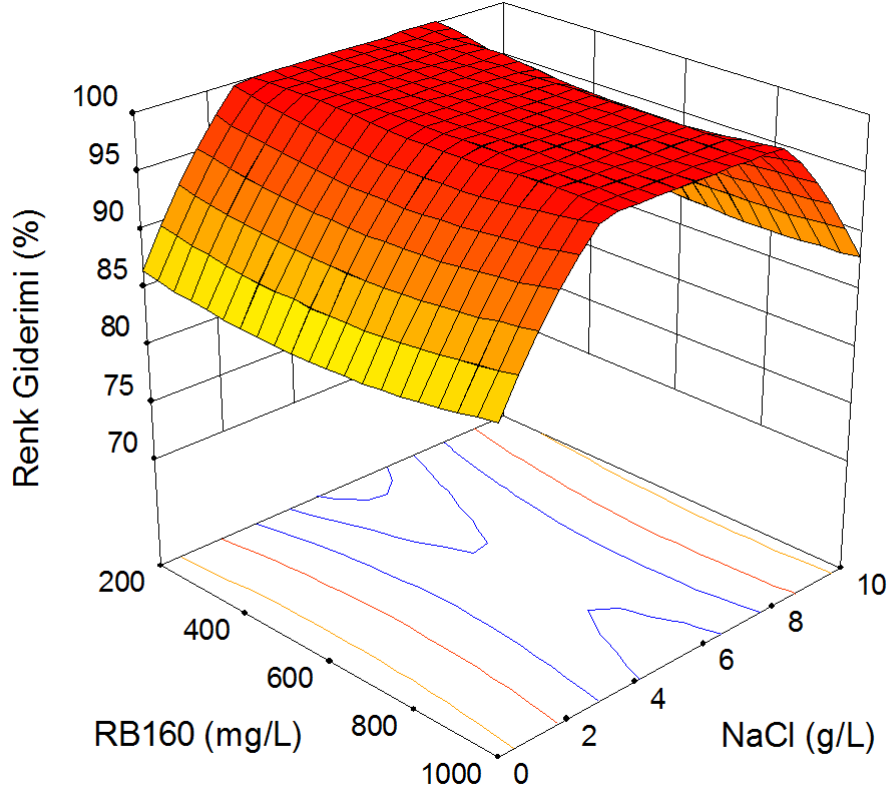
Şekil 4.25. Boyarmadde derişiminin ve akım yoğunluğunun renk giderimine etkisi (Elektrolit derişimi: 5 g/L; sıcaklık:25°C)

Şekil 4.25’de boyarmadde başlangıç derişiminin ve akım yoğunluğunun renk giderimine etkisi görülmektedir. Boyarmadde derişimi 200-1000 mg/L aralığında ve 6 mA/cm², den yüksek akım yoğunluğu değerlerinde tamamen renk giderimi sağlanmıştır.



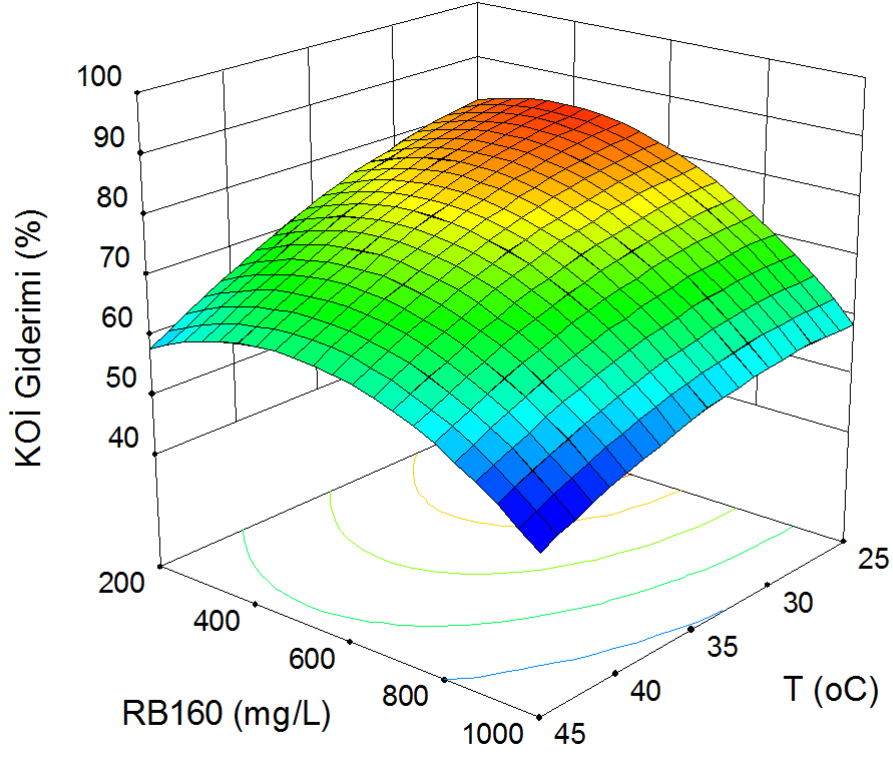
Şekil 4.26. Boyarmadde derişiminin ve elektrolit derişiminin KOİ giderimine etkisi (Sıcaklık: 25°C; akım yoğunluğu: 11 mA/ cm²)

Şekil 4.26'da boyarmadde derişiminin ve elektrolit derişiminin KOİ giderimine etkisi görülmektedir. Optimum reaksiyon sıcaklığı, akım yoğunluğu ve 400 mg/L başlangıç boyarmadde derişiminde en yüksek KOİ giderimine 6 g/L destek elektrolit derişiminde ulaşılmıştır. RB160 boyarmaddesinin elektrokoagülasyon yöntemi ile giderimi çalışmaları optimum elektrolit derişimi 6 g/L olarak belirlenmiştir.



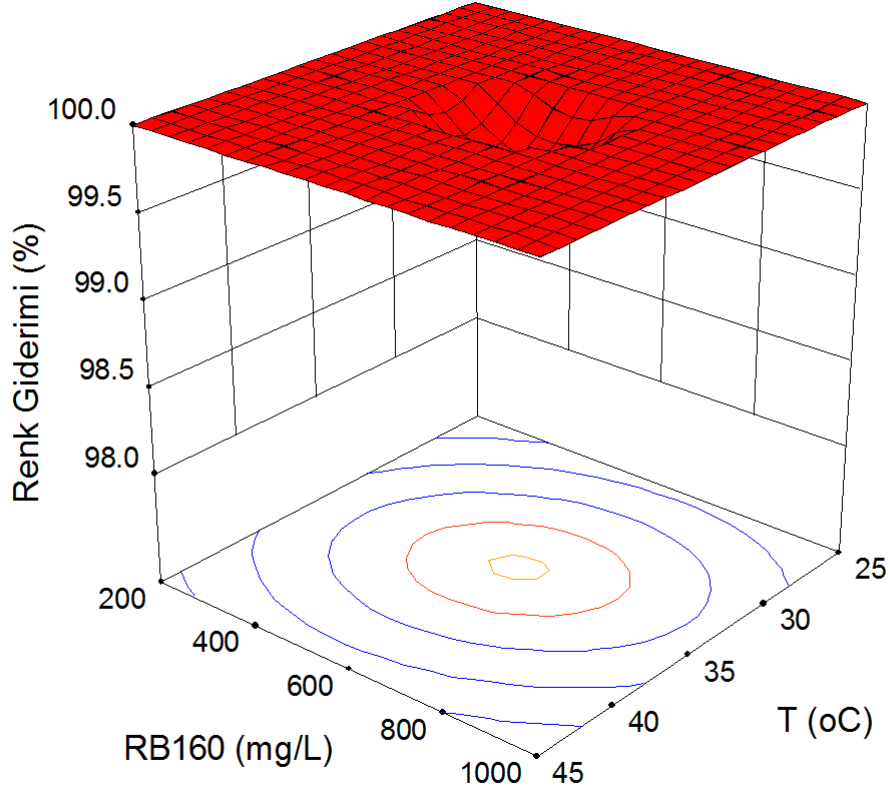
Şekil 4.27. Boyarmadde derişiminin ve elektrolit derişiminin renk giderimine etkisi (Sıcaklık: 25°C; akım yoğunluğu: 11 mA/ cm²)

Şekil 4.27’de boyarmadde başlangıç derişiminin ve elektrolit derişiminin renk giderimine etkisi görülmektedir. Boyarmadde derişimi 200-1000 mg/L aralığında ve elektrolit derişimi 2-8 g/L aralığında tamamen renk giderimi sağlanmıştır.



Şekil 4.28. Boyarmadde derişiminin ve sıcaklığın KOİ giderimine etkisi (Elektrolit derişimi: 6g/L; akım yoğunluğu: 11 mA/cm²)

Şekil 4.28’de boyarmadde derişiminin ve sıcaklığın KOİ giderimine etkisi görülmektedir. Optimum elektrolit derişimi ve akım yoğunluğu değerlerinde en yüksek KOİ giderimine 400 mg/L başlangıç boyarmadde derişiminde ve 25°C’de ulaşılmıştır.



