



**AKRİLİK VE YÜNLÜ BOYA BANYOSU KARMA
ATIKSULARININ ARITILMASINDA
ELEKTROKOAGÜLASYON PROSES PERFORMANSININ
CEVAP YÜZEY METODU İLE İNCELENMESİ**

Kübra KAMACI

Yüksek Lisans Tezi

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Teknolojileri Bilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Serkan BAYAR

Doç. Dr. Uğur KURT

2019

Her Hakkı Saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**AKRİLİK VE YÜNLÜ BOYA BANYOSU KARMA
ATIKSULARININ ARITILMASINDA ELEKTROKOAGÜLASYON
PROSES PERFORMANSININ CEVAP YÜZEY METODU İLE
İNCELENMESİ**

Kübra KAMACI

**ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Çevre Teknolojileri Bilim Dalı**

**ERZURUM
2019**

Her Hakkı Saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

**AKRİLİK VE YÜNLÜ BOYA BANYOSU KARMA ATIKSULARININ
ARITILMASINDA ELEKTROKOAGÜLASYON PROSES PERFORMANSININ
CEVAP YÜZEY METODU İLE İNCELENMESİ**

Dr. Öğretim Üyesi Serkan BAYAR'ın danışmanlığında, Doç. Dr. Uğur KURT'un eş danışmanlığında, Kübra KAMACI tarafından hazırlanan bu çalışma 19/03/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı – Çevre Teknolojileri Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof.Dr.Yaşar NUHOĞLU

İmza :

Üye : Prof.Dr.Yalçın Kemal BAYHAN

İmza :

Üye : Prof.Dr.M.Tolga YILMAZ

İmza :

Üye : Doç.Dr.Uğur KURT

İmza :

Üye : Dr.Öğretim.Üyesi.Serkan BAYAR

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu **28.03.2019** tarih ve **14. / . 28** nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AKRİLİK VE YÜNLÜ BOYA BANYOSU KARMA ATIKSULARININ ARITILMASINDA ELEKTROKOAGÜLASYON PROSES PERFORMANSININ CEVAP YÜZEY METODU İLE İNCELENMESİ

Kübra KAMACI

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Çevre Teknolojileri Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Serkan BAYAR
Eş Danışman: Doç. Dr. Uğur KURT

Yüksek lisans tezi olarak hazırlanan bu çalışmada, tekstil endüstrisi atıksuyunda elektrokoagülasyon prosesiyle renk ve KOİ giderimi: Cevap yüzey metodu ile optimizasyon konusu incelenmiştir.

Bu tez çalışmasında akrilik ve yün iplik boyahane atıksuları için elektrokoagülasyon prosesi ile demir ve alüminyum elektrotlar kullanılarak ayrı ayrı renk ve KOİ parametreleri üzerinden arıtma performansı incelenmiş, her bir prosesin birbirleriyle olan avantaj ve dezavantajları araştırılmış. Elektrokoagülasyon prosesi için cevap yüzey istatistiksel modeli, deneysel kurgu ve sonuçların değerlendirilmesi için kullanılmıştır. Renk ve KOİ giderim verimini belirlemek amacıyla modeller oluşturulmuş ve varyans analizleriyle (ANOVA) modellerin uygunluğu ve modellerde kullanılan her bir terimin anlamlılık düzeyi araştırılmıştır.

Yaptığımız deneyler sonucunda elektrokoagülasyon prosesi ile renk ve KOİ gideriminde yüksek oranda verim elde edilmiştir. Fakat kullanılan demir ve Alüminyum elektrotlar karşılaştırıldığında demir elektrotların alüminyum elektrotlara oranla iyi renk ve KOİ giderimi sağladığı görülmüştür. Sırasıyla Fe KOİ ve renk giderimi %90,45 ile %95'dir, Al KOİ ve renk giderimi %77,52 ve %99,6'dır. KOİ ve renk gideriminde optimum şartlar Fe elektrot için; zaman 27,35 dk, pH 9, Akım 1,82 A, Akım yoğunluğu 61,53 A/m² olduğu görülmüştür. Al elektrotlar için reaksiyon süresi 27,13 dk, pH 7, Akım 1,75 A, Akım yoğunluğu 59,17 A/m² olarak elde edilmiştir.

Optimum şartlarda İşletme maliyetleri, optimize edilmiş koşullarda elektrokoagülasyon prosesi Fe ve Al elektrotları için 2,31 TL/m³ ve 0.68 1,89 TL/m³ atıksu olarak hesaplanmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde her iki elektrot için işletme maliyetlerinin arasında önemli bir fark olmadığı görülmüştür.

2019, 115 sayfa

Anahtar Kelimeler: Cevap Yüzey Metodu, elektrokoagülasyon, tekstil endüstrisi atıksuyu, alüminyum ve demir elektrot, ANOVA, KOİ, renk, maliyet

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF THE ELECTROCOAGULATION PROCESS PERFORMANCE IN THE TREATMENT OF ACRYLIC AND WOOLEN DYE BATH WASTEWATER WITH RESPONSE SURFACE METHOD

Kübra KAMACI

Atatürk University
Graduated School of Natural and Applied Science
Department of Environmental Engineering
Department of Environmental Technologies

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Serkan BAYAR
Assoc. Prof. Dr. Uğur KURT

In this study, which was prepared as a master thesis, color and COD removal by electrocoagulation process in textile industry wastewater: The optimization with answer surface method was examined.

In this thesis, by using electrocoagulation process for acrylic and wool yarn dyehouse wastewater treatment process, iron and aluminum electrodes were used for different color and COD parameters. The advantages and disadvantages of each process were investigated. The response surface statistical model for the electrocoagulation process was used to evaluate experimental fiction and results. In order to determine the color and COD removal efficiency, models were formed and the suitability of the models with variance analysis (ANOVA) and the significance level of each term used in the models were investigated.

As a result of our experiments, high yield was achieved in color and COD removal by electrocoagulation process. However, compared to the iron and aluminum electrodes used, iron electrodes were found to provide good color and COD removal compared to aluminum electrodes. Fe COD and color removal are respectively 90,45% and 95% respectively, Al COD and color removal is 77,52% and 99,6%. Optimum conditions for COD and color removal Fe electrode; time 27,35 min, pH 9, current 1,82 A, current density was 61,53 A/m². The reaction time for Al electrodes was 27,13 min, pH 7, Current 1,75 A, Current density 59,17 A/m².

Operating costs under optimized conditions The electrocoagulation process under optimized conditions was calculated as 2,31 TL/m³ and 0.68 1,89 TL/m³ wastewater for Fe and Al electrodes. As a result of the studies, it was seen that there is no significant difference between the operating costs for both electrodes.

2019, 115 pages

Keywords: Response Surface Method, electrocoagulation, textile industry wastewater, aluminum and iron electrode, ANOVA, COD, color, cost

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamda yaptığım araştırmalar için beni yönlendiren, destek ve yardımlarını esirgemeyen ayrıca her an beni destekleyen değerli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Serkan BAYAR'a teşekkür ederim.

Tezim için değerli desteklerini sunan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Yaşar NUHOĞLU'na, laboratuvar çalışmamı Yıldız Teknik Üniversitesi'nde yapmama olanak sağlayan, atıksu numunelerini teminin etmemde bana yardımcı olan ve ayrıca çalışmalarım boyunca her türlü destek, ilgi ve yardımlarını esirgemeyen değerli eş danışman hocam Sayın Doç. Dr. Uğur KURT'a teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarım boyunca numunelerin hazırlanması ve ölçümlerinin yapılmasında bana büyük katkıları olan, karşılaşmış olduğum zorluklar karşısında ayrıca bilgi ve becerileriyle yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen Sayın Dr. Fatih İLHAN'a ve deneysel tasarım ve optimizasyon konularında yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Sayın Dr. Kübra ULUCAN ALTUNTAŞ'a çok teşekkür ederim.

Çalışmamı tamamlayabilmem için beni cesaretlendiren ve desteklerini sürekli yanımda hissettiğim Ferhan Saniye PALAZ'a, Eda GÜNEŞ'e, Seda TÜRK'e ve Bahar TAŞÇI'ya ayrıca lisans ve yüksek lisans arkadaşlarıma ve atıksu numunelerinin temininde her türlü yardımı sağlayan Yalçın Bey'e (Akınal Tekstil) teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatım boyunca ve çalışmalarım süresince her zaman yanımda olan benden maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen sevgili annem Yıldız KAMACI'ya, sevgili babam Selçuk KAMACI'ya ve kardeşlerime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Kübra KAMACI

Şubat, 2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURUMSAL TEMELLER	3
2.1. Tekstil Endüstrisi.....	3
2.1.1. Tekstil endüstrinin tanımı ve içeriği.....	3
2.1.2. Tekstil endüstrinin tarihçesi, Türkiye’de yeri ve önemi.....	3
2.1.3. Tekstil endüstrisi üretim prosesleri ve işlemleri.....	5
2.1.3.a. Kuru prosesler.....	5
2.1.3.b. Islak prosesler.....	6
2.1.3.c. Tekstil endüstrisinde kullanılan boyarmaddeler.....	11
2.1.3.d. Bazık boyarmaddeler.....	12
2.1.3.e. Asidik boyarmaddeler.....	12
2.1.3.f. Direkt (substansif) boyarmaddeler.....	13
2.1.3.g. Reaktif boyarmaddeler	13
2.1.3.h. Vat (küp) boyarmaddeler.....	14
2.1.3.ı Dispers boyarmaddeler.....	14
2.1.3.i. Kükürt boyarmaddeler.....	14
2.1.4. Tekstil endüstrisi atık sularında kirletici parametreler	14
2.1.5. Tekstil endüstrisi atıksularının özellikleri ve renk giderme yöntemleri.....	16
2.1.6. Biyolojik arıtma yöntemleri	22
2.1.7. Kimyasal ve fizikokimyasal yöntemler	23
2.1.8. Membran teknolojileri.....	24
2.1.9. Kimyasal oksidasyon ve elektrokimyasal yöntemler	25
2.1.9.a. Elektrokimyasal arıtma prosesinin avantaj ve dezavantajları.....	27

2.1.9.b. Elektrokimyasal arıtım türleri	28
2.2. Elektrokoagülasyon Prosesi	30
2.2.1. Elektrokoagülasyon prosesinin tanımı ve teorisi.....	30
2.2.2. Alüminyum elektrotlarla gerçekleştirilen elektrokoagülasyon prosesi	35
2.2.3. Demir elektrotlarla gerçekleştirilen elektrokoagülasyon prosesi	37
2.2.4. Elektrokoagülasyon prosesinde verimi etkikeyen faktörler	39
2.2.4.a. Akım yoğunluğu	39
2.2.4.b. pH	40
2.2.4.c. Elektrot türü	41
2.2.4.d. Elektrotların yerleşimi ve bağlantı tipi	41
2.2.4.e. İletkenlik	43
2.2.4.f. Reaksiyon süresi	44
2.2.4.g. Sıcaklık	44
2.2.5. Elektrokoagülasyon prosesinde kullanılan reaktör tipleri	45
2.2.6. Elektrokoagülasyon prosesinin avantajları.....	48
2.2.7. Elektrokoagülasyon prosesinin dezavantajları	49
2.2.8. Tekstil atıksuları ile yapılan elektrokoagülasyon çalışmaları	49
2.3. Cevap Yüzey Metodu	51
2.3.1. Cevap yüzey metodu (CYM) teorisi	56
2.3.2. Cevap yüzey metodunun istatistiksel analizi	61
2.3.2.a. Optimizasyon	63
2.3.3. Merkezi kompozit dizayn	63
2.3.4. Cevap yüzey metodunun avantajları ve dezavantajları	66
3. MATERYAL ve YÖNTEM	68
3.1. Tekstil Endüstrisi Atıksuyunun Karakterizasyonu	68
3.2. Deney Düzenekinin Kurulumu ve İşletilmesi	69
3.3. Deneyin Yürütülüşü	70
3.4. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Analitik Yöntemler	71
3.4.1. pH	71
3.4.2. İletkenlik	71
3.4.3. Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ)	71
3.4.3.a. Kapalı reflux titrimetrik yöntem	72

3.4.3.b. Reaktifler	72
3.5. Deneyin Yapılışı.....	73
3.6. Hesaplama	74
3.6.1. Renk.....	74
3.7. Elektrokoagülasyon Deneyleri için Cevap Yüzey Metodu Teorisi.....	75
3.8. Analiz Yöntemleri	77
3.9. Elektrokoagülasyon Deneylerinde Kullanılan Hesaplamalar.....	78
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	79
4.1. Demir Elektrotlar ile Yürütülen Elektrokoagülasyon Deney Sonuçları.....	79
4.2. Renk Giderimi	81
4.2.1. KOİ giderimi	86
4.3. Alüminyum Plaka Elektrotlar ile Yürütülen Elektrokoagülasyon Prosesi	
Deney Sonuçları	93
4.3.1. Renk giderimi	94
4.3.2. KOİ giderimi	100
5. TARTIŞMA, SONUÇ ve ÖNERİLER	106
KAYNAKLAR	108
ÖZGEÇMİŞ	116

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

C_{koi}	EC prosesi giderim verimi
λ_e	Seçilen dalga boyundaki arıtım sonrası absorbens değeri (Abs)
λ_o	Seçilen dalga boyundaki başlangıç absorbens değeri (Abs)
A	Aktif elektrot yüzey alanı (m ²)
AC	Alternatif akım
AKM	Askıda katı madde
Al	Alüminyum (elektrot)
ANOVA	Varyans Analizi
APHA	Amerikan Halk Sağlığı Birliği
BBD	Box-Behenken tasarımı
BDD	Borlanmış Elmas Elektrot
BOI ₅	5 günlük Biyolojik oksijen ihtiyacı
CCD	Merkezi Karışık Tasarım
CE	Akım verimindeki kayıp
C _e	Arıtım sonunda elde edilen süzöntüdeki kirletici madde konsantrasyonu
C _o	Atıksudaki başlangıç kirletici madde konsantrasyonu
CYM	Cevap Yüzey Metodu
D	Cevap yüzey metodunda faktörler çekicilik/istenilen hedefe ulaşma fonksiyonu
DAS	Demir amonyum sülfat
DC	Doğru akım
DF	Serbestlik derecesi
d _i	Kısmi çekicilik fonksiyonu
E	Tüketilen elektrik enerjisi(Wsa)
EF	Elektroflotasyon
EK	Elektrokoagülasyon
EO	Elektrooksidasyon
F	Faraday sabiti (coulomb sayısı)
Fe	Demir (elektrot)

I	Akım şiddeti(A)
İSKİ	İstanbul su ve kanalizasyon idaresi
KOİ	Kimyasal oksijen ihtiyacı
m _a	Çözünen maddenin molekül ağırlığını
N	Cevapların sayısı
n	Deneylerin sayısı
N ₀	Sekiz faktöriyel nokta
N _K	Altısı merkez
N _α	Matrisi altısı yıldız noktası
P	Model parametrelerinin sayısı
PAC	Toz aktif karbon
PRESS	Tahminlenmiş kalıntı hata kareler toplamını
Pt	Platinyum (elektrot)
Q	Bir elektrokimyasal hücreden geçen akım miktarı
q _p	Oluşan ürünün harcadığı yük
q _t	Toplam harcanan yük değerini ifade eder
r _i	Belirli bir yanıtın önem derecesi
Ru	Rutenyum (elektrot)
SCD	Küçük Karışık Tasarımdır
SS	Kareler toplamı
SS _{LOF}	Model uygunsuzluğundan dolayı kaynaklanan kareler toplamı
SS _{PE}	Safsızlık hatasından dolayı kaynaklanan kareler toplamı
T	Akım süresi
t	Zaman (saat)
TAKM	Toplam askıda katı madde
TÇM	Toplam çözünmüş madde
Ti	Titanyum (elektrot)
Ti/RuO ₂	Titanyum Üzerine Oksitlenmiş Rutenyum Kaplı Elektrot
Ti/SnO ₂	Titanyum Üzerine Oksitlenmiş Kalay Kaplı Elektrot
TKM	Toplam katı madde
V	Volt
X _{avg}	i'inci faktörde yüksek ve düşük değerlerin ortalaması

X_i	i 'inci faktörde gerçek değer
Y	Bağımlı (gözlenebilen) cevap değişkeni
z	Etkime değerliğini
ε	Tesadüfi hata terimi olarak tanımlanmaktadır
σ^2	Kalıntı ortalama kareyi



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Atıksulardan boya giderimi için kullanılan ana yöntemler.....	19
Şekil 2.2. İki elektrotlu basit bir elektrokoagülasyon reaktörünün kesiti	32
Şekil 2.3. Sulu ortamda ve pH ilişkisi ve Al kompleksleri.....	36
Şekil 2.4. Sulu ortamda pH ilişkisi ve Fe kompleksleri.....	37
Şekil 2.5. Tek kutuplu bağlantı biçimlerinin şematik görünümü.....	42
Şekil 2.6. Çift kutuplu bipolar bağlantı biçiminin şematik görünümü	43
Şekil 2.7. Paralel bağlı monopolar elektrokoagülasyon reaktörü	45
Şekil 2.8. Seri bağlı monopolar elektrokoagülasyon reaktörü	46
Şekil 2.9. Paralel bağlı bipolar elektrokoagülasyon reaktörü	47
Şekil 2.10. X_1 ve X_2 'nin Y 'ye etkisinin cevap yüzey grafiği	58
Şekil 2.11. Kontur grafiği	58
Şekil 2.12. Örnek bir merkezi kompozit dizayn modeli	64
Şekil 2.13. Merkezi kompozit dizaynın kısımları.....	66
Şekil 2.14. İki değişkenli merkezi kompozit dizaynın analitik düzlemde gösterimi	66
Şekil 3.1. Eşit miktarda karışım (1), ön yıkama (2), ön durulama (3) ve son durulama (4)	68
Şekil 3.2. Elektrokoagülasyon deney düzeneği	70
Şekil 3.3. Termoreaktördeki parçalanmış numuneler	73
Şekil 3.4. DAS ile titrasyon sonrası elde edilen kiremit kırmızısı numune	74
Şekil 4.1. Fe plaka elektrotlarla gerçekleştirilen denemelerde akım yoğunluğu ve pH'ın renk giderimi üzerindeki etkisi	83
Şekil 4.2. Fe plaka elektrotlarla gerçekleştirilen denemelerde raeaksiyon süresi ve pH'ın renk giderim verimi üzerindeki etkisi	84
Şekil 4.3. Fe plaka elektrotlarla gerçekleştirilen denemelerde akım yoğunluğu ve reaksiyon süresinin renk giderim verimi üzerindeki etkisi	85
Şekil 4.4. Fe plaka elektrotlarla gerçekleştirilen denemeler için akım yoğunluğu ve pH'ın KOI giderim verimi üzerindeki etkisi	89
Şekil 4.5. Fe plaka elektrotlarla gerçekleştirilen denemeler için zaman ve pH'ın KOI giderimi üzerindeki etkisi.....	90

Şekil 4.6. Fe plaka elektrotlarla gerçekleştirilen denemeler için akım yoğunluğu ve zamanın KOI giderimi üzerindeki etkisi	91
Şekil 4.7. Al plaka elektrotlarla gerçekleştirilen denemeler için akım yoğunluğu ve pH'ın renk giderim verimi üzerindeki etkisi	97
Şekil 4.8. Al plaka elektrotlarla gerçekleştirilen denemeler için zaman ve pH'ın renk giderim verimi üzerindeki etkisi	98
Şekil 4.9. Al plaka elektrotlarla gerçekleştirilen denemeler için akım yoğunluğu ve zamanın renk giderim verimi üzerindeki etkisi.....	99
Şekil 4.10. Al plaka elektrotlarla gerçekleştirilen denemeler için akım yoğunluğu ve pH'ın KOI giderim verimi üzerindeki etkisi	102
Şekil 4.11. Al plaka elektrotlar ile gerçekleştirilen denemeler için zaman ve pH'ın KOI giderimi üzerindeki etkisi.....	103
Şekil 4.12. Al plaka elektrotlar ile gerçekleştirilen denemeler için akım yoğunluğu ve zamanın KOI giderimi üzerindeki etkisi	104

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Boyama işleminde en sık kullanılan kimyasal maddeler.....	9
Çizelge 2.2. Tekstil endüstrisinde uygulanan proseslerde kullanılan kimyasallar ve atıksu.....	11
Çizelge 2.3. Elyaf türlerine uygulanan boyarmaddeler	12
Çizelge 2.4. Tekstil atıksuların temel kirletici parametreler.....	15
Çizelge 2.5. Boya sınıflarına göre renk giderme metotları.....	18
Çizelge 2.6. Tekstil endüstrisi atıksularının arıtılması için kullanılan çeşitli teknolojilerin karşılaştırması.....	20
Çizelge 2.7. Tekstil sanayi (yün yıkama, terbiye, dokuma ve benzer sektörler) atıksularının alıcı ortama deşarj standartları.....	21
Çizelge 2.8. İleri oksidasyon proseslerinin genel sınıflandırması	27
Çizelge 2.9. Fe^{3+} ve Fe^{2+} sulu ortamda oluşan hidroksil kompleks türleri	38
Çizelge 3.1. Tez çalışmasında kullanılan tekstil endüstrisi atıksuyunun karakterizasyonu	69
Çizelge 3.2. Akımın, Akım yoğunluğuna çevrilmesi	70
Çizelge 3.3. Elektrokoagülasyon deneyi için bağımsız değişkenler ve deneysel aralıklar	75
Çizelge 3.4. Elektrokoagülasyon prosesinin optimizasyonu için bağımsız değişkenlerin kodlanmış ve gerçek değerleri.....	76
Çizelge 4.1. Elektrokoagülasyon hesap tablosu.....	79
Çizelge 4.2. Demir palaka elektrotlar ile gerçekleştirilen elektrokoagülasyon prosesinde deneysel çalışmalar sonucu elde edilen ve model yardımıyla tahmin edilen KOİ ve renk giderim verimleri	80
Çizelge 4.3. Demir plaka elektrotlar ile gerçekleştirilen elektrokoagülasyon prosesi ile renk gideriminde ANOVA (varyans analizi) sonuçları	81
Çizelge 4.4. Demir plaka elektrot ile gerçekleştirilen elektrokoagülasyon prosesi ile KOİ gideriminde ANOVA (varyans analizi) sonuçları	87
Çizelge 4.5. Demir plaka elektrot için optimum değerler.....	92

Çizelge 4.6. Alüminyum palaka elektrotlar ile gerçekleştirilen elektrokoagülasyon prosesinde deneysel çalışmalar sonucu elde edilen ve model yardımıyla tahmin edilen KOİ ve renk giderim verimleri	94
Çizelge 4.7. Alüminyum plaka elektrotlarla gerçekleştirilen elektrokoagülasyon prosesi ile renk gideriminde ANOVA (varyans analizi) sonuçları.....	95
Çizelge 4.8. Alüminyum plaka elektrotlar ile gerçekleştirilen elektrokoagülasyon prosesi ile KOİ gideriminde ANOVA (varyans analizi) sonuçları.....	100
Çizelge 4.9. Alüminyum plaka elektrotlar için optimum değerler	105



1. GİRİŞ

İlk olarak, tekstil endüstrisinin tanımı, içeriği, kullanılan boyarmaddeler, üretim proses ve işlemleri incelenmiştir. Tekstil endüstrisinde kullanılan boyarmaddeler alt başlıklar halinde bahsedildikten sonra tekstil endüstrisi atıksularının kirletici parametreleri açıklanmıştır. Daha sonra tekstil endüstrisi atıksularının özellikleri ve renk giderme yöntemlerinin incelenmesi yapılmıştır. Elektrokimyasal arıtma prosesinin avantaj ve dezavantajlarında bahsedilmiştir.

Daha sonra, elektrokimyasal arıtma uygulamalarından elektrokoagülasyon prosesinin tanımı, alüminyum ve demir elektrotlarla gerçekleştirilen proseslere değinilmiştir. Elektrokoagülasyon prosesinde verimi etkileyen faktörler alt başlıklar halinde açıklanmıştır. Daha sonra prosesde kullanılan reaktör tiplerinden ayrı ayrı bahsedilerek avantaj ve dezavantajları açıklanmıştır. Literatür incelenerek son zamanlarda elektrokoagülasyon prosesi ile endüstriyel atıksu arıtımı üzerine yapılan çalışmalar incelenmiştir.

Ardından, deneysel tasarım yöntemi olarak cevap yüzey metodu (CYM) ele alınmış ve elektrokoagülasyon deneyleri bu istatistiksel yöneme dayanılarak incelenmiştir. Elektrokoagülasyon prosesinin verimi, KOİ ve renk giderimi ile ifade edilerek, pH, akım yoğunluğu ve zaman parametrelerinin etkisi cevap yüzey metodu kullanılarak araştırılmıştır. Renk ve KOİ giderim verimini belirlemek amacıyla modeller oluşturulmuş ve varyans analizleriyle (ANOVA) modellerin uygunluğu ve modellerde kullanılan her bir terimin anlamlılık düzeyi araştırılmıştır. Cevap yüzey metodunun çeşitli dizaynları arasında en çok kullanılan iki dizaynı, 'Merkezi kompozit' ve 'Box-Behnken' dizaynları incelenmiştir. Daha sonra cevap yüzey metodunun avantaj ve dezavantajlarına değinilmiştir.

Devamında, tez kapsamında kullanılacak olan İstanbul Topkapı' da bulunan tekstil terbiye alanında faaliyette gösteren Akınal Yünlü bir tekstil fabrikasından Temmuz 2018 yılında

temin edilmiş atıksuyunun karakterizasyonu ve deney düzeneğinin kurulumu ve işletilmesi ele alınmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan analitik yöntemler adım adım incelenmiştir. Daha sonra elektrokoagülasyon deneyleri için cevap yüzey metodu teorisi ve analiz yöntemleri açıklanmıştır. Akrilik ve yünlü boya banyo atıksuları için belirlenen bağımsız proses değişkenleri yani pH, reaksiyon süresi ve akım yoğunluğu çizelgeler halinde gösterilmiştir. Elektrokoagülasyon deney sonucunda kullanılacak hesaplamalar için formüller bildirilmiştir.

Ardından, deneysel çalışmalarda elde edilen KOİ ve renk giderim verimlerinin değerlendirilmesi yapılarak sonuçlar STATISTICA programı ile analiz edilip 3 boyutlu CYM grafikleri çizilmiştir. Elde edilen sonuçlara dayanılarak Varyans analizine göre optimum sonuçlar belirlenmiştir.

Bu çalışmada ki amaç tekstil endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtılması, KOİ ve renk giderim verimlerinin belirlenmesi ve maliyet hesaplarının yapılması. Bu amaç doğrultusunda elektrokoagülasyon prosesi için Fe ve Al elektrotlar kullanılarak arıtma verimi üzerindeki etkili olan değişkenler cevap yüzey metodu yardımıyla incelenmiştir. Optimum değerler bulunmaya çalışılarak enerji tüketimi. Maliyet hesabı ve verim yüzdeleri ayrı ayrı bulunmuştur.

2. KURUMSAL TEMELLER

2.1. Tekstil Endüstrisi

2.1.1. Tekstil endüstrinin tanımı ve içeriği

Tekstil endüstrisi, üretilmiş ve doğal elyaf kullanarak tekstil ürünleri ve kumaş üreten tesisleri kapsar (Koby vd 2007). İmalat yapan sanayii içerisinde yer alan en kompleks ve uzun endüstriyel zincirlerden birisi tekstil endüstrisidir. Giyim, ev tekstilleri ve endüstriyel kullanım alanları bulunmaktadır. Tekstil endüstrisi, hammaddelerden (kimyasal lifler), nihai ürünlerin (giyim, halılar, ev tekstilleri ve endüstriye kullanıma sahip tekstiller) ve yarı işlenmiş ürünlerin (örme kumaşlar, dokuma ve iplik ile bunların terbiye işlemleri) üretimine kadar olan üretim halkasının tamamını kapsayan çok sayıdaki alt sektörden oluşmaktadır (BAT 2002).

Bu endüstrinin kullandığı malzemeler, endüstriyel, evsel ve ticari pazarlar için iplik, kumaş ve kullanıcılar için yapılan ürünlerden oluşmaktadır. Genel olarak tekstil endüstrisinde kullanılan hammaddeler;

- Bitkisel kaynaklı iplikler, pamuk ve keten
- Yapay iplikler, naylon ve akrilik gibi
- Hayvansal kaynaklı iplikler, yün ve ipek gibi 3 gruba ayrılmaktadır (Etki, 2013).

2.1.2. Tekstil endüstrinin tarihçesi, Türkiye’de yeri ve önemi

Tekstil endüstrisi dünyada ki en eski sanayi dallarından birini oluşturmaktadır. İlk olarak Mısırlılara ait mağaralarda (M.Ö. 5000) giysi kalıntıları şeklinde bulunmuştur. 1500 lü yılların başlarında tekstil endüstrisi ilk üretim tesislerini kurarak hız kazanmaya başlamıştır. Geçmişte olduğu gibi şimdide gelişmekte olan ülkelere tekstil ve hazır giyim sanayisi önemli katkı sağlamaktadır. Avrupa’nın önde gelen tekstil üreticileri sırasıyla

İtalya, Almanya, İngiltere, Fransa ve İspanya'dır. Bu ülkeler birlikte, AB tekstil üretiminin %80'ninden fazlasını gerçekleştirmektedirler (Vandervivere *et al.* 1998).

Türkiye'de tekstil endüstrisi geçmişe dayanan bir tarihi bulunmaktadır. Anadolu'da ise dokumacılığın Selçuklulardan da eskiye dayandığı bilinmektedir. Bu bilgi sayesinde Osmanlı İmparatorluğu zamanında da sanayi tekstil üzerine dayalı olarak gelişmiştir (Etki 2013).

Tekstil sektörü, gerek duyulan doğal elyaflar (pamuk ve yün), hayvancılık sektörü, tarım ve yapay elyaflar sebebiyle petro-kimya sanayi ile iç içedir. Türkiye'nin hazır giyim ve tekstil ihracatındaki payı göz önünde bulundurulduğunda bu sektör ülkenin ana sanayilerinden biri olarak görülmektedir (Etki 2013).

Türkiye'de tekstil endüstrisi üretim ve istihdama katkısı ve ihracat yoluyla ekonomiye yön vermesi sebebiyle ekonominin en önemli sektörü olma özelliğini korumaktadır. Türkiye'de rekabetçiliğinin arttırılması ve sürdürülmesi bakımından tekstil endüstrisinin ekonomiye katkısı büyüktür. Türkiye'nin üretimde yüksek kapasite, hammaddede bolluk, endüstrideki bilgi birikimi ve deneyim, teslimatın kısılalığı, uygun maliyet, kaliteli üretim ile ürün çeşitliliği gibi faktörlerden dolayı üstünlüğü kaynaklanmaktadır.

Türkiye Cumhuriyetin tekstil sektöründe 1950, konfeksiyon sektöründe 1970'li yıllarda net ihracatçı konumuna ulaşmıştır. 1980 yılında ihracatta gösterdiği başarıyı, üstün ekonomik performans ile birleştirerek günümüze kadar taşıyan sektör, enerji maliyetinden, hammadde teminine, yatırımlardan kapasite kullanım oranına, dış ticaretten yabancı ülkelerle ilişkilerine uzanan geniş bir görünüşü ortaya koymaktadır. Türkiye'de en fazla yarar sağlayan sektörlerden birisi tekstil endüstrisi olmuştur (Çalışır 2010). Dünya genelinde tekstil sektöründe Türkiye en büyük kapasiteye sahip on ülke arasında yerini almaktadır (Kınacı 2006).

2.1.3. Tekstil endüstrisi üretim prosesleri ve işlemleri

Endüstride ki prosesler, yapılan hammaddenin özelliğinden kaynaklı farklılıklar gösterebilir ama genellikle birbirlerine benzeyen özellikler göstermektedir. Bu endüstride üretilmiş elyaflar kullanılarak tekstil ürünleri ve kumaş üretilmektedir. Tekstil endüstrisi fabrikasyon ve ham ipliklerinin hazırlanması, dokuma, örme veya başka yöntemlerle triko, kumaş, halı gibi terbiye işlemlerinin uygulanması işlemlerini içermektedir. Tekstil endüstrisinin temel prosesleri içinde boyama yıkama ve baskı yer almaktadır (Göknil vd 1984).

Tekstil ürünleri kuru ve ıslak prosesler olarak ikiye ayrılır. Islak prosesler kuru proseslere göre çoğunlukla apre ve boyama işlemlerini içermektedir. Su kullanımı gerektirmediklerinden dolayı kuru prosesler kirlenme açısından daha az önem taşımaktadır. Islak prosesler su kullanımını gerektirmektedir (Sözen 1991).

Kuru ve ıslak prosesler olarak adlandırılan işlemler aşağıda listelenmiştir.

2.1.3.a. Kuru prosesler

İplik üretimi;

- Bükme
- Bobinlere Aktarma
- Eğirme
- Çekerek Büzme
- Elyaftan İplik Çekme adımlarını kapsar (Sözen 1991).

Uzun ve ince ürünlerin üretimi

Üretim büküm ve örgü aşamalarından meydana gelmektedir (Sözen 1991).

Açık enli ürünlerin üretimi

Burada üretim keçeleştirme, dokuma ve sağlamlaştırma, flokleştirme ve örgü adımlarıyla meydana gelmektedir (Sözen 1991).

2.1.3.b. Islak prosesler

Yıkama

Yapay ve doğal malzemelerde istenmeyen maddelerin uzaklaştırılması işlemidir. Pamuk liflerinin arasına giren yağ, parafin, yaprak gibi maddeleri pamuktan uzaklaştırmak için uygulanmaktadır (Woerner 2003). Yıkama işlemi gerçekleşirken içinde sabun veya deterjan bulunan sıcak alkali çözeltiler (çoğunlukla soda külü veya kostik soda) kullanılmaktadır. Pamuğun yetiştirilmesi aşamasında kullanılan kimyasal maddeler yıkama sırasında atıksuya geçmektedir (Sözen 1991). Sentetik elyaflara göre yün ve pamuk elyaflar daha çok yıkamaya ihtiyaç duyarlar. Tekstil endüstrisinde yünün yıkanması kirlilik yükü en fazla olan basamaktır (Corriea *et al.* 1994).