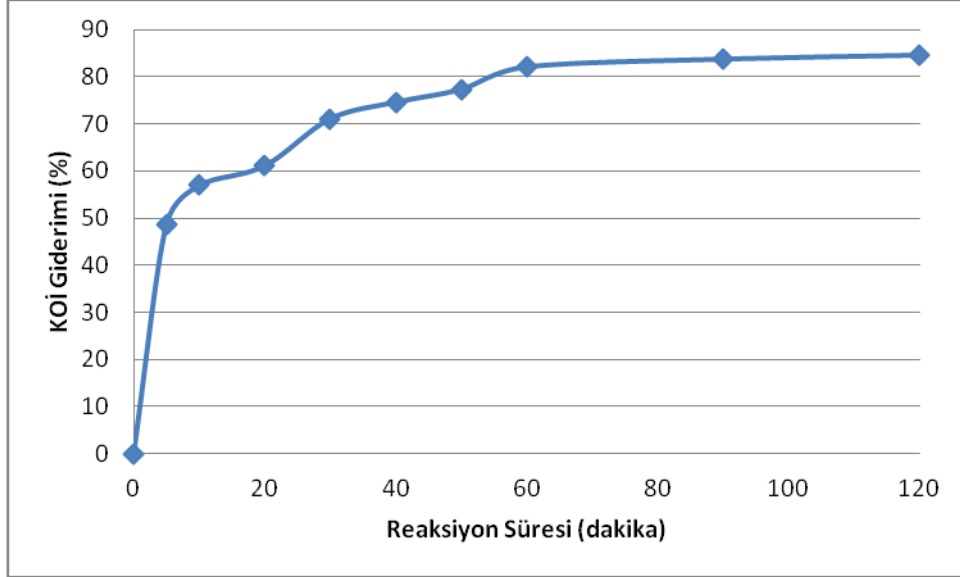
Şekil 4.29. Boyarmadde derişiminin ve sıcaklığın renk giderimine etkisi (Elektrolit derişimi: 6g/L; akım yoğunluğu: 11 mA/cm²)

Şekil 4.29’da boyarmadde başlangıç derişiminin ve sıcaklığın renk giderimine etkisi görülmektedir. Reaksiyon sıcaklığının renk giderimi verimi üzerinde belirgin bir etkisi bulunmamaktadır.

Tekstil boyarmaddeleri, doğrudan ve dolaylı oksidasyonla veya katodik indirgenmeyle elektrokimyasal proseste parçalanırlar. Boyarmadde moleküllerinde bulunan azo gruplarının indirgenmesiyle ve kromofor gruplarının doğrudan veya dolaylı oksidasyonu sonucunda reaksiyon ortamında renksiz ara ürünler oluşur. Elektrokimyasal proseste oluşan bu ara ürünler ve organik bileşenler çok düşük hızda oksidasyona uğrar ve reaksiyon ortamından uzaklaştırılmaları daha uzun sürede gerçekleşir [5].

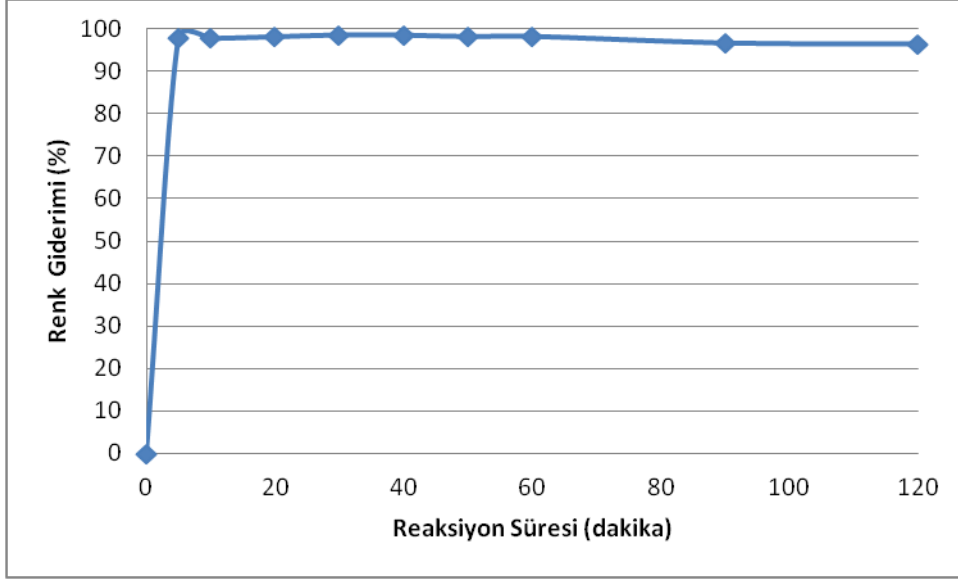
Tez kapsamında renk giderimi ilk 10 dakika içinde çok hızlı biçimde tamamen sağlanırken kimyasal oksijen ihtiyacı gideriminde aynı reaksiyon süresinde düşük verim elde edilmiştir. Kimyasal oksijen ihtiyacı giderimi daha güç koşullarda sağlandığı için tez kapsamında optimum koşullar kimyasal oksijen ihtiyacı giderimi temelinde belirlenmiştir.

Cevap yüzey yöntemi uygulanarak, akım yoğunluğu, elektrolit derişimi, boyarmadde derişimi ve reaksiyon sıcaklığı işletim değişkenleri optimize edilmiştir. Optimum koşulların 400 mg/L başlangıç boyarmadde derişimi, 6 g/L elektrolit derişimi, 11 mA/cm² akım yoğunluğu ve 25°C reaksiyon sıcaklığında sağlandığı belirlenmiştir. Optimum koşullarda gerçekleştirilen deneylerde 60 dakika reaksiyon süresi sonunda KOİ giderimi % 82.1, boyarmadde renk giderimi % 98.5, enerji tüketim değerleri 17.5 kWh/kg boyarmadde giderimi, 178.7 kWh/kg KOİ giderimi ve akım verimi 0.278 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.30. Optimum işletim koşullarında KOİ giderimi (Boyarmadde derişimi 400 mg/L, elektrolit derişimi 6 g/L, akım yoğunluğu 11 mA/cm², reaksiyon sıcaklığı 25°C, reaksiyon süresi 120 dk)

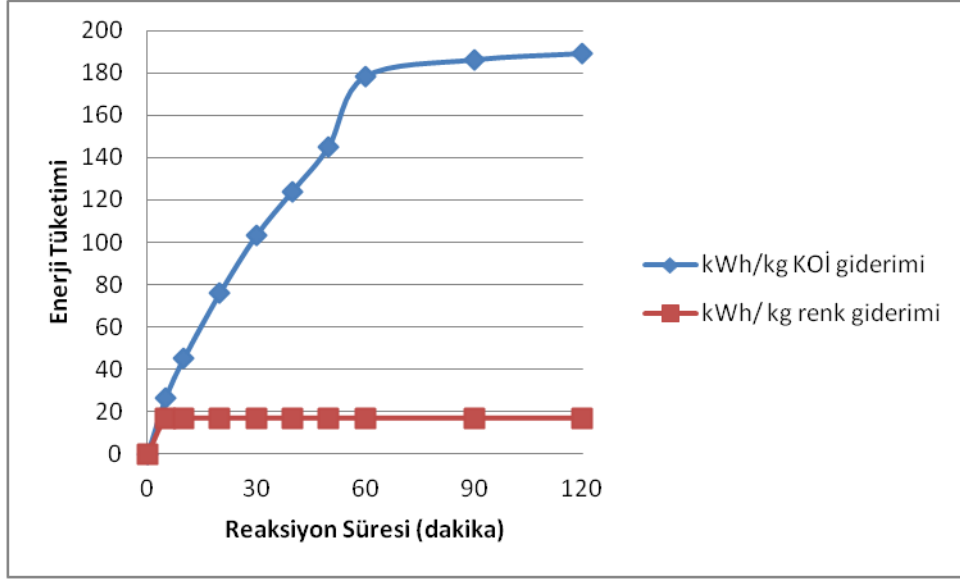
Şekil 4.30'da optimum işletim koşullarında gerçekleştirilen deneylerde 120 dakika reaksiyon süresi sonunda KOİ giderimi % 84.6 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.31. Optimum işletim koşullarında boyarmadde renk giderimi (Boyarmadde derişimi 400 mg/L, elektrolit derişimi 6 g/L, akım yoğunluğu 11 mA/cm², reaksiyon sıcaklığı 25°C, reaksiyon süresi 120 dk)