Haşılama

Pamuk elyafların dokuma hazırlık işlemi olan haşılama sırasında kumaş elde edilirken dayanıklılık kazanması için üstlerinin asetat, nişasta, karboksimetil selüloz, polivinil gibi maddelerle çevrelenmesi işlemidir (Özkan 2007). Bu proseste atıksuyun miktarı azdır fakat kirlilik yükü biraz yüksektir (Sözen 1991).

Haşıl Sökme (Ön Yıkama)

Kumaştan haşıl maddelerin atılması işlemidir. Haşılama işleminden sonra yapılır. Su, alkaliler, enzimler, asitler ve oksidasyon maddeleri başlıca haşıl sökme maddeleridir

(Özkan 2007). İşlemden çıkan atıksuyun karakteri içinde ki maddelere bağlıdır. Çıkan atıksu katı madde ve BOİ içeriğine sahiptir (Sözen 1991).

Ağartma

Ağartma işleminde kimyasallar (sodyum bisülfid, hidrojen peroksit, sülfirik asit , sodyum klorit, hipoklorik asit, kostik soda, sodyum hipoklorit) kullanılarak istenmeyen renkler giderilmektedir. Tekstil ürünlerinin daha iyi bir görünüp kazanması ve üründeki doğal sarımsı rengin beyazlatılmasıdır (Woerner 2003). Ağartma işleminin yapılmasının en büyük nedeni tam bir beyazlık sağlanma isteğidir. Doğal liflerin ağartılması yapay liflere oranla daha çok gerekmektedir (Kurt 2012).

Merserizasyon

Bu işlem pamuklu iplik, elyaf veya kumaşların boyayı daha iyi tutmasını sağlayarak parlaklığını artırmak amacıyla yapılmaktadır. Merserizasyon sırasında malzeme konsantre kostik soda banyosundan geçirilmektedir. Çıkan ürünün parlaklığını ve yumuşaklığını artırmak için sülfirik veya hidroklorik asit kullanımıyla nötralize (asitli yıkama) edilir (Sözen 1991).

Karbonizasyon

Yünün içerisinde bulunan bitkisel artıkların, mekanik işlemle veya yıkama ile giderilemediği durumlarda yapılan ‘kömürleştirme’ de denilen işlemdir (Sözen 1991). Bu işlemde yüne herhangi bir zararı olmayacak şekilde yüksek sıcaklıkta güçlü asitler kullanılarak selülozu parçalamak ve daha sonra güçlü asitlerin etkisini yok etmek için nötralizasyon ve yıkama yapılır. Asitli maddelerden dolayı çıkan atıksuda çözünmüş madde miktarı yüksektir (Corriea *et al.* 1994).

Pişirme ve Kaynatma

Doğal ve sentetik malzemelerde ki istenmeyen, görünümü bozan, doğal liflerinin arasına giren yağ, parafin, yaprak gibi maddelerin uzaklaştırılması için uygulanmaktadır. Uygulama esnasında, sabun veya deterjan içeren sıcak alkali zeltiller kullanılabilir. Bu işlem sonucunda atıksuya pamuğun yetişmesinde kullanılan kimyasal maddelerinde geçmesiyle atıksular toksik özellik göstermektedir. Kaynatma işlemide normal atmosfer basıncı altında yaklaşık 100°C yapılmaktadır (Sözen 1991).

Kasarlama

Pamuk ve elyafların parlaklığının artırılarak yeşilvari olan doğal renklerinin giderilmesi için yapılmaktadır. Kasar işleminde sodyum hipoklorit veya hidrojen peroksit kullanılmakta ve ek olarak yüzey aktif maddeler, hipoklorikasit, sodyum bisülfit kostik soda ve sülfürik asit kullanılmaktadır (Sözen 1991).

Boyama

Elyafı, ipliği ve kumaşı renklendirmek için yapılmaktadır. Boyama işlemleri kesikli boyama, yarı sürekli boyama veya sürekli boyama olarak uygulanmaktadır (Sözen 1991). Bu süreçte su tüketimi boya banyosunda ve sonrasında ki durulama ve yıkamada da fazladır. Boyama işleminde boyanın lif üzerinde ki tutunmasını artırmak için suya (sülfür, tuzlar, yüzey aktifler, sülfit, formaldehit, metaller) kimyasallar eklenmektedir. Eklenen bu kimyasallar temel kirliliği, düşük organik madde miktarı ve yüksek renge sahip atıksular oluşturur (Kocaer ve Alkan 2002). Tekstil sektörü atıksularında ortaya çıkan en büyük problem yüksek miktarda boyarmadde ve bozulmayan kimyasal madde içermesidir. ıkış sularında bulunan kimyasalların yaptıkları bileşikler, sulara kirletici özellik ve renk vermektedir (Corriea *et al.* 1994). Çizelge 2.1'de boyama işleminde en sık kullanılan kimyasal maddeler verilmiştir.

Çizelge 2.1. Boyama işleminde en sık kullanılan kimyasal maddeler (Kocaer ve Alkan 2002)

Kimyasal Madde	Bileşim	Fonksiyon
Kompleks Yapıcılar	Etilen diamin tetra asetik asit (EDTA)	Kompleks oluşturma, yavaşlatıcı
Asitler	Sülfürik asit, Asetik asit	pH kontrolü
Bazlar	Sodyum karbonat, Sodyum hidroksit	pH kontrolü
Tamponlar	Fosfat	pH kontrolü
Tuzlar	Sodyum klorür, Sodyum nitrat, Sodyum sülfat	Elyafın zeta potansiyelini nötralize edici
İndirgeyici Maddeler	Sodyum sülfid, Sodyum hidrosülfid	Reaksiyona girmemiş boyanın uzaklaştırılması, Boyaları çözünabilir yapma,
Düzenleştirici ve yüzey aktif maddeler	Anyonik, katyonik ve noniyonik	Boya uygulamasını düzene sokma, Boyaları dağıtma
Okside Edici Maddeler	Sodyum nitrit, Hidrojen peroksit	Boyaları çözünemez yapma
Taşıyıcılar	Klorlu benzenler, Fenil fenoller	Adsorpsiyonun artırılması

Tekstil endüstrisinde ortaya çıkan atıksuların esas kaynağı boyama işlemleridir. Boyama işleminde kullanılan tekstil boyalarının yapısını ve rengini sürdürebilmesi için oldukça yüksek kimyasal ve fotolitik kararlılığa sahip olmaları gerekmektedir. Tekstil endüstrisinde kullanılan boyarmaddenin, boyama işleminde de kullanılabilmesi için renkliliği ve elyaf üzerine bağlanabilmesi gerekmektedir. Tüm renkli organik bileşikler, içinde renkleri oluşturan doymamış kromofor grubu barındırmaktadır. Bu grubu barındıran bileşikler kromojen olarak adlandırılırlar. Kromojenin boyarmadde olması için molekülde kromofordan ayrı olarak yer değiştiren amino (-HR, -NR₂), hidroksil (-OH), oksokrom denilen amino (-NH₂), karboksil (-COOH), sülfonik (-SO₃H) ve metoksil (-OCH₃) gruplarının da olması gerekmektedir. Kromofor grupları; etilenik çift bağ (-C=C-), nitrozo (N₂O), karbonil (C=O), azo (-N=N-), nitro (R.NO₂), tiyokarbonil (-C=S-) gibi çift bağlı gruplarından oluşmaktadır (Arıcı 2000; Koby 2008).

Tekstil endüstrisi proses atıksuları oldukça renkli atıksulardır ve genellikle yüksek konsantrasyonlarda boyarmadde içermektedirler. Arıtım proseslerinden herhangi birini uygulamadan alıcı ortama doğrudan deşarj edildiklerinde birkaç probleme sebep olabilmektedirler. Başta, boyaların doğada biyoakümülyasyonuna ve toksik etki göstermeleri sebep olmalarıdır. Boyarmaddeler kimyasal ve fotolitik olarak dayanıklı olduklarından, doğal çevrede inatçı ve kalıcı olmaktadırlar. Bu yüzden, arıtılmadan çevreye deşarj edilmesi ekotoksik tehlike oluşturmakta, diğer taraftan görünüş olarak estetik problemlere sebep olmaktadır. Boyarmaddeler, canlılar üzerinde toksik etki oluşturmaktadır. Boyanın besin zincirine girip besin maddesi olarak kullanılması sonucu suda yaşayan canlıların yanı sıra insan vücuduna kadar geçtiği görülmüştür (Kamag Projesi 2013).

Baskı

Tekstil malzemeleri kumaş haldeyken baskı boyamaya tabi tutulur. Basılacak kumaş genellikle beyaz olur. Ön boyamadan geçirilmiş kumaşlar üzerine de baskı yapılabilir. Direkt (Aplike) baskı, aşındırma ve rezerve baskı belli başlı baskı yöntemleridir (Özkan 2007).

Apreleme ve Bitim

Kumaşa su geçirmezlik, çekmezlik, buruşmazlık, ateşe dayanıklılık, saydamlık, iyi bir görünüş, yumuşaklık ve düzgünlük gibi istenilen özelliklerin kazandırıldığı son aşamadır. Bu proseste sentetik reçine, amonyum ve çinko klorür, dekstrin, nişasta, doğal ve yapay vakslar, ıslatıcılar ve yumuşatıcı maddeler kullanılmaktadır (Sözen 1991).

Çizelge 2.2’de tekstil endüstrisinde uygulanan proseslerde kullanılan atıksu özellikleri ve kimyasallar gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Tekstil endüstrisinde uygulanan proseslerde kullanılan kimyasallar ve atıksu

PROSES	KULLANILAN KİMYASALLAR	ATIKSU KARAKTERİSTİKLERİ
Haşılama	Nişasta, polivinil asetat selüloz, , poliakrilat ve yapıştırıcı	Az atıksu hacmi, yüksek TAM, BOİ ₅ ve KOİ
Haşıl Sökme	Enzimler, asit ve alkali	Çok yüksek BOİ ₅ ve TKM (haşılamada nişasta kullanılmış ise)
Yıkama	Sıcak kostik soda, deterjanlar, klor, peroksitler, silikat, sodyum bisülfıt,	Kirletici yükünün %35 ve çıkış BOİ ₅ konsantrasyonunun %3 değeri
Ağartma	NaOCl, H ₂ O ₂ , H ₂ SO ₄ , HCl, kostik soda, sodyum bisülfıt	Yüksek TKM, yüksek çözünmüş katılar ve orta dereceli BOİ ₅
Merzerizasyon	Konsantre kostik soda ve asit yıkama	Düşük BOİ ₅ ve TKM Nötralizasyondan önce oldukça alkali
Boyama	Boyalar ve kullanılan yardımcı kimyasallar	Yüksek renk, TÇM, pH ve BOİ ₅ düşük TAM, toksikler
Apreleme	Pentaklorofenoller, etilklorofosfatlar	Düşük hacimde çeşitli bileşenler ve toksisite

2.1.3.c. Tekstil endüstrisinde kullanılan boyarmaddeler

Malzemenin renklendirilmesi ve yüzeyinin renk verici madde ile kaplanması veya malzemenin kendisinin renkli hale getirilmesi şeklinde iki farklı yöntemle gerçekleştirilir. Bu işlemlerdeki renk verici maddelere boya denir. Boyalar, malzemenin yüzeyine fiziksel olarak bağlanırlar ve kazınabilir bir film tabakası oluşturarak malzemeyi renkli hale getirirler. Malzemelerin kendilerinin renkli hale getirilmesinde kullanılan maddelere boyarmadde adı verilir. Boyarmaddeler renklendirilecek malzeme ile devamlı bir biçimde birleşerek cismin yüzeyini yapı bakımından değiştirir. Bu bağlanma kimyasal veya fiziko-kimyasal yollarla gerçekleşir. Tekstil endüstrisinde malzemenin renklendirilmesi amacıyla boyarmaddeler kullanılır.

Tekstil endüstrisinde kullanılan boyarmaddeler boyadıkları elyaf türlerine göre farklılık gösterirler. Çizelge 2.3’de elyaf türlerine uygulanan boyarmaddeler yer almaktadır (Doğan 2010).

Çizelge 2.3. Elyaf türlerine uygulanan boyarmaddeler

Selüloz elyaf	Protein Elyaf	Sentetik Elyaf		
		Poliamid	Poliester	Poliakrilonitril
Direkt Boyarmadde	Asit Boyarmadde	Asit Boyarmadde	Dispers Boyarmadde	Bazik (katyonik) Boyarmadde
Reaktif Boyarmadde	Metal Kompleks Boyarmadde	Metal Kompleks Boyarmadde	-	Dispers Boyarmadde
Pigment Boyarmadde	Reaktif Boyarmadde	Kromlama Boyarmadde	-	-
Kükürt Boyarmadde	Kromlama Boyarmadde	Dispers Boyarmadde	-	-
Küp Boyarmadde	-	-	-	-
Oksidasyon Boyarmadde	-	-	-	-

2.1.3.d. Bazik boyarmaddeler

Moleküllerinde pozitif (+) yük taşıyan boyarmaddelere “bazik (katyonik) boyarmadde” adı verilmektedir. Ayrıca pozitif yük taşıyan tek boyarmadde ve ortam alkaliliği arttıkça suda çözünmeyen boyarmadde bazlarına dönüşür (Doğan 2010). Organik bazların hidroklorürleri veya asetat tuzları olarak, katyonik grubu renkli kısımda taşırlar. Azot veya kükürt atomunu pozitif yük taşıyıcı olarak içerirler. Bazik boyaların belirgin özellikleri parlaklıkları ve renk şiddetleridir. 80-90°C’de kumaştan ayrılmayarak hızlıca poliakrilik elyafını boyarlar. Renk indekste bulunan bütün boyarmaddelerin yaklaşık %5’i bazik boyarmaddeler sınıfına girmektedir (Sevimli 2000; Van der Zee 2001).

2.1.3.e. Asidik boyarmaddeler

Adından da anlaşılacağı üzere molekülleri üzerinde asidik gruplar bulunduran, asidik özellik gösteren boyalardır. Aslında anyonik boyarmaddeler, boyama prosesinin asidik su çözeltisinde (pH=2-6) gerçekleşmesinden ve hemen hepsinin organik asitlerin

tuzlarından oluşmasından dolayı bu ismi alırlar. En büyük avantajları, ucuz olmaları, ışık haslıklarının iyi olması, kolay ve düzgün boyama sağlamaları, parlak ve canlı renk vermeleridir (Doğan 2010). Başlıca katyonik modifiye poliakrilonitril elyafı, yün, poliamid elyaf ile ipek boyamada kullanılır ayrıca kâğıt, deri, kürk ve besin boyarmaddesi olarak da uygulanabilir (Van der Zee 2001).

2.1.3.f. Direkt (substansif) boyarmaddeler

Direkt boyarmaddeler, selülozik lifin boyanmasında ön işlem gerektirmeden doğrudan boyama yapılabilen ve substansif olarak da adlandırılan boyarmaddelerdir. Anyonik yapıda olup suda iyi çözünürler. Bu boyarmaddelerin çoğu poliazo-disazo grubu taşıyan azo boyarmaddelerdir. Kimyasal yapı bakımından asit boyarmaddelere benzerler fakat boyama yönteminde asit boyarmaddelerden ayrılırlar. Direkt boyarmaddeler çoğunlukla sülfonik kimi zaman da karboksilik asitlerin sodyum tuzları şeklindedir (Doğan 2010).

Direkt boyaların tercih edilme sebepleri; ucuz olmaları, boyama esnasında elyafın yıpranmaması ve boyama işlemlerinin çok basit oluşudur. Genellikle selüloz liflerin boyanmasında kullanılırken Bazıları da kâğıt, deri, ipek ve naylon boyamada kullanılırlar (Kiernan 2001; Zee 2002).

2.1.3.g. Reaktif boyarmaddeler

1953 yılında yüne uygulanacak bir boya araştırılırken tesadüfen bulunmuştur. Özellikleri küçük ve basit molekül yapılarına sahip olmalarıdır. Diğer boyarmaddelerden farklı olarak lif molekülleri ile kimyasal reaksiyona girerek kovalent bağlarla lif moleküllerine bağlanabilirler bu yüzden de boyamanın suya dayanıklılığı çok yüksektir. Direkt boyarmaddeler gibi suda çözünürler ve anyonik bir yapıya sahiptirler. Küçük tanecikli yapıları life hızlıca nüfuz etmelerini sağlar. Parlak renklere sahip reaktif boyarmaddeler basit yapılarının sonucunda spektrumlarında çok dar ve şiddetli pikler gösterirler. Çoğunlukla kırmızı, mavi, portakal ve sarı renkleri elde etmek için kullanılırlar (Tanzer 2006).

2.1.3.h. Vat (küp) boyarmaddeler

Vat boyarmaddeler karbonil grubu içeren ve suda çözünemeyen boyarmaddelerdir. Boyarmaddeler önce bazik ortamda indirgenerek suda çözünmesi sağlanır ve life çekilmesinden sonra havada ki oksijen kullanılarak boyarmadde yükseltgenir ve tekrar su içerisinde çözünmez hale gelir.

Yapılan işleme küpeleme dendiğinden dolayı küp boyarmadde olarak da adlandırılırlar. Küp boyarmaddeler daha çok selülozik elyafların ve bu elyafların karışımlarının boyanmasında kullanılır (Koçyiğit 2008).

2.1.3.ı Dispers boyarmaddeler

Selülozik asetat, polyester, poliamid akril gibi sentetik liflerin içine işleyerek boyama yapabilen, düşük molekül ağırlıklı ve suda çözünmeyen boyalardır. Elyaflar aktif grup içermediği için boya katyonlarını ve anyonlarını da bağlayamaz, dispers boyalar; polyesterin boyanmasında en çok kullanılan boyalardır (Özcan 1984).

2.1.3.i. Kükürt boyarmaddeler

Kükürt boyalar amino ve nitro grupları içeren amino bileşiklerin sodyum sülfid veya sülfür ile yüksek sıcaklıkta reaksiyonu sonucu oluşur. Genellikle kahverengi, siyah, koyu mavi gibi koyu renkleri kullanılır (Scott 1995).

2.1.4. Tekstil endüstrisi atık sularında kirletici parametreler

Tekstil üretiminde iki önemli adım boyama ve bitim prosesleridir. Bu basamaklar yapay ya da doğal liflerin homojen olarak bu liflerin nihai ürüne çevrilmesi ve devamlı olarak renklerle boyanmasıdır. tekstil üretim aşamasını Boyama ve bitim prosesleri beraberce tamamlar ama sonucunda tekstil endüstrisi atık suları meydana gelir. Tekstil endüstrisi

atık sularında karışık katı maddeler, yüksek oranda boya, yüksek sıcaklık ve asit var olduğu için arıtım yapmak zordur. Atıksular geniş pH aralığına, koyu renge, yüksek sıcaklığa, KOİ, yüksek iletkenlik, toplam çözünmüş katı, bazen de yüksek alkaliniteye sahiptirler ve kötü yanları güçlü renkleridir. Boyama atıksularının rengi gün içinde veya günden güne de değişebilir, çünkü boyama sırasında müşteri isteğine göre sık sık değişik boyarmaddeler kullanılır bu sebepten dolayı atıksuyun KOİ içeriğinin sık sık inip çıkmasına neden olur (Lin and Peng 1994).

Tekstil atıksuları yüksek oranda boya maddeleri ve yardımcı kimyasal maddelerin bulunmasından dolayı toksik yapıdadır. Askıda katı maddelerin fazla olduğu yoğun renkli atıksular yüksek KOİ ve BOİ'ye sahip olup biyolojik olarak ayrışmaya karşı direnç gösterirler buyüzden geleneksel arıtma yöntemleriyle arıtilamazlar. Tekstil atıksularında temel kirletici parametreler fiziksel, kimyasal ve biyolojik olarak üç grupta toplanır. Çizelge 2.4'de atıksuların temel kirletici parametreleri yer almaktadır (Bianchi vd 1998; Arıcı 2000).

Çizelge 2.4. Tekstil atıksuların temel kirletici parametreler

Fiziksel parametreler	Kimyasal parametreler	Biyolojik parametreler
Çözünmemiş bileşikler	Asidite ve alkalilik	Biyolojik oksijen ihtiyacı
Çözünmüş oksijen	Fenol	Kimyasal zehirlilik
Koku	Kimyasal oksijen ihtiyacı	Patojenik bakteriler
Korozyon	Klor ihtiyacı	
Köpük	Klor iyonu	
Radyoaktivite	Organik ve inorganik bileşikler	
Renk	pH	
Sıcaklık	Sertlik (Kalsiyum ve Magnezyum) Spesifik iyonlar (As, Ba, Cd, Cr, CN, F, Pb, Sn, Ag) Toplam Çözünmüş tuzlar Toplam Organik karbon Yağ ve hidrokarbonlar	

KOİ, BOİ, AKM, pH, sıcaklık, toplam krom, renk, toplam sülfür, yağ ve gres, fenoller ve yüzey aktif maddeler tekstil atıksularının karakterizasyonunda kullanılan başlıca kirletici parametrelerdir. BOİ, atıksulardaki kirlilik derecesini belirlemede kullanılan en önemli parametrelerden biridir. Suyun oksijen içeriğini düşürdüğünden dolayı su ekosistemine zararlı bir etki yapmaktadır (Göknil vd 1984). Tekstil atıksuyunun aerobik reaktörde arıtılması sırasında çıkan yüksek KOİ değerleri yüzünden çeşitli problemlerle karşılaşmaktadır. Bunlar çamur kabarması, aşırı çamur üretimi, havalandırma için yüksek enerji ihtiyacı ve boyarmaddelerin uzaklaştırılmamasıdır (Işık and Sponza 2004). Atıksularda bulunan toplam askıda katı maddenin yüksek miktarda olması fiziksel olarak kirlenmeye yol açmaktadır buda su canlılarına zarar vermektedir. Çünkü askıda katı maddenin fazla olması durumunda su yoğunlaşır, bulanıklaşır, ışık geçirgenliği ve buna bağlı olarak oksijen miktarında azalma ve toksisitesi artar (Göknil vd 1984).

Atıksuda bulunan kirletici parametreler debinin büyük olduğu işletmelerde çevre kirliliği oluşturmaktadır. Tekstil endüstrisi atıksularında organik ve inorganik kimyasal maddeler bulunduğundan, arıtılmadan deşarj edildiklerinde birçok problem oluşmaktadır. Boyarmaddeler biyolojik ve kimyasal olaylar esnasında suyun içindeki oksijenini azaltmaktadır. Ortofosfatların alıcı ortama deşarjı ötrofikasyonu hızlandırarak, alglerin büyüyerek ve su yüzeyini hep kaplayarak fotosentez - ışık olayının olmasını önlemektedir. Alıcı ortamda koku ve tad oluşturan maddeler fenolik maddelerdir. Yıkamalardan kaynaklanan atıksulardaki süspansiyon katılar bulanıklık meydana getirerek atıksuyun fiziksel özelliklerini, rengini ve kokusunu değiştirmektedir. İnsan ve su yaşamında zehirli ve istenmeyen etkileri oluşturan mikrokirleticiler suyun değerini ve kalitesini düşürmektedir. Az miktarı bile ekolojik dengeyi bozmaya ve çevreyi zehirlenmeye yetmektedir (Tünay 1996).

2.1.5. Tekstil endüstrisi atıksularının özellikleri ve renk giderme yöntemleri

Tekstil endüstrisinde bulunan ıslak proses işleminde fazla miktarlarda su kullanımı gerekmektedir. 1 kg kumaş yaklaşık 200-300 L su ile üretilmektedir (Marcucci *et al.* 2001). İmalata bağlı olarak atıksu miktarı artmakta ve kirliliğe yol açmaktadır. Tekstil

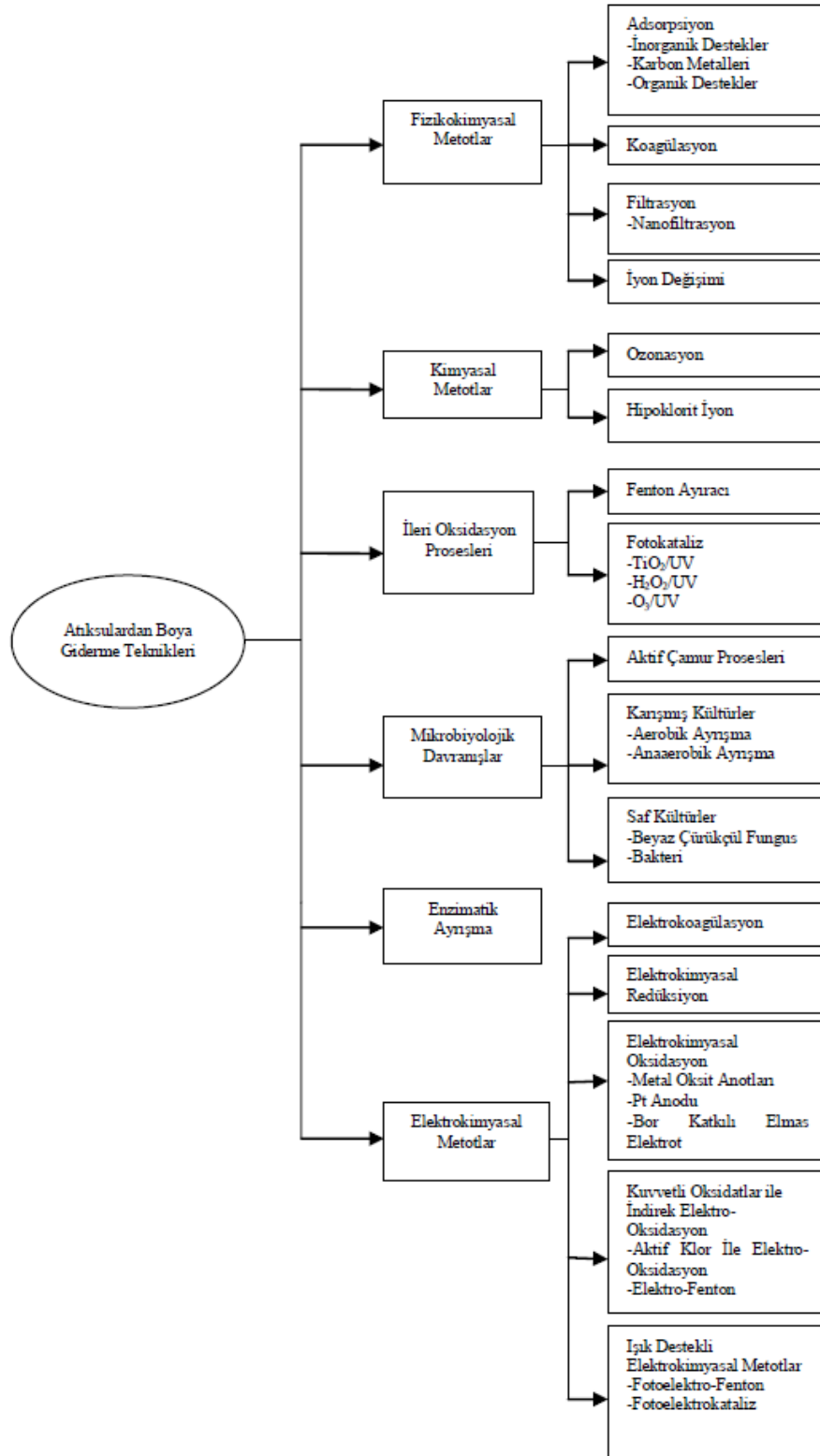
endüstrisinde uygulanan ileri teknolojiler ve yenilenen işletme proseslerinden dolayı atıksuların karakterizasyonlarında değişiklik gösterir. Uygulanan işlemler sonucunda geleneksel arıtma yöntemleriyle atıksuları arıtmak mümkün olmamaktadır.

Tekstil endüstrisinde renklilik için sentetik boyalar kullanılmakta ve boyanın malzeme üzerinde ki tutuşunu artırmak için de metaller, tuzlar, yüzey aktifler, sülfür ve sülfid gibi kimyasallar kullanılmaktadır. Bu üretim proseslerine göre çıkan atıksularda değişiklik gösterir. Kullanılan boyalardan dolayı tekstil atıksularında katı madde miktarı fazladır. Bu atıksuların, boyar madde içermesi sebebiyle kuvvetli renk içeriğine sahip olması, kimyasal içermesi, yüksek sıcaklıkları, iletkenlikleri ve geniş aralıklardaki pH'ı, KOİ ve toplam çözünmüş katı maddeleri ihtiva etmesi sebebiyle endüstride büyük problemlerle yol açmaktadır. Kimyasal arıtma prosesleri ve aktif çamur proseslerinde pH değişimleri (2.0-12.0) sıkıntı yaratacağından ötürü boya atıksularında pH ayarı yapılmalıdır. Geniş aralıklardaki pH değişiminin sebebi kullanılan boya türlerinden kaynaklanmaktadır. KOİ değişimleri de atıksudaki renk değişimlerinden etkilenmektedir (Lin and Peng 1994). Boyanın tutuşunu artırmak için kullanılan tuzlardır İletkenlik artışına sebep olur. Atıksuda bulunan toksik bileşikler ve ağır metaller arıtma tesislerinde bazı problemlere yol açar. Bunlar çamur kabarması, hidrolik akış hızında değişiklik meydana gelmesi, pH'da, sıcaklıkta ve ağır metallerde yüksek değerler olması. Bu prosesler sonucu oluşan renkli sular görüntü açısından kötü durmasının yanı sıra ışık geçirgenliğini engellemesi yüzünden biyolojik sistemin çökmesine neden olmaktadır. Atıksuya eklenen kimyasallar ve boyar maddeler arıtma işlemini zorlaştırmaktadır (Çalışır 2010).

Tekstil endüstrisi atıksuların arıtımında, boyarmaddenin karakteristik özelliğine ve uygulama alanına göre birçok arıtım metodu vardır. Bunlar Çizelge 2.5'de Boya sınıflarına göre renk giderme metotları (Martinez *et al.* 2009) ve Şekil 2.1'de Atıksulardan boya giderimi için kullanılan ana yöntemler (Correia *et al.* 1994) yer almaktadır.

Çizelge 2.5. Boya sınıflarına göre renk giderme metotları (Martinez *et al.* 2009)

SINIFLAMA	BOYA TÜRÜ	ŞARJ/ÇÖZELTİ DURUMU	TEKNOLOJİ
Non-iyonik	Dispers Azoik Vat Sülfür	Negatif yükle şarj Kolloidal	Koagülasyon Membran Oksidasyon
Anyonik	Asit Reaktif Direk Mordan Metal kompleks	Anyonik çözünür	Adsorpsiyon İyon değişimi Membran Oksidasyon
Katyonik	Bazik	Katyonik çözünür	Adsorpsiyon İyon değişimi Membran Oksidasyon



Şekil 2.1. Atıksulardan boya giderimi için kullanılan ana yöntemler (Correia *et al.* 1994)

Tekstil atıksuları diğer endüstri atıksularına göre daha çeşitli kirletici parametrelerine sahiptir çünkü kimyasalların çeşitliliği fazladır. Geniş pH aralığında olan bu atıksuların arıtım, düşük pH toleransına sahip biyolojik ve kimyasal arıtma tesislerinde zorluklara neden olmaktadır. Tekstil atıksuyu içindeki boyarmadde molekülleri biyolojik olarak ayrışmaya dirençlidir ve aktif çamur sistemlerinde indirgenememektedir. Çizelge 2.6’da tekstil endüstrisi atıksularının arıtılması için kullanılan çeşitli teknolojilerin karşılaştırılması listelenmiştir (Sevimli 2000).

Çizelge 2.6. Tekstil endüstrisi atıksularının arıtılması için kullanılan çeşitli teknolojilerin karşılaştırması (Sevimli 2000)

Preses	Arıtma Kademesi	Uygulama Durumu	Performans	Sınırlama
Flotasyon	Ön Arıtma	Laboratuar ölçekli çalışılıyor	%90 Renk Giderimi, %40 KOİ Giderimi, Ucuz oluşu	
Fenton Prosesi	Ön Arıtma	Güney Afrika’da büyük ölçekte tesisler mevcut	Düşük ilk yatırım ve işletme maliyeti, çok iyi renk giderimi	Toksik çamur oluşumu
Elektroliz	Ön Arıtma	Pilot ölçekli çalışılıyor	Çok iyi renk giderimi, ucuz	Köpük oluşumu, elektrot ömrü kısa
Membran	İkinci kademe veya ileri arıtma	Güney Afrika’da yaygın kullanım	Su ve kimyasal madde geri kazanımı, yüksek performans	Konsantrenin arıtımı ve bertarafının zor ve pahalı olması
Aktif Çamur	İkinci kademe arıtma	Yaygın kullanım	KOİ ve N giderimi	Yüksek kalıcı KOİ, renk, N ve yüzey aktif maddeler
Anaerobik + Aerobik	İkinci kademe arıtma	Tesis sayısı çok az	İyi renk, KOİ ve toksik madde giderimi	Yüksek kalıcı renk ve KOİ
Biyofilm Reaktörler	İkinci kademe arıtma	Çin’de bazı pilot ölçekli tesisler mevcut	İyi renk ve KOİ giderimi	
Mantar (Fugi)/ H₂O₂	İkinci kademe arıtma	Laboratuar ölçekli çalışılıyor	Çok iyi renk giderimi	
Koagülasyon-Flokülasyon	Ön, İkinci kademe veya ileri arıtma	Çok yaygın kullanım	Çok iyi renk giderimi, su geri kazanımı	Çamur problemi, her zaman etkili değildir
Ozon	İleri arıtma	Büyük ölçekte tesisler mevcut	Çok iyi renk giderimi, su geri kazanımı	Pahalı, aldehit oluşumu
Sorbsiyon (karbon, kil, biyokütle)	Ön veya ileri arıtma	Sorbent tipine bağlı olarak tam veya laboratuar ölçekte	Yeni sorbentler etkili ve ucuz, su geri kazanımı	Yüksek bertaraf ve rejenerasyon maliyeti
Fotokataliz	İleri arıtma	Pilot ölçekli çalışma	İyi renk ve toksik madde giderimi	Sadece son adımda kullanılır.

Ülkemizde tekstil endüstrisi atıksularının alıcı ortama deşarj standartları Çevre ve Orman Bakanlığınca 31.12.2004 tarih ve 25687 sayılı Resmi Gazete yayımlanan Su Kirliliği ve Kontrol Yönetmeliği kapsamında belirlenmiştir. Yün yıkama, terbiye, dokuma ve benzer sektörler için belirlenen sınır değerler Su Kirliliği ve Kontrol Yönetmeliği Eklerinde bulunan Çizelge 2.7’de belirtilmiştir.

Çizelge 2.7. Tekstil sanayi (yün yıkama, terbiye, dokuma ve benzer sektörler) atıksularının alıcı ortama deşarj standartları (Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği 2004)

PARAMETRE	BİRİM	KOMPOZİT NUMUNE (2 SAATLİK)	KOMPOZİT NUMUNE (24 SAATLİK)
Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)	(mg/L)	400	300
Askıda Katı Madde(AKM)	(mg/L)	400	300
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	-
Yağ ve Gres	(mg/L)	200	100
pH		6-9	6-9
Balık Biyodeneyi (Zsf)		4	3
*Renk	(Pt-Co)	280	260

*RG-24/4/2011-27914 Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelikte eklenen değerdir

Tekstil endüstrisi atıksularının arıtımında özellikle renk ve KOİ giderimin de uygulanan yöntemler aşağıda belirtilen 4 ana grup altında toplanarak değerlendirilmiştir.

- Biyolojik arıtma yöntemleri (aerobik, anaerobik)
- Kimyasal ve Fizikokimyasal yöntemler
- Membran teknolojileri (fiziksel ayırma)
- Kimyasal oksidasyon ve elektrokimyasal yöntemler

2.1.6. Biyolojik arıtma yöntemleri

Biyolojik arıtma, tekstil atıksuyun içinde olan çözünmüş ve askıda organik maddelerin bakteriler ile parçalanması ve çökebilen biyolojik yumaklarla sıvının içinde kalan veya gaz olarak havaya giden sabit inorganik bileşiklere dönüşmesidir. Biyolojik arıtım aslında organik kirleticilerin doğada yok edilmeleri için bulunan biyolojik mineralleştirme ve yumaklaştırma işlemlerinin kontrolü ile uygun şartlarda ve çevrede tekrar edilmesidir. Böylelikle doğadaki tepkimelerin hızlandırılarak daha az bir zamanda, güvenli koşulda gerçekleştirilmeleri sağlanmaktadır. Biyolojik arıtma; organik kirleticilerin uzaklaştırılması için en etkili yöntemdir. Tekstil atıksularında biyolojik arıtma, inorganik ve organik bileşiklerin arıtımı için çok önemlidir. Biyolojik arıtma yöntemleri birçok şekilde sınıflandırılabilirler. Ortamda oksijen varlığına göre anaerobik (havasız) ve aerobik (havalı) olarak sınıflandırılır (Öztürk vd 2005).

Klasik biyolojik arıtma yöntemleri ile arıtmada biyolojik oksidasyon ve biyokütle adsorpsiyon olmak üzere iki düzenek önemli rol oynar. Bunlar özellikle evsel atıksulardaki pek çok organik kirleticinin giderilmesinde etkilidir fakat renkli tekstil atıksuları söz konusu olduğunda klasik biyolojik arıtma prosesleri çoğu zaman yetersiz kalmakta ve renk giderimi zor olmaktadır (Kim 2002; Peres *et al.* 2007; Khataee *et al.* 2009).

Tekstil endüstrisindeki boyarmaddelerinin kimyasal özellikleri nedeniyle biyolojik prosesler tek başına istenilen renk giderim verimini sağlamamaktadır. Özellikle azo grubu (-N=N-) boyarmaddelerden dolayı anaerobik ve aerobik arıtma yöntemleri birlikte kullanılmaktadır. Aerobik ayrışmaya karşı çoğu zaman dirençli olan azo boyarmaddelerin N=N bağları anaerobik arıtma aşamasında kırılmakta ve aromatik aminleri oluşturmaktadır. Oluşan aromatik aminlerde aerobik arıtmada giderilmektedir (Pinheiro *et al.* 2001; Çınar vd 2008; Khataee *et al.* 2009). Aerobik ve anaerobik aşamaları bünyesinde bulundurması, işletim esnekliği nedeniyle ardaşık kesikli reaktörler kullanılarak azo boyarmaddelerin giderilmesi üzerine çeşitli çalışmalar yapılmaktadır

(Sponza and Işık 2002; Ong *et al.* 2005; Sirianuntapiboon *et al.* 2006, 2008; Çınar vd 2008).

Sentetik atıksularda laboratuvar ortamında anaerobik yöntemler ile renk giderimin de iyi sonuçlar alınmasına rağmen, gerçek tekstil atıksularının içinde sülfat, nitrat gibi bileşenlerin bulunmasından dolayı sistem verimi düşmektedir.

Ardaşık kesikli reaktörlerde aktif granül karbon ve bio-çamur kullanılarak boyarmaddenin giderim verimini arttırmaya yönelik çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalarda dispers boyarmaddeler için sentetik ve ham tekstil atıksularında yüksek renk giderim verimleri elde edilmiştir. Fakat küp boyarmaddelerde tekstil atıksuları için renk giderim verimleri oldukça düşüktür (Sirianuntapiboon *et al.* 2006, 2008).

2.1.7. Kimyasal ve fizikokimyasal yöntemler

Boyarmadde içeren tekstil atıksularının arıtımında kimyasal koagülasyon yöntemi kimi zaman yetersiz kalmaktadır. Bu prosesin en büyük dezavantajı fazla miktarda çamur oluşmasıdır. imyasal arıtma prosesi sülfür, küp (vat) ve dispers boyarmaddeler için tatmin edici sonuçlar vermektedir. Özellikle dispers boyarmaddeler kimyasal koagülasyon yöntemi ile kolaylıkla giderilebilmektedir. Buna rağmen sudaki çözünürlüğü yüksek olan boyarmaddelerin giderilmesinde iyi sonuçlar vermemektedir. Azo, reaktif, direkt ve asit boyarmaddeler bu yöntemle çok fazla giderilememektedir (Gupta and Suhas 2009).

Adsorpsiyon prosesi atıksulardan renk giderimini sağlamak için oldukça etkili bir yöntemdir. Biyolojik parçalanması zor olan organik boyar maddeler uygun adsorbanların yüzeyinde tutularak atıksudan giderilebilirler (Şahin 2006). Adsorpsiyon prosesinde en çok kullanılan ve en etkin adsorban maddelerden bir tanesi aktif karbondur. Aktif karbon, odun, kömür, hindistan cevizi kabuğu gibi maddelerden kimyasal veya fiziksel yöntemlerinden birisi kullanılarak elde edilir. Atıksulardan renk gideriminde en yüksek verim sağlayan işlemlerden biri aktif karbon adsorpsiyonudur. Ancak bazı asit ve reaktif boyarmaddeler yüksek çözünürlüğe sahip olduklarından ötürü adsorpsiyon yöntemi ile

giderilmeleri de zordur (Baburşah 2004). Aktif karbonun en önemli dezavantajı maliyetinin fazla olması ve rejenerasyonda karşılaşılan zorluklardır. Bu nedenle adsorpsiyon ile renk giderilmesindeki çalışmalarda ucuz adsorbanslar üzerine yoğunlaşmıştır (Holkar *et al.* 2016).

2.1.8. Membran teknolojileri

Membran filtrasyonu ile atıksulardan renk giderimi sağlanabilir (Mıdık 2011). Membran sistemleri elektronik, ilaç, biyoteknoloji ve gıda endüstrisi alanlarında proses suyu temininde ve atıksuların geri kazanılmasında kullanılan ileri fiziksel ayırma teknolojileridir. Bu prosesler, tekstil atıksularında boyarmaddelerin giderilmesinde ve geri kazanılması amacıyla kullanılabilir (Şahin 2006). Oluşan konsantre akımda kirletici konsantrasyonuna bağlı olarak ileri arıtma yapılmakta veya alıcı ortama deşarj edilmektedir. Membran proseslerle, boyanın türüne ve istenilen çıkış suyu kalitesine göre boyar madde giderilmesi için uygun teknolojinin seçimi değişiklik göstermektedir. Membran teknolojisinin oldukça pahalı olması, sık membran kirlenmesine sebep olması, ön arıtma gerektirmesi ve çevreye deşarj edilmeden önce arıtılması gereken konsantre bir akım oluşturması dezavantajları olarak sıralanabilir. Membran filtrasyonda ön arıtmanın uygulanması askıda katı madde giderimi sağlayarak, membranın ömrünü uzatır (Verna *et al.* 2012; Bahadır 2012).

Membran filtrasyonunda en çok kullanılan uygulamalar nanofiltrasyon, mikrofiltrasyon, ters ozmoz ve ultrafiltrasyon olarak sıralanabilir. Tekstil atıksularından geri kazanım ve renk giderimi amacıyla nanofiltrasyon membranların kullanıldığı çalışmalarda membran kirlenmesi sorunu ile karşılaşmaktadır. Bu sebeple son zamanlardaki çalışmalarda membran filtrasyonunun boyarmadde içeren tekstil atıksularının geri kazanımında ve arıtımında diğer endüstriyel atıksu arıtma yöntemleri (klasik aktif çamur, fiziko-kimyasal arıtım vb.) ile birlikte kullanılmasına yoğunlaşmıştır (Bes-Piá *et al.* 2002, 2005; Dilek vd 2008).

Avlonitis ve arkadaşları sentetik tekstil atıksuları ile yaptıkları çalışma da nanofiltrasyon membranlar ile atıksuyun tekrar kullanılabileceği düzeyde renk ve tuzluluk giderimi sağlamayı başarmışlardır. Bununla birlikte enerji tüketimlerinin (4 kw-saat/m³) gerçek endüstriyel uygulamalar için 2 kw-saat/m³'ün altına düşürülmesi durumunda nanofiltrasyon ile atıksu geri kazanımının endüstriyel açıdan oldukça cazip olacağını belirtmektedirler (Avlonitis *et al.* 2008).

Persin ve arkadaşları da tekstil atıksularının geri kazanımı ile ilgili çalışmalarında fizikokimyasal arıtma sonrası nanofiltrasyon ve ters ozmos sistemlerini değerlendirmişlerdir. Her iki sistemde fiziko-kimyasal arıtma sonrasında kullanıldıklarında tekstil atıksuyunun boyama prosesinde tekrar kullanılabilmesi için istenilen düzeyde arıtım sağlamayı başarmıştır (Persin *et al.* 2005).

2.1.9. Kimyasal oksidasyon ve elektrokimyasal yöntemler

Kimyasal oksidasyon prosesi atıksudaki kimyasallar arasındaki elektron transferi sonucunda redoks reaksiyonları oluşturarak boyarmaddedeki kimyasal bileşikler oksitleyip biyolojik parçalanabilen maddelere veya diğer yan ürünlere dönüşmesini sağlayan prosesdir. Bunun için en çok kullanılan oksidantlar arasında ozon, klor, klordioksit, hidrojenperoksit ve potasyumpermanganat yer almaktadır (Arıcı 2000).

Organik maddeleri yüksek verim ile oksitleyebilen bir oksidan ozondur. Bu özelliğinden dolayı, atıksularda organik maddeler, renk ve toksik bileşiklerin gideriminde, içme sularında ise koku ve tat gideriminde, kullanılmaktadır. Dispers tekstil boyaları dışında başka boyarmaddelerin ozonlama ile arıtımında yüksek verim elde edilmektedir. Bu uygulamanın en önemli dezavantajı, ozon ile yapılan arıtımın maliyetinin fazla olmasıdır çünkü tekstil endüstrisinde de çok fazla atıksu oluşmaktadır (Uygun 2003).

Reaktif boyarmaddeler ozon ile beraber çabucak reaksiyona girebilir fakat metal içeren boyarmaddeler ve antrokinon boyarmaddeler ozona karşı direnç gösterirler. Sudrarajan ve arkadaşları 5 dk'lık temas süresi ve 36 mg/l ozon ile reaktif boyarmaddelerden

kaynaklı rengi başarıyla giderebilmişlerdir (Sudrarajan vd 2007). Baban ve arkadaşları ise yünlü boyama ve apreleme atıksuları ile yaptıkları çalışmada biyolojik arıtma sonrası uyguladıkları ozonlama ile %98-99 oranında renk giderimi sağlamışlardır (Baban vd 2003).

Ozon ile renk giderilmesinde karşılaşılan diğer bir dezavantaj boyarmaddelerin parçalanması sonucu oluşan parçalanma ürünleridir. Bazı boyarmaddeler klor, klorür ve kükürt içerdiğinden parçalanma ürünleri toksik olabilmektedir (Uygun 2003).

Klor, oksidasyon ve dezenfeksiyon uygulamalarında daha sık olarak kullanılan kuvvetli bir oksitleyicidir. En yaygın kullanılan klor bileşikleri sodyum hipoklorit veya kalsiyum hipoklorit'dir. Klor oksidasyonu ile rengin tamamını giderilememekte ve ortamda oluşan klorlu bileşiklerinde alıcı ortama olumsuz etkileri olmaktadır (Uygun 2003).

Klordioksit, klordan daha az etkili ve tam renk giderimi sağlayamamaktadır. Reaktif, dispers, direkt ve anyonik metalik boyarmaddelerin oksidasyonunda etkilidir bazı boya gruplarını oksitleyememektedir (Uygun 2003).

Hidrojen peroksit (H_2O_2), normal koşullarda tesir etmez. Ama asidik ortamda Fenton reaktifini demir (II) ile oluşturarak ortamda hidroksil radikallerini oluştururlar. Radikaller, yüksek oksidasyon gücüne sahip olduklarından dolayı arıtımında yüksek verim elde edilebilmektedir. Fenton reaktifi çözünemeyen ve çözünebilen boyarmaddelerin oksidasyonunda oldukça etkilidir. Diğer taraftan reaksiyon sonucunda kimyasal oksijen giderimi de sağlanmaktadır. Bu uygulamanın en önemli dezavantajı ise işletme maliyetinin yüksek olmasıdır (Uygun 2003).

Çok güçlü oksidant olan ve hidroksil radikallerinin oluşumuna dayanan oksidasyon yöntemleri, ileri oksidasyon yöntemleri olarak adlandırılırlar. İleri oksidasyon proseslerinin genel bir sınıflandırması Çizelge 2.8'de yer almaktadır.

Çizelge 2.8. İleri oksidasyon proseslerinin genel sınıflandırması

Homojen İleri Oksidasyon Prosesleri		Heterojen İleri Oksidasyon Prosesleri
Fotokimyasal olmayan prosesler	Fotokimyasal prosesler	UV/TiO ₂ prosesi
Ozonlama (pH>11’de)	Fotofenton prosesi	UV/ZnO prosesi
Ozon/H ₂ O ₂ prosesi	H ₂ O ₂ /UV prosesi	
Fenton prosesi	Ozon/UV prosesi	
Elektron demeti irradasyonu	Ozon /H ₂ O ₂ /UV prosesi	
Islak hava oksidasyonu		

Son yıllarda elektrokimyasal arıtım prosesi atıksu arıtımında çok taraflı bir arıtım prosesi olması sebebiyle oldukça önem arz etmektedir. Elektrokimyasal arıtım proseslerin en önemli farklılıkları prosesin yapısı ve şeklidir (prosesin tipi, elektrot tipi, elektriksel gerilim ve uygulanan akım). Bilhassa prosesde ki elektrot tipi sistemin elektrooksidasyonu mu yoksa elektrokoagülasyonu mu etkileyeceğini belirleyen unsurların başında gelmektedir (İlhan vd 2007).

2.1.9.a. Elektrokimyasal arıtma prosesinin avantaj ve dezavantajları

Elektrokimyasal Arıtma Prosesinin Avantajları (Akbulut 2000; Mollah *et al.* 2001);

- Basit işletme ve araç gereçler ile çok daha iyi verim elde edilebilir.
- Renk ve koku gideriminde elektrokimyasal arıtım yöntemleri daha verimlidir.
- Elektrokimyasal proseslerde tek bir prosesle birçok kirlenici bir arada giderilebilir, diğer proseslerde belli kontaminantları gidermede birkaç proses bir arada kullanılabilir
- Düşük bakım maliyeti ve iş gücü gerektirir.
- Prosesin aşamalarında yüksek sıcaklıklar herhangi bir problem oluşturmamaktadır.

- Diğer proseslere oranla daha az kimyasal madde kullanılır.
- Elektrokoagülasyon prosesinde floklar daha kararlı ve daha büyüktür bu yüzden floklar filtrasyonla daha kolay ayrışabilir.
- Elektrokoagülasyon sonrası oluşan çamurlar çoğunlukla metal hidroksitler şeklindedir.
- Elektrokoagülasyon sonucunda oluşan toplam çözünmüş katıların içeriği kimyasal arıtmaya oranla daha azdır. Eğer su yeniden kullanılmak istenirse, toplam çözünmüş katının az olması maliyetin daha az olmasına tercih edilir.
- Elektrokoagülasyon prosesi küçük kolloidal partiküllere karşı diğer yöntemlere göre daha etkilidir.
- Elektrokoagülasyon prosesinde fazla kirletici konsantrasyonlarında kimyasal madde kullanımı yapılabilir, ancak çöktürme işlemi nötralizasyona göre olduğundan kullanılmaz.
- Elektroflotasyon prosesinde gaz kabarcıkları elektroliz süresince kirleticileri taşıyarak daha küçük kirletici konsantrasyonlarını bile flotasyon mekanizmasıyla giderebilir.
- Elektroflotasyon prosesinde kabarcık sayısı ve boyutunu kontrol etmek için bir parametre olarak akım yoğunluğu kontrol edilir.

Elektrokimyasal Arıtma Prosesinin Dezavantajları;

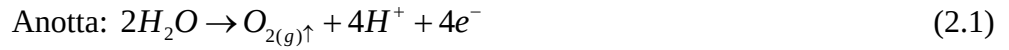
- Elektrokimyasal arıtma yöntemlerinde elektrot, atık su içindeki çözünmüş maddelerin oksidasyonu sonucu oksitlenebilir.
- Bu proseslerde genellikle elektrik maliyeti yüksektir.
- Atıksudaki süspanse maddelerin iletkenliğinin fazla olması istenir.

2.1.9.b. Elektrokimyasal arıtım türleri

Elektrokimyasal prosesler yaygın olarak 3 grupta incelenir. Bunlar elektroflotasyon (EF), elektrooksidasyon (EO) ve elektrokoagülasyondur (EC). Bu prosesler tek başlarına çalışabildiği gibi bazı sistemlerde birkaç elektrokimyasal işlem aynı zamanda, toplu

şekilde kullanılabilir. Örneğin elektrokoagülasyon prosesi sırasında oluşan gaz çıkışı ile kısmen bir elektroflotasyon da gerçekleşmektedir. Bu da elektrokimyasal arıtım yöntemlerinde kısa sürede etkili bir arıtım veriminin oluşmasına olanak sağlamaktadır. Son yıllarda elektrokimyasal prosesler, arıtmadan başka metal geri kazanımında da kullanılmaya başlanmıştır (Chmielewski and Urbanski 1977; Gezer ve Keskinler 2006).

Elektroflotasyon, atıksu arıtımında en fazla kullanılan bir elektrokimyasal arıtım işlemidir. Çoğunlukla tek başına olmayıp diğer bir elektrokimyasal prosesle beraber kullanılan bu yöntem; prosesin gereği elektrotlardan açığa çıkan gaz kabarcıkların (hidrojen ve oksijen) kirleticileri adsorbe ederek yüzeye çıkarması sonucu kirliliğin giderilmesi esasına dayanır. Elektrokoagülasyon prosesi esnasında da gerçekleşir ve prosesin doğası gereği ilave edilmesi gereken gaz, elektroflotasyonda belli ölçüde kendiliğinden oluşmaktadır. Elektroflotasyonda anottaki ve katottaki elektrokimyasal reaksiyonlar esnasında oksijen ve hidrojen oluşum reaksiyonlarıdır ve 2.1 ve 2.2’de gösterilmiştir.



Elektroflotasyon prosesinin verimi; oluşan kabarcıkların sayısına ve hacmine, oluşan kabarcıkların boyutu ise; elektrot cinsi, akım yoğunluğu ve şekline bağlıdır. Akım yoğunluğu, elektrot materyali, sıcaklık ve pH değiştirilerek kabarcıkların büyüklüğü ve sayısı kontrol edilebilmekte ve bu sayede elektroflotasyonun hızı arttırılabilmektedir (Romanov *et al.* 2000; Chen 2004).

Elektroflotasyon prosesinin kullanıldığı alanlar; metal kaplama atölyeleri, kâğıt, mandıra, yağ-su emülsiyonları, yemek üretim, çiftlik, restoran, konserve, tekstil, kimya, boya, deri endüstri atıksularının arıtımıdır. Aynı zamanda atıklarından değerli metallerin eldesi ve maden cevherleri ve onların geri kazanımı, radyoaktif ve toksik metal atıksuların arıtımı,

deniz suyundan magnezyum eldesi, biyoteknolojide bir kısım maddelerin eldesi ve ayrılma işlemlerinde de kullanılmaktadır (Müller 1992; Matis and Zouboulis 1995).

Elektrooksidasyon, çözünmeyen elektrotlar (Pt, Ti, paslanmaz çelik vb.) kullanılarak organik maddelerin elektrokimyasal olarak doğrudan veya dolaylı yollarla oksitlenmesi olarak bilinir (Avcu 2010; Bayar vd 2012). Bu prosesinde anot aktif olan elektrottur. Bu sebepten etkili olan parametrelerin başında anodun katalitik aktivitesi gelmektedir. Ayrıca akım, sıcaklık, pH ve organik bileşiklerle diğer oksidantların difüzyon hızı da önemlidir. Anodun yüksek potansiyeli ile atıksuda bulunan klorür iyonları ve klora dönüşebilmekte veya organik bileşiklerin doğrudan oksidasyonu gibi ikincil reaksiyonlar da ortaya çıkabilmektedir (İlhan vd 2007). Klorlu organik bileşiklerin ara veya son ürüne dönüşümleri bu prosesin uygulamasını engellemektedir (Vardar 2006). Bu uygulamada elektrotların bulunduğu ortam çok önemlidir ve iki tip oksidasyon gerçekleşir. Bunlar anodik (direkt) ve dolaylı (indirekt) oksidasyondur. Proses uygulanırken atıksuyun klorür içeriğinin düşük olması durumunda elektrooksidasyon verimini artırmak için fazla miktarda tuz ilavesi gerekmektedir (Chen 2004).

Elektrooksidasyon prosesleri literatürde çoğunlukla $\text{TiO}_2/\text{TiRuO}_2$ (titanyum üzerine oksitlenmiş rutenyum kaplı elektrot), $\text{Ti}/\text{PdO}-\text{CO}_3\text{O}_4$, Ti/Pt , $\text{PbO}_2/\text{SnO}_2$, $\text{Ti}/\text{RhOx}-\text{TiO}_2$, $\text{Ti}/\text{Pt}-\text{Ir}$, PbO_2/Ti , SnO_2 (oksitlenmiş kalay kaplı elektrot), PbO_2 , BDD (borlanmış elmas elektrot) vb. anot elektrotlar kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Çamur oluşumunun ve etkili giderim çok az olması sebebiyle elektrokimyasal prosesler arasında tercih edilen bir yöntem olmaktadır (İlhan vd 2007). Elektrokoagülasyon prosesi bölüm 3’de detaylı olarak ele alınmıştır.

2.2. Elektrokoagülasyon Prosesi

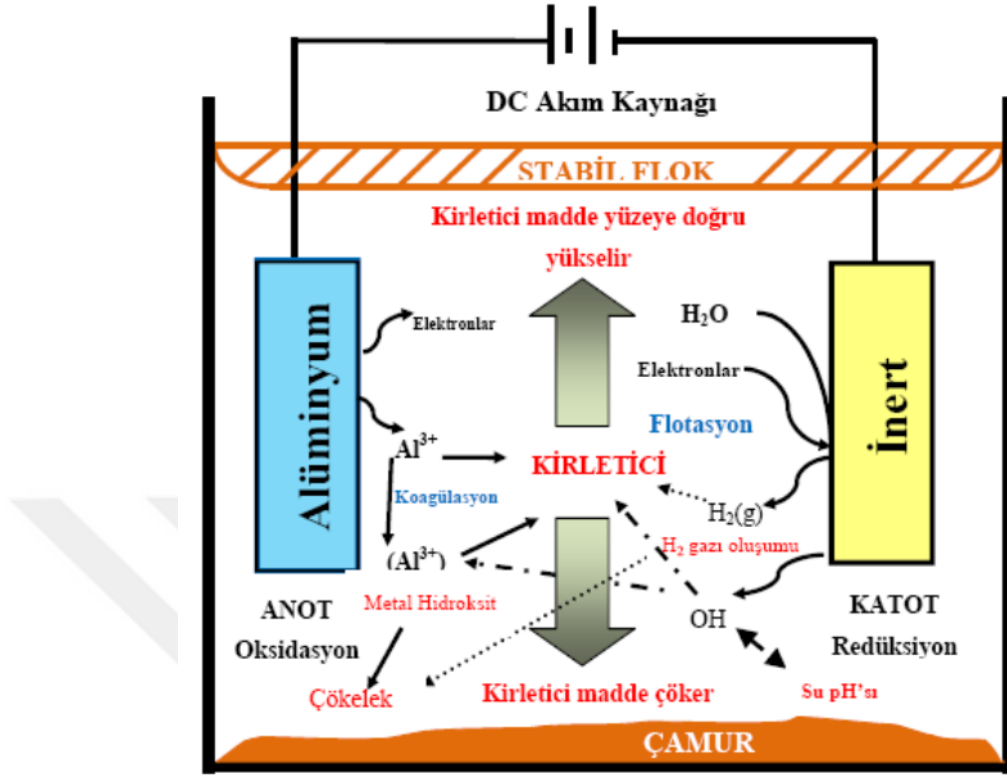
2.2.1. Elektrokoagülasyon prosesinin tanımı ve teorisi

Elektrokoagülasyon prosesi, son yıllarda dünyada ve ülkemizde getirilen atıksu deşarj standartları nedeniyle endüstriyel atıksu arıtımı için kullanılan en yaygın prosestir. Bu

proses ile arıtma uygulamasının esası elektroliz ve koagülasyon işlemlerine dayanır. Basit olarak tanımlamak gerekirse atıksulardaki kirleticilerin sisteme verilen elektrik akımı ile arıtılmasıdır, pıhtılaştırıcı özelliğe sahip demir ve alüminyum gibi metal elektrot malzemelerinin çözünmesiyle koagülant oluşturulması esasına dayanmaktadır. Koagülasyon işleminde ortama alüminyum sülfat, demir klorür gibi kimyasal maddeler eklenir. Demir ve alüminyum elektrotlarının sık olarak kullanılmasının sebebi metalik adsorbsiyon kapasitelerinin yüksek olmasıdır. Elektroliz işlemi ise bir elektrik akımı tarafından aşılın bir elektrolitin uğradığı ayrışma olarak ifade edilmektedir. Elektroliz esnasında elektrik akımı elektrolit içindeki iyonlar aracılığıyla bir elektrottan (anot) diğerine (katot) geçerken elektrotlarda kimyasal değişimler meydana gelir ve ortama metal iyonları geçer. Elektrokoagülasyon prosesinde sisteme kimyasal ilavesi yapılmamaktadır. Pıhtılaşma ve çökeltme işlemleri, reaktördeki elektrotların elektrik akımı alarak ortamdaki kolloidlerin elektriksel yüklerden etkilenmesiyle olmaktadır (Larue *et al.* 2003; Can vd 2006; Can 2010).

Elektrokoagülasyon prosesinin tercih edilme nedenleri; daha az iş gücü gerektirmesi, daha küçük alanlarda uygulanabilmesi, az ve basit ekipmana sahip olması, kimyasal ilavesi olmadığından ikincil bir kirlilik problemi oluşturmaması, uygun hücre tasarımları ve elektrot seçimi ile enerji verimlerini artırılabilmesi ve düşük konsantrasyonlarda bile birçok kirleticilerin giderimi sağlanmasıdır (Scott 1995; Bayar vd 2012).

EC prosesinde destabilize olmuş kirleticiler çöktürme ve flotasyon ile giderilmektedir. Proseste arıtım adsorbsiyon kapasitesi yüksek olan metal hidroksitlerin kirleticileri adsorbe ederek çökelti oluşturmaları ve bu çöktürmeleri atıksudan uzaklaştırması işlemine dayanmaktadır. Oluşan yumaklarda katottan çıkan hidrojen gazı kabarcıklarına yapışarak reaktörün üst kısmına doğru çıkıp elektroflotasyon ile sudan uzaklaştırılmaktadırlar. Elektrokoagülasyon prosesin de genellikle anot olarak demir ve alüminyum elektrotlar kullanılmaktadır. Basit bir elektrokoagülasyon reaktörünün kesiti Şekil 2.2’de gösterilmiştir (Can 2010).



Şekil 2.2. İki elektrotlu basit bir elektrokoagülasyon reaktörünün kesiti (Doğan 2010)

Elektrokoagülasyonun genelde art arda 3 aşamadan meydana geldiği kabul edilmektedir (Özyonar ve Karagözoğlu 2012).

- Elektrolitik oksidasyonda çözünen elektrot ile beraber koagülant oluşumu,
- Kirleticilerin destabilizasyonu, emülsiyonların kırılması ve partikül süspansiyonu,
- Destabilize edilmiş bileşenlerin flokları toplaması.

Elektrokoagülasyon prosesi tekstil endüstrisi atıksularının arıtımından başka besin endüstrisi, yağlar, ağır metal, organik kirletici içeren endüstriyel atıksuların arıtımında ve içme suyu arıtımında da uygulanmaktadır (Can 2010).

Kirleticilerin destabilizasyon mekanizması, emülsiyon kırılması ve partikül süspansiyonu şu şekilde özetlenebilir (Mollah *et al.* 2004).

- Çözeltinin içinden geçen akımdan dolayı anot elektrotun çözünmesiyle ortaya çıkan iyonların etkileşimleri sonucunda yüklü türlerin, oluşan iyonlar etrafındaki dağınık çift tabakanın sıkıştırılması sağlanır.
- Suda bulunan iyonik türlerin yüklerinin nötralizasyonu elektrokimyasal olarak çözünebilen elektrotlar tarafından üretilen zıt iyonlar aracılığıyla sağlanır.
- Flok oluşumu sağlanır (kompleks halinde bulunmayan kolloidal parçacıklar koagülasyon sonucu oluşan floklarla birlikte bir çamur örtüsü oluşturur).

Elektrokoagülasyon prosesinin uygulandığı atıksular ve potansiyel uygulama alanları aşağıda verilmektedir (Xiong *et al.* 2001; Öztürk 2005)

- Gres ve yağ içeren atıksuların arıtımı
- Boya, gıda ve tekstil endüstrisi atıksularının arıtımı
- Petrokimya endüstrileri atıksuları ve galvanize sanayi atıksularının arıtımı
- Kağıt hamuru ve kağıt endüstrisi atıksuların arıtımı
- Restorandan çıkan atıksuların arıtımı
- Organik madde bulunan sızıntı sularının arıtımı
- Membran teknolojilerinin (ters osmoz gibi) ön arıtımı
- Silis, AKM giderimiyle sertlik, kazan besleme suyunun ön şartlandırması
- Atıksudan ağır metal giderimi ve arıtma çamuru susuzlaştırma
- İçme sularının arıtılması
- Suyun tekrar kullanımından veya deşarjdan önce bakteri ve klor giderimi
- Proses işlemlerinde yıkama ve durulama sularının arıtımı
- Biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ), azot ve fosfat giderimi
- Kompleks organiklerin giderimi
- Su- yağ emülsiyonunun kırılması

Elektrokoagülasyon denemelerinde elektrot veya elektrot grupları genellikle bir doğru akım kaynağına bağlanır. Çözünmüş metal miktarı elektrolit çözeltisinden geçen akım şiddetine bağlıdır. Akım yoğunluğu (A/cm^2) ve çözünmüş madde miktarı (g veya M/cm^2) arasındaki basit bir ilişki Faraday kanunu ile hesaplanabilir. Elektrokimyasal arıtma

proseslerinde Faraday'ın Elektroliz kanunu ve bu kanundan elde edilen eşitliklerden yararlanılmaktadır. Faraday'ın deneylerinden elde ettiği sonuçlar iki kısımda açıklanır.

1. Bir elektrotta toplanan madde miktarı çözeltiden geçen elektrik yüküyle doğru orantılıdır.
2. Devreden belirli bir yük miktarının geçmesiyle, katotta açığa çıkan elementin kütlesi, elementin kimyasal eşdeğeri (ekivalen) ile orantılıdır

Faraday kanunu esas alınarak elektrokoagülasyon prosesinde kullanılan eşitlikler elde edilmektedir. Faraday kanunu çözünen madde miktarı gram olarak 3.1'de ki eşitlik ile elde edilir (Mollah *et al.* 2004; Doğan 2010).

$$m = \frac{m_a \cdot q}{z \cdot F} = \frac{m_a \cdot I \cdot t}{z \cdot F} \quad (2.3)$$

q: Bir elektrokimyasal hücreden geçen akım miktarı

t: Akım süresi

I: Akım şiddeti

m_a : Çözünen maddenin molekül ağırlığını

z: Etkime değerliğini ($Fe=2$, $Al = 3$)

F: Faraday sabiti (coulomb sayısı) 96500 C/mol değerini ifade etmektedir

Elektrokimyasal sistemin veriminin ölçülmesinde en önemli kriter akım verimi veya diğer bir deyişle Faraday değerindeki kayıptır. Bu eşitlik (2.4) aşağıdaki biçimde ifade edilir.

$$CE = \frac{q_p}{q_t} \quad (2.4)$$

CE: akım verimindeki kayıp

q_p : oluşan ürünün harcadığı yük

q_t : toplam harcanan yük değerini ifade eder.