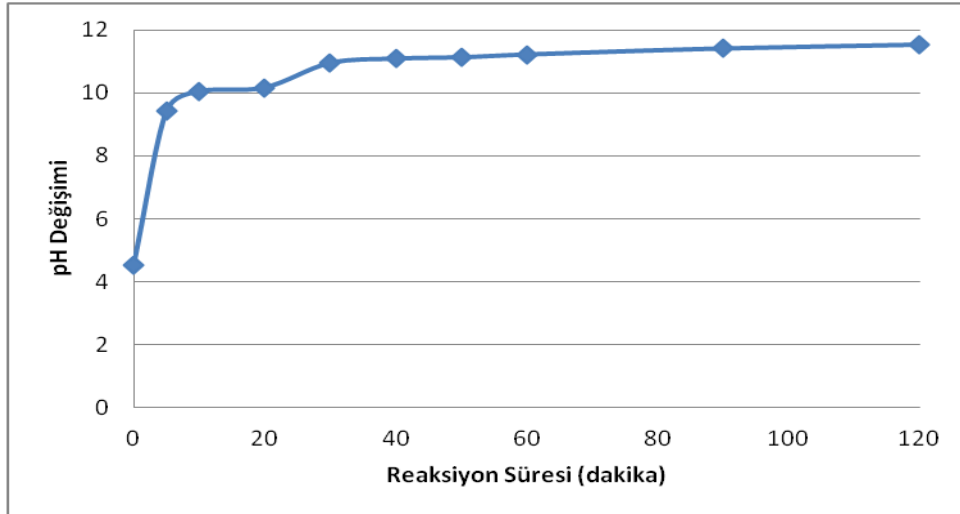
Şekil 4.31’de optimum işletim koşullarında gerçekleştirilen deneylerde 120 dakika reaksiyon süresi sonunda boyarmadde renk giderimi % 97 olarak elde edilmiştir.

Merzouk vd. [46] elektrokoagülasyon prosesi ile % 95 renk giderimi elde etmiş, ancak işletme maliyetinin yüksek olduğunu belirtmişlerdir [46]. Mollah vd. [56], Fe elektrotlar kullanarak elektrokoagülasyon yöntemini uygulamışlar ve NaCl varlığında optimum işletim koşullarında % 98.5 boya giderimi elde etmişlerdir [56].



Şekil 4.32. Optimum işletim koşullarında enerji tüketimi (Boyarmadde derişimi 400 mg/L, elektrolit derişimi 6 g/L, akım yoğunluğu 11 mA/cm², reaksiyon sıcaklığı 25°C, reaksiyon süresi 120 dk)

Şekil 4.32’de optimum koşullarda gerçekleştirilen deneylerde 60 dakika reaksiyon süresi sonunda enerji tüketim değerleri 17.5 kWh/kg boyarmadde giderimi, 178.7 kWh/kg KOİ giderimi olarak elde edilmiştir.

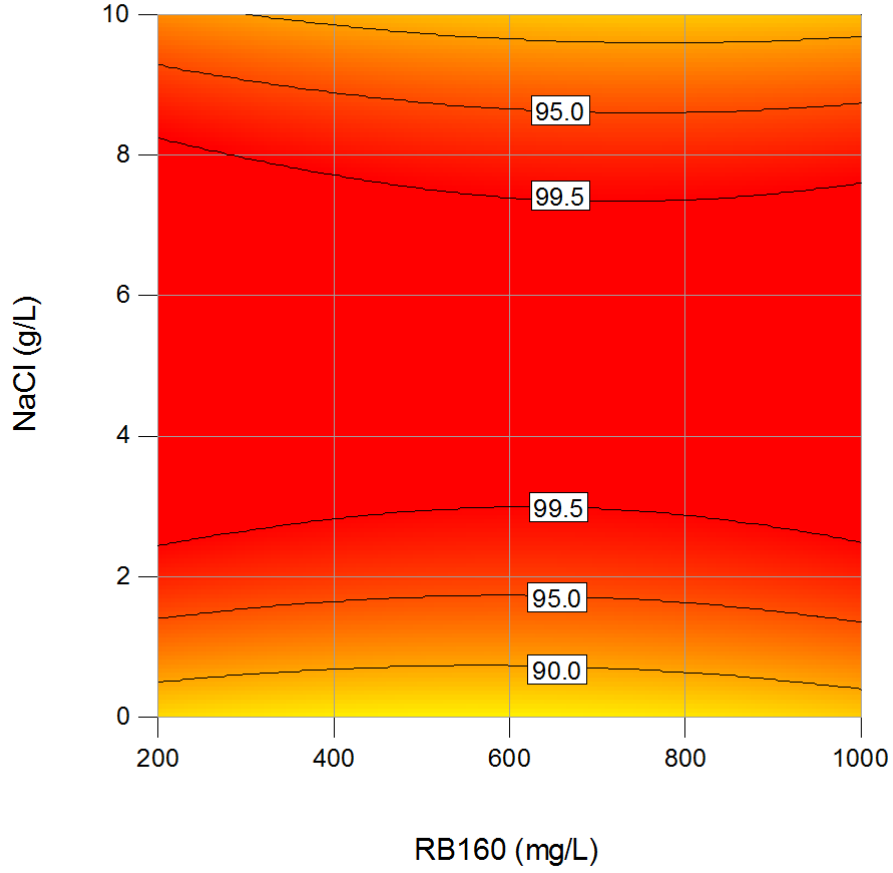


Şekil 4.33. Optimum işletim koşullarında pH değişimi (Boyarmadde derişimi 400 mg/L, elektrolit derişimi 6 g/L, akım yoğunluğu 11 mA/cm², reaksiyon sıcaklığı 25°C, reaksiyon süresi 120 dk)

Şekil 4.33’de optimum koşullarda gerçekleştirilen deneylerde 120 dakika reaksiyon süresi sonunda pH 11.53 olarak elde edilmiştir.

4.3. OPTİMUM İŞLETİM KOŞULLARINDA BOYARMADDE DERİŞİMİ VE SODYUM KLORÜR DERİŞİMİNİN PROSES VERİMİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

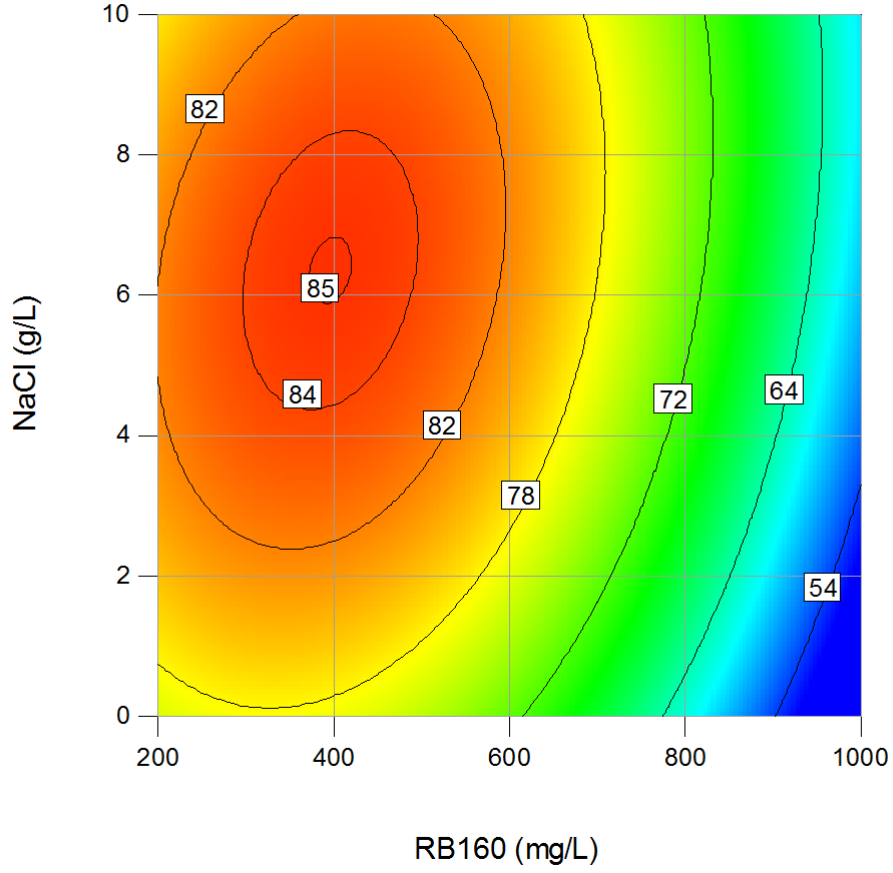
Tekstil endüstrisi boyama prosesinde, boyarmaddeler ile birlikte farklı amaçlar için yüksek derişimlerde sodyum klorür kullanılmaktadır [5]. Dolayısıyla durulama suları ile birlikte yüksek derişimlerde fikse olmamış boyarmadde ve sodyum klorür atılmaktadır. Bu nedenle, tez kapsamında boyarmadde derişiminin ve NaCl derişiminin proses verimi üzerindeki etkileri optimum işletim koşulları olarak belirlenen 25°C sıcaklıkta ve 11 mA/cm² akım yoğunluğunda incelenmiştir.