Oluşan ürün veya harcanan materyalin miktarı esas alınarak ölçülen akım (m_{act}) ve teorik akım verimi (m) arasındaki ilişki (2.5)'de verildiği gibidir.

$$CE = \frac{m_{act}}{m} \quad (2.5)$$

(3.1) eşitliğinin (2.6) eşitliğindeki yerine yazılması durumunda;

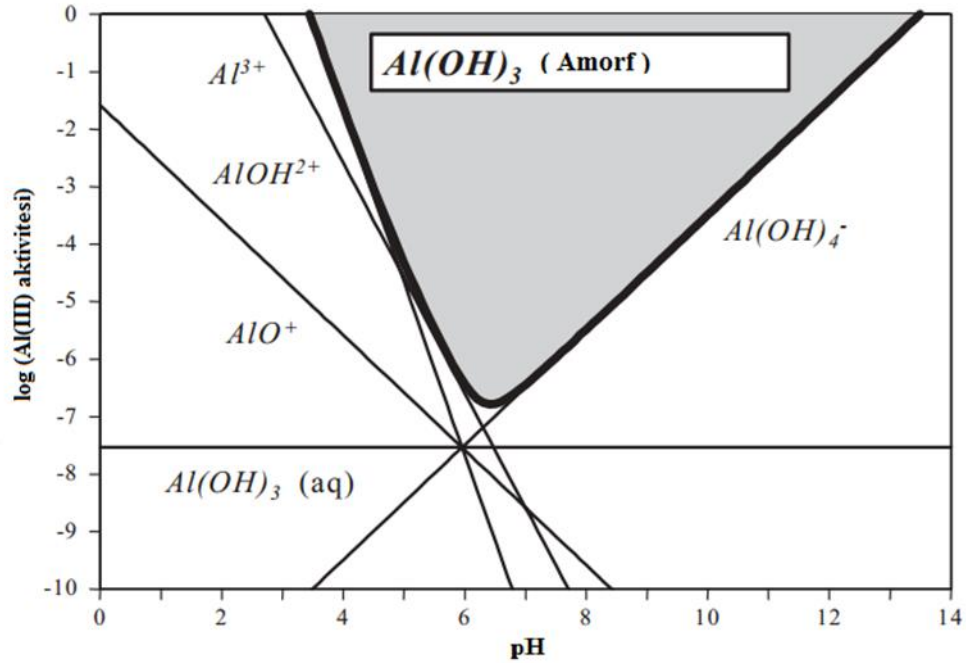
$$CE = \frac{z.F.m_{act}}{I.t.m_a} \quad (2.6)$$

Dolayısıyla elektrokimyasal bir proseste herhangi bir andaki akım verimi akıma bağlı olarak belirtilmek istenirse (2.6) eşitliğinden faydalanılmaktadır.

$$CE = \frac{I_T}{I} \quad (2.7)$$

2.2.2. Alüminyum elektrotlarla gerçekleştirilen elektrokoagülasyon prosesi

Alüminyum elektrot elektrokoagülasyon prosesinde sıklıkla kullanılır. Al elektrotta genellikle aşırı metal hidroksit oluşumundan kaynaklanan istenmeyen çökeltiler oluşabilir. Bu nedenle demir elektrotlar daha fazla tercih edilir. Fakat demir elektrot kullanıldığında da çok az çözülmüş demir iyonları suda renk oluşumuna sebep olduğundan alüminyum elektrot kullanılan sistem kadar şeffaf bir renk elde edilmemektedir (Şahin 2006). Sulu ortamda alüminyum elektrodun oluşturduğu alüminyum kompleksleri önemlidir. Şekil 3.2'de sulu ortamda Al^{3+} 'nın oluşturduğu hidroksil kompleksleri ve bu komplekslerin oluşum sabitleri verilmiştir. Elektrotlardan çözünerek çözeltiye geçen Al^{3+} iyonları sudaki hidroksil iyonları ile karışarak ortamda ki durumun pH değerine de bağlı olarak türlü kompleksler oluştururlar (Benefield *et al.* 1982).

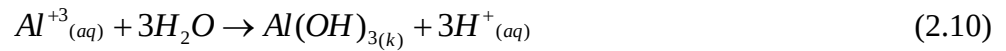


Şekil 2.3. Sulu ortamda ve pH ilişkisi ve Al kompleksleri (Benefield *et al.* 1982)

Elektrokoagülasyon prosesinde, Alüminyum anotta çözünmekte (2.8) ve katotta da hidrojen gazı oluşmaktadır (2.9). Alüminyumun çözünmesi ile anotta oluşan farklı türlerdeki Al, büyük boyutlu floklar oluşturmak amacıyla koagülant olarak kullanmakta ve kirleticilerle birleşmektedir (Solak 2007).



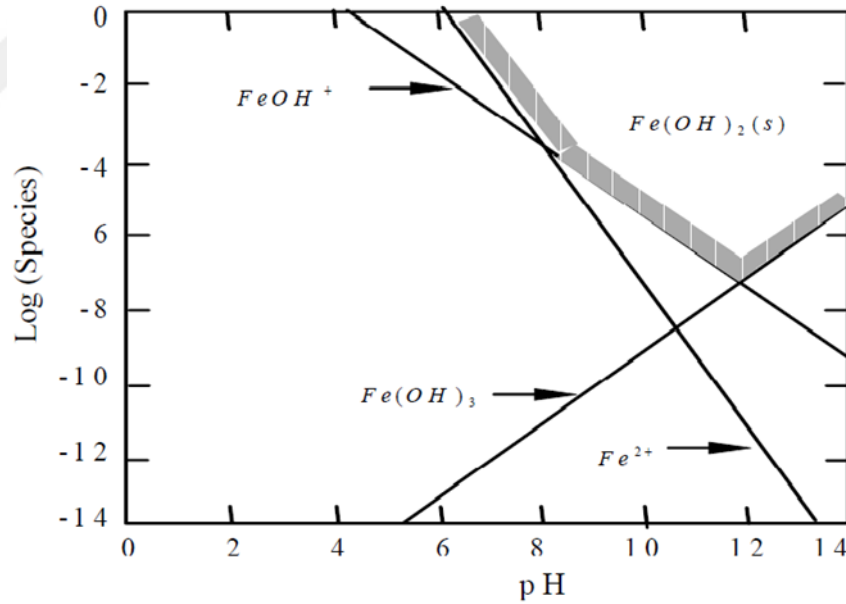
Hidroliz sırasında katotta oluşan H_2 gazı su yüzeyine doğru hareket ederek flokülasyonu hızlandırmaktadır. Al^{+3} iyonlarından katı fazda $Al(OH)_3$ oluşum reaksiyonu denklem 2.10'da gösterilmiştir (Üçevli 2017).



Elektrokoagülasyon çalışmalarında Al elektrotlarının koagülant üretimi, kimyasal koagülasyondaki çalışma sistemine benzemektedir (Mollah *et al.* 2001).

2.2.3. Demir elektrotlarla gerçekleştirilen elektrokoagülasyon prosesi

Elektrokoagülasyon prosesinde fazlaca kullanılan Fe elektrotların suda dağılmasıyla meydana gelen demir(III) kompleksleri önemlidir. Detaylı olarak şekil 3.4’de, sulu ortamda Fe^{3+} iyonunun oluşturduğu hidroksi kompleksleri ve bu komplekslerin oluşum sabitleri gösterilmiştir. Aynı zamanda Çizelge 2.9’da da görüleceği üzere suda bulunan hidroksil iyonları elektrotlardan çözünmüş olan Fe^{3+} iyonları ile birleşmek suretiyle ortamın pH değerlerine göre komplekslerin oluşumuna sebebiyet vermektedir (Benefield *et al.* 1982; Şanlı 2006; Özyonar 2007).



Şekil 2.4. Sulu ortamda pH ilişkisi ve Fe kompleksleri (Benefield *et al.* 1982)

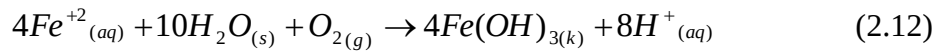
Çizelge 2.9. Fe^{3+} ve Fe^{2+} sulu ortamda oluşan hidroksil kompleks türleri (Şanlı 2006; Özyonar 2007)

Reaksiyon	logK	Reaksiyon	logK
$Fe^{3+} \leftrightarrow Fe(OH)^{+2} + H^+$	-3.00	$Fe^{3+} \leftrightarrow Fe(OH)_4^{-} + 4H^+$	-23.50
$Fe^{3+} \leftrightarrow Fe(OH)_2^{+} + 2H^+$	-6.40	$Fe^{2+} \leftrightarrow Fe(OH)^{+} + H^+$	-8.30
$2Fe^{3+} \leftrightarrow Fe(OH)_2^{4+} + 2H^+$	-3.10	$Fe^{2+} \leftrightarrow Fe(OH)_2^0 + 2H^+$	-17.20
$Fe^{3+} \leftrightarrow Fe(OH)_3^0 + 3H^+$	-13.10	$Fe^{2+} \leftrightarrow Fe(OH)_3^{-} + 3H^+$	-32.00
		$Fe^{2+} \leftrightarrow Fe(OH)_4^{2-} + 4H^+$	-46.40

Elektrokoagülasyon prosesinde elektrot olarak Fe anodun elektrolitik çözeltideki çıktıları düşük pH'da demir hidroksit ($Fe(OH)^{-}$) gibi anyonik türler olmaktadır. Fe elektrotlar kullanıldığında $Fe(OH)^{-}$ üretimi için iki farklı mekanizma ileri sürülmektedir (Üçevli 2017). Elektrokoagülasyon prosesinde demir elektrodunun oluşturduğu iki mekanizma (3.8-3.15) denklemlerinde gösterilmiştir (Solak 2007).

1. Mekanizma

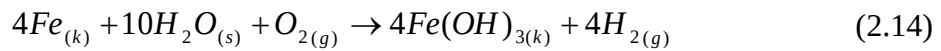
Anot:



Katot:



Toplam Reaksiyon:



2. Mekanizma

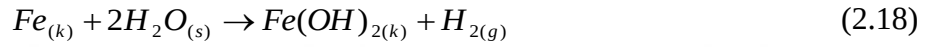
Anot:



Katot:



Toplam Reaksiyon:



Yükseltgenme indirgenme reaksiyonları sonucu üretilen H₂ gazı, çözülmüş organikleri veya askıda katı maddeleri flotasyon ile gidermektedir (Üçevli 2017).

2.2.4. Elektrokoagülasyon prosesinde verimi etkikeyen faktörler

Elektrokoagülasyon prosesinde giderim verimine etki eden faktörler akım yoğunluğu, pH, elektrot türü, elektrotların yerleşimi ve bağlantı tipi, iletkenlik, reaksiyon süresi ve sıcaklık olup aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

2.2.4.a. Akım yoğunluğu

Birim elektrot alanından geçen akım, akım yoğunluğu olarak tanımlanır. Birimleri mA/cm² ve A/m² ile ifade edilir. Akım yoğunluğu, tüm elektrokimyasal prosesleri etkilediği gibi EC prosesinin verimliliğini ve hızını etkileyen en önemli faktörlerdendir. Akım verimi anyonların türüne ve pH, sıcaklık, debi gibi değişkenlerede bağlıdır (Mollah *et al.* 2001; Chen 2004; Şengil vd 2009). Akım yoğunluğunun artmasıyla verimde artış meydana gelmekte ve çıkış suyunun kalitesinde iyileşme görülmektedir. Akım yoğunluğu arttığında katottaki ve anotta ki iyon üretimi de artmaktadır. Bu sebeple de çözeltideki flok oluşumunu arttırmakta ve renk gideriminide geliştirmektedir (Daneshvar *et al.* 2003). Elektroliz reaksiyonlarının verimliliğini ölçmede kullanılan önemli parametrelerden

birisi Akım verimliliğidir. Akım yoğunluğu ile zaman birbirine bağlıdır. Akım yoğunluğu arttırıldığında reaksiyonun süresinde azalma görülmektedir. Elektrokoagülasyon yöntemi için Akım yoğunluğunun optimizasyonu çok önemlidir. Hücre potansiyelinin ve akımın çarpılması ile elektrik sarfiyatı bulunmaktadır. Olması gerekenden fazla akım yoğunluğu maliyetin artmasına ve akım yoğunluğuna bağlı olarak çamur oluşumunun da artmasına neden olur (Chen 2004).

2.2.4.b. pH

Elektrokoagülasyon sırasında pH parametresi reaktörde gerçekleşen elektrolitik reaksiyonları ve metal iyonlarının çözünürlüğünü etkileyen önemli bir faktördür. Prosesler sonucunda pH değişimleri görülmektedir. Çoğunlukla ortamın pH'sı işlem süresince değişmektedir. Bu değişim elektrot materyalinin başlangıç pH'sına ve türüne bağlıdır. Bazı çalışmalarda geniş pH aralığında istenilen verim elde edilmekte ve sistemde başlangıç pH düzenlemesine ihtiyaç duyulmamaktadır (Koby *et al.* 2006). Bazı çalışmalarda ise optimum pH değerinin belirlenmesi ve istenilen giderim performansı için başlangıç pH değerinin ayarlanması gerekmektedir.

Proseste alüminyum elektrot kullanıldığı zaman başlangıçta çözeltinin pH'ı bazik (pH 8'den büyük) ise çıkış suyunun pH'sı daha düşük, asidik (pH 8'den küçük) ise çıkış suyunun pH'sı daha yüksek olmakta ve bu durum Elektrokoagülasyon prosesinin avantajlarından birisi sayılmaktadır (Vik 1984). Demir elektrotlarında her zaman çıkış suyu pH değeri, başlangıç pH değerinden yüksektir. Elektrokoagülasyon prosesindeki bu sonuçlar alkali ortamda suyun bir miktar tampon kapasitesine sahip olduğunun göstergesidir. Kirletici gideriminin en iyi olduğu pH değeri 7 civarındır. Güç tüketiminin yüksek olduğu pH değeri ise nötr pH'tır. pH etkisinin önemli olmadığı durum ise iletkenliğin yüksek olduğu durumlardır (Chen 2004; Vardar 2006). Giderim performansı hem başlangıç pH'sına hem de son durumdaki pH değerine bağlıdır (İlhan vd 2007).

2.2.4.c. Elektrot türü

EC prosesinde kirleticilerin hangi metal hidroksitlerle giderileceğinin belirlenmesi seçilen elektrot türüne bağlıdır. Genellikle demir, alüminyum ve çelik elektrotlar kullanılmaktadır. Arıtılacak suyun kompozisyonuna bağlı olarak farklı elektrot türleri ile de istenen arıtma verimi sağlanabilmektedir.

Demirin ucuz olması nedeniyle çoğunlukla atıksu arıtımında demir, su arıtımında ise alüminyum elektrotlar tercih edilmektedir. Alüminyum elektrotlar tek başlarına veya demir elektrotlarla birlikte atıksu arıtımında da kullanılmaktadır. Atıksu da önemi miktarda Ca^{2+} ve Mg^{2+} bulunması halinde katot olarak paslanmaz çelik elektrotların kullanılması gerekmektedir (Chen 2004; Ifill 2010).

Elektrokoagülasyon prosesi için uygun elektrot tipinin seçilmesinde dikkate edilmesi gereken hususlar (Ifill 2010):

- Elektrot materyali elektrokimyasal olarak oksitlenmeli ve suda çözünebilir olmalıdır.
- Metal hidroksitler düşük çözünürlük çarpımına sahip olmalı böylece çözeltideki kalıntı miktarı en alt düzeye çekilmiş olur.
- Elektrot materyali kolay temin edilebilmeli ve ucuz olmalıdır.
- Elektrot materyali toksik olmamalıdır.

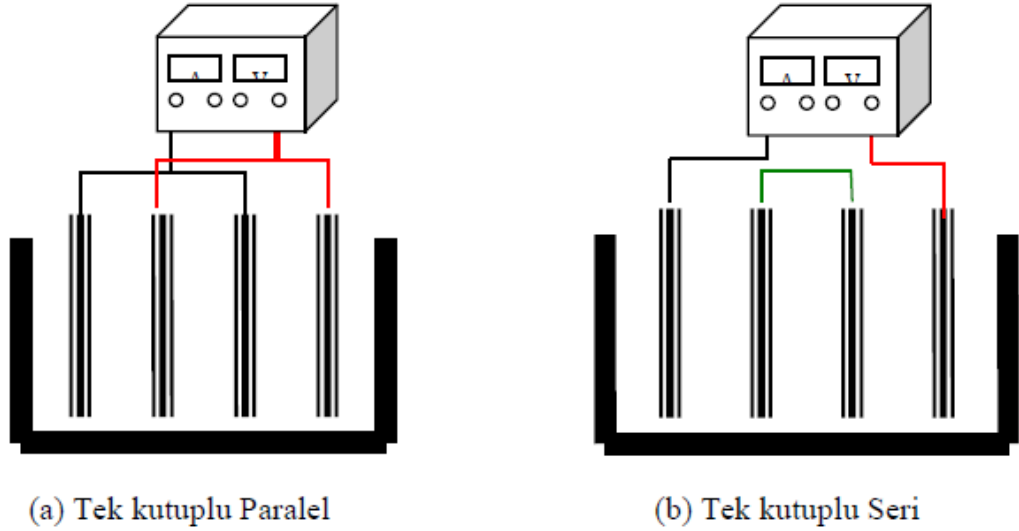
2.2.4.d. Elektrotların yerleşimi ve bağlantı tipi

Elektrotlar arası mesafenin, EC prosesinin arıtım performansı üzerine etkisi diğer faktörlere göre daha fazladır. Elektrotlar arası mesafe arttığında potansiyel fark ve buna bağlı olarak elektrik tüketimi de artmaktadır. Elektrotlar arası mesafenin ne çok fazla ne de çok az olması istenir. Uygun mesafenin sağlanması ile EC prosesi istenen performansta çalıştırılır. Mesafe çok yakın olduğunda flok oluşumu ve flokların adsorplama yetenekleri az olur. Çok uzak olduğunda ise potansiyel farktaki artışa bağlı olarak EC prosesi ekonomik bir çözüm olmaktan uzaklaşır (Aygün 2012).

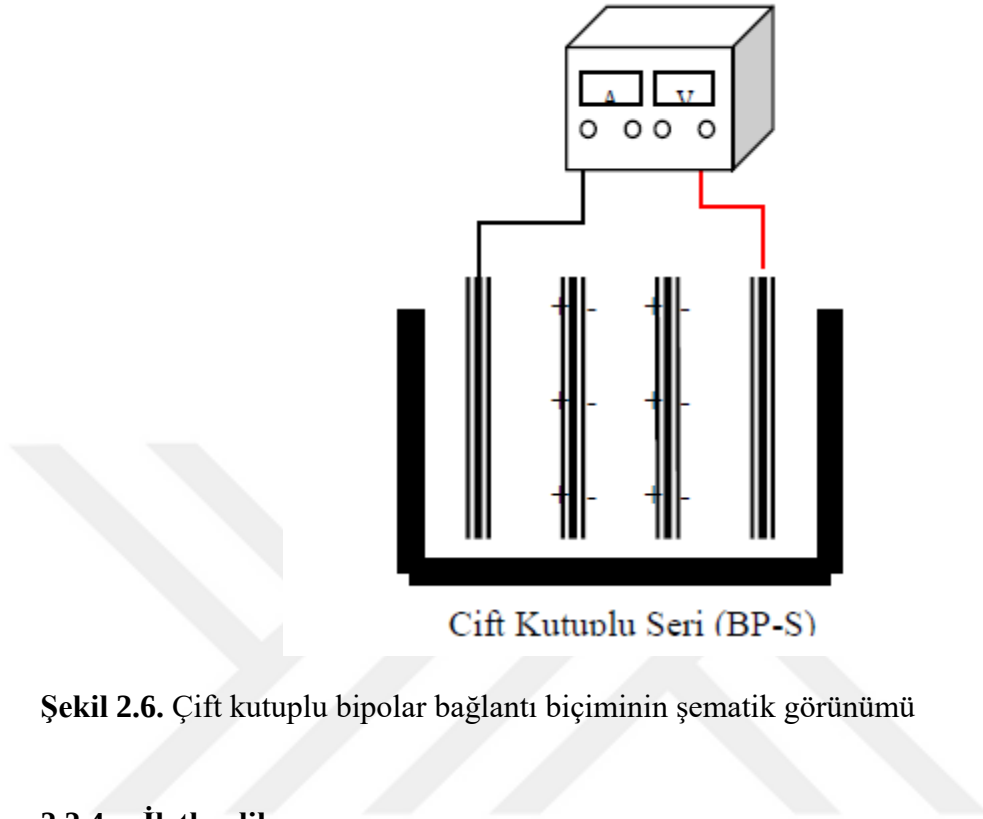
Reaktör tasarımı, elektrotların yerleşimi, bağlantı biçimleri ve iletkenlik gibi enerji tüketimini etkileyen faktörler arasında yer almaktadır. Bu sebeple işletme açısından önemlidir. Elektrotlar arası mesafenin değişmesi, kirletici giderim veriminden çok enerji tüketimini etkilemektedir (Phalakornkule *et al.* 2010).

Elektrokoagülasyon reaktörü oluşturulurken anot ve katot kutuplar arasında farklı bağlantı şekilleri uygulanabilmektedir. Tek kutuplu (monopolar) veya çift kutuplu (bipolar) bağlantılar en çok tercih edilenlerdir.

Tek kutuplu bağlantı biçimleri Şekil 2.5’de görülebileceği üzere paralel veya seri olabilmektedir. Bir diğer bağlantı biçimi ise çift kutuplu (bipolar bağlantıdır) olarak seri bağlantıdır Şekil 2.6’da gösterilmiştir (Doğan 2010).



Şekil 2.5. Tek kutuplu bağlantı biçimlerinin şematik görünümü



Şekil 2.6. Çift kutuplu bipolar bağlantı biçiminin şematik görünümü

2.2.4.e. İletkenlik

İletkenlik elektrokoagülasyon prosesinde enerji tüketimi açısından büyük önem taşımaktadır. Elektrokoagülasyon dahil pek çok elektrokimyasal proses için önemlidir. Su ve atıksuların arıtımında iletkenliği arttırmak için genellikle tuz (NaCl) kullanılır (Vardar 2006). Yüksek iletkenlik, uygun maliyet, iyi çözünürlük, orta seviyede düşük toksisite gibi özellikleri NaCl tuzunun kullanmasının başlıca sebeplerindendir (Gourich *et al.* 2009). Atıksuda klorür iyonlarının bulunması elektriksel yüke katkı sağlamaktadır. Elektrokoagülasyonun normal şartlarda çalışmasını için ortamda %20 oranında klorür iyonunun olması gerekmektedir. İlave edilen tuz iletkenliği arttırıp aynı zamanda elektrik sarfiyatının azalmasına da katkı sağlamaktadır. Klor su dezenfeksiyonunda da etkilidir (Can 2010; Akbaş 2014).

2.2.4.f. Reaksiyon süresi

Tüm giderim proseslerinde olduğu gibi elektrokimyasal proseslerde de reaksiyon süresi önemlidir. Gerekli olandan az bir giderim süresi uygulandığında iyi verim sağlanamaz. Reaksiyon süresinin uzaması da gerekse köpük ve çamur oluşumu bakımından ve gerekse maliyet açısından uygun olmamaktadır (İlhan vd 2007). Farklı bir deyişle, her atıksuyun giderim süresi çok farklı olabilir. Örneğin; bir atıksuyun renk gideriminde yarım saat reaksiyon süresi yeterli olmakta iken, krom gideriminde yaklaşık iki saat reaksiyon süresine ihtiyaç duyulmaktadır. Reaksiyon süresi arttırıldığında çözünen metal iyonlarının miktarı da artmaktadır. Yapılan çalışmalar gösteriyor ki elektrokoagülasyon için belirlenen optimum reaksiyon süresinden sonra zamanın arttırılması ile kirletici giderim veriminde artış olmakta ve çoğunlukla sabit kalmaktadır (Aygün 2012). Fakat, alüminyum elektrot kullanıldığında optimum renk gideriminin elde edildiği elektroliz süresinden sonra oluşturulan metal hidroksitler tarafından adsorplanan boyarmadde moleküllerinin flokların çözünmesi ve pH'daki değişim gibi nedenlerden dolayı tekrar suya karışmasıyla süre artışına bağlı olarak verimde önemli bir düşüş tespit edilmiştir (Yang and McGarrah 2005).

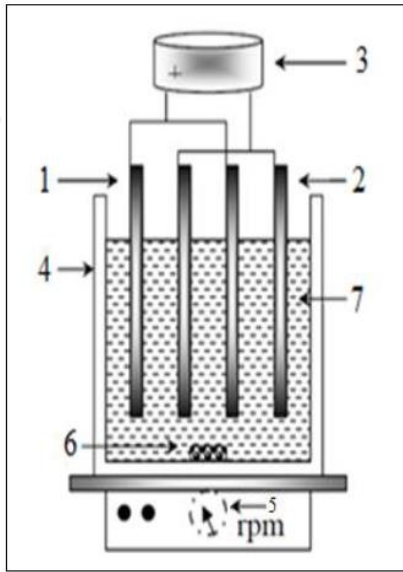
2.2.4.g. Sıcaklık

Sıcaklık tüm kimyasal proseslerde olduğu gibi elektrokoagülasyon prosesinin de reaksiyon hızını artırmaktadır. Yüksek sıcaklık değerlerinde elektrokoagülasyon prosesinde ki yumak ve metal hidroksit floklarının tekrar çözünmesi gerçekleşmekte böylelikle verimin azalmasına sebep olmaktadır (Türkoğlu 2007). Sistemde 60°C'ye kadar oluşan sıcaklık, akım verimini arttırmakta ve sonraki sıcaklıklar ise akım verimini düşürmektedir. Akım veriminin düzenli bir sıcaklıkla artması elektrot kesitinde ki alüminyum oksit filmin bozunmasıyla artan aktiviteye bağlanmaktadır. Sıcaklığın beklenenden fazla yükselmesiyle alüminyum hidroksit jelinin büyük gözeneklerinde bir küçülme olmakta ve bu küçülme elektrot kesitinde birikmeye daha yatkın flokların oluşumuna meydan vermektedir. Akım verimine benzeyen ama daha düşük sıcaklıkta enerji tüketimi de yüksek değere ulaşmaktadır. Yağlı atıksular için sıcaklık 35°C olarak

kesinleşmiştir. Bu durum sıcaklığın iletkenlik üzerine ters etkisi ve akım verimi ile açıklanmaktadır. Sıcaklığın artmasıyla beraber iletkenlikte artırmakta ve buna bağlı olarak enerji tüketimi azalmaktadır (Chen 2004).

2.2.5. Elektrokoagülasyon prosesinde kullanılan reaktör tipleri

EC reaktörünün çalışma prensibi anot ve katottan oluşan elektrotların uygun bir şekilde yerleştirilerek elektrolit içine daldırılmasıdır. Deneysel çalışmalarda suyun reaktör içerisinde homojen olarak karışması için magnet kullanılır. Elektrokoagülasyon prosesinde performansın iyileştirilmesi için tek kutuplu EC pillerinin seri veya paralel bir şekilde bağlanması gerekmektedir. Çift anot ve çift katottan oluşan paralel bağlı monopolar sistem basit bir şekilde Şekil 2.8’de gösterilmektedir (Mollah vd 2004).

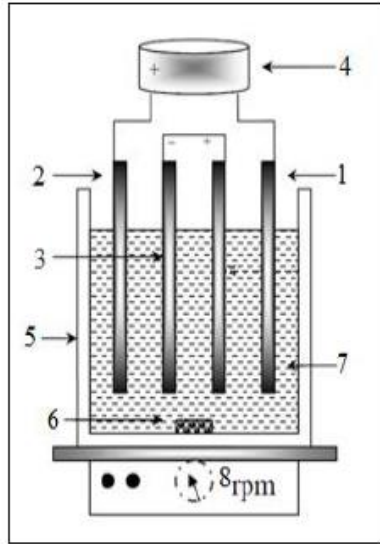


1. Paralel anot elektrotlar
2. Paralel katot elektrotlar
3. Güç kaynağı
4. Elektrokoagülasyon reaktörü
5. Manyetik karıştırıcı
6. Magnet
7. Atıksu

Şekil 2.7. Paralel bağlı monopolar elektrokoagülasyon reaktörü (Can 2002)

Şekil 2.7’de görüldüğü gibi bir çift iletken metal plakanın arasına iki adet paralel plaka yerleştirilip bir güç kaynağı konularak reaktör oluşturulabilir. Bu deneysel düzenek ile gerçek akımlarda, akım yoğunluğu ve zamanı incelenerek optimizasyon yapılmalıdır (İlhan 2006). Güç kaynağına bağlanan metal elektrotların akım ve voltaj değerleri ayarlanarak, dijital olarak okunabilmektedir (Vardar 2006). Paralel bağlı monopolar

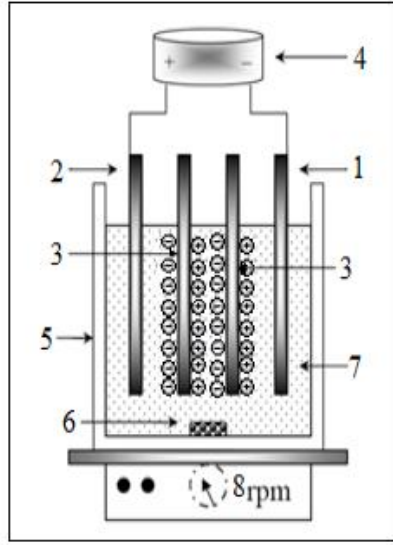
sistemde akım her bir hücrenin direncine göre bölünür. Seri bağlantı tipine göre bu sistemde daha düşük potansiyel fark gereklidir (Can 2010).



1. Monopolar katot elektrot
2. Monopolar anot elektrot
3. Çözünen anot elektrotlar
4. Güç kaynağı
5. Elektrokoagülasyon reaktörü
6. Magnet
7. Atıksu
8. Manyetik karıştırıcı

Şekil 2.8. Seri bağlı monopolar elektrokoagülasyon reaktörü (Can 2002)

Kullanılan bir diğer tip elektrokoagülasyon reaktörü ise seri bağlı elektrotlar şeklindedir. Şekil 2.8’de gösterilmekte olan bu tip bir reaktörlerde, herhangi bir çözünür veya tükenen elektrot çiftleri birbirine bağlanmakta ve anot metal ve monopolar katot elektrotlar ise bir güç kaynağına bağlanmaktadır. En dıştaki monopolar katot veya anot elektrotlar ile içteki çözünür anot ve katot elektrotların bir bağlantısı yoktur. Bu sistemlerde akım her yerde aynıdır ve reaktörde direnç daha yüksek olduğu için paralel bağlı sistemlere göre daha yüksek potansiyel fark gerektirmektedir (Mollah *et al.* 2004).



- 1 - Monopolar katot elektrot
- 2- Monopolar anot elektrot
- 3- Çözünen anot elektrotlar
- 4- Güç kaynağı
- 5- Elektrokoagülasyon reaktörü
- 6- Magnet
- 7- Atıksu
- 8- Manyetik karıştırıcı

Şekil 2.9. Paralel bağlı bipolar elektrokoagülasyon reaktörü (Delipınar 2007)

Elektrokoagülasyon bağlantı tiplerinden bir diğeri Şekil 2.9'da gösterilen paralel çift kutuplu (bipolar) sistemdir, dış kısımda bir güç kaynağına bağlanmış monopolar katot ve anot elektrotları iç kısımda ise birbirleriyle bağlantısı olmayan elektrotlar yerleştirilmiştir. Ortadaki bağımsız çözünen anot elektrotlara akım uygulandığında bir yüzü katot gibi diğer bir yüzü anot gibi davranmaktadır (Vardar 2006). Bu sistem basit bir şekilde kurulabilir ve kolaylıkla düşük bakım ihtiyaçları ile kullanılabilir. Genellikle alüminyum ve demir gibi elektrotlar kullanılır (İlhan 2006).

Elektrokoagülasyon reaktörlerinde (DC) doğru akım veya (AC) alternatif akım uygulanmaktadır. Doğru akım (DC) elektrokoagülasyon prosesinde; oksitlenmeden dolayı anot metaryalinde bir çözünme meydana getirirken, katotta su geçirmeyen bir oksit tabakasının oluşmasına ve verim kaybına neden olmaktadır. elektrokoagülasyon prosesinde doğru akım kayıpları, çözünen paralel plaka elektrotlar eklenerek aza indirilir. Birçok elektrokoagülasyon sisteminde alternatif akım tercih edilmektedir (Scott 1995; Mollah *et al.* 2001; Delipınar 2007; Özyonar 2007).

Elektrokoagülasyon prosesinde arıtım sırasında elektrotların katot tarafında katodik, anot tarafında ise anodik reaksiyonlar oluşmaktadır. Demir ve alüminyum elektrotların

ortamda çözünmesiyle yüklü partiküller nötrale olmakta ve koagülasyon işlemi başlamaktadır. Metal levhalardan çözünen iyonlar, kimyasal reaksiyonların yardımı ile kolloidal maddelerin çökmesine ve elektroflotasyon ile yüzeye çıkmasına sebep olmaktadır. Böylece atıksudan kirleticiler uzaklaştırılmış ve arıtımı gerçekleşmiş olmaktadır (Eyvaz 2005; Özyonar 2007).

2.2.6. Elektrokoagülasyon prosesinin avantajları

1. Proses çevresel ve ekonomik açıdan önemli potansiyele sahiptir çünkü ilk yatırım, işletme ve bakım maliyeti düşüktür.
2. Ekipman yapısı basit ve kolayca temin edilebilir. Ayrıca kolay işletme parametreleri ile iyi bir verim sunar.
3. İşletiminin basit olması, proses sırasında ortaya çıkan sorunlara elle müdahale edilebilmesini sağlar.
4. Birçok prosesden farklı olarak tek bir kirletici yerine birçok kirletici aynı anda giderilmekte aynı zamanda renk ve koku giderimi iyi derecede sağlanmaktadır.
5. Kimyasal ilavesine gerek olmadığından dolayı ikincil kirlilik oluşturmaz ve işletimi ve bakımı daha kolay olur.
6. Elektrokoagülasyon sonucu oluşan çamur formu genellikle metal hidroksitler şeklinde oluştukları için kolayca çökebilme ve susuzlaşabilme özelliklerine sahiptirler.
7. Elektrokoagülasyon ile oluşturulan flok formları kimyasal floklara benzemesine rağmen daha az su içeren, daha büyük ve kararlı bir yapıya sahiptir. Ayrıca filtrasyon ile hızlı bir şekilde ayrışabilirler.
8. Elektrokoagülasyon sonucu oluşan toplam çözünmüş katı madde içeren su, kimyasal arıtıma oranla oldukça azdır. Eğer bu su yeniden kullanılacaksa toplam çözünmüş katı maddenin az olması maliyetinde az olmasını sağlar (Mollah 2001; Aşkın 2011; Güneş 2018).

2.2.7. Elektrokoagülasyon prosesinin dezavantajları

1. Elektrotlar atıksudaki çözünmüş maddelerin oksidasyonu sonucu oksitlenebilir ve periyodik olarak değiştirilmesi gerekir.
2. Elektrik maliyeti işletme maliyetini etkilediğinden dolayı elektrik kullanımı pahalı olan bölgelerde işletme maliyetide yüksek olabilir fakat kullanılması gereken enerji çok az olduğundan yüksek bir maliyet oluşturmaz.
3. Katotda oluşan geçirimsiz film tabakası prosesin verimini düşürebilmektedir.
4. İşlem yapılacak atıksu yüksek iletkenliğe sahip olmalıdır.
5. Bazı çalışmalarda çözünebilir maddeler hidroksit şeklinde çökerler (Mollah 2001; Can 2010; Aşkın 2011).

2.2.8. Tekstil atıksuları ile yapılan elektrokoagülasyon çalışmaları

Literatür incelendiğinde son zamanlarda elektrokoagülasyon prosesi ile endüstriyel atıksu arıtımı üzerine birçok çalışma bulunmaktadır. Gerçek atıksular ve sentetik sular ile ilgili yapılmış çalışmalar proses değişkenlerinin incelenmesi için faydalı olmaktadır (Özden 2016).

Özyonar ve Karagözoğlu tarafından 2012 yılında, elektrokoagülasyon ile bir tekstil atıksuyunun arıtımı üzerine çalışmışlardır. Sistemde monopolar paralel bağlı alüminyum elektrotlar kullanılarak, prosesin verimi incelenmiştir. Akım yoğunluğu, başlangıç pH ve elektroliz süresinin kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), (TOK) toplam organik karbon, renk ve bulanıklık giderimine etkisi araştırılmıştır. Deneyler sonucunda ulaşılan veriler değerlendirilerek elektrokoagülasyon prosesinin optimum şartları belirlenmiş olup, belirlenen koşullar; başlangıç pH 3, akım yoğunluğu 100 A/m² ve elektroliz süresi 20 dakika olarak tanımlanmıştır. Sonuç olarak %72,5 KOİ, %82,6 TOK, %97,7 renk ve bulanıklık giderim verimleri elde edilmiştir. Böylece tekstil atıksuyu arıtımında elektrokoagülasyon yönteminin başarılı olduğu sonucuna varılmıştır (Özyonar ve Karagözoğlu 2012; Özden 2016).

Can ve arkadaşları tarafından yapılan ve 2005 yılında yayınlanan tekstil atıksularının elektrokoagülasyon ile arıtılması çalışmalarında toz aktif karbon (PAC) ya da alum gibi kimyasal koagülant ilave edilmesinin KOİ giderimine etkisi incelenmiş ve kimyasal madde tüketimi, elektrot ve elektrik enerjisi bakımından işletme maliyeti analizleri yapılmıştır. Klasik jar test deneyinde pH 5.5'e ayarlanarak alüminyum ve PAC kimyasal koagülant olarak kullanıldığında KOİ giderimi %78 verim elde edilirken, elektrokoagülasyonda ise 10 dakika reaksiyon süresi ve 100 A/m² akım yoğunluğunda tekstil atıksularının doğal pH'sında (pH 6,9) KOİ gideriminde %50 verim elde edilmiştir. Bu durumda Daha yüksek KOİ verimi elde edebilmek için pH'nın başlangıçta azaltılması ve elektrokoagülasyon süresince pH 6'dan daha az olması gerektiği bulunmuştur. Fakat atıksuya başlangıçta alum veya PAC gibi bir kimyasal koagülant ilave edilmesi birleştirilmiş elektrokoagülasyon için daha uygun olduğu bulunmuştur. Birleştirilmiş (combined) elektrokoagülasyonda; başlangıçta eklenen ve elektrokimyasal olarak üretilen alüminyum ile PAC miktarına bağlı olarak KOİ giderim veriminde ve hızında alumina göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Fakat işletme maliyeti göz önüne alındığında bu iki tuzun verimleri birbirleriyle aynı bulunmuştur. Başlangıçta atıksuda alüminyumun bulunması çözünen partikülleri ve organik bileşikleri adsorblayan daha çok flok oluşumuna yol açmıştır. Deneyler sonucunda elektrokoagülasyonun hızı ve verimi geliştirilmiş ve enerji tüketiminin azalması işletme maliyetinde azalma sağlayacağı kanısına varılmıştır (Can vd 2005)

Bayramoğlu ve arkadaşları tarafından yapılan ve 2004 yılında yayınlanan bir tekstil atıksuyunun demir ve alüminyum elektrot kullanarak yaptığı elektrokoagülasyon prosesi deneyinde sabit akım yoğunluğunda (100 A/m²), işletme süresinin proses verimine etkisini incelemiştir. Etkili bir renk ve KOİ giderim verimi elde etmek için demir elektrotlarla 10 dakika yeterli gelirken, alüminyum elektrotlarla 15 dakika reaksiyon süresinin yeterli olduğu görülmüştür. Diğer taraftan reaksiyon süresi ile akım yoğunluğunun proses performansında emsal etkiler göstermesi sebebiyle bu iki değişkenin beraber ifade edilebileceği kanısına varılmıştır. Ortaya çıkan bu yeni değişken yük yüklemesi (suyun birim kütlesi veya hacmi başına Faraday) olarak ifade edilmiştir (Bayramoğlu 2004; Türkoğlu 2007).

Lin ve Peng tarafından yapılan ve 1994 yılında yayınlanan demir elektrotlar kullanılarak (toplam aktif yüzey alanı: 324 cm²) tekstil atıksularının elektrokoagülasyon ile arıtımı deneyinde. 1 000 cm³'lük bir reaktörde, akış hızı 0,75 L/dk. olacak şekilde elektrokoagülasyon üzerine iletkenlik, pH, enerji gereksinimi ve polielektrolit ilavesinin etkileri (PAC) incelenmiştir. Optimum şartlar; zaman 10 dk., iletkenlik 1 000 µmho/cm, pH 6 olarak belirlenmiştir. 40 mg/L PAC ilavesi kimyasal oksijen ihtiyacı değeri 800-1 600 mg/L arasında değişmekte olup, giderme verimi %70 civarındadır. AKM ise 200 mg/L'nin altına düşürülmüştür (Güney 2013).

Literatürde yapılan bir diğer çalışmada, alüminyum ve demir elektrotlarının kullanıldığı elektrokoagülasyon prosesi ile tekstil atıksularının arıtılmasında maliyet karşılaştırması yapılmıştır. Bu çalışmada paralel ve seri bağlı alüminyum ve demir elektrotlar kullanılmıştır. Elektrik, tükenen elektrot, çamur taşıma, iş gücü, işletme, yıpranma payı gibi doğrudan ve dolaylı maliyet parametreleri 1 000 m³/günlük kapasiteye sahip tekstil işletmesinden alınan 1 m³ atıksu için toplam maliyetin hesaplanmasında göz önünde bulundurulmuştur. Sonuçlar, alüminyum ve demir için en çok maliyet sunan sistem olduğunu göstermiştir. Bu elektrotlar KOİ ve bulanıklık giderme içinde benzer sonuçlar sergilemiştir. Tekstil atıksuyundan KOİ ve bulanıklık gidermede optimum pH'nın demir elektrot için 7, alüminyum elektrot için 5 olduğu tespit edilmiştir. 30 A/m²'lik akım yoğunluğunda, 15 dakikalık işletme süresinin alüminyum ve demir elektrotlar için yeterli olacağı bulunmuştur. Sonuç olarak elektrokoagülasyon prosesinin, tekstil atıksularından bulanıklık ve KOİ gidermede kimyasal koagülasyona göre hızlı olması, daha az çamur üretmesi, daha az materyal harcanması yanında verimli olduğu da belirlenmiştir. Optimum değerlerde elektrokoagülasyon prosesi kimyasal koagülasyon prosesine göre maliyetin daha az olacağı belirtilmiştir (Bayramoğlu 2007; Kara 2009).

2.3. Cevap Yüzey Metodu

Elektrokoagülasyon prosesinin performansını geliştirmek ve verimi düşük maliyetlerde yükseltmek en önemli amaçtır. Bu amaca erişebilmek için kullanılan yöntem optimizasyon yöntemi denir (Uzunoğulları 2010). Optimizasyon, prosesin belirlenen

cevaplar (hedefler) doğrultusunda, bağımsız değişkenlerin birbirleriyle olan etkileşimleri ve bu bağımsız değişkenlerin cevaba (hedefe) olan etkileri de göz önüne alınarak bir araya getirilmesidir. Son yirmi yıl içinde bilgisayar yazılımlarında matematiğin, sayısal analizin ve mühendisliğin uygulanması ile optimizasyon teorisinde çok fazla ilerleme kaydedilmiştir (Koç ve Kaymak 2009). Bir optimizasyon işlemi, genellikle hedef fonksiyonu olarak adlandırılan önceden tanımlanmış kriterleri maksimize veya minimize etmek için (örnek olarak kâr ya da ürün kalitesi) karar (bağımsız) değişkenleri olarak isimlendirilen şartların değiştirilmesini içermektedir (Banga *et al.* 2003; Koç ve Kaymak 2009).

Deneysel mühendislik verilerine yorumlama, analiz etme, planlama çalışmaları açısından istatistiksel yöntem ve yaklaşımlar son yıllarda önemli olmuştur. Tasarlanmış Denemeler, uygulamada güvenilir, geçerli, ekonomik koşullar altında ürün karakterini etkileyen birçok değişkeni tasarlamak önemlidir. Prosesin verimini arttırmak, kâr ve yatırımlar üzerindeki etkisini görebilmek, stabiliteyi arttırmak, proses yeterliliğini değerlendirmek, reaksiyon süresini ve en iyi son ürün koşullarını değerlendirmek açısından oldukça önemlidir (Antony 2003; Oba 2012).

Geleneksel metotlarında her bir parametrenin sistem performansı üstüne etkisi araştırıldığında diğer parametreler sabit tutulmak koşuluyla araştırma yapılmaktadır. Bu halde, aynı zamanda sistem performansını etkileyen bütün değişkenlerin, farklı seviyelerdeki etkilerinin incelenmesi mümkün değildir. Kaynakların verimli kullanılması, deney sayısının azaltılması, maliyetten ve zamandan tasarruf ve en önemlisi araştırma-geliştirme faaliyetlerine hız kazandırılması için sistemin incelenen cevabının ölçülmesine olanak sağlayacak deneysel tasarımının yapılması gereklidir (Aygün 2012). Değişken zaman yöntemi, herhangi bir parametre değişiminin diğer parametre değişkenlerini sabit tutarak uygun çalışma şartlarının belirlenmesidir. Yöntemin en belirgin olumsuz yanı değişkenlerin interaktif etkilerini kapsamaması ve parametrelerin etkilerinin prosese tam anlamıyla yansıtılamamasıdır. Bu sorun cevap yüzey metodu (CYM) kullanarak çözümlenebilmektedir (Baş ve Boyacı 2007; Uzunogulları 2010).

Deneysel tasarım yöntemlerinde izlenmesi gereken adımlar şu şekilde sıralanabilir (Doğan 2010),

1. Problemin tanımlanması
2. Faktörler (bağımsız değişken) ve faktörlerin seviye, aralıklarının seçimi
3. Cevap (bağımlı) değişkeninin seçimi
4. Deneysel tasarım matrisinin oluşturulması
5. Deneylerin yapılması
6. Regresyon analizi ile regresyon katsayılarının belirlenmesi, faktörlerin verim cevap değişkeni üzerindeki etkisinin belirlenmesi
7. Verilerin ve modelin istatistiksel analizi
8. Sonuçların değerlendirilmesi

Bu çalışmada deneysel tasarım yöntemi olarak cevap yüzey metodu (CYM) seçilmiş, Elektrokoagülasyon deneyleri bu istatistiksel yönetime dayanılarak gerçekleştirilmiştir. Cevap yüzey metodu ilk kez 1951 yılında Box ve Wilson tarafından ‘Denemelerin Optimum Koşullara Ulaşması’ ismiyle kullanılmış ve geliştirilmiştir. İlk kimya endüstrisi alanında uygulanmıştır. Montgomery ve Myers 1995 yılında cevap yüzey metodunu, proseslerin optimizasyonu ve geliştirilmesi için gerekli matematiksel ve istatistiksel tekniklerin beraberce uygulandığı bir metot olarak belirtmişlerdir (Myers and Montgomery 1995; Koç ve Kaymak 2009). Cevap yüzey metodu, Elektrokoagülasyon prosesini etkileyen parametreler arasında etkileşimin olup olmadığını, eğer gerçekleşmişse hangi etkileşimin daha belirgin olduğunu, prosesin hangi bağımsız değişkene daha duyarlı olduğunu belirleyen bir yöntem olup bu avantajlarından dolayı da birçok alanda kullanılmaktadır (Türkyılmaz 2011; Aygün 2012).

Cevap yüzey metoduna bağlı olarak sık kullanılan üç deneysel tasarım yöntemi bulunur. Bunlar sırasıyla, Merkezi Karışık Tasarım (CCD) veya diğer adıyla Box-Wilson tasarımı, Box-Behenken tasarımı (BBD) ve Küçük Karışık Tasarımdır (SCD) (Doğan 2010).

Box ve Wilson mümkün olduğunca en az gözlem değeri ile cevap yüzeyi üzerinde cevap değişkeninin en yüksek değerini alacağı noktaya ulaşılması istenen deneme düzenlerini gerçekleştirmişlerdir. Bu maksatla bazı deneme düzenlerini kıyaslamış ve kompozit denemeleri tarif etmişlerdir (Mead and Pike 1975; Turan ve Altundoğan 2011).

Cevap yüzey metotları model regresyon yardımıyla meydana getirilir. Bir faktörün ana etkisinin veya diğer faktörlerle etkileşiminin cevap değişkeninin değerlerinde ne derece önemli bir etkiye sahip olduğuna regresyon katsayıları vasıtasıyla karar verilmektedir (Turan ve Altundoğan 2011)

Cevap yüzey desenlerini kullanarak iki veya daha fazla faktörün (örnek olarak zaman, sıcaklık ve ikisinin beraber) sonuç üzerindeki etkileri araştırılarak optimum değerlerine ulaşılabilir. Elde edilen sonuçlar kontur haritası halinde veya üç boyutlu grafik olarak ifade edilebilir. Sayıca oldukça az deneysel kombinasyon kullanılarak gerçekte test edilmeyen faktör değeri ve bunların kombinasyonları hakkında tahmin yapılabilir (Turan ve Altundoğan 2011). ‘Cevap Yüzeyi’ oluşturma amacı, deneysel bir çalışmada sonuç üzerinde etkin olan çok sayıdaki parametreden meydana gelen bir tasarım düzleminde belirli özellikleri sağlayan bir bölgeyi (etkinliği araştırılan parametreleri içeren bir aralık) ve bu bölgeye ait optimum noktayı tahmin etmektir. Bu şekilde elde edilen fonksiyon deneysel verileri temsil etmekle birlikte model uyumunun yüksek olması büyük önem arz eder (Turan ve Altundoğan 2011).

Cevap yüzey metodu uygulamalarının doğası genellikle bir dizi matematiksel ve istatistiksel tekniklerin peşpeşe uygulanması ve her bir aşamada elde edilen verilerin bir sonraki aşamada kullanılmasından oluşmaktadır. Birinci aşamada, birtakım fikirler öne sürülmek şartıyla sistemi karakterize edebilecek performans ölçüleri (cevap) ve bunlar üstünde etkili olması muhtemel faktörlerin ve değişkenlerin belirlenmesi gerekir. Bu faktörler çoğu proseste oldukça fazladır. Bu durumdan dolayı bir takım ön denemeler yapılmak kaydıyla faktörlerin istatistiksel olarak en önemli olan birkaçı seçilebilir. Yapılan bu denemeler eleme (screening) olarak isimlendirilir ve araştırmanın ilerleyen safhalarında daha az deneme yapılarak maliyet ve zaman açısından önemli kazanımlar sağlanır.

Öneme sahip değişkenler ve deneme bölgesi belirlendikten sonra ‘Cevap Yüzey Metodu’nun ikinci aşamasına geçilmekte ve bu aşamada amaç ise bağımsız değişkenlerin deneme bölgesi içinde belirlenen seviyelerinin sistemin cevabında meydana getirdikleri değerlerin, optimum noktaya yakın sonuçlar verip vermediğini saptamaktır. Optimum noktaya yaklaşıldıkça, meydana getirilen cevap yüzeydeki eğrilik doğal olarak daha belirginleşmektedir. Bu durumdan ötürü cevap yüzey metodunun bu aşaması birinci dereceden modeller kullanmak kaydıyla bu eğrilerin test edilmesinden ibarettir. Sistemin cevabını belirlemede birinci dereceden modeller yeterli olursa seçilen deneme bölgesinin sistemin optimum performansından uzakta olduğu kanısına varılır (Gürbüz 2015).

Bu durumdan dolayı, yeni bir deneme bölgesi seçilerek faktör ayarlamaları yapılır. Yapılan bu işlem, meydana getirilen cevap yüzeydeki eğriliğin önemli olduğu bölgeler bulununcaya dek devam etmektedir. Yapılan bu işlem ‘tarama’ olarak adlandırılır.

Üçüncü aşamada optimum noktaya gelindiğinde başlamaktadır. Araştırmacı bu noktada, optimum nokta çevresinde gerçek yanıt fonksiyonunu doğru ve hassas bir şekilde tahmin etmek için uğraşır. Optimum nokta etrafında gerçek yanıt fonksiyonu önemli bir eğrilik gösterir. Bu eğriliğin tahmin edilmesinde genelde ikinci dereceden polinomiyal modellerden yararlanır. Bu modelde eğriliğin tahmin edilmesinde bir önceki aşamada uygulanan deneysel dizayna ek olarak deneysel noktaların ilave edilmesi gerekir (Central composite rotatable design). Uygun bir dizayn elde edilmesinin ardından, bu model optimum noktanın araştırılmasında kullanılmaktadır. Fakat bazı durumlarda, araştırmacı birtakım fiziksel kısıtlamalardan dolayı dizayn değişkenlerini belli aralıklar içerisinde incelemesi gerekir. Başka bir deyişle, işletme bölgesi ve deneme bölgesi aynıdır. Bu durumdan dolayı, bölge taraması yapılmasına gerek yoktur. Böylece araştırmacı proses hakkında önceden detaylı bir bilgiye sahip ise anlatılan bu aşamalardan bir veya birkaçını kullanmaktan tasarruf sağlayabilir. Böylece hem zaman hem de maliyet açısından kazanımlara sahip olabilir (Uzunoğulları 2010; Dündar 2011).

Sonuç olarak Cevap yüzey metodu, üç aşamalı olarak gerçekleştirilir.

İlk aşamada tepki değerlerinin elde edilmesi için deneysel bir parametre kombinasyonu oluşturularak fiziksel deneyler gerçekleştirilir. Böylece geleneksel yöntemlerle yapılacak deney sayısına oranla daha az sayıda ve verimli deneyler yapılarak maliyetlerin düşmesi sağlanır. Gerçekleştirilen analiz sonucunda meydana getirilen matematik model vasıtasıyla bilinmeyen ara tepki değerlerinin tespiti kısa sürede yapılabilir.

İkinci aşamada elde edilen tepkilerin giriş parametreleri ile olan ilişkileri ikinci dereceden polinomiyal ya da üssel bir fonksiyon olarak ifade edilir.

Üçüncü ve son aşamada ise yüzey grafikleri ve ANOVA (varyans analizi) gibi analizler yardımıyla optimum noktalar belirlenir (Neşeli vd 2012).

2.3.1. Cevap yüzey metodu (CYM) teorisi

Bir prosesteki cevap değişkenleri ve girdi değişkenleriyle arasındaki ilişkinin yapısı bilindiği zaman, girdi değişkenleri seviyelerinin optimum cevap değerini elde edecek şekilde seçilmesi olasıdır. Fakat cevap ile girdi değişkenleri arasındaki ilişkinin gerçek yapısı bilinmediği zaman, girdi değişkenlerinin cevap üzerindeki etkilerinin deneye dayalı olarak bulunması gerekmektedir. Cevap ve bağımsız değişkenler arasındaki fonksiyonun matematiksel denklemi birçok cevap yüzey metodu probleminde bilinmediğinden dolayı tahmin edilmelidir. Başka bir deyişle, cevap ve girdi değişkenleri arasındaki ilişkiyi temsil eden deneysel bir model bulunmaktadır. Bundan dolayı, birinci aşamada elde edilen verilere en iyi uyumu sağlayacak matematiksel modelin bulunması çok önemlidir (Subaşı 2010). Genellikle cevap yüzey metodunda bağımsız değişkenlerle bağımlı değişkenler arasındaki matematiksel ilişki bilinmemektedir. Bağımsız değişken ile bağımlı değişken arasında doğru fonksiyonel (1. dereceden veya 2. dereceden polinomiyal denklem) ilişkiyi tanımlamak üzere uygun yaklaşılmalıdır (Oba 2012).

Bu gibi çalışmalarda aşağıdaki eşitlik esas alınmaktadır:

$$Y=f(X_1,X_2,X_3,\dots,X_n)+\varepsilon \quad (2.19)$$

Bu eşitlikte;

Y= bağımlı (gözlenebilen) cevap değişkeni

F= bağımsız değişkenlerin ($X_1, X_2, X_3 \dots X_n$) sürekli fonksiyonu

ε = tesadüfî hata terimi olarak tanımlanmaktadır (Oba 2012).

Bağımsız değişkenler (2.20)'de görüldüğü gibi kodlanmaktadır.

$$\text{Kod değeri} = X_i = \frac{X_i - X_{avg}}{\Delta x} \quad (2.20)$$

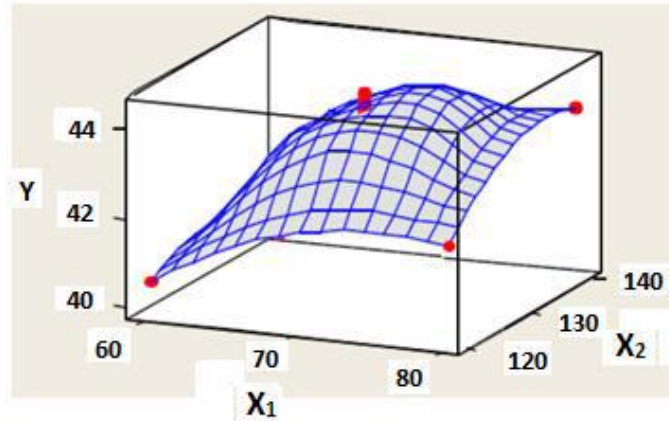
Burada X_i gerçek birimlerde i'inci faktörün gerçek değeri

X_{avg} i'inci faktör için yüksek ve düşük değerlerinin ortalamasını,

Δx ise adım değişikliğini ifade etmektedir (Bajpai 2012).

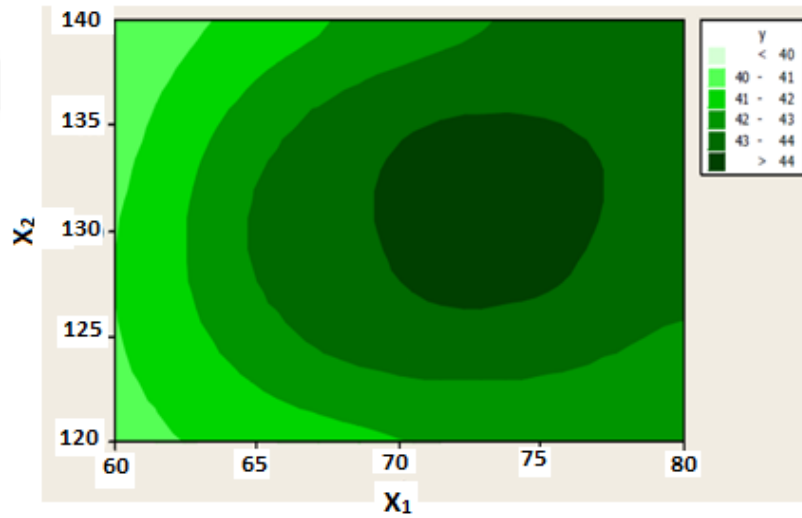
Cevap değişkeninde, bağımsız değişkenlerin etkisinin ve faktörlerin birbirleri arasındaki etkileşiminin hangi derecede önemli bir etkiye sahip olduğu meydana getirilen regresyon katsayıları vasıtasıyla model doğrultusunda karar verilmektedir. Elde edilen sonuçlar kontur grafiği şeklinde veya üç boyutlu grafik şeklinde gösterilmektedir. 'Cevap Yüzeyi Metodu' yöntemiyle deneme sayısı azaltılarak gerçekte test edilmeyen faktör değerleri hakkında değerlendirmeler yapmak olası olabilir (Oba 2012).

Örnek olarak, bir cevap yüzey grafiği Şekil 2.10'da verilmektedir. Aşağıda verilen grafikte, X_1 ve X_2 'nin her değeri Y değerini meydana getirmektedir ve verilen bu üç boyutlu grafik de cevap yüzey grafiği olarak isimlendirilmektedir (Bradley 2007; Akan 2013).



Şekil 2.10. X_1 ve X_2 'nin Y 'ye etkisinin cevap yüzey grafiği (Bradley 2007; Akan 2013)

Aşağıdaki Şekil 2.11'de ise örnek bir kontur grafiği verilmektedir (Bradley 2007).



Şekil 2.11. Kontur grafiği (Bradley 2007)

Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi açıklayan fonksiyon birçok durumda bilinmemektedir. Birinci veya ikinci dereceden denklemler genelde sistemi ifade etmek amacıyla kullanılır (Uzunoğulları 2010).

Cevap, bağımsız değişkenlerin doğrusal fonksiyonuyla güzel bir şekilde modellendiriliyorsa, yaklaşım fonksiyonu birinci derece modeldir (Akan 2013).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon \quad (2.21)$$

Sistemde bir eğri var ise, ikinci dereceden model gibi daha yüksek bir polinom derecesinden faydanılmalıdır (Akan 2013).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \varepsilon \quad (2.22)$$

İkinci dereceden model başka bir şekilde ifade edilirse:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i \neq j}^n \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (2.23)$$

X_i =bağımsız değişkenin seviyesi

$ij = 1$ “den bağımsız değişken sayısına kadar olan sayı (bu çalışmada bağımsız değişkenler akım yoğunluğu (A/m^2), reaksiyon süresi (dk) ve pH olmak üzere $ij = 1$ ’den 3’e kadar)
 β_0 =kesme terimi (her terim için $X_j=0$ olduğu zaman cevaba karşılık gelen sabit cevap değeri)

β_i , β_{ii} , ve β_{ij} sırasıyla doğrusal, kuadratik (ikinci dereceden) ve etkileşimli etki regresyon terimleri

n =bağımsız değişkenlerin sayısı

ε =rasgele hatayı ifade etmektedir.

Genellikle, ikinci dereceden polinomal bir denklem aşağıdaki gibi türetilmektedir (Bashir 2012):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 + \varepsilon \quad (2.24)$$

Yaygın olarak, cevap yüzey metodu uygulamalarında ikinci dereceden model kullanılımasının nedenleri;

- Esnekliğinden kaynaklı çeşitli fonksiyonel formlar alabildiğinden gerçek cevap fonksiyonunun tahmin edilmesinde kolaylık sağlar.
- Karmaşık hesaplamalar yapmadan en küçük kareler metodu kullanılarak katsayı değerlerinin tahmin edilmesine olanak tanır.
- Cevap yüzey metodunun problem çözümünde başarılı olduğunu kanıtlayan çok sayıda deneyin yapılmış olması.
- Matematiksel olarak optimum noktanın kolaylıkla bulunabilmesi (Aygün 2012).

Matris notasyonuyla beraber ikinci dereceden eşitliğin ifade edilmesi olasıdır. En küçük kareler yöntemi yardımıyla matris notasyonunu anlatan denklem sistemi çözülmektedir. Metod da hatanın rastgele olduğu, hataların ortalamasının sıfıra eşit olduğu ve birbirlerinden bağımsız oldukları kabul edilir (Uzunoğulları 2010).

$$Y = X\beta \pm \varepsilon \quad (2.25)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$Y \qquad \qquad \qquad X \qquad \qquad \qquad \beta \qquad \qquad \varepsilon$$

Burada, ε rasgele hatayı ifade etmektedir (Bashir 2012).

Aşağıdaki denklem yardımıyla deneylerin toplam sayısı hesaplanmaktadır.

$$N = n^3 + 2n + n_c \quad (2.27)$$

Bu denklemde, N deneylerin toplam sayısını ve n ise faktörlerin sayısıdır (Bashir 2012).

2.3.2. Cevap yüzey metodunun istatistiksel analizi

Varyans analizi (ANOVA), test edilen parça gruplarının ortalama performansları arasındaki farklılığı ortaya koymak için kullanılan istatistiğe dayanan bir metottur. Deneysel tasarım temelde varyans analizine dayanır. Bu metod Fisher tarafından 1930'lu yıllara geliştirildiği için isminin baş harfinden dolayı F-testi olarak da isimlendirilir (Bashir 2012).

Regresyon modeli tahmin edildikten sonra bu denklemi kullanarak yapılacak tahminlerin ve denklemin ilişkiyi hangi ölçüde açıkladığının hangi ölçüde hassas olacağı araştırılmalıdır. Yapılan varsayımlardan biri olan, seçilen modelin matematiksel motifinin uygunluğu vasıtasıyla gerçek ortalama cevabı temsil edebildiği de test edilmelidir. Bu amaçla regresyon analizine hipotez testlerinin uygulanması, varyasyon katsayısının (C.V) hesaplanması, regresyon katsayısının (R^2) ve düzeltilmiş regresyon katsayısının hesaplanması (R^2_{adj}), hipotez testlerinin regresyon katsayılarına bireysel olarak uygulanması, yeterli tahminleme (adequite precision) değerinin hesaplanması, model uygunsuzluğunun test edilmesi (lack of fit testi), kalıntı analizi, ve tahminlenmiş kalıntı hata kareler toplamının (PRESS) hesaplanması gibi farklı test yöntemleri kullanılmaktadır (Koç ve Kaymak 2009; Subaşı 2010).

Buna ek olarak, meydana getirilen matematiksel modelin prosesi tam anlamıyla karşılayıp karşılamadığının anlaşılabilmesi için istatistiksel analizlere ek yapılan deneylerde incelenen parametrelerden bir veya birkaçının seviyesini değiştirerek doğrulama deneyleri yapılarak modelden elde edilen sonuçla karşılaştırılabilir. Bu doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlarla matematiksel modelden elde edilen sonuçlar arasındaki hatanın kabul edilebilir sınırlar içinde olması durumunda modelin prosesi karşıladığını yani temsil ettiğini söylemek doğru olur (Subaşı 2010).

Cevap yüzey metodunda polinomal denklemin uygunluk kalitesi, regresyon katsayısı (R^2) denklem (2.28), düzeltilmiş regresyon katsayısı (R^2_{adj}) denklem (2.29), tahmin edilmiş çoklu belirleme katsayısı (R^2_{Pred}) denklem (2.30) ile açıklanmaktadır (Bashir 2012).

$$R_2 = 1 - \frac{SS_{Residual}}{SS_{Model} + SS_{Residual}} \quad (2.28)$$

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{SS_{Residual}/DF_{Residual}}{(SS_{Model} + SS_{Residual})/(DF_{Model} + DF_{Residual})} \quad (2.29)$$

$$R_{Pred}^2 = 1 - \frac{PRESS}{SS_{Model} + SS_{Residual}} \quad (2.30)$$

SS: kareler toplamı

DF: serbestlik derecesini

PRESS: tahminlenmiş kalıntı hata kareler toplamını ifade etmektedirler. Kalıntı kareler toplamı (SS_E) aşağıdaki denklemlerde gösterilmektedir (Bashir 2012).

$$SS_E = SS_{PE} + SS_{LOF} \quad (2.31)$$

$$SS_{PE} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (2.32)$$

$$SS_{LOF} = \sum_{i=1}^m n_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (2.33)$$

SS_{PE} : safsızlık hatasından dolayı kaynaklanan kareler toplamı

SS_{LOF} : model uygunsuzluğundan dolayı kaynaklanan kareler toplamını göstermektedir (Bashir 2012).

Aşağıdaki eşitlikte tahminleşmiş kalıntı hata kareler toplamı (PRESS) ifade edilmektedir.

$$PRESS = \sum_{i=1}^n e_{(i)}^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - \hat{y}(i)]^2 \quad (2.34)$$

Yeterli tahminleme değeri işaret gürültü oranına göre aşağıdaki eşitliklerde gösterilmektedir.

$$AP = \frac{\max(\hat{Y}) - \min(\hat{Y})}{\sqrt{V(\hat{Y})}} \quad (2.35)$$

$$V(Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V(\hat{Y}) = \frac{p \sigma^2}{n} \quad (2.36)$$

P: model parametrelerinin sayısı

σ^2 : kalıntı ortalama kareyi

n: deneylerin sayısını ifade etmektedir (Bashir 2012).

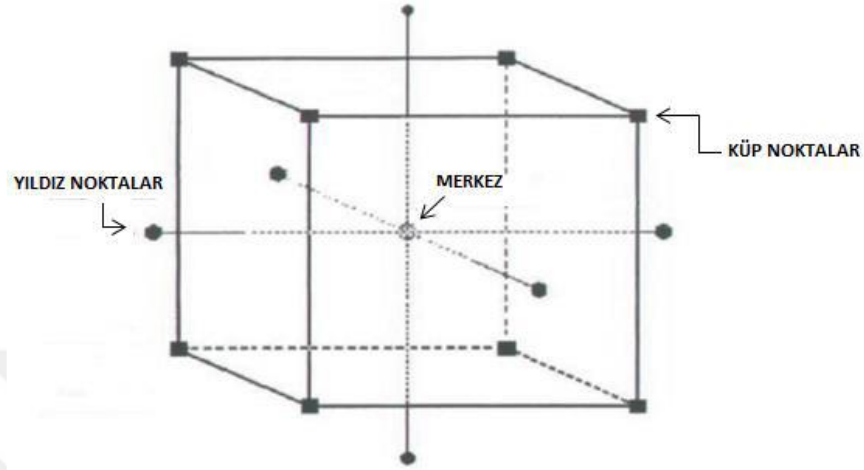
2.3.2.a. Optimizasyon

MathCAD bilgisayar yazılımı kullanılarak optimizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu işlem laboratuvarı elde edilen sonuçların excell programında veri analiz kısmında yani Varyans analizi ile elde ettiğimiz denklemlerin, MathCAD programında türevini alma işlemidir. Bu sayede verilerin maksimizasyonu sağlanmış olur.