Şekil

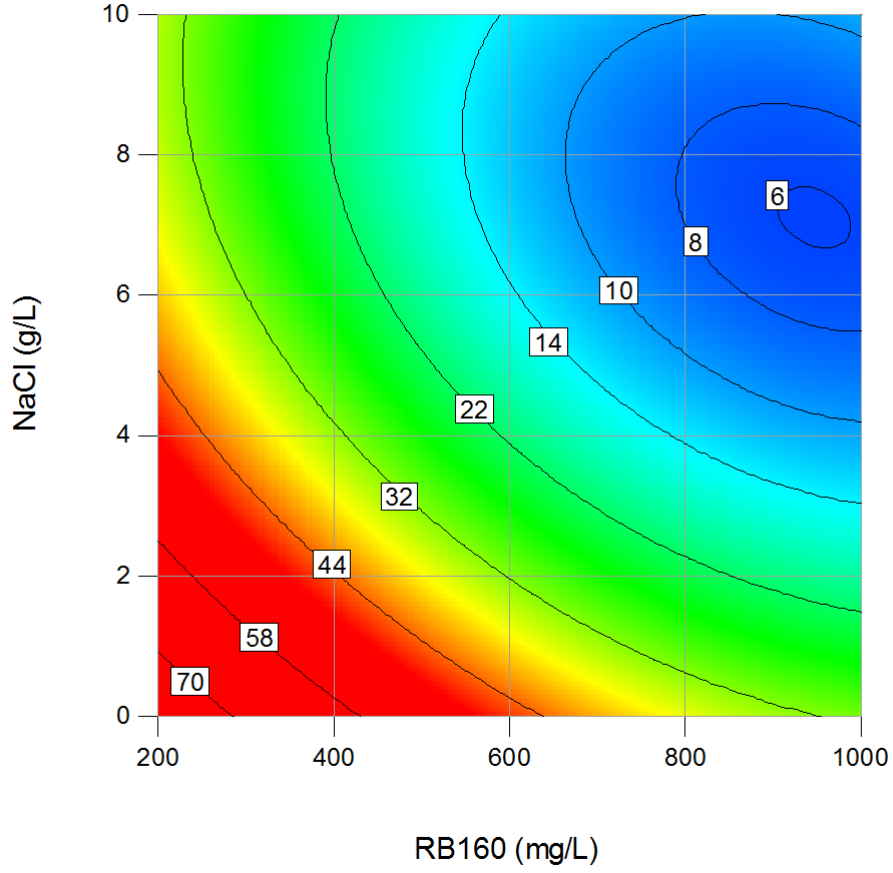
4.34. Optimum koşullarda boyarmadde derişimi ve NaCl derişiminin renk giderimine etkisi (t = 10 dk)

Şekil 4.34' de 25°C sıcaklıkta ve 11 mA/cm² akım yoğunluğunda, 200-1000 mg/L arasındaki boyarmadde derişimlerinde ve 2-8 g/L arasında elektrolit derişimlerinde % 99.5'tan daha yüksek boyarmadde renk giderimi elde edilmiştir.



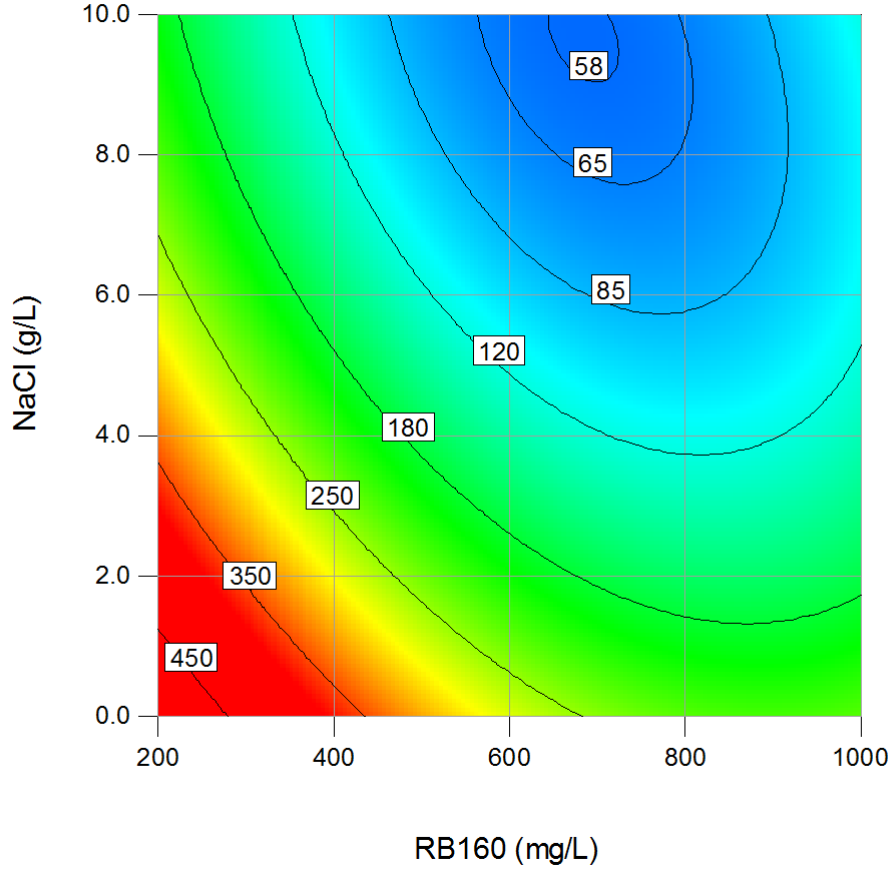
Şekil 4.35. Optimum koşullarda boyarmadde derişimi ve NaCl derişiminin KOİ giderimine etkisi (t = 60 dk)

Şekil 4.35’ de 25°C sıcaklıkta ve 11 mA/cm² akım yoğunluğunda, 400 mg/L boyarmadde derişiminde ve 6 g/L elektrolit derişiminde optimum % 85 KOİ giderimi elde edilmiştir.



Şekil 4.36. Optimum koşullarda boyarmadde derişimi ve NaCl derişiminin enerji tüketimine etkisi (kWh/kg boyarmadde giderimi) (t = 10 dk)

Şekil 4.36 ve 4.37’de boyarmadde derişimi ve elektrolit derişimi azalırken enerji tüketiminin arttığı belirlenmiştir.



Şekil 4.37. Optimum koşullarda boyarmadde derişimi ve NaCl derişiminin enerji tüketimine etkisi (kWh/kg KOİ giderimi) (t = 60 dk)

Çizelge 4.2. Optimum koşullarda gerçekleştirilen deney sonuçlarının RSM modeli ile karşılaştırılması

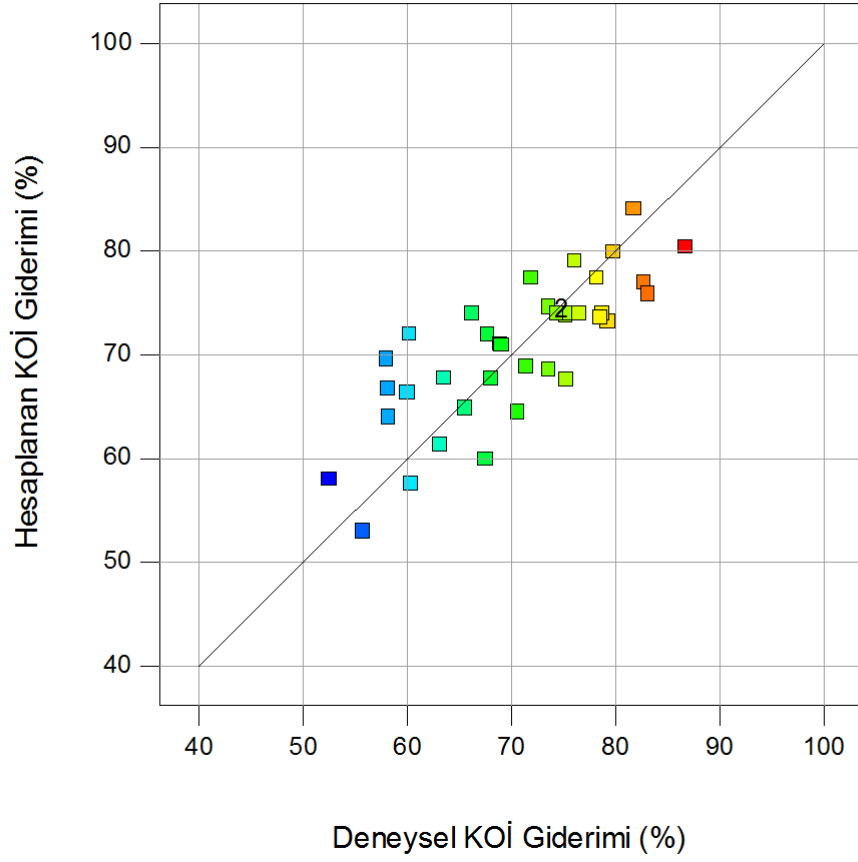
	Parametre	
	KOİ Giderimi (%)	Renk Giderimi (%)
RSM Modeli	85,0	100,0
DeneySEL Sonuç	82,1	98,5
Hata (%)	3,6	1,5

Optimizasyon çalışmalarında RB 160 boyarmaddesinin KOİ ve renk giderimi için elde edilen yaklaşım fonksiyonları sırasıyla Eşitlik 4.5-4.6'da verilmiştir. x_1 , x_2 , x_3 ve x_4 parametreleri sırasıyla boyarmadde derişimi, elektrolit derişimi, akım yoğunluğu ve reaksiyon sıcaklığını tanımlamaktadır.