2.3.3. Merkezi kompozit dizayn

Cevap yüzey metodunun çeşitli dizaynları bulunmaktadır. En çok kullanılan iki dizaynı, ‘Box-Behnken’ ve ‘Merkezi kompozit’ dizaynlarıdır. Merkezi kompozit dizayn, herbir faktörün beş seviyesini kullanmakta iken, Box-Behnken dizaynı her bir faktörün üç seviyesini kullanmaktadır. Merkezi Kompozit Dizayn, birkaç yıldız noktası ve merkezi nokta eklemek yoluyla meydana gelmektedir. Örnek olarak, bir faktörün beş seviyesi kullanıldığında bu seviyeler $-\alpha$, -1, 0, 1 ve α olarak kodlanmakta, $-\alpha$ ve α minimum ve maksimum noktaları, -1, 1 düşük ve yüksek seviyeyi, 0 ise orta seviyeyi ifade etmektedir. Buna ek olarak, Box-Behnken dizaynları, Merkezi kompozit dizaynlarından, sadece üç seviye kullanması ve daha az deneme noktası olması yönüyle farklılık göstermektedir (Dündar 2011). Merkezi kompozit dizayn, grafik meydana getirmeyi sağlayan, genişletilmiş merkez noktaları içeren deneysel tasarım yöntemidir (Turan ve Altundoğan 2011). Bu tezde Merkezi Kompozit Dizayn kullanılmıştır.

Aşağıdaki şekilde örnek bir merkezi kompozit dizayn modeli gösterilmektedir.



Şekil 2.12. Örnek bir merkezi kompozit dizayn modeli (Turan ve Altundoğan 2011)

Her bir faktör için yıldız noktalar için faktöriyel noktaların ötesinde $\pm \alpha$ birim, merkez noktadan uzaklık faktöriyel noktaları için ± 1 birim olmaktadır. α değeri, incelenen faktör sayısı ve tasarım için arzu edilen bazı özelliklere bağlı olmaktadır.

Yukarıdaki şekilden de anlaşılacağı üzere merkezi kompozit dizaynın en önemli avantajı, küp noktalar olan ana tasarım noktalarının dışında da deneysel tasarıma olanak tanınmasıdır. Buna ilaveten bu noktaların mevcudiyeti merkezi kompozit dizayn ile tasarlanmış bir çalışmaya döndürebilirlik kazandırmaktadır. Bu model çoğunlukla bir araştırma esnasında matematiksel olarak doğrusal modellerin yeterli gelmediği durumlarda ikinci dereceden model denklemlerinin açıklamasında ve dizaynında kullanılmaktadır. Merkezi kompozit dizaynın kullanılması halinde matematiksel model ikinci dereceden bir polinom formuna dönüşmektedir. Dolayısıyla cevap değerleri doğrusal ve ikinci dereceden modeller vasıtasıyla seçilen faktörlere bağlı olarak hesap edilir (Turan ve Altundoğan 2011).

Box ve Wilson 3^k faktöriyel tasarımlara alternatif olarak merkezi kompozit dizaynı teklif etmiştir. Önemli istatistiksel özelliklere (rotatability (döndürülebilirlik), orthogonality

(ortogonallık)) sahip merkezi kompozit tasarım, ikinci dereceden bir cevap düzeyi modelinin meydana getirilmesi için en popüler yöntemlerdendir (Subaşı 2010; Aygün 2012).

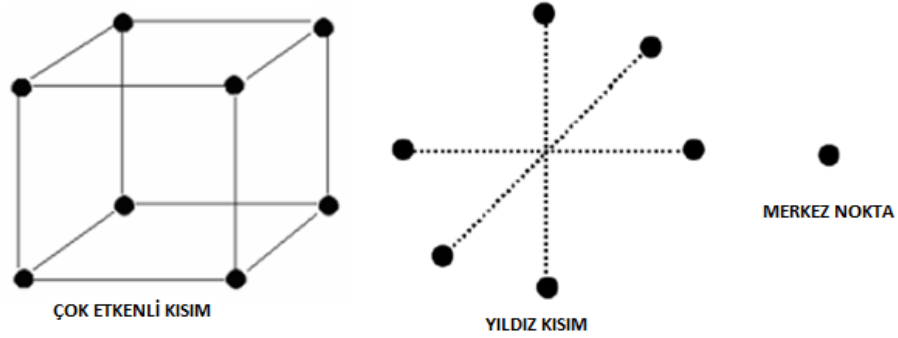
Merkezi kompozit dizayn üç bölümden meydana gelmektedir:

- k faktör sayısı olmak üzere 2^k faktöriyel veya 2^{k-m} kesirli faktöriyel tasarımıdır, burada faktör seviyeleri -1, +1 değerleri ile kodlanır. Buna tasarımın faktöriyel parçası denilir.
- n_0 adet merkez noktası ($n_0 \geq 1$).
- Her bir tasarım değişkeninin eksen üzerinde, tasarım merkezine uzaklığı α olan iki yıldız (veya eksen) noktası. Bu kısım eksen parçası veya yıldız parçası olarak isimlendirilir (Subaşı 2010; Aygün 2012).

Merkezi kompozit dizaynın kısımları Şekil 2.13'de gösterilmektedir. Burada, toplam tasarım sayısı $N = 2^k + 2k + n_0$ olmaktadır. Meydana getirilecek olan ikinci dereceden modelin ana etkileri ve birinci dereceden interaksyon etkileri 2^k denemesinden elde edilirken, merkez noktalar vasıtasıyla sistemin eğriselliği test edilmektedir (Subaşı 2010; Aygün 2012).

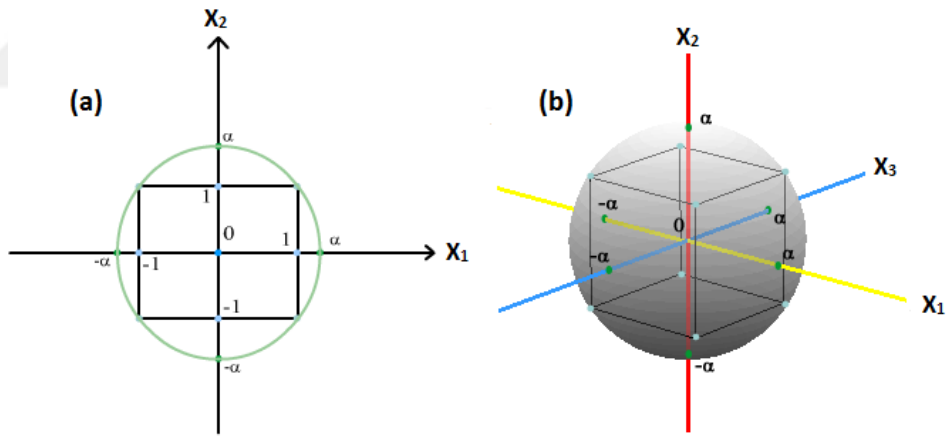
Merkezi kompozit dizayn metoduyla:

- Faktörlerin doğrusal etkisi incelenebilir.
- Faktörlerin parabolik etkileri ve faktörler arasındaki interaksyon ve karesel ilişki incelenebilir.
- Optimum koşullar tespit edilebilir.
- DeneySEL hata olup olmadığı kontrol edilebilir (Oba 2012).



Şekil 2.13. Merkezi kompozit dizaynının kısımları (Subaşı 2010; Aygün 2012)

Aşağıdaki şekillerde iki değişkenli merkezi karmaşık tasarımın Şekil 2.14(a) ve üç değişkenli merkezi kompozit dizaynın Şekil 2.14(b) analitik düzlemde gösterimi verilmektedir.



Şekil 2.14. İki değişkenli merkezi kompozit dizaynının analitik düzlemde gösterimi (a), üç değişkenli merkezi kompozit dizaynının analitik düzlemde gösterimi (b) (Oba 2012)

2.3.4. Cevap yüzey metodunun avantajları ve dezavantajları

Cevap Yüzey Metodunun avantaj ve dezavantajları;

Avantajları:

- Daha fazla bilgiye daha az deney ile ulaşılabilir.
- Bağımsız değişkenlerin etkilerini beraber inceleme olanağı tanımaktadır.
- Matematik bir model ile sistemin tanımlanması, dolayısıyla bağımlı ve bağımsız değişken arasındaki ilişkinin bu model vasıtasıyla ifade edilmesidir (Uzunoğulları 2010; Ürküt 2007).

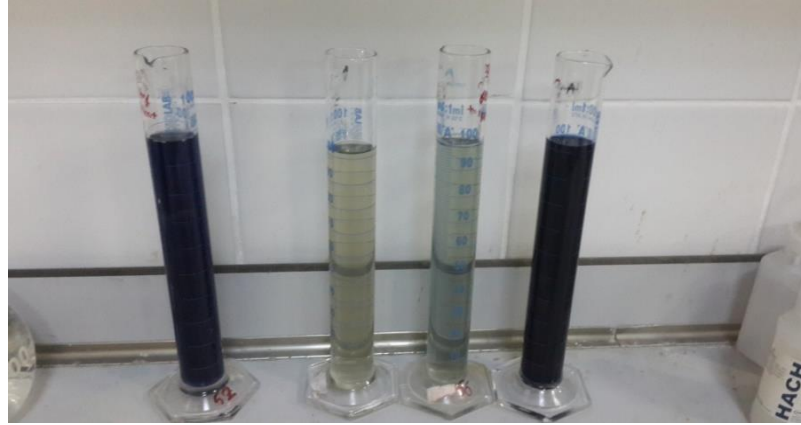
Dezavantajları:

- Hiperbolik ya da çan eğrisi şeklinde simetrik olmayan fonksiyonlar ile modellenememesi
- Elde edilen biyokimyasal süreçler gibi doğrusal olmayan sistemlerin modellenmesinde başarılı olmamasıdır (Myers and Montgomery 1995; Uzunoğulları 2010).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Tekstil Endüstrisi Atıksuyunun Karakterizasyonu

Deneysel çalışmalarda kullanılan atıksu ynl ve akrilik iplik boyahanesinden temin edilmiştir. Tesiste akrilik ve yn iplikler n terbiye işleminden geçirilmeden boyama işlemine alınmaktadır. Boyama sonrası oluşan boya banyo atıksuları ve banyo yıkama suları bir dengeleme havuzunda biriktirilmekte, evsel atıksular ile birleştirilmeden kimyasal yöntemle arıtılmaktadır. Boya banyo sularının tesis atıksularını temsil eder nitelik taşıması nedeniyle, akrilik ve ynl boya banyolarından alınan atıksular ile deneysel çalışmalar yrtlmştir. n yıkama, n durulama ve son durulama sularından eşit miktarlarda alınıp karıştırılarak deneylere başlanmıştır. şekil 3.1’de tekstil sularının ham halleri gösterilmiştir.



şekil 3.1. Eşit miktarda karışım (1), n yıkama (2), n durulama (3) ve son durulama (4)

Tez çalışmasında kullanılan tekstil endüstrisi atıksuyu, İstanbul Topkapı’da bulunan tekstil terbiye alanında faaliyet gösteren “Akınal Ynl” tekstil fabrikasından Temmuz 2018 yılında temin edilmiştir. Fabrikada, kasarlama, haşıl sökme, apreleme, boyama işlemleri gerçekleştirilmektedir. Oluşan atıksular biyolojik arıtma (aerobik) sistemi ile arıtıldıktan sonra İSKİ kanalizasyon sistemine deşarj edilmektedir. Çalışmalarda kullanılan tekstil atıksuyu yn ve akrilik iplik boyama banyosu suyu (boyama ve

durulama) proses çıkışından temin edilmiş olup deneysel çalışmalar sırasında +4°C sıcaklıktaki soğuk odada muhafaza edilmiştir. Atıksu karakterizasyonu Çizelge 3.1’de verilmektedir.

Çizelge 3.1. Tez çalışmasında kullanılan tekstil endüstrisi atıksuyunun karakterizasyonu

Parametre	Birim	Atıksu
pH	-	4,5 ± 0,2
KOİ	mg/L	2105 ± 25
İletkenlik	ms/cm	2,2 ± 0,2
Renk	Pt-Co	1120 ± 30

Akrilik boya banyosunda katyonik, yünlü boya banyosunda ise metal kompleks boyarmaddeler kullanılmaktadır.

Akrilik iplik boyama banyosu, katyonik boyarmadde için siyah (X2RN), koyu mavi (XFGRL), Asetik asit, Avolan IW Dispergator den oluşmaktadır.Yünlü iplik boyama banyosu ise; metal kompleks boyarmadde için gri (EGU), Deniz mavisi (ER), Avolan S Egalizator, Asetik asit ten oluşmaktadır.Akrilik iplik boya banyosunda kullanılan dispergatorün kimyasal yapısı alkilpoliglikoleter olup, non-iyonik yapıdadır.Yünlü iplik boya banyosunda kullanılan egalizator ise alkilaril aminopoliglikol eter/alkilamin polietilen glikol eter kimyasal yapısına sahip non-iyonik /hafif katyonik iyonik yapıya sahiptir.

3.2. Deney Düzeneginin Kurulumu ve İşletilmesi

Elektrokoagülasyon prosesine ait deneysel çalışmalar polipropilen reaktörlerde 500 ml atıksu numunesi ile gerçekleştirilmiştir. Reaktör boyutları 11,5 cm x 9,5 cm x 7,5 cm’dir. Denemelerde 4 Anot 4 katot elektrot kullanılmış ve reaktör içerisine tek kutuplu ve paralel bağlı olarak yerleştirilmiştir. Kullanılan elektrotların ebatları ise 65x130x3 mm olup suya batan kısımları 297,75 cm² yüzey alanına sahiptir ve elektrotlar arası mesafe 10 mm’dir.

Akımın (A), Akım yoğunluğuna (A/m^2) çevrilmesi aşağıda ve Çizelge 3.2’de, elektrokoagülasyon deney düzeneği ise Şekil 3.2’ de gösterilmiştir.

$$X = \frac{0,5}{0,029575m^2} x = 16,9 = 17 A/m^2 \quad (3.1)$$

Çizelge 3.2. Akımın, Akım yoğunluğuna çevrilmesi

Akım (A)	0,5	1	1,5	2
Akım Yoğunluğu (A/m^2)	17	34	51	68

Şekil 3.2’de.



Şekil 3.2. Elektrokoagülasyon deney düzeneği

3.3. Deneyin Yürütülüşü

Elektrokoagülasyon deneylerinde 500 ml atıksu kullanılmıştır. Deney süresince atıksu manyetik karıştırıcı ile 200 rpm hızında karıştırılmıştır. Deneyler, 25°C sabit sıcaklıkta ve monopolar elektrot bağlantı düzeninde gerçekleştirilmiştir. Atıksuyun pH değerinin ayarlanmasında 6 N H_2SO_4 ve 6 N NaOH kullanılmıştır.

Her deneyde, reaktöre 500 ml atıksu koyulup elektrotlar belirlenen elektrot bağlantı düzeninde elektrokoagülasyon reaktörüne yerleştirilmiştir. Çalışma başlatıldığı sırada Doğru Akım güç kaynağından voltaj değeri okunarak kaydedilmiştir. Deney sonucunda oluşan atıksu 5 dk boyunca 6000 devir/dk' da santrifüj edilmiştir.

Elektrokoagülasyon deneyleri esnasında elektrotların yüzeyinde bulunan ve biriken olan kalıntıları temizlemek için 100 ml HCl çözeltisi (35%) ve 200 mL heksametilentetramin ((CH₂)₆N₄) sulu çözeltisinin (2,8%) karıştırılmasıyla elde edilen yıkama çözeltisi ile temizlenmiş ve saf su ile yıkandıktan sonra kurutulmuştur (Arabian Journal of Chemistry 2016).

3.4. Deneyisel Çalışmalarda Kullanılan Analitik Yöntemler

Deneyisel çalışmalarda kullanılan analitik yöntemler aşağıda verilmiştir:

3.4.1. pH

pH ölçümleri, HACH-LANGE HQ40D modeli multimetre ile 4500-H⁺ (APHA-AWWA-WEF, 1995) ile belirtilen standart yöntemle göre yapılmıştır.

3.4.2. İletkenlik

İletkenlik ölçümleri, HACH-LANGE HQ40D modeli multimetre ile 2510 B (APHA-AWWA-WEF, 1995) ile belirtilen standart yöntemle göre yapılmıştır.

3.4.3. Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ)

Kimyasal Oksijen ihtiyacı deneyinde kapalı Reflux Titrimetrik yöntemi 5220-C kullanılmıştır (APHA-AWWA-WEF 1995).

3.4.3.a. Kapalı reflux titrimetrik yöntem

Açık Reflux Metodu, yüksek konsantrasyonlarda büyük hacimlerdeki atıksularda daha etkin olarak kullanılmaktadır. Kapalı Reflux Kolorimetrik ve Kapalı Reflux Titrimetrik Metodlarında daha ekonomik olan metal tuzları kullanılır. Bu sayede daha az zararlı atık oluşumu da söz konusu olur. Fakat numune partiküler madde içeriyorsa bunun homojen hale getirilmelidir. Bu yöntem KOİ değeri 40-400 mg/L olan numuneler için daha uygun olmaktadır. Gerekli malzemeler ise; Termoreaktör, pipet, Borosilikat parçalama tüpü (TFE kapaklı), ve erlendir (APHA-AWWA-WEF 1995).

3.4.3.b. Reaktifler

Standart potasyum dikromat çözeltisi (0.01667M); Önceden 150°C’de iki saat süreyle kurutulmuş olan 4,903 gr. $K_2Cr_2O_7$ kimyasalı, 167 mL H_2SO_4 , 33,3 g $HgSO_4$ 500 mL distile suda çözüldü, oda sıcaklığına soğutuldu ve 1000 ml’ye seyreltildi. **Sülfürik asit reaktifi;** 1 kg. derişik sülfürik asit çözeltisine, kristal veya toz halinde 5,5 gr. Ag_2SO_4 ilave edilerek çözüldü. Gümüş sülfatın asit içerisinde tamamen çözünmesi için 1-2 gün bekletilmesi gerekmektedir (APHA-AWWA-WEF 1995).

Ferroin indikatör çözeltisi; 1,485 gr. fenantrolin monohidrat ve 695 mg. $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ distile suda çözüldü ve 100 ml’ye tamamlandı ve daha sonra 5 kat seyreltildi.

Standart demir amonyum sülfat çözeltisi –DAS (0,1 M); 39,2 gr $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ kimyasalı, distile suda çözüldü. 20 ml derişik sülfürik asit eklendi, soğutuldu ve 1000 ml’ye tamamlandı. Bu çözelti, kullanılacağı zaman standart dikromat çözeltisiyle birlikte aşağıdaki şekilde ayarlanmalıdır(*):

* Standardizasyon: Behere 5 ml standart $K_2Cr_2O_7$ çözeltisi ve 10 ml distile su eklenip, 1-2 damla ferroin indikatörü damlatılıp demir amonyum sülfat (DAS) ile titre edilmelidir. Böylece standart DAS çözeltisi, her kullanıldığı gün için, standart dikromat çözeltisi ($K_2Cr_2O_7$) ile standardizasyon sağlanmış olur (APHA-AWWA-WEF 1995).

$$DAS'ın\ Molaritesi = \frac{Titre\ edilen\ K_2Cr_2O_7\ hacmi \times 0,1}{Harcanan\ DAS\ hacmi}$$

3.5. Deneyin Yapılışı

Parçalama tüpüne 2,5 ml numune (veya 2,5ml'ye seyreltilmiş numune), 2,5 ml standart $K_2Cr_2O_7$ çözeltisi ve 5 ml sülfürik asit reaktifi ilave edilip karıştırıldıktan sonra tüpün kapağı kapatılır. Daha sonra tüp termoreaktöre yerleştirilerek $150^\circ C$ 'de karışımın reaksiyona girmesi için 2 saat bekletilir. 2 saat sonunda numune termoreaktörden çıkarılarak oda sıcaklığına kadar soğuması beklenip, soğuyan numuneler erlene alınarak üzerine 1-2 damla ferroin indikatörü ilave edilip DAS ile kiremit kırmızısı rengi elde edilene kadar titre edilir.



Şekil 3.3'de $150^\circ C$ 'deki termoreaktörden 2 saat süresi sonunda çıkarılan numuneler, Şekil 3.4'de ise DAS ile titrasyon sonrası elde edilen kiremit kırmızısı numune gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Termoreaktördeki parçalanmış numuneler



Şekil 3.4. DAS ile titrasyon sonrası elde edilen kiremit kırmızısı numune

3.6. Hesaplama

$$KOİ (mg / L) = \left(\frac{(A - B) \times M \times 8000}{\text{numune}(ml)} \right) \quad (3.3)$$

A: Şahit için demir amonyum sülfat sarfiyatı

B: Numune için demir amonyum sülfat sarfiyatı

M: Demir amonyum sülfat çözeltisinin molaritesi.

3.6.1. Renk

Renk ölçümleri, Standart metotlarda metot 2120-C de belirtilen yöntemle göre HACH-LANGE DR5000 model Spektrofotometre ile 455 nm dalga boyunda yapılmıştır. Numuneler Spektrofotometre’de okunmadan önce 5 dk boyunca 6000 devir/dk da santrifüj edilmiştir. Koyu renge sahip atıksulara ‘saf su’ ile seyreltme yapılmıştır.

Seyreltme suyu hacmi sonuçların belirlenmesinde dikkate alınmıştır. Spektrofotometre küvetine önce saf su konularak cihaz kalibre edilmiştir. Akabinde her bir ölçüm sonrasında kalibrasyon tekrar edilmiştir.

3.7. Elektrokoagülasyon Deneyleri için Cevap Yüzey Metodu Teorisi

Elektrokoagülasyon çalışmasında kullanılan iki bağımlı değişken KOI ve Renk (sırasıyla Y_1 ve Y_2), bağımlı faktörler (cevaplar) ve üç bağımsız faktörlü değişkenler pH (X_1), akım yoğunluğu (X_2), reaksiyon süresi (t) (X_3). Elektrokoagülasyon deney matrisi 20 deneyden oluşmuştur. Bu deneyler Al ve Fe elektrotlarla ayrı ayrı yapılmıştır. Bağımsız değişkenler için deneysel parametrelerin belirlenmesinde literatür bilgileri ve boya banyo atık suları ile yapılan çalışmalar göz önüne alınmıştır (Doğan 2010; Gürbüz 2015).

Akrilik ve yünlü boya banyo atıksuları için belirlenen bağımsız proses değişkenleri ve deneysel aralıkları sırasıyla Çizelge 3.3'te gösterildiği gibidir. Çizelge 3.4'de Elektrokoagülasyon prosesinin optimizasyonu için bağımsız değişkenlerin kodlanmış ve gerçek değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.3. Elektrokoagülasyon deneyi için bağımsız değişkenler ve deneysel aralıklar

Bağımsız değişken (proses değişkeni)	Faktör X_j	Cevap yüzey metodu seviyeler				
		$\alpha = -2$	-1	0	1	$\alpha = 2$
pH	X_1	5	6	7	8	9
Akım Yoğunluğu (A/m ²)	X_2	0	17	34	51	68
Reaksiyon süresi (dk)	X_3	0	10	20	30	40

Not: akım yoğunlukları sırasıyla 0A – 0,5A – 1A – 1,5A – 2A Akımı temsil etmektedir

Çizelge 3.4. Elektrokoagülasyon prosesinin optimizasyonu için bağımsız değişkenlerin kodlanmış ve gerçek değerleri

Deney	pH	Akım Yoğunluğu	Zaman
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	0	0
13	-2	0	0
14	2	0	0
15	0	-2	0
16	0	2	0
17	0	0	-2
18	0	0	2
19	0	0	0
20	0	0	0

Deney	pH	Akım yoğunluğu	Zaman
1	6	17	10
2	8	17	10
3	6	51	10
4	8	51	10
5	6	17	30
6	8	17	30
7	6	51	30
8	8	51	30
9	7	34	20
10	7	34	20
11	7	34	20
12	7	34	20
13	5	34	20
14	9	34	20
15	7	0	20
16	7	68	20
17	7	34	0
18	7	34	40
19	7	34	20
20	7	34	20

Elektrokoagülasyon deneyleri 20 deneyden oluşmuştur. Bu deneyler Al ve Fe elektrotlarıyla ayrı ayrı yapılmıştır. Deney sayısı ve deney tasarımı STATISTICA istatistik programı kullanılarak belirlenmiştir.

3.8. Analiz Yöntemleri

Deneyisel çalışmalarda kullanılan cihaz ve araçların isimleri aşağıda verilmiştir;

- Laboratuvar ölçekli EC sistemi
- Masaüstü bilgisayar
- Etüv (Elektro-Mag-M-6040-P)
- HACH-LANGE HQ40D modeli pH - iletkenlik ölçer
- Soğuk oda (Numune saklamak için)
- Termoreaktör (WTW CR 3200)
- Santrifüj (Hettich marka Rotofix 32A)
- Hassas terazi (Precisa AS 220.R2)
- HACH- LANGE DR5000 UV-VIS spektrofotometre
- 10 mm kalınlığında kuvars küvet
- Manyetik Karıştırıcı (Wisestir MSH-20A)
- Güç kaynağı (GOOD WILL marka GPC-3060D)

Numunelerin KOI deneyinde kapalı Reflux Titrimetrik yöntemi kullanılmıştır. Renk analizleri Standart metot 2120-C'de 455 μm dalga boyunda yapılmıştır. İletkenlik ölçümleri, HACH-LANGE HQ40D modeli pH metre ile 2510 B (APHA-AWWA-WEF 1995) ile belirtilen iletkenlik ölçer cihazı ile ölçülmüştür.

Deneylerde kullanılan kimyasallar;

- 1 N NaOH
- 1 N H₂SO₄
- Standart dikromat çözeltisi
- Ferroin indikatörü
- Demir Aluminyum Sülfat
- HCl (%5'lik temizleme çözeltisi)

3.9. Elektrokoagülasyon Deneylerinde Kullanılan Hesaplamalar

Akım Yoğunluğu (J); (A/m²) hesaplanmasında aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır:

$$J = \left(\frac{I}{A} \right) \quad (3.4)$$

I: Sisteme uygulanan akım şiddeti (amper)

A: Aktif elektrot yüzey alanı (m²)

Enerji Tüketimi; Harcaan elektrik enerjisini Watt saat (Wsa) cinsinde aşağıdaki verilen eşitliğegöre hesaplanmıştır (Aygün 2012).

$$W (kW \text{ saat } m^{-3}) = \left(\frac{V \times I \times t}{V} \right) \quad (3.5)$$

E= Tüketilen elektrik enerjisi (Wsa)

V= Volt

I= Akım şiddeti (A)

t= zaman (saat)

V reaktördeki toplam çözelti hacmini

Arıtma Veriminin Hesaplanması; EC deneylerinde kirletici maddelerin giderim verimlerinin hesaplanması için aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır (Aygün 2012).

$$\eta (\%) = \left(\frac{C_0 - C_e}{C_0} \right) \times 100 \quad (3.6)$$

Burada, C₀ başlangıçta atıksudaki kirletici konsantrasyonunu (mg L⁻¹), C_e t anında atıksuda kalan kirletici konsantrasyonunu (mg L⁻¹) göstermektedir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde akrilik ve yün iplik boya banyosu atıksularından elektrokoagülasyon prosesi ile KOİ ve renk giderim verimleri incelenmiştir. Çalışmalarda alüminyum ve demir elektrotlar için ayrı ayrı renk ve KOİ giderimine yönelik uygun deneysel şartların belirlenmesi hedeflenmiştir. Yapılan literatür araştırmaları ve ön deneysel çalışmalar sonucunda renk ve KOİ giderim verimi üzerine başlangıç pH değerinin, akım yoğunluğunun (A/m^2), reaksiyon süresinin (dk) etki ettiği belirlenmiştir. Burada X_1 = pH, X_2 =Akım yoğunluğu, X_3 = Zaman, Y_1 =Fe-Renk, Y_2 =Fe-KOİ, Y_3 = Al-Renk, Y_4 = Al- KOİ olarak adlandırılır.

Çizelge 4.1. Elektrokoagülasyon hesap tablosu

Faktör	-2	-1	0	1	2
pH	5	6	7	8	9
Akım yoğ. (A/m^2)	0	17	34	51	68
Zaman (dk)	0	10	20	30	40

Not: akım yoğunlukları sırasıyla 0A – 0,5A – 1A – 1,5A – 2A Akımı temsil etmektedir

4.1. Demir Elektrotlar ile Yürütülen Elektrokoagülasyon Deney Sonuçları

Demir plaka elektrotlarla akrilik ve yün iplik boya banyosu atıksularından renk ve KOİ giderim verimlerinin incelendiği denemelerde, deneysel çalışma programına uygun olarak her bir deney seti üç kere tekrar edilmiş ve her bir parametre için ortalama değerler hesaplanmıştır. Her bir deney seti için belirlenen başlangıç pH değeri, akım (A) ve reaksiyon süresi (dk) ile, 455 nm dalga boyunda renk giderim verimi (%), kapalı reflux titrimetrik yöntemiyle KOİ giderim verimi (%) hesaplanmıştır. Aşağıda ki Çizelge 4.2’de Elektrokoagülasyon hesap tablosu verilmiştir.

Çizelge 4.2. Demir palaka elektrotlar ile gerçekleştirilen elektrokoagülasyon prosesinde deneysel çalışmalar sonucu elde edilen ve model yardımıyla tahmin edilen KOİ ve renk giderim verimleri

	pH	Akım Yoğunluğu (A/m ²)	Zaman	pH	Akım yoğunluğu (A/m ²)	Zaman	Renk	KOİ
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁	X ₂	X ₃	% Verim	% Verim
1	-1	-1	-1	6	17	10	29.23	59,02
2	1	-1	-1	8	17	10	77.07	62,20
3	-1	1	-1	6	51	10	81.83	55,46
4	1	1	-1	8	51	10	77.70	72,37
5	-1	-1	1	6	17	30	72.84	75,55
6	1	-1	1	8	17	30	91.91	64,68
7	-1	1	1	6	51	30	88.76	74,19
8	1	1	1	8	51	30	89.66	80,10
9	0	0	0	7	34	20	85.07	69,21
10	0	0	0	7	34	20	86.33	69,03
11	0	0	0	7	34	20	85.61	69,39
12	0	0	0	7	34	20	86.15	69,75
13	-2	0	0	5	34	20	92.81	64,59
14	2	0	0	9	34	20	82.19	78,12
15	0	-2	0	7	0	20	0.18	67,85
16	0	2	0	7	68	20	92.99	78,37
17	0	0	-2	7	34	0	0.63	28,40
18	0	0	2	7	34	40	85.61	68,03
19	0	0	0	7	34	20	85.79	69,75
20	0	0	0	7	34	20	88.31	69,70

4.2. Renk Giderimi

Tekstil Sanyii Atıksularının en önemli problemlerinden biri olan renk sorununu çözmek için demir plaka elektrotlar kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda elde edilen giderim verimlerinin değerlendirilmesi aşağıda yapılmıştır. Modelin anlamlılığı ve yeterliliği Çizelge 4.2'deki verilerle varyans analizi (ANOVA) ile gerçekleştirilmiştir. Varyans analizinde cevaplar ve proses değişkenleri arasındaki ilişkiyi belirlemek için verilerin grafiksel analizi yapılmıştır. Polinomiyal modelin kalitesi R^2 ile açıklanmış ve istatistiksel önemi "Fisher F-testi" ile kontrol edilmiştir. Model terimi P-değeri ile değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen deney sonuçları kullanılarak elektrokoagülasyon prosesiyle atıksudan renk giderimi için oluşturulan modelin regresyon parametrelerinin varyans analizi Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Demir plaka elektrotlar ile gerçekleştirilen elektrokoagülasyon prosesi ile renk gideriminde ANOVA (varyans analizi) sonuçları

	Katsayılar	Standart Hata	t Stat	P-değeri	Anlamlılık
Kesişim	88,07840	6,27720	14,03146	6,629E-08	
X_1	2,6529	3,9344	0,6743	0,5154	
X_2	15,7824	3,9344	4,0113	0,0025	Çok Anlamlı
X_3	15,4564	3,9344	3,9285	0,0028	Çok Anlamlı
$X_1 X_2$	-8,7680	5,5641	-1,5758	0,1461	
$X_1 X_3$	-2,9676	5,5641	-0,5333	0,6054	
$X_2 X_3$	-4,9460	5,5641	-0,8889	0,3949	
$X_1 X_1$	1,2559	3,1386	0,4002	0,6975	
$X_2 X_2$	-8,9734	3,1386	-2,8590	0,0170	Anlamlı
$X_3 X_3$	-9,8389	3,1386	-3,1348	0,0106	Anlamlı

Regresyon İstatistiklerine göre $R^2 = 0,92$

ANOVA (varyans) analizinde Prob>F değerinin 0,05'den az olduğu durumlar, model teriminin anlamlı olduğunu gösterirken, 0,1'den daha büyük değerler model teriminin anlamsız olduğunu göstermektedir. Prob>F değeri 0,0001'den düşük değerlere sahip

olduğunda model çok anlamlı ve model terimleri %95 olasılık seviyesinde anlamlıdır denilebilir. Çizelge 4.4'deki sonuçlara göre modelin Prob>F değerleri 0.0001'den daha düşük değerler almıştır. Dolayısıyla KOİ optimizasyonunda bu modellerin kullanılabileceği anlaşılmıştır. Bu sistemin CYM'ye uygun olduğunu göstermektedir.

Merkezi kompozit dizayn yöntemiyle elde edilen deneysel sonuçların değerlendirilmesi için kuadratik (ikinci dereceden) polinom CYM uygulanmıştır. Elektrokoagülasyon prosesinde deneysel tasarım sonuçları ile elde edilen regresyon denklemleri, renk ve KOİ giderimi için ayrı ayrı belirlenmiştir.

$$X_1 = \text{pH}, X_2 = \text{Akım yoğunluğu}, X_3 = \text{Reaksiyon süresi}$$

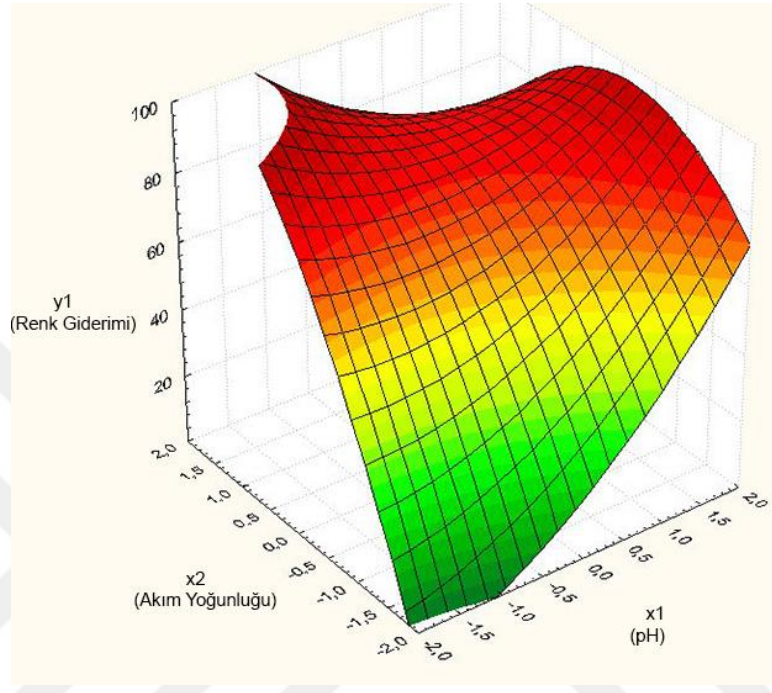
$$\text{Renk giderimi (\%)} Y_1 = +88,07840 + 15,7824 * X_2 + 15,4564 * X_3 - 8,9734 * X_2^2 - 9,8389 * (\text{Zaman})^2$$

Elektrokoagülasyon prosesinde regresyon denklemlerinin tahmin yeteneklerini gösteren R^2 ifadesinin elektrokoagülasyon prosesi için %90'ı geçmesi, modelin %95 güven aralığında gerçeğe en yakın giderim verimlerinin tahmin edilmesinde yeterli olduğunu göstermektedir.

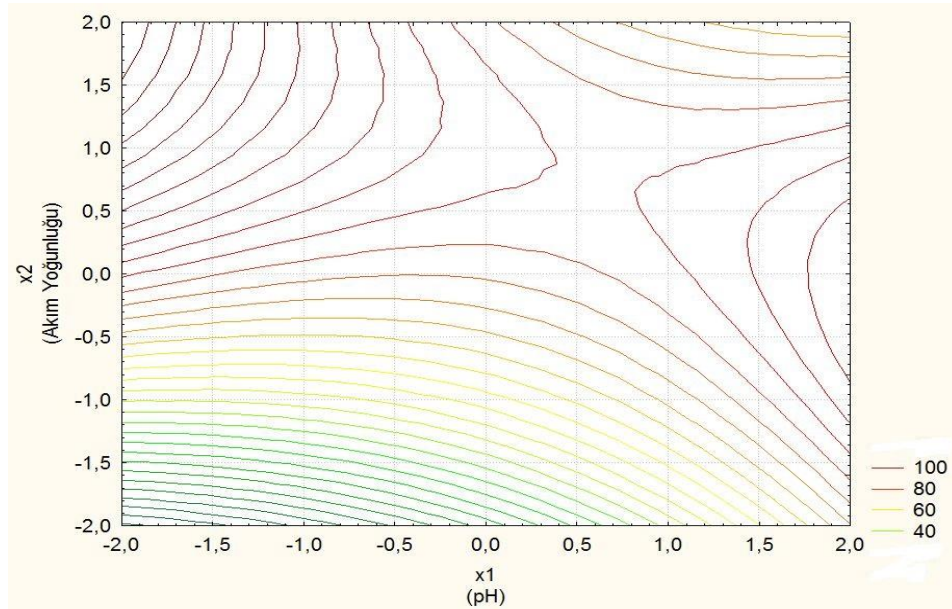
Renk gideriminde etkili olan parametreler akım yoğunluğu ve reaksiyon süresidir. Bu analize göre pH'ın etkisi göz ardı edilebilecek kadar azdır. Akım yoğunluğu ve reaksiyon süresi için elde edilen katsayılar bakıldığında her ikisinde birbirine benzer eğilimde etkili olduğu görülmüştür. Çizelge 4.1'de verilen deneysel sonuçlar STATISTICA programı ile analiz edildiğinde, renk giderim verimini ifade etmek için 3 boyutlu CYM grafikleri çizilmiştir.

Şekil 4.1'de görüldüğü gibi Fe plaka elektrotlarla gerçekleştirilen denemelerde akım yoğunluğu renk giderim verimini artırırken, pH'ın renk giderim verimi üzerindeki etkisi az denecek kadar azdır. Ayrıca, Şekil 4.2'de reaksiyon süresi arttıkça renk giderim verimi artarken, pH'ın renk giderim verimi üzerindeki etkisi olmadığı görülmektedir. Şekil

4.3’de akım yoğunluğu ve reaksiyon süresinin artmasıyla birlikte renk giderim veriminin arttığı görülmektedir.

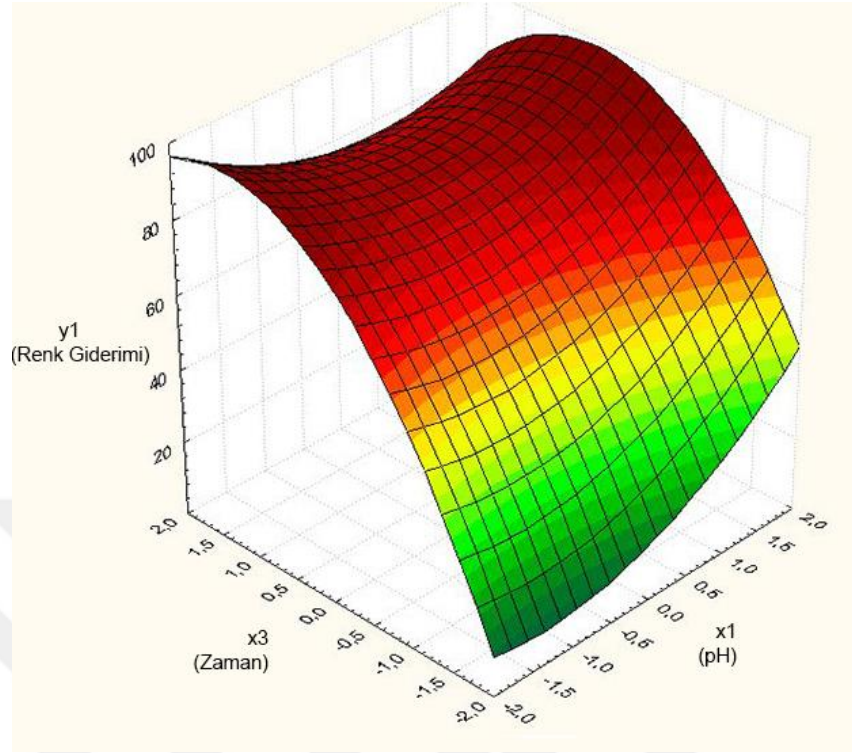


a: Cevap yüzeyi grafiği

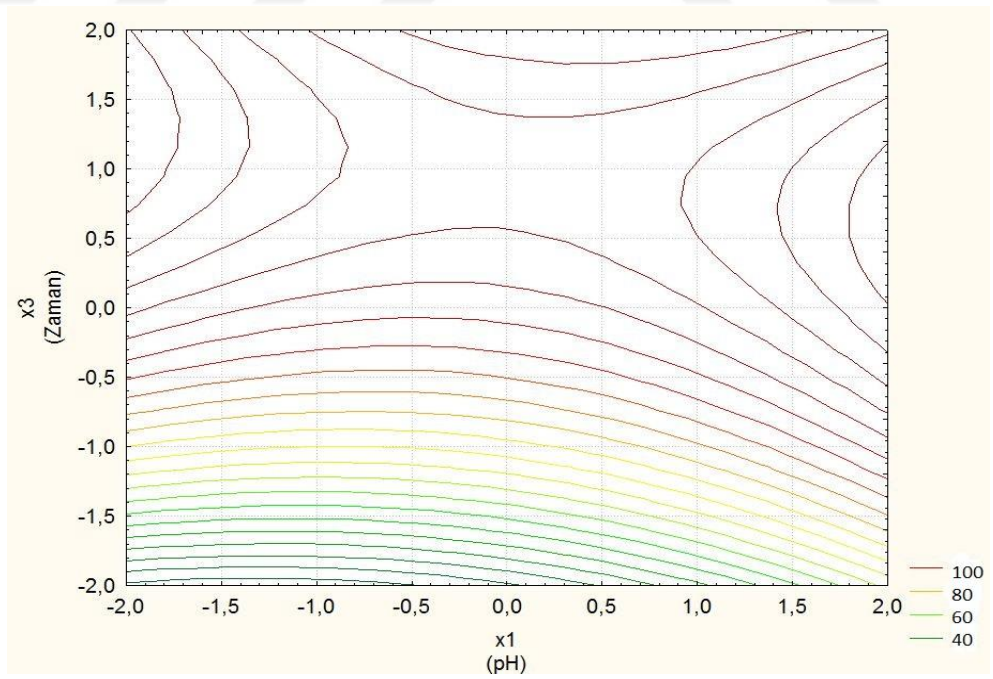


b: Kontur grafiği

Şekil 4.1. Fe plaka elektrotlarla gerçekleştirilen denemelerde akım yoğunluğu ve pH’ın renk giderimi üzerindeki etkisi

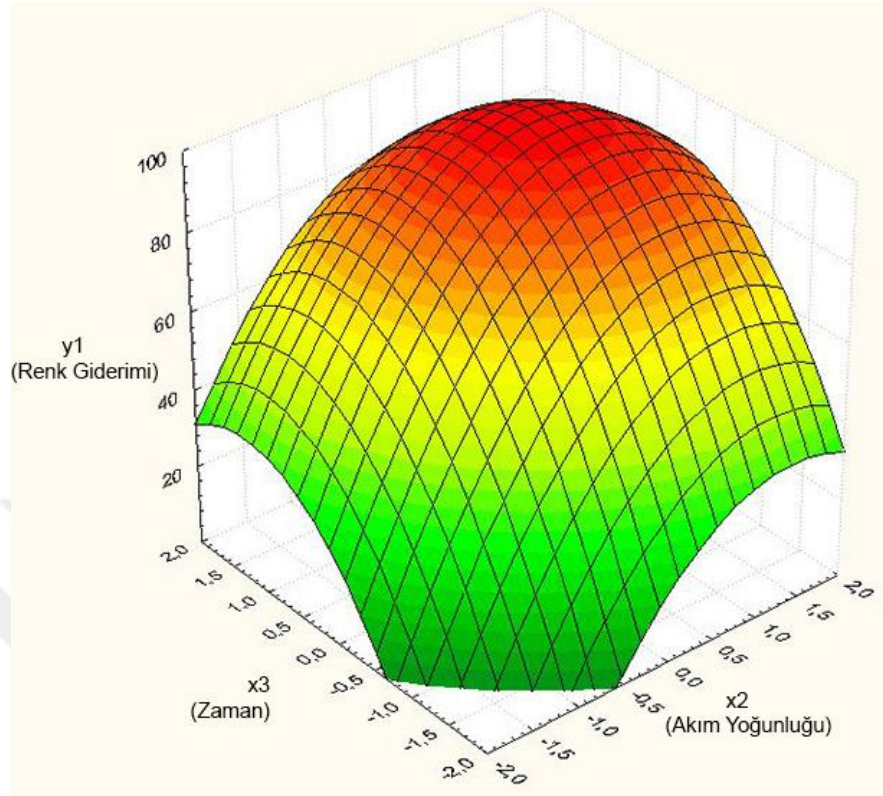


a: Cevap yüzeyi grafiği

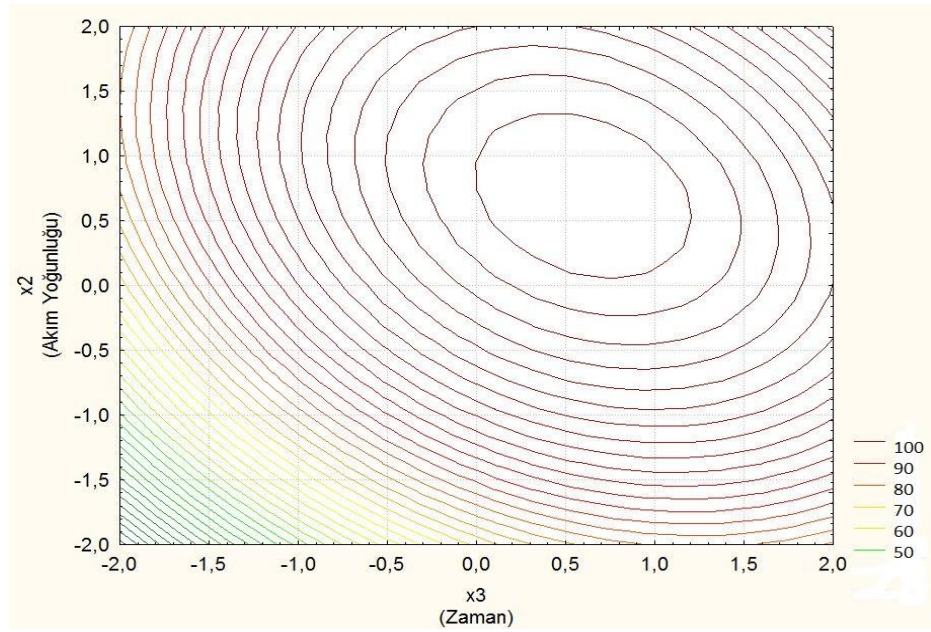


b: Kontur grafiği

Şekil 4.2. Fe plaka elektrotlarla gerçekleştirilen denemelerde reaksiyon süresi ve pH'ın renk giderim verimi üzerindeki etkisi



a: Cevap yüzeyi grafiği



b: Kontur grafiği

Şekil 4.3. Fe plaka elektrotlarla gerçekleştirilen denemelerde akım yoğunluğu ve reaksiyon süresinin renk giderim verimi üzerindeki etkisi

Verilen kontur grafikleri incelendiğinde, reaksiyon süresi ve akım yoğunluğunun $\alpha:0 - 1,5$ aralığında optimum giderim veriminin sağlandığı görülürken, pH'ın fazla etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.1.b, Şekil 4.2.b, Şekil 4.3.b). Reaksiyon süresi ve akım yoğunluğu arttığında renk giderim verimi olumlu yönde artmıştır. Şekil 4.1- 4.2 ve 4.3'ten görüldüğü üzere demir plaka elektrotlarla gerçekleştirilen deneyler için CYM modeli yardımıyla bulunan renk giderim verimleriyle deneysel olarak bulduğumuz sonuçlar birbiriyle örtüşmüştür. Buda yaptığımız deneyin doğruluğunu sağlamaktadır.

4.2.1. KOİ giderimi

Atıksuların elektrokoagülasyon ile arıtımında demir elektrot kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen KOİ giderim verimlerinin değerlendirilmesi aşağıda yapılmıştır. Çizelge 4.2'de verilen deneysel sonuçlar STATISTICA programı ile analiz edildiğinde, KOİ giderim verimini ifade etmek için 3 boyutlu CYM grafikleri çizilmiştir. Elde edilen sonuçlara dayanılarak Varyans analizine göre KOİ giderim verimini yansıtacak uygun model ve model katsayıları belirlenmiştir.

Modelin anlamlılığı ve yeterliliği varyans analizi (ANOVA) ile gerçekleştirilmiştir. Varyans analizinde cevaplar ve proses değişkenleri arasındaki ilişkiyi belirlemek için verilerin grafiksel analizi yapılmıştır. Polinomiyal modelin kalitesi R^2 ile açıklanmış ve istatistiksel önemi "Fisher F-testi" ile kontrol edilmiştir. Model terimi P-değeri ile değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen deney sonuçları kullanılarak elektrokoagülasyon prosesleriyle atıksudan KOİ giderimi için oluşturulan modelin regresyon parametrelerinin varyans analizi Çizelge 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Demir plaka elektrot ile gerçekleştirilen elektrokoagülasyon prosesi ile KOİ gideriminde ANOVA (varyans analizi) sonuçları

	Katsayılar	Standart Hata	t Stat	P-değeri	Anlamlılık
Kesişim	69,9085	1,3061	53,5266	1,25E-13	
X₁	2,6374	0,8186	3,2218	0,0091	Çok Anlamlı
X₂	2,6075	0,8186	3,1853	0,0097	Çok Anlamlı
X₃	7,7956	0,8186	9,5230	2,48E-06	Çok Anlamlı
X₁ X₂	3,8138	1,1577	3,2943	0,008091	Çok Anlamlı
X₁ X₃	-3,1315	1,1577	-2,7049	0,022	Anlamlı
X₂ X₃	0,9310	1,1577	0,8042	0,440	
X₁ X₁	0,6898	0,6530	1,0563	0,315	
X₂ X₂	1,1290	0,6530	1,7289	0,115	
X₃ X₃	-5,0950	0,6530	-7,8022	1,47E-05	Çok Anlamlı

Regresyon İstatistiklerine göre R²= 0,976

Her bir modelin Prob>F (P) değerinin (0.0001) <0,05 olması bu modellerin anlamlı olduğuna işaret etmektedir. Demir elektrotlar için KOİ bağımlı değişkeni için önerilen modeller Çizelge 4.2’de görüldüğü gibi istatistiksel olarak anlamlı çıkmıştır. Dolayısıyla KOİ optimizasyonunda bu modellerin kullanılabileceği anlaşılmıştır. Bu sistemin CYM’ye uygun olduğunu göstermektedir.

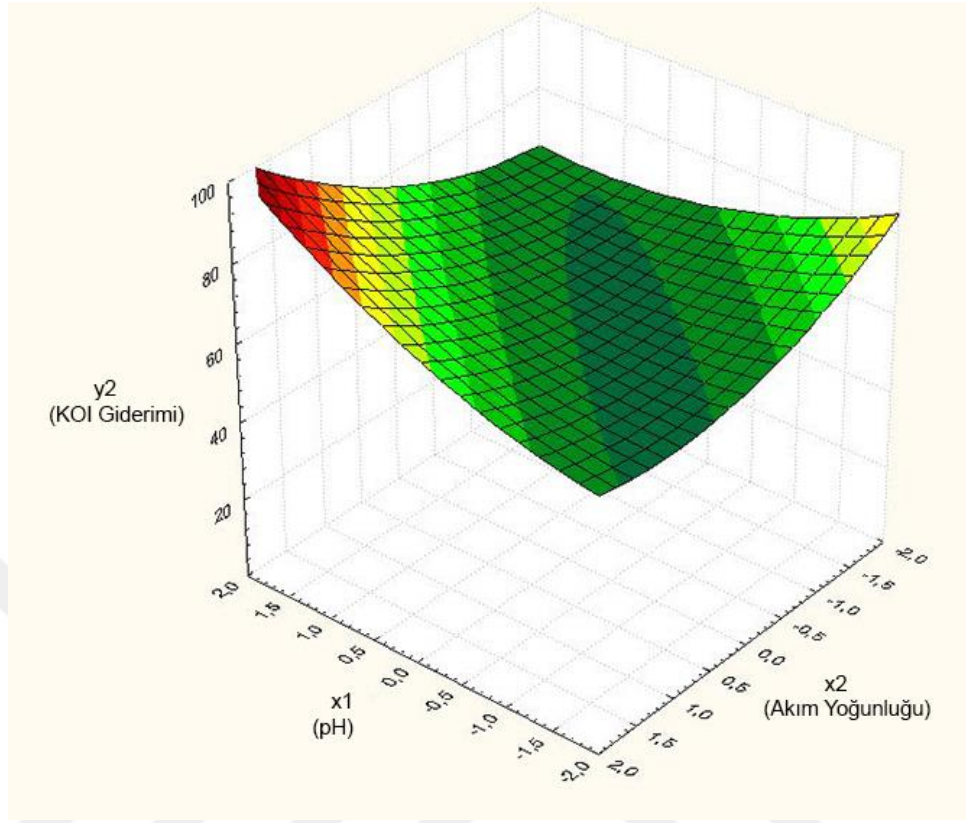
$$X_1 = \text{pH}, X_2 = \text{Akım yoğunluğu}, X_3 = \text{Zaman}$$

$$\text{KOİ giderim verimi (\%)} Y_2 = +69,909 + 2,637 * X_1 + 2,6075 * X_2 + 7,7956 * X_3 + 3,8138 * X_1 X_2 - 3,1315 * X_1 X_3 - 5,0950 * X_3^2$$

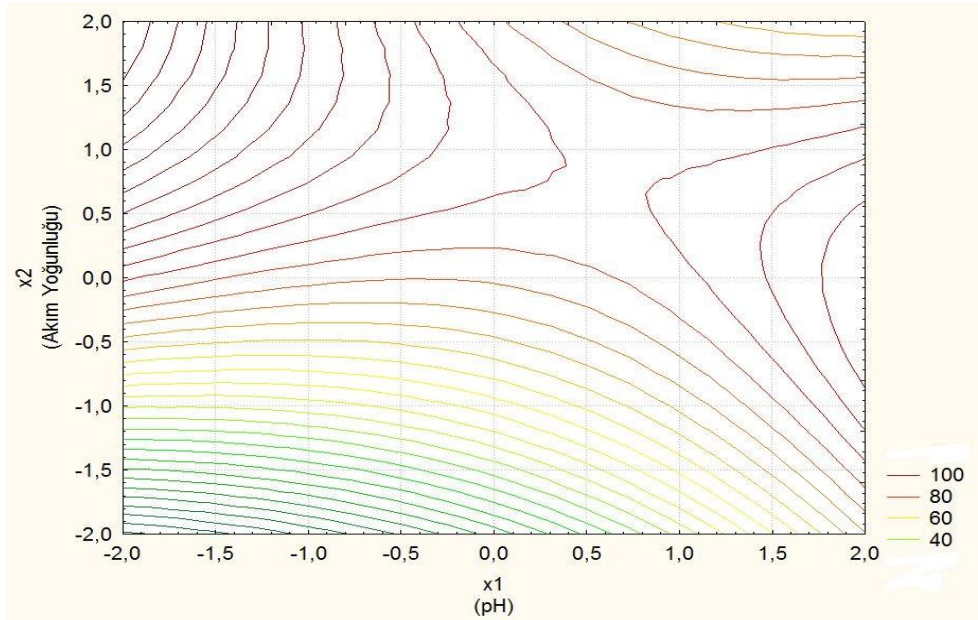
Elektrokoagülasyon regresyon denklemlerinin tahmin yeteneklerini gösteren R^2 ifadesinin elektrokoagülasyon için %95'den büyük olması, modelin %95 güven aralığında gerçeğe en yakın giderim verimlerinin tahmin edilmesinde yeterli olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.4'deki parametreler için hesaplanan katsayılar ve P-değerleri'ne bakarak, renk giderim veriminde etkili olduğu düşünülen 3 parametrenin de etkili olduğu görülmüş olup içlerinde en etkili parametrenin zaman olduğu tespit edilmiştir. Bu analize göre pH ve akım yoğunluğunun etkisinin reaksiyon süresine kıyasla daha az olduğu görülmüştür. Çizelge 4.1'de verilen deneysel sonuçlar STATISTICA programı ile analiz edildiğinde, renk giderim verimini ifade etmek için 3 boyutlu CYM grafikleri çizilmiştir.

Şekil 4.4.a'da görüldüğü gibi Fe plaka elektrot için pH'ın ve akım yoğunluğunun en yüksek olduğu değerlerde ($\alpha: +2$) verim maksimuma ulaşmaktadır. Şekil 4.2.a'da ise, reaksiyon süresi ve pH'nın KOI giderim verimine etkisi görülmektedir. Buna göre, zaman değişkeninin, pH değişkenine göre daha etkili bir parametre olduğu görülmüştür. Zaman değeri $\alpha: -2$ 'den $\alpha: 0$ 'ya yükseldikçe giderim verimini artsada, $\alpha: 0$ 'dan sonra giderim verimi göz ardı edilebilecek kadar düşüktür. Reaksiyon süresinin düşük olduğu zaman aralıklarında pH'nın belirgin bir etkisi olarak gözlemlenirken, reaksiyon süresi $\alpha: 0$ noktasından sonra pH'nın etkisi olmamıştır. Şekil 4.3.a'da reaksiyon süresi ve akım yoğunluğunun KOI giderim verimine etkisi görülmektedir. Şekil 4.3.a incelendiğinde reaksiyon süresinin, akım yoğunluğuna göre daha etkili olduğu görülmektedir. Akım yoğunluğunun artmasıyla renk gideriminde düşük bir artış mevcuttur ancak reaksiyon süresine göre kıyaslayınca etkisi oldukça azdır.

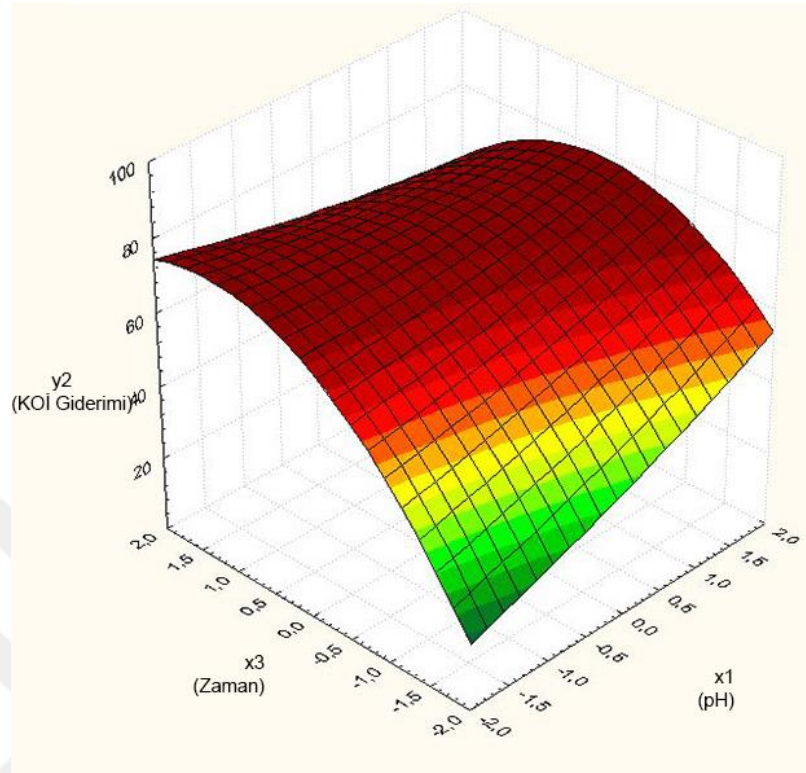


a: Cevap yüzeyi grafiği

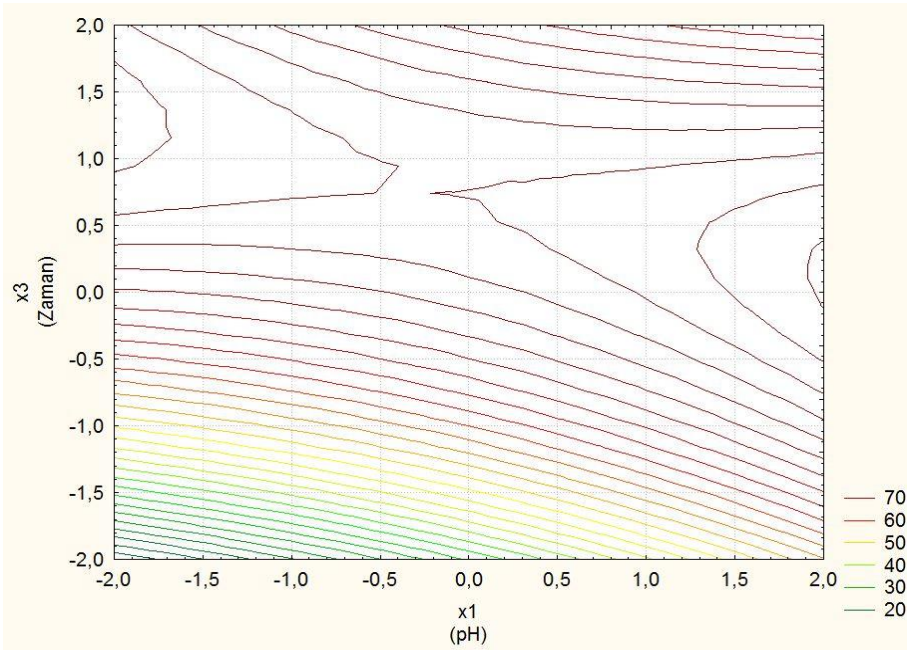


b: Kontur grafiği

Şekil 4.4. Fe plaka elektrotlarla gerçekleştirilen denemeler için akım yoğunluğu ve pH'ın KOI giderim verimi üzerindeki etkisi

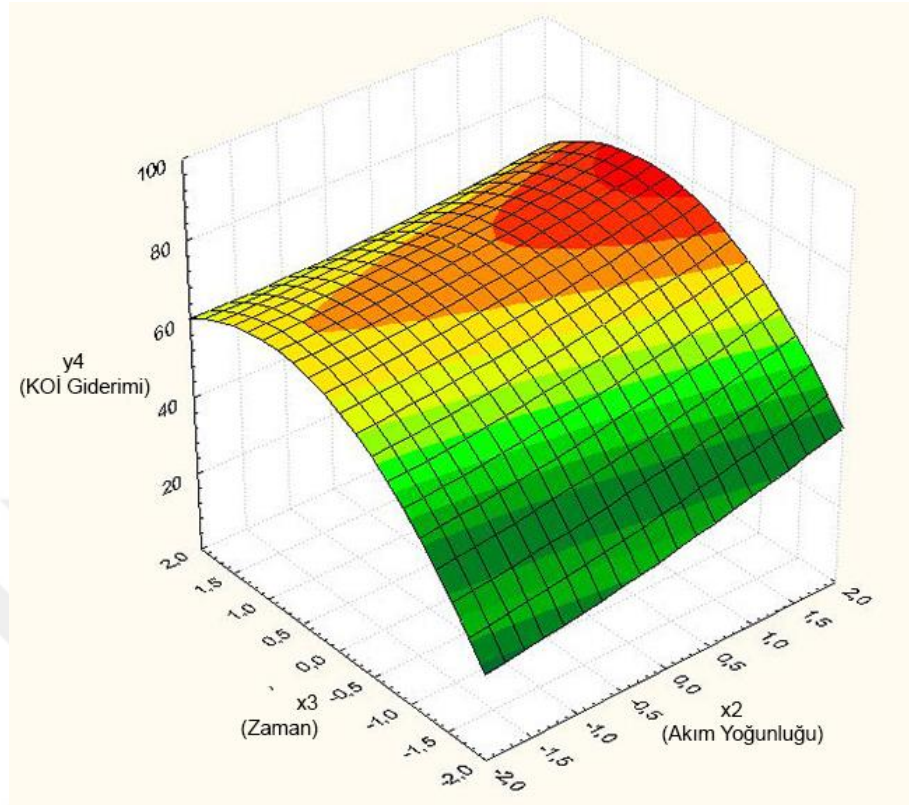


a: Cevap yüzeyi grafiği

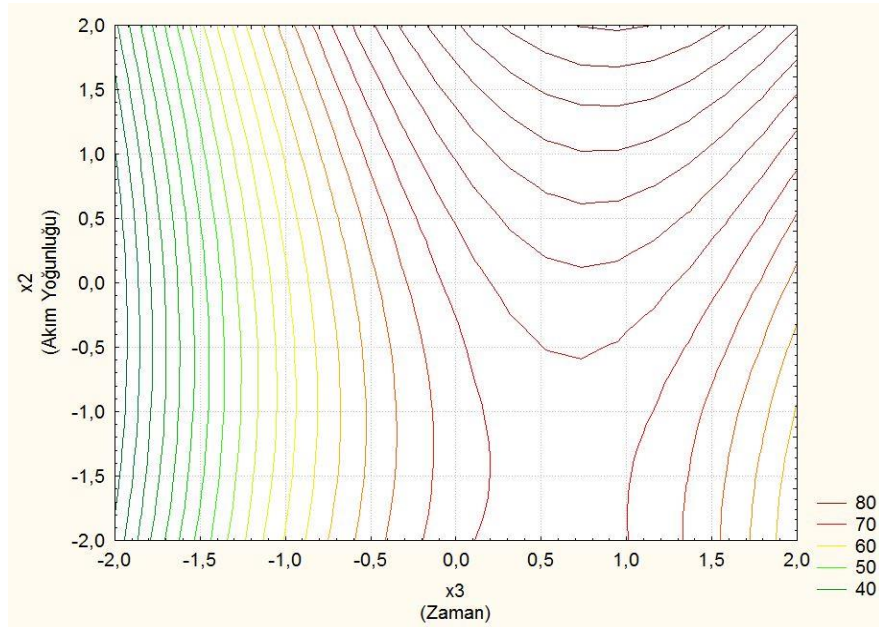


b: Kontur grafiği

Şekil 4.5. Fe plaka elektrotlarla gerçekleştirilen denemeler için zaman ve pH'ın KOI giderimi üzerindeki etkisi



a: Cevap yüzeyi grafiği



b: Kontur grafiği

Şekil 4.6. Fe plaka elektrotlarla gerçekleştirilen deneyler için akım yoğunluğu ve zamanın KOI giderimi üzerindeki etkisi

Verilen kontur grafikleri incelendiğinde ise (Şekil 4.4.b- 4.5.b ve 4.6.b) akım yoğunluğu ve pH'ın etkisinin reaksiyon süresine kıyasla daha az etkili olduğu gözlemlenmiştir. Reaksiyon süresinin artması ise KOİ giderim verimini olumlu yönde etkilemiştir. Kontur grafiklerinden, reaksiyon süresi için optimum noktanın α : (+0,0) – (+1,0) aralığında olduğu tespit edilebilmektedir. Benzer şekilde KOİ giderim veriminin akım yoğunluğu için α :0'dan yüksek olması gerektiği görülmektedir. Şekillerden görüldüğü üzere demir plaka elektrot için CYM modeli yardımıyla bulunan KOİ giderim verimleriyle deneysel olarak bulduğumuz sonuçlarla örtüşmüştür. Buda yaptığımız deneyin doğruluğunu sağlamaktadır.