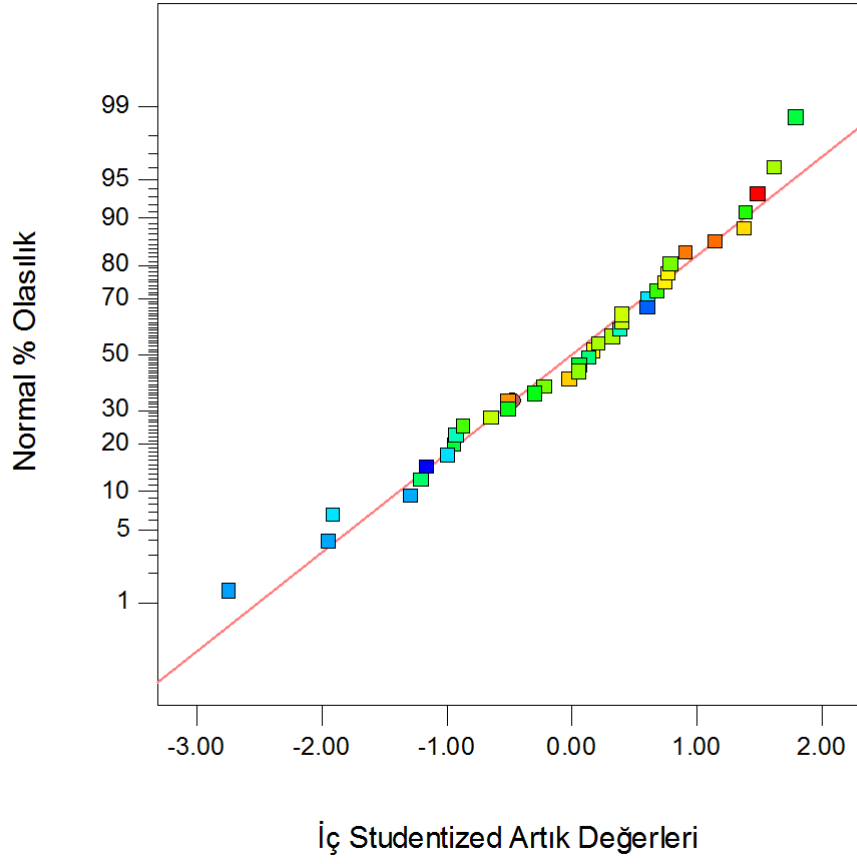
$$\begin{aligned} \text{KOİ gid. (\%)} = & 57.58725 + 0.028681x_1 - 0.99858x_2 + 0.47835x_3 + 1.44661x_4 + \\ & 1.58750 \times 10^{-3} x_1 x_2 - 5.20833 \times 10^{-5} x_1 x_3 + 7.43750 \times 10^{-4} x_1 x_4 + 0.24277 x_2 x_3 - \\ & 5.00000 \times 10^{-4} x_2 x_4 - 0.017083 x_3 x_4 - 7.16254 \times 10^{-5} x_1^2 - 0.18009 x_2^2 - 2.94438 \times 10^{-3} x_3^2 - \\ & 0.037424 x_4^2 \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} \text{Renk gid. (\%)} = & 78.09731 - 0.019710x_1 + 12.99724x_2 + 5.08870x_3 - 1.86497x_4 - \\ & 4.75000 \times 10^{-4} x_1 x_2 + 4.16667 \times 10^{-4} x_1 x_3 + 1.50000 \times 10^{-4} x_1 x_4 - 0.53499 x_2 x_3 - \\ & 0.010000 x_2 x_4 + 2.50000 \times 10^{-3} x_3 x_4 + 1.02955 \times 10^{-5} x_1^2 - 0.63336 x_2^2 - 0.13006 x_3^2 + \\ & 0.026002 x_4^2 \end{aligned} \quad (4.6)$$

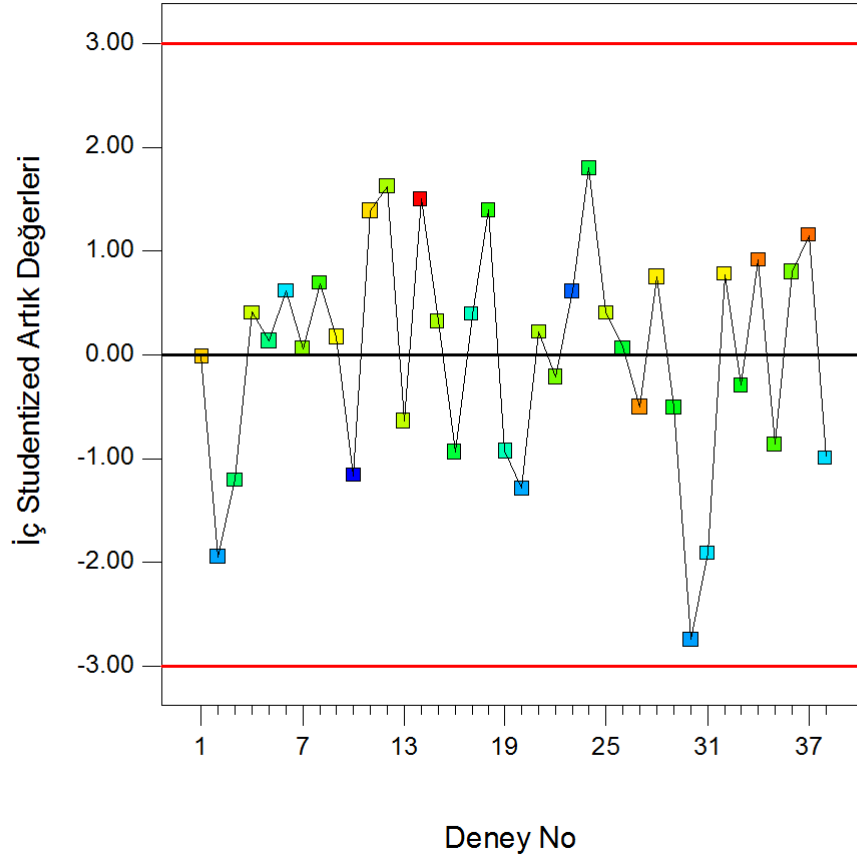
Şekil 4.38'de deneysel ve hesaplanan kimyasal oksijen ihtiyacı giderimi değerleri görülmektedir. Deneysel değerler deneye özgü ölçülen cevap verilerinden, hesaplanan değerler yaklaşım fonksiyonu kullanılarak türetilen ikinci derece modelin hesaplanmasından elde edilmektedir. Kimyasal oksijen ihtiyacı giderimi grafiği için $R^2=0.63$ olarak hesaplanmıştır.



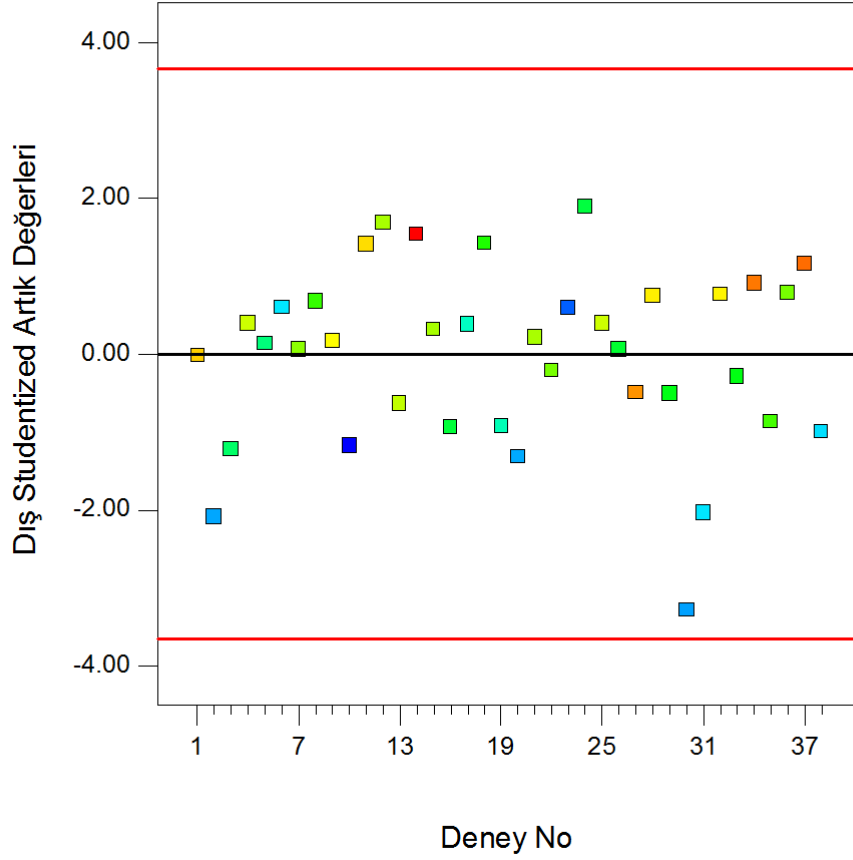
Şekil 4.38. Deneysel ve hesaplanan kimyasal oksijen ihtiyacı giderimi ($R^2 = 0.63$)



Şekil 4.39. Normal olasılık dağılımı



Şekil 4.40. İç studentized artık değerleri



Şekil 4.41. Dış studentized artık değerleri

KOİ giderim modelinin verilere uyumunu gösteren normal olasılık dağılımı, iç studentized artık değerleri ve dış studentized artık değerleri Şekil 4.39, 4.40, 4.41'de verilmiştir. Dış studentized artık değerlerinin ± 3.50 arasında yer alması ve verilerin grafikte gelişigüzel dağılmaları gerekmektedir. İç artık değerleri ± 3.00 , dış artık değerleri ± 3.50 aralığında elde edilmiştir. Normal % dağılım, iç ve dış studentized artık grafikleri incelendiğinde, R^2 değerinin düşük olmasına karşın modelin verilere istatistiksel olarak çok iyi uyum sağladığı belirlenmiştir.

4.4. REAKSİYON KİNETİĞİNİN BELİRLENMESİ

RB160 boyarmaddesinin elektrokoagülasyon yöntemi ile giderimi için optimum koşullarda reaksiyon derecesi belirlenmiştir. Tez kapsamında renk giderimi ilk 10 dakika içinde hızlı biçimde tamamen sağlanırken kimyasal oksijen ihtiyacı gideriminde aynı sürede daha düşük verim elde edilmiştir. Kimyasal oksijen ihtiyacı giderimi daha güç koşullarda sağlandığı için tez kapsamında reaksiyon kinetiği kimyasal oksijen ihtiyacı giderimi temelinde belirlenmiştir.

RB160 boyarmaddesinin elektrokoagülasyon yöntemi ile giderimi için optimum koşullarda reaksiyon derecesini belirlemek amacıyla kimyasal oksijen ihtiyacı derişiminin değiştirildiği kontrollü deneyler planlanmıştır. Başlangıç boyarmadde derişiminin 200 mg/L ile 1000 mg/L aralığında değiştirildiği deneyler 8 dakika reaksiyon süresi için gerçekleştirilmiş ve reaksiyon derecesinin tayini için başlangıç reaksiyon hızı yöntemi uygulanmıştır.

Reaksiyon hız ifadesi;

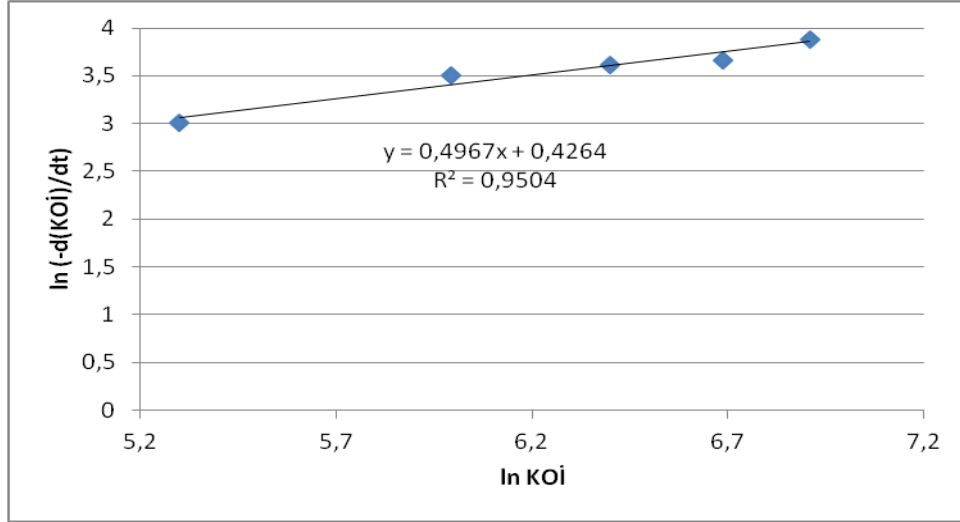
$$-\frac{d[\text{KOİ}]}{dt} = k [\text{KOİ}]^n \quad (4.7)$$

şeklinde yazılabilir. Eşitlik 4.7 doğrusallaştırıldığında Eşitlik 4.8 elde edilir.

$$\ln\left(\frac{-d[\text{KOİ}]}{dt}\right) = \ln(k) + n(\ln[\text{KOİ}]) \quad (4.8)$$

$\ln[\text{KOİ}] - \ln(-d[\text{KOİ}]/dt)$ grafiği çizildiğinde doğrunun eğimi reaksiyon derecesini verirken, doğrunun kayma değeri ise 25°C reaksiyon sıcaklığında özgül reaksiyon hız sabitini vermektedir.

RB160 boyarmaddesinin elektrokimyasal reaksiyonu için reaksiyon derecesi Şekil 4.42'den belirlenmiştir. Şekil 4.42'den reaksiyon derecesi 0,5 ve 25°C'de özgül reaksiyon hız sabiti $1.532 \text{ mg}^{0.5}/\text{L}^{0.5}\text{-dak}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.42. Reaksiyon derecesinin belirlenmesi

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tezde Reactive Blue 160 boyarmaddesini içeren çözeltinin elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtılması hedeflenmiştir. Deneysel çalışmalar demir elektrotlar kullanılarak NaCl elektrolit varlığında kesikli reaktörde gerçekleştirilmiştir.

Cevap yüzey yönteminin uygulandığı, Design-Expert® 8.0 istatistiksel tasarım programı kullanılarak planlanan kesikli sistem deneyleri sonucunda, farklı deney koşulları için sonuçlar genel olarak karşılaştırıldığında kimyasal oksijen ihtiyacı giderimi %52,5 ile %86,7 aralığında, boyarmadde renk giderimi %53,5 ile %99,5 aralığında ve pH değerleri 9,9 ve 11,9 aralığında elde edilmiştir. Elektrokoagülasyon prosesinde akım verimi 0,149 ile 1,000 aralığında, anotlardan çözünen madde miktarı 0,812 ile 4,060 g aralığında, tüketilen enerji miktarı 19,6 ile 377,8 kWh/kg KOİ giderimi ve 3,4 ile 67,8 kWh/kg boyarmadde giderimi aralığında hesaplanmıştır. RB160 boyarmaddesini içeren çözeltinin elektrokoagülasyonunda cevap yüzey yöntemiyle akım yoğunluğu, elektrolit derişimi, boyarmadde derişimi ve reaksiyon sıcaklığı optimize edilmiş ve 400 mg/L başlangıç boyarmadde derişimi, 6 g/L elektrolit derişimi, 11 mA/cm² akım yoğunluğu ve 25°C reaksiyon sıcaklığı optimum koşullar olarak belirlenmiştir.

Optimum koşullarda gerçekleştirilen deneylerde 60 dakikalık reaksiyon süresi sonunda KOİ giderimi % 82.1, boyarmadde renk giderimi % 98.5, enerji tüketim değerleri 17.5 kWh/kg boyarmadde giderimi, 178.7 kWh/kg KOİ giderimi ve akım verimi 0.278 olarak elde edilmiştir.

RB160 boyarmaddesi içeren çözeltinin elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımı sırasında gerçekleşen reaksiyonun derecesi 0,5 ve 25°C'de özgül reaksiyon hız sabiti 1.532 mg^{0.5}/L^{0.5}-dak olarak hesaplanmıştır.

Bu tez kapsamında elde edilen deneysel sonuçların değerlendirilmesi ile RB160 boyarmaddesini içeren tekstil endüstrisi atıksuyunun arıtılmasında elektrokoagülasyon yönteminin başarılı olduğu görülmektedir. Çalışmada 10 dakikalık reaksiyon süresinde boyarmadde gideriminin % 98.5' e ulaşması, yöntemin boyarmadde renk gideriminde etkili olduğunu göstermektedir, ancak KOİ gideriminin % 82.1 olması yüksek KOİ gideriminin elde edilebilmesi için yöntemin ek bir sisteme ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. Çalışmada yüksek derişimlerde boyarmadde içeren çözeltilerin boyarmadde renk giderimi ve KOİ giderimi için yüksek akım yoğunluklarına ihtiyaç duyulmakta ve enerji tüketimi de artmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Önder, E., Koparal, A.S. ve Öğütveren Ü.B., “An alternative method for the removal of surfactants from water: Electrochemical coagulation”, *Separation and Purification Technology*, 52:527–532, (2007).
- [2] Mollah, M.Y.A., Schennach, R., Parga, J.R. ve Cocke, D.L., “Electrocoagulation (EC)—science and applications”, *Journal of Hazardous Materials*, B84:29–41, (2001).
- [3] Kobyay, M., Can, O.T. ve Bayramoğlu M., “Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes”, *Journal of Hazardous Materials*, B100:163–178, (2003).
- [4] Körbahti, B.K., Artut, K., Geçgel, C.ve Özer, A., “Electrochemical decolorization of textile dyes and removal of metal ions from textile dye and metal ion binary mixtures”, *Chemical Engineering Journal*, 173:677– 688, (2011).
- [5] Körbahti, B.K., “Response surface optimization of electrochemical treatment of textile dye wastewater”, *Journal of Hazardous Materials*, 145:277–286, (2007).
- [6] Malkoç, R., “ Reaktif Tekstil Boya Çözeltilerinin Elektrokoagülasyon Yöntemi İle Arıtımının İncelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 132s, Sivas, (2008).
- [7] Körbahti, B.K., “Boya Endüstrisi Su Bazlı Boya Atıksuyu Ve Tekstil Endüstrisi Atıksuyunun Elektrokimyasal Olarak Arıtılması İçin Sistem Tasarlanması Ve Proses Geliştirilmesi”, *Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 189s, Ankara, (2003).
- [8] Birgül, A., “Tekstil Endüstrisi Atıksu Arıtımında İleri Oksidasyon Proseslerinin Kullanımı”, *Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 137s, Bursa, (2006).

- [9] Demirci, C., “Pamuklu Tekstil Endüstrisi Atıksularındaki Rengin Foto-Fenton Prosesiyle Giderimi”, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 56s, Elazığ, (2007).
- [10] Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği,
<http://web.deu.edu.tr/atiksu/ana39/skkypdf.pdf>, (10.07.2012)
- [11] Gür, N.B., “Tekstil Endüstrisi Atıksularının Elektrokoagülasyon İle Arıtılabilirliği”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 55s, Sakarya, (2008).
- [12] Başer, İ. ve İnancı, Y., “Boyarmadde Kimyası”, Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, İstanbul, (1990).
- [13] Endüstriyel ürünler ansiklopedisi, “Solver Kimya”,
<http://www.solverkimya.com/site/makaleler/endustriyel-urunler-makaleleri/boyar-maddeler-ve-reaktif-boya-endustriyel-urunler-ansiklopedisi.html> (10.05.2012)
- [14] Wu, J., Doan, H. ve Upreti S.,” Decolorization of aqueous textile reactive dye by ozone”, Chemical Engineering Journal, 142:156–160, (2008).
- [15] Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R. ve Nigam, P., “Remediation of dyes in textile e.uent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative”, Bioresource Technology, 77:247±255, (2001).
- [16] Hassan, S.S.M., Awwad^b, N.S., Aboterikaa, A.H.A.,” Removal of synthetic reactive dyes from textile wastewater by Sorel’s cement”, Journal of Hazardous Materials, 162:994–999, (2009).
- [17] Bashaa, C.A., Selvakumar^b, K.V., Prabhub, H.J., Sivashanmugamb, P. ve Leea, C.W., “Degradation studies for textile reactive dye by combined electrochemical, microbial and photocatalytic methods”, Separation and Purification Technology, 79:303– 309, (2011).
- [18] Turgay, O., Ersöz, G., Atalay, S., Forss, F. ve Welander, U.,” The treatment of azo dyes found in textile industry wastewater by anaerobic biological method and chemical oxidation”, Separation and Purification Technology, 79:26–33, (2011).

- [19] Khouni, I., Marrot, B. ve Amar, R.B., “Treatment of reconstituted textile wastewater containing a reactive dye in an aerobic sequencing batch reactor using a novel bacterial consortium”, *Separation and Purification Technology*, 87:110–119, (2012).
- [20] Spagni, A., Grilli, S., Casu, S. ve Mattioli D., “Treatment of a simulated textile wastewater containing the azo-dye reactive orange 16 in an anaerobic-biofilm anoxiceaerobic membrane bioreactor”, *International Biodeterioration & Biodegradation*, 64:676-681, (2010).
- [21] Akbari, A., Remigy, J.C. ve Aptel P., “Treatment of textile dye effluent using a polyamide based nanofiltration membrane”, *Chemical Engineering and Processing*, 41:601–609, (2002).
- [22] Khaled, A., Nemr, A.E., El-Sikaily, A. ve Abdelwahab, O.,” Treatment of artificial textile dye effluent containing Direct Yellow 12 by orange peel carbon”, *Desalination*, 238:210–232, (2009).
- [23] Raghu, S. ve Basha C.A., “Chemical or electrochemical techniques, followed by ion exchange, for recycle of textile dye wastewater”, *Journal of Hazardous Materials*, 149:324–330, (2007).
- [24] Chatzisyneon, E., Xekoukoulotakis, N.P., Coz, A., Kalogerakis, N. ve Mantzavinos D., ”Electrochemical treatment of textile dyes and dyehouse effluents”, *Journal of Hazardous Materials*, B137:998–1007, (2006).
- [25] Phalakornkule, C., Polgumhang S., Tongdaung, W., Karakat, B. ve Nuyut T., ”Electrocoagulation of blue reactive, red disperse and mixed dyes and application in treating textile effluent”, *Journal of Environmental Management*, 91:918–926, (2010).
- [26] Tarr, M.A., “Chemical Degredation Methods For Wastes And Pollutants Environmental And Industrial Applications”, *Environmental Science And Pollution Control Series*, New York, 484s, (2003).
- [27] Artut, K., “Sintine Suyunun Elektrokimyasal Yöntemle Arıtımının Araştırılması”, *Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 125s, Mersin, (2008).

- [28] Petrucci, R.H. ve Harwood, W.S., “General Chemistry Principles and Applications”, Prentice-Hall International, New Jersey, Yedinci Baskı, 989 s, (1997).
- [29] Ibanez, J.G., “Electrochemical Remediation Of The Environment: Fundamentals And Microscale Laboratory Experiment”, <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ed075p1040>, (30.05.2012)
- [30] Chafi, M., Gourich, B., Essadki, A.H., Vial, C. ve Fabregat A., “Comparison of electrocoagulation using iron and aluminium electrodes with chemical coagulation for the removal of a highly soluble acid dye”, *Desalination*, 281:285–292, (2011).
- [31] Vardar, B., “Tekstil Endüstrisi Reaktif Boya Banyolarının Elektrokimyasal Yöntemler ile Arıtımı”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 224s, İstanbul, (2006).
- [32] Emamjomeh, M.M. ve Sivakumar M., “Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes”, *Journal of Environmental Management*, 90:1663–1679, (2009).
- [33] Kobyas, M., Bayramoglu, M. ve Eyvaz M.,” Techno-economical evaluation of electrocoagulation for the textile wastewater using different electrode connections”, *Journal of Hazardous Materials*, 148:311–318, (2007).
- [34] İlhan, F., Kurt, U., Apaydın,Ö., Arslankaya, E. ve Gönüllü, M.T., “Elektrokimyasal Arıtım Ve Uygulamaları: Katı Atık Sızıntı Suyu Çalışması”, AB Sürecinde Türkiye’de Katı Atık Yönetimi Ve Çevre Sorunları Sempozyumu, 16s, İstanbul, (2007).
- [35] Körbahti, B.K. ve Tanyolaç, A., “Electrochemical treatment of simulated textile wastewater with industrial components and Levafix Blue CA reactive dye: Optimization through response surface methodology”, *Journal of Hazardous Materials*, 151:422–431, (2008).
- [36] Kobyas, M., Demirbas,E., Can, O.T. ve Bayramoglu M., “Treatment of levafix orange textile dye solution by electrocoagulation” *Journal of Hazardous Materials*, B132:183–188, (2006).

- [37] Merzouk, B., Yakoubi, M., Zongo, I., Leclerc, J.P., Paternotte, G., Pontvianne, S. ve Lopicque, F., “Effect of modification of textile wastewater composition on electrocoagulation efficiency”, *Desalination*, 275:181–186, (2011).
- [38] Chafi, M., Gourich, B., Essadki A.H., Vial, C. ve Fabregat A., “Comparison of electrocoagulation using iron and aluminium electrodes with chemical coagulation for the removal of a highly soluble acid dye”, *Desalination*, 281:285–292, (2011).
- [39] Daneshvar, N., Khataee, A.R. ve Djafarzadeh N., “The use of artificial neural networks (ANN) for modeling of decolorization of textile dye solution containing C. I. Basic Yellow 28 by electrocoagulation process”, *Journal of Hazardous Materials*, B137:1788–1795, (2006).
- [40] Kabdaşlı, I., Vardar, B., Arslan-Alaton, I. ve Tunay O.,”Effect of dye auxiliaries on color and COD removal from simulated reactive dyebath effluent by electrocoagulation” *Chemical Engineering Journal*, 148:89–96, (2009).
- [41] Zidane, F., Drogui, P., Lekhlif, B., Bensaid, J., Blais J.F., Belcadi, S. ve El kacemi K., “Decolourization of dye-containing effluent using mineral coagulants produced by electrocoagulation”, *Journal of Hazardous Materials*, 155:153–163, (2008).
- [42] Merzouk, B., Madani, K. ve Sekki A.,”Using electrocoagulation–electroflotation technology to treat synthetic solution and textile wastewater, two case studies”, *Desalination*, 250:573–577, (2010).
- [43] Daneshvar, N., Oladegaragoze, A.ve Djafarzadeh, N.,”Decolorization of basic dye solutions by electrocoagulation:An investigation of the effect of operational parameters”, *Journal of Hazardous Materials*, B129:116–122, (2006).
- [44] Martins, A.F., Wilde, M.L., Vasconcelos, G. ve Henriques D.M., “Nonylphenol polyethoxylate degradation by means of electrocoagulation

- and electrochemical Fenton” Separation and Purification Technology, 50:249–255, (2006).
- [45] Pajootan, E., Arami, M. ve Mahmoodi, N.M., “Binary system dye removal by electrocoagulation from synthetic and real colored wastewaters”, Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 43:282–290, (2012).
- [46] Merzouk, B., Gourich, B., Madani, K., Vial, C. ve Sekki A., “Removal of a disperse red dye from synthetic wastewater by chemical coagulation and continuous electrocoagulation. A comparative study”, Desalination, 272:246–253, (2011).
- [47] El-Ashtoukhy, E.Z. ve Amin N.K., “Removal of acid green dye 50 from wastewater by anodic oxidation and electrocoagulation—A comparative study”, Journal of Hazardous Materials, 179:113–119, (2010).
- [48] Yıldız, Y.Ş., “Optimization of Bomaplex Red CR-L dye removal from aqueous solution by electrocoagulation using aluminum electrodes”, Journal of Hazardous Materials, 153:194–200, (2008).
- [49] Şengil, İ.A. ve Özacar, M., “The decolorization of C.I. Reactive Black 5 in aqueous solution by electrocoagulation using sacrificial iron electrodes”, Journal of Hazardous Materials, 161:1369–1376, (2009).
- [50] Aoudj, S., Khelifab, A., Drouichea, N., Hecini, M. ve Hamitoucheb H., “Electrocoagulation process applied to wastewater containing dyes from textile industry”, Chemical Engineering and Processing, 49:1176–1182, (2010).
- [51] Balla, W., Essadki, A.H., Gourich, B., Dassaa, A., Chenik, H. ve Azzib M., “Electrocoagulation/electroflotation of reactive, disperse and mixture dyes in an external-loop airlift reactor”, Journal of Hazardous Materials, 184:710–716, (2010).
- [52] Kim, T.H., Park, C., Shin, E.B. ve Kim, S., “Decolorization of disperse and reactive dyes by continuous electrocoagulation proses”, Desalination, 150:165-175, (2002).

- [53] Zodi, S., Potier, O., Lopicque, F. ve Leclerc, J.P., “Treatment of the industrial wastewaters by electrocoagulation: Optimization of coupled electrochemical and sedimentation processes”, *Desalination*, 261:186–190, (2010).
- [54] Secula, M.S., Creţescu, I. ve Petrescu, S., “An experimental study of indigo carmine removal from aqueous solution by electrocoagulation”, *Desalination*, 277:227–235, (2011)
- [55] Alinsafi, A., Khemis, M., Pons, M.N., Leclerc, J.P., Yaacoubi, A., Benhammou, A. ve Nejmeddine, A., “Chemical Electro-coagulation of reactive textile dyes and textile wastewater”, *Engineering and Processing*, 44:461–470, (2005).
- [56] Mollah, M.Y.A., Pathak, S.R., Patil, P.K., Vayuvegula, M., Agrawal, T.S., Gomes, J.A.G., Kesmez, M. ve Cocke, D.L., “Treatment of orange II azo-dye by electrocoagulation (EC) technique in a continuous flow cell using sacrificial iron electrodes”, *Journal of Hazardous Materials*, B109:165–171, (2004).
- [57] Daneshvar, N., Khataee, A.R., Ghadim, A.R.A. ve Rasoulifard, M.H., “Decolorization of C.I. Acid Yellow 23 solution by electrocoagulation process: Investigation of operational parameters and evaluation of specific electrical energy consumption (SEEC)”, *Journal of Hazardous Materials*, 148:566–572, (2007).
- [58] Song, S., Yao, J., He, Z., Qiu, J. ve Chen, J., “Effect of operational parameters on the decolorization of C.I. Reactive Blue 19 in aqueous solution by ozone-enhanced electrocoagulation”, *Journal of Hazardous Materials*, 152:204–210, (2008).
- [59] Arslan-Alaton, İ., Kabdaşlı, I., Hanbaba, D. ve Kuybu, E., “Electrocoagulation of a real reactive dye bath effluent using aluminum and stainless steel electrodes”, *Journal of Hazardous Materials*, 150:166–173, (2008).

- [60] Arslan-Alaton, İ., Kabdaşlı I., Vardar, B. ve Tunay O., “Electrocoagulation of simulated reactive dyebath effluent with aluminum and stainless steel electrodes”, *Journal of Hazardous Materials*, 164:1586–1594, (2009).
- [61] Feng, J., Sun, Y., Zheng, Z., Zhang J., Li, S. ve Tian, Y., “Treatment of tannery wastewater by electrocoagulation”, *Journal of Environmental Sciences*, 19:1409-1415, (2007).
- [62] Merzouk, B., Gourich, B., Sekki, A., Madani, K. ve Chibane M.,”Removal turbidity and separation of heavy metals using electrocoagulation-electroflotation technique: A case study”, *Journal of Hazardous Materials*, 164:215-222, (2009).
- [63] Boroski, M., Rodrigues, A.C., Garcia, J.C., Sampaio, L.C., Nozaki, J. ve Hioka N., “Combined electrocoagulation and TiO₂ photoassisted treatment applied to wastewater effluents from pharmaceutical and cosmetic industries”, *Journal of Hazardous Materials*, 162:448-454, (2009).
- [64] Wan, W., Pepping, T.J., Banerji, T., Chaudhari, S. ve Giammar D.E., “Effects of water chemistry on arsenic removal from drinking water by electrocoagulation”, *Water Research*, 45:384-392,(2011).
- [65] Asselin, M., Drogui, P., Brar, S.K., Benmoussa, H. ve Blais J., “Organics removal in oily bilgewater by electrocoagulation process”, *Journal of Hazardous Materials*, 151:446-455, (2008).
- [66] Un, U.T., Koparal, A.S. ve Ögütveren, Ü.B., “Electrocoagulation of vegetable oil refinery wastewater using aluminum electrodes”, *Journal of Environmental Management*, 90:428-433, (2009).
- [67] El-Naas, M.H., Al-Zuhair, S., Al-Lobaney, A. ve Makhoulf, S., “Assessment of electrocoagulation for the treatment of petroleum refinery wastewater”, *Journal of Environmental Management*, 91:180-185, (2009).
- [68] Uğurlu, M., Gürses, A., Doğar, Ç. ve Yalçın, M., “The removal of lignin and phenol from paper mill effluents by electrocoagulation”, *Journal of Environmental Management*, 87:420-428, (2008).

- [69] Zaied, M. ve Bellakhal, N., "Electrocoagulation treatment of black liquor from paper industry", *Journal of Hazardous Materials*, 163:995-1000, (2009).
- [70] Khemis, M., Tanguy, G., Leclerc, J.P., Valentin, G. ve Lapique G., "Electrocoagulation for the treatment of oil suspensions: Relation between the rates of electrode reactions and efficiency of waste removal", *Process Safety and Environmental Protection*, 83:50-57, (2005).
- [71] Kobya, M., Hız, H., Şentürk, E., Aydın, C. ve Demirbaş, E. "Treatment of potato chips manufacturing wastewater by electrocoagulation", *Desalination*, 190:201-211, (2006).
- [72] Valero, D., Ortiz, J.M., García, V., Expósito, E., Montiel, V. ve Aldaz, A., "Electrocoagulation of wastewater from almond industry", *Chemosphere*, 84:1290-1295, (2011).
- [73] Myers, R.H. ve Montgomery, D.C., "Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments", John Wiley ve Sons, New York, İkinci Basım, 798s., (2002).
- [74] Khuri, A.I. ve Cornell, J.A., "Response Surface Designs and Analyses", Marcel Dekker, New York, İkinci Basım, 510s., (1996).

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Gül Seren Akkuş

Doğum Tarihi: 15/09/1986

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Yıl
Lise	Fen Bilimleri	İçel Anadolu Lisesi	2000-2004
Lisans	Kimya Mühendisliği	Gazi Üniversitesi	2004-2010
Yüksek Lisans	Kimya Mühendisliği	Mersin Üniversitesi	2011-2012

ESERLER (Makaleler ve Bildiriler)

1. Bahadır K. Körbahti ve Gül Seren Akkuş, “Reactive Blue 160 Boyarmaddesi İçeren Tekstil Endüstrisi Boyama Prosesi Atıksuyunun Elektrokoagülasyon Yöntemi ile Arıtımında İşletim Koşullarının Enerji Tüketimine Etkisi”, X. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi, Koç Üniversitesi/İstanbul, sözlü bildiri, 3-6 Eylül 2012.