Optimizasyon için renk ve KOİ parametreleri kullanılmıştır. Demir elektrot için optimum değerlerin bulunabilmesi amacıyla MathCAD programında optimizasyon koşulları belirlenmiştir. Demir elektrotlar için 1,82 A yani 61,53 A/m² akım yoğunluğu, pH=9 ve 27,35 dakikalık reaksiyon süresi optimum işletme şartları olarak belirlenmiştir. Demir elektrotlar için optimum KOİ ve renk giderim verimleri sırasıyla %95,77 ve %100'dür. Aşağıda ki çizelge de de optimum sonuçlar gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. Demir plaka elektrot için optimum değerler

Değişken	Renk Giderimi	KOİ Giderimi	Birlikte	Değişken	Renk Giderimi	KOİ Giderimi	Birlikte
	Kodlu Değerler				Gerçek Değerler		
X ₁	0	2	2	pH	7	9	9
X ₂	0,879	2	1,65	Akım (A)	1,32	2	1,82
X ₃	0,735	0,15	0,735	Zaman	27,35	21,5	27,35

Model sonucunda elde edilen işletme şartlarıyla çalışmalar tekrarlanmış olup elde edilen KOİ ve renk giderim verimleri sonuçları sırasıyla %90,45 ile %95'dir. Bu giderim verimleri model sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmüştür.

Tekstil sanayii atıksularından Fe plaka elektrotlarla yapılan denemelerde optimum olarak kabul edilen deney şartlarında ($61,53 \text{ A/m}^2$ akım yoğunluğu, $\text{pH}=9$ ve 27,35 dakikalık reaksiyon süresi) Eşitlik (3.5) kullanılarak enerji tüketimi değerleri hesaplanmıştır. Çalışmalarda optimum olarak kabul edilen deney şartlarında enerji tüketimi $4,64 \text{ kW-saat/m}^3$ olarak bulunmuştur. Elektrokimyasal arıtmada enerji tüketiminin %80'i enerji maliyetidir. İşletme maliyeti olarakta elektriğin kW-saat için birim fiyatı 0,40 TL olarak alındığında (sanayi için vergi ve fonlar dahil elektrik fiyatı 2018) optimum şartlar altında arıtma maliyeti $2,31 \text{ TL/m}^3$ atıksu olarak hesaplanmıştır.

4.3. Alüminyum Plaka Elektrotlar ile Yürütülen Elektrokoagülasyon Prosesi Deney Sonuçları

Al plaka elektrotlarla gerçekleştirilen elektrokoagülasyon prosesi deneylerinde, deney çalışma programına uygun olarak her bir deney seti üç kere tekrar edilmiş ve her bir parametre için ortalama değerler hesaplanmıştır. Her bir deney seti için belirlenen başlangıç pH değeri, akım (A) ve reaksiyon süresi (dk) ile, 455 nm dalga boyunda renk giderim verimi (%), kapalı reflux titrimetrik yöntemiyle KOİ giderim verimi (%) hesaplanmıştır. Aşağıda ki çizelgelerde Elektrokoagülasyon hesap tablosu verilmiştir.

Çizelge 4.6. Alüminyum palaka elektrotlar ile gerçekleştirilen elektrokoagülasyon prosesinde deneysel çalışmalar sonucu elde edilen ve model yardımıyla tahmin edilen KOİ ve renk giderim verimleri

Faktör	-2	-1	0	1	2
pH	5	6	7	8	9
Akım yoğ. (A/m ²)	0	17	34	51	68
Zaman (dk)	0	10	20	30	40

	pH	Akım	Zaman	pH	Akım yoğ.(A/m ²)	Zaman	Renk	KOİ
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁	X ₂	X ₃	Verim%	Verim%
1	-1	-1	-1	6	17	10	12,77	69,30
2	1	-1	-1	8	17	10	35,79	70,11
3	-1	1	-1	6	51	10	60,43	72,38
4	1	1	-1	8	51	10	62,95	71,02
5	-1	-1	1	6	17	30	68,97	72,29
6	1	-1	1	8	17	30	77,79	65,58
7	-1	1	1	6	51	30	85,16	69,48
8	1	1	1	8	51	30	80,85	60,15
9	0	0	0	7	34	20	81,12	67,85
10	0	0	0	7	34	20	80,94	67,76
11	0	0	0	7	34	20	81,29	68,03
12	0	0	0	7	34	20	80,67	67,85
13	-2	0	0	5	34	20	90,11	64,50
14	2	0	0	9	34	20	70,59	66,76
15	0	-2	0	7	0	20	0,18	63,41
16	0	2	0	7	68	20	89,21	73,74
17	0	0	-2	7	34	0	0,63	63,32
18	0	0	2	7	34	40	90,11	68,30
19	0	0	0	7	34	20	81,12	67,94
20	0	0	0	7	34	20	84,71	70,02

4.3.1. Renk giderimi

Tekstil Sanyii Atıksularının en önemli problemlerinden biri olan renk sorununu çözmek için demir plaka elektrotlar kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda elde edilen giderim verimlerinin değerlendirilmesi aşağıda yapılmıştır. Modelin anlamlılığı ve

yeterliliği Çizelge 4.6’da ki verilerle varyans analizi (ANOVA) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Varyans analizinde cevaplar ve proses değişkenleri arasındaki ilişkiyi belirlemek için verilerin grafiksel analizi yapılmıştır. Polinomiyal modelin kalitesi R^2 ile açıklanmıştır. Model terimi P-değeri ile değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen deney sonuçları kullanılarak elektrokoagülasyon prosesleriyle atıksudan renk giderimi için oluşturulan modelin regresyon parametrelerinin varyans analizi Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Alüminyum plaka elektrotlarla gerçekleştirilen elektrokoagülasyon prosesi ile renk gideriminde ANOVA (varyans analizi) sonuçları

	Katsayılar	Standart Hata	t Stat	P-değeri	Anlamlılık
Kesişim	81,1989	3,728689	21,7768	9,32E-10	
X ₁	-0,562	2,337	-0,240	0,815	
X ₂	17,008	2,337	7,277	0,00003	Çok Anlamlı
X ₃	19,987	2,337	8,552	0,00001	Çok Anlamlı
X ₁ X ₂	-4,204	3,305	-1,272	0,23216	
X ₁ X ₃	-2,630	3,305	-0,796	0,44460	
X ₂ X ₃	-6,947	3,305	-2,102	0,06188	
X ₁ X ₁	-0,543	1,864	-0,291	0,77695	
X ₂ X ₂	-9,457	1,864	-5,072	0,00048	Çok Anlamlı
X ₃ X ₃	-9,288	1,864	-4,982	0,00055	Çok Anlamlı

Regresyon İstatistiklerine göre $R^2 = 0,946$

Varyans analizi (ANOVA) ile modelin anlamlılığı ve yeterliliği gerçekleştirilmiştir. Varyans analizinde proses değişkenleri ve cevaplar arasındaki ilişkiyi belirlemek için verilerin analizi MatchCAD programı ile yapılmıştır. Modelin kalitesi R^2 ile açıklanmıştır. Küçük P değeri, değişkenin anlamlı olduğunu ve hipotezin reddedilmesini yani anlamsız olduğunu belirtmektedir. Prob>F değerinin 0,05’den az olduğu durumlar, model teriminin anlamlı olduğunu gösterirken, 0,1’den daha büyük değerleri model terimlerinin anlamsız olduğunu göstermektedir. Prob>F değeri 0,0001’den düşük değerlere sahip olduğunda ise model istatistiksel olarak model terimleri %95 olasılıkla anlamlıdır ve çok anlamlıdır denilebilir. Yapılan deney sonuçlarında R^2 değerinin %95’e

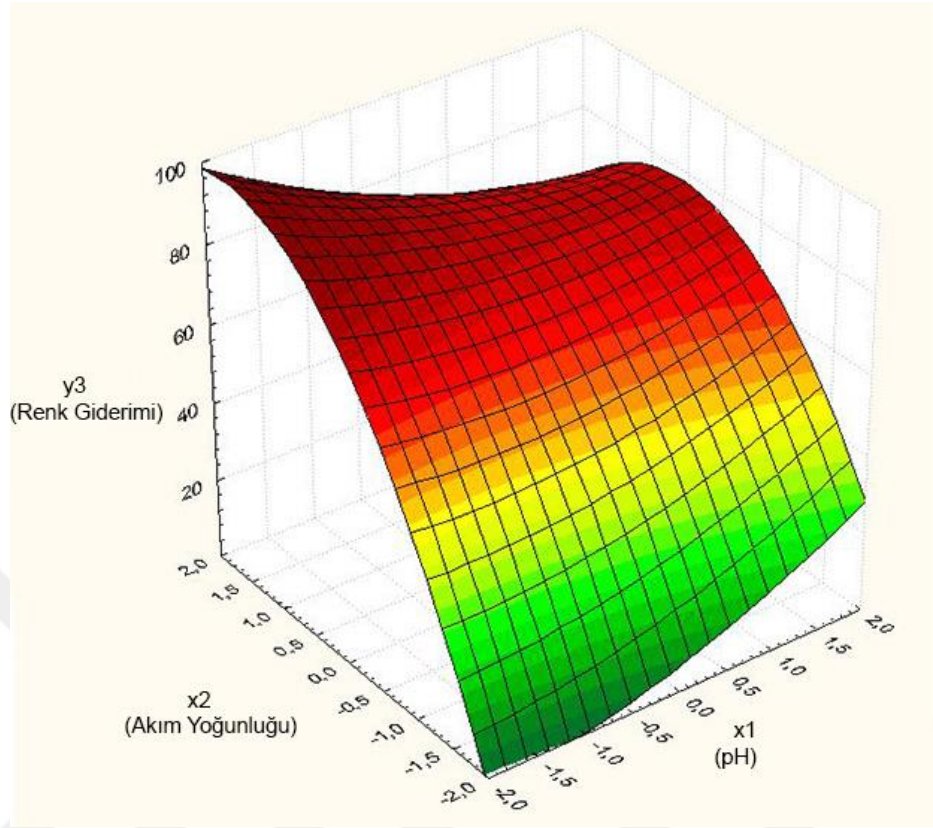
çok yakın olması gerçeğe en yakın giderim verimlerinin tahmin edilmesinde yeterli olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla renk giderim verimleri optimizasyonunda bu modellerin kullanılabileceği anlaşılmıştır. Bu sistemin CYM'ye uygun olduğunu göstermektedir.

$$X_1 = \text{pH}, X_2 = \text{Akım yoğunluğu}, X_3 = \text{Zaman}$$

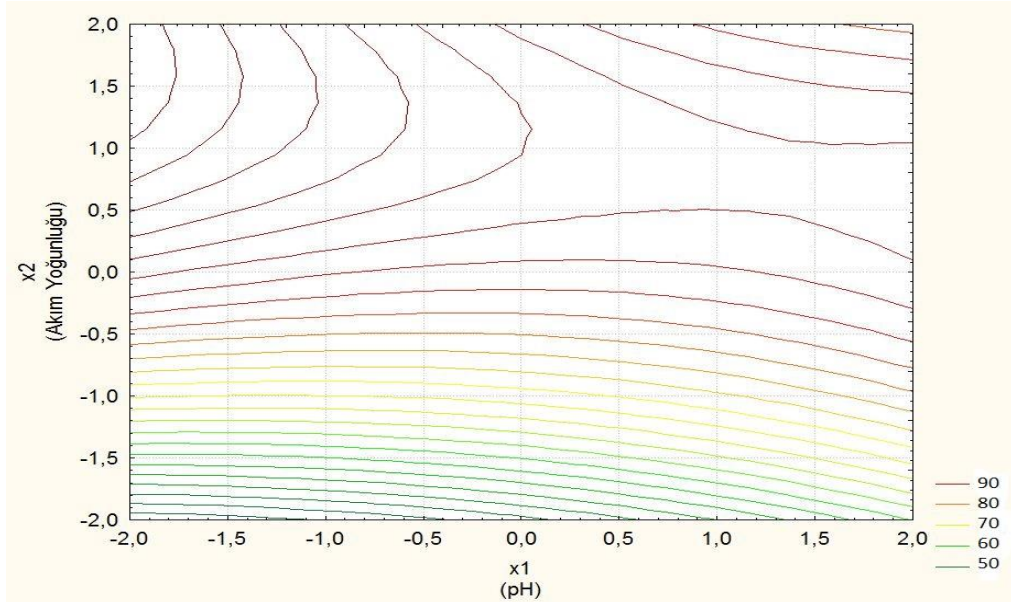
$$\text{Renk giderim Verimi (\%)} Y_3 = + 81,198 + 17,008 * X_2 + 19,987 * X_3 - 9,457 * X_2^2 - 9,288 * X_3^2$$

Renk giderim veriminde etkili olan parametreler zaman ve akım yoğunluğudur. Bu analize göre pH'ın etkisi görülmemektedir. Hem akım yoğunluğu hemde reaksiyon süresi için elde edilen katsayılar bakıldığında her ikisinde giderim verimlerinde etkili parametreler olduğu görülmüştür. Akım yoğunluğu ve reaksiyon süresi değerlerindeki artış renk giderim verimlerini artırmıştır. Çizelge 4.6'da verilen deneysel sonuçlar STATISTICA programı ile analiz edildiğinde, renk giderim verimini ifade etmek için 3 boyutlu CYM grafikleri çizilmiştir.

Şekil 4.7'de görüldüğü gibi Al plaka elektrot için akım yoğunluğu renk giderimini arttırırken, pH'ın renk giderim verimi üzerindeki etkisi az denecek kadar azdır. Şekil 4.8'de görüldüğü gibi Al elektrot için zaman renk giderimini arttırırken, pH'ın renk giderim verimi üzerin etkisi görülmektedir. Şekil 4.9'da Al elektrot için akım yoğunluğu ve zamanın arttıkça renk gideriminin de arttığı görülmektedir.

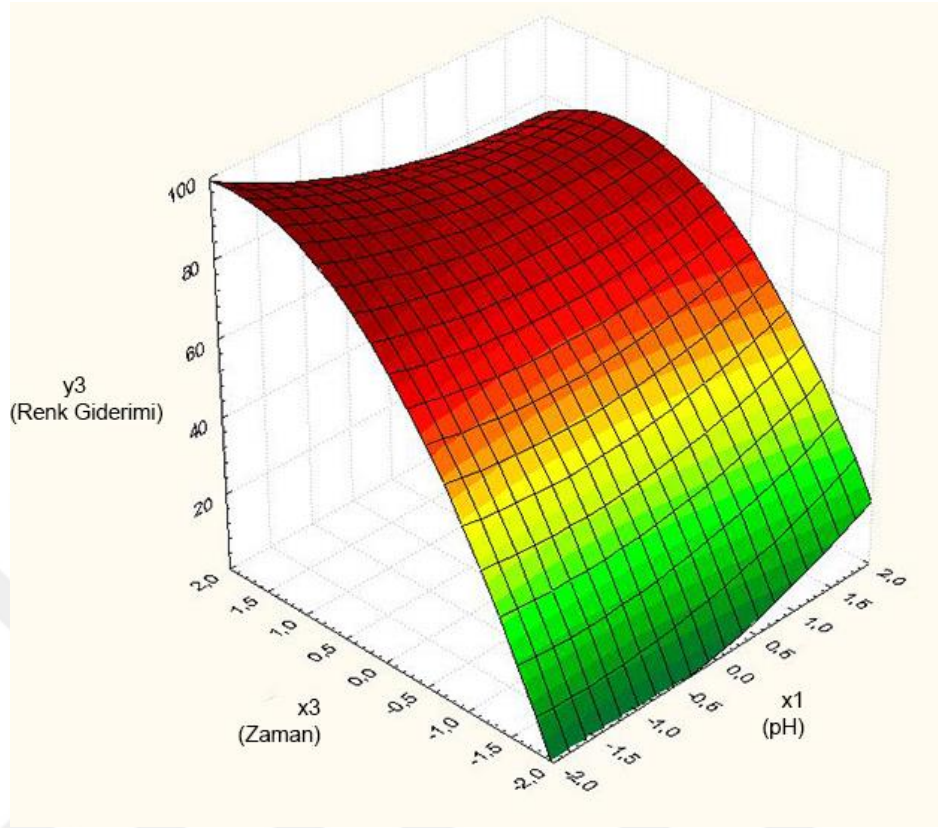


a: Cevap yüzeyi grafiği

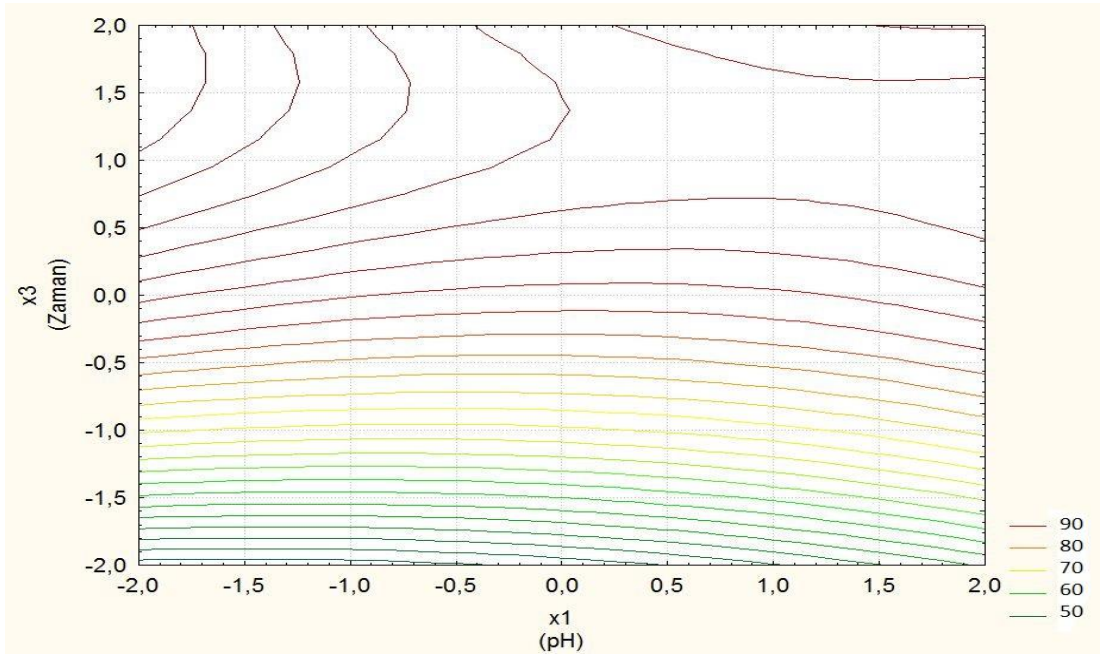


b: Kontur grafiği

Şekil 4.7. Al plaka elektrotlarla gerçekleştirilen denemeler için akım yoğunluğu ve pH'ın renk giderim verimi üzerindeki etkisi

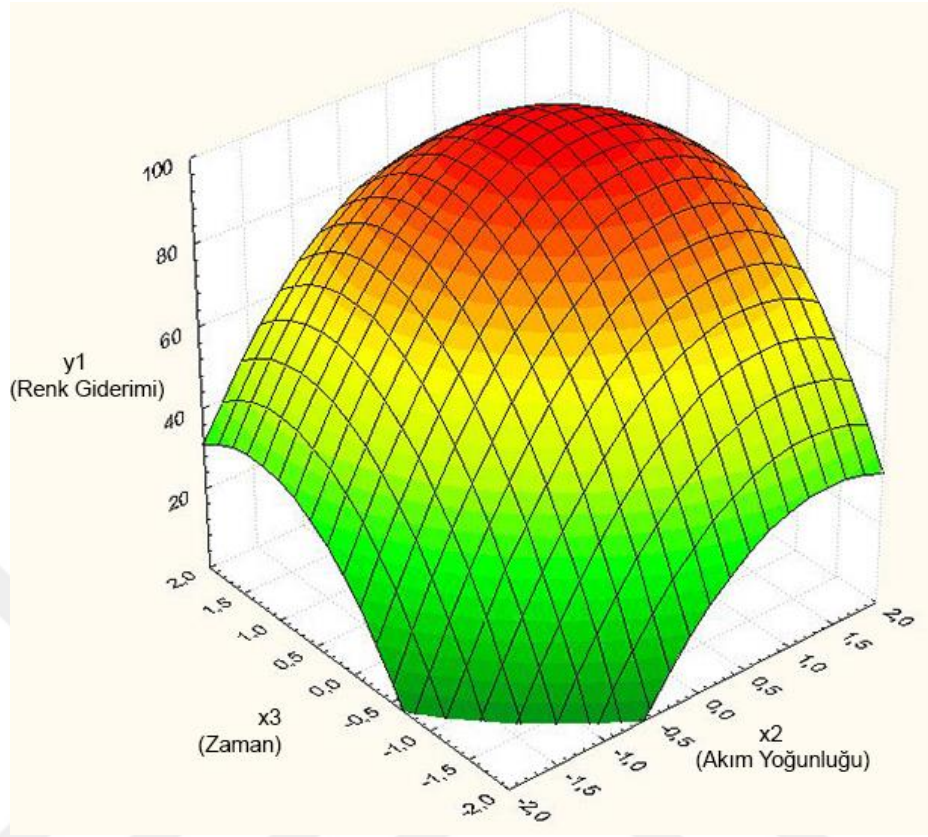


a: Cevap yüzeyi grafiği

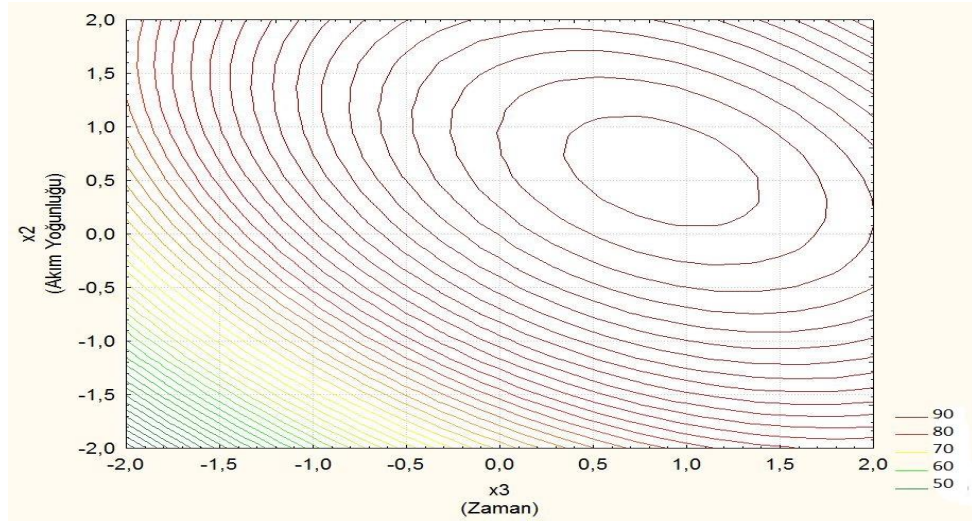


b: Kontur grafiği

Şekil 4.8. Al plaka elektrotlarla gerçekleştirilen denemeler için zaman ve pH'ın renk giderim verimi üzerindeki etkisi



a: Cevap yüzeyi grafiği



b: Kontur grafiği

Şekil 4.9. Al plaka elektrotlarla gerçekleştirilen deneyler için akım yoğunluğu ve zamanın renk giderim verimi üzerindeki etkisi

4.3.2. KOİ giderimi

Tekstil Atıksuların elektrokoagülasyon ile arıtımında alüminyum plaka elektrotlar kullanılarak yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen KOİ giderim verimlerinin değerlendirilmesi aşağıda yapılmıştır. Çizelge 4.6’da verilen deneysel sonuçlar STATISTICA programı ile analiz edildiğinde, KOİ giderim verimini ifade etmek için 3 boyutlu Cevap Yüzey Metod grafikleri çizilmiştir. Elde edilen sonuçlara dayanılarak Varyans analizine göre KOİ giderim verimini yansıtacak uygun model ve model katsayıları belirlenmiştir.

Modelin anlamlılığı ve yeterliliği Varyans analizi (ANOVA) ile gerçekleştirilmiştir. Varyans analizinde cevaplar ve proses değişkenleri arasındaki ilişkiyi belirlemek için verilerin grafiksel analizi yapılmıştır. Polinomiyal modelin kalitesi R^2 ile açıklanmış ve istatistiksel önemi Fisher F-testi ile kontrol edilmiştir. Model terimi P-değeri ile değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen deney sonuçları kullanılarak elektrokoagülasyon prosesleriyle atıksudan KOİ giderimi için oluşturulan modelin regresyon parametrelerinin varyans analizi Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Alüminyum plaka elektrotlar ile gerçekleştirilen elektrokoagülasyon prosesi ile KOİ gideriminde ANOVA (varyans analizi) sonuçları

	Katsayılar	Standart Hata	t Stat	P-değeri	Anlamlılık
Kesişim	68,392667	2,107666	32,449479	1,82057E	
X ₁	0,769	1,321	0,582	0,573	
X ₂	3,125	1,321	2,366	0,040	Anlamlı
X ₃	8,069	1,321	6,108	0,0001	Çok Anlamlı
X ₁ X ₂	0,821	1,868	0,440	0,670	
X ₁ X ₃	-0,128	1,868	-0,069	0,947	
X ₂ X ₃	-0,730	1,868	-0,391	0,704	
X ₁ X ₁	-0,337	1,054	-0,320	0,756	
X ₂ X ₂	0,399	1,054	0,379	0,713	
X ₃ X ₃	-5,657	1,054	-5,368	0,0003	Çok Anlamlı

Regresyon İstatistiklerine göre $R^2 = 0,94$

Her bir modelin Prob>F (P) değerinin (0.0001) < 0,05 olması bu modellerin anlamlı olduğuna işaret etmektedir. Çizelge 6.8’de görüleceği üzere alüminyum plaka elektrotlar için KOİ bağımlı değişkeni için önerilen modeller istatistiksel olarak anlamlı çıkmıştır. Dolayısıyla KOİ optimizasyonunda bu modellerin kullanılabileceği anlaşılmıştır. Bu sistemin CYM’ye uygun olduğunu göstermektedir.

$$X_1 = \text{pH}, X_2 = \text{Akım yoğunluğu}, X_3 = \text{Zaman}$$

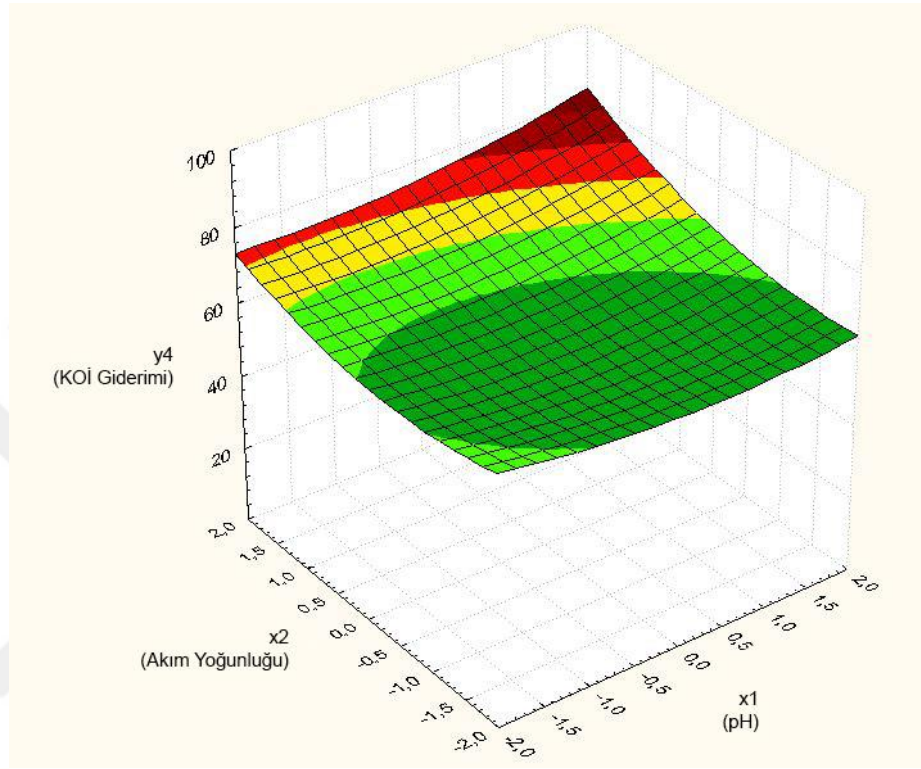
$$\text{KOİ giderim verimi (\%)} Y_4 = + 68,392667 + 3,125 * X_2 + 8,069 * X_3 - 5,657 * X_3^2$$

Elektrokoagülasyon regresyon denklemlerinin tahmin yeteneklerini gösteren R^2 ifadesinin elektrokoagülasyon prosesi için %95’e çok yakın olması, modelin %95 güven aralığında gerçeğe en yakın giderim verimlerinin tahmin edilmesinde yeterli olduğunu göstermektedir. KOİ gideriminde etkili olan parametreler X_2 ve X_3 yani akım yoğunluğu ve zamandır. Reaksiyon süresindeki artış KOİ giderim veriminide artırmıştır.

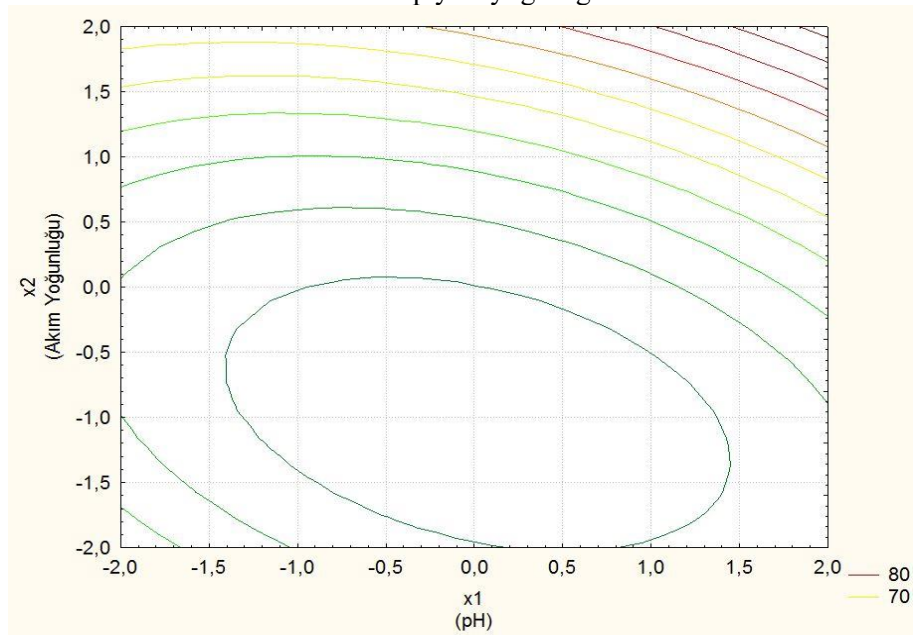
Bulduğumuz sonuçların doğruluğunu teyit etmek için 3 boyutlu cevap yüzey grafikleri STATISTICA programı ile çizilmiştir bu grafiklerde de zamanın etkisi görülmüştür. Bu grafikler vasıtasıyla bağımsız değişkenlerin (akım yoğunluğu, pH ve zaman) birbirleriyle etkileşimi, KOİ bağımlı değişkeni üzerindeki etkisi görülmüştür. Alüminyum plaka elektrot için akım yoğunluğu, pH ve reaksiyon süresinin KOİ giderimi üzerindeki etkisi CYM ve kontur (iz düşüm) grafikleri ile gösterilmiştir.

Şekil 4.10.a’dan görüleceği üzere Al plaka elektrotlarla yapılan deneylerde akım yoğunluğunun artması KOİ giderim verimini arttırırken, pH’ın KOİ giderim verimi üzerindeki etkisinin oldukça sınırlı etkinin olduğu görülmüştür. Şekil 4.11.a’da ise, pH’ya nazaran reaksiyon süresinin daha etkili bir parametre olduğu görülmektedir. Şekil 4.12.a’da ise reaksiyon süresinin ve akım yoğunluğunun KOİ giderim verimine etkisi görülmektedir. Akım yoğunluğu değeri arttıkça giderim verimi artmaktadır. Benzer şekilde reaksiyon süresi arttıkça giderim verimi artsa da α : (+0,5) – (+2,0) aralığında

optimuma ulaşmaktadır. Kontur grafikleri ise elde edilen bu verileri doğrulamaktadır (Şekil 4.10.b, Şekil 4.11.b, Şekil 4.12.b)

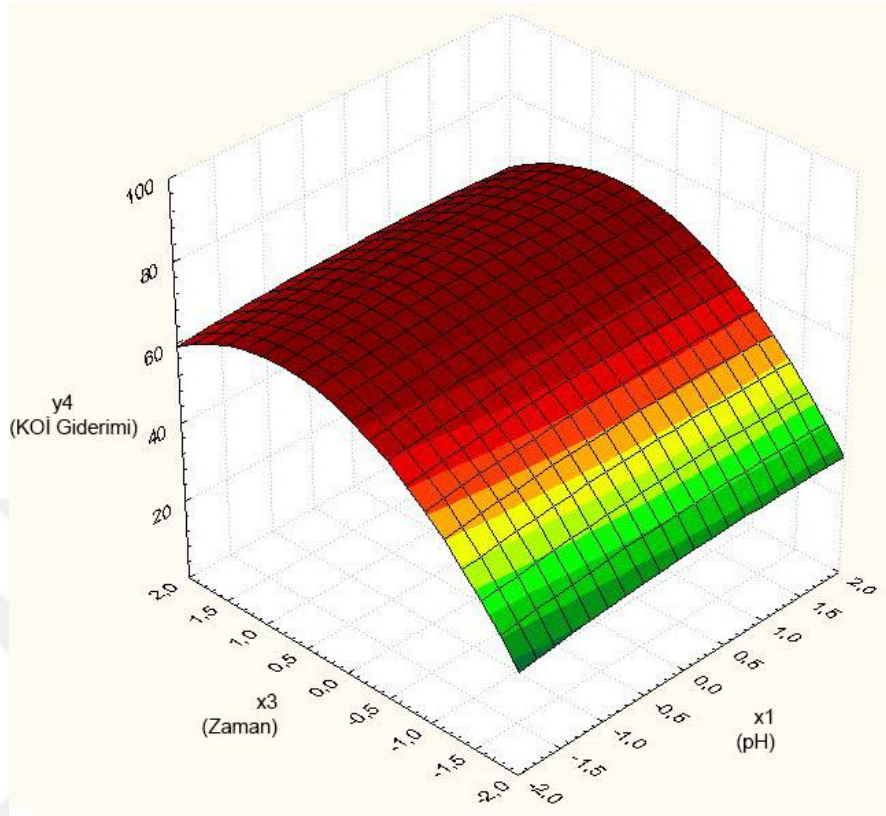


a: Cevap yüzeyi grafiği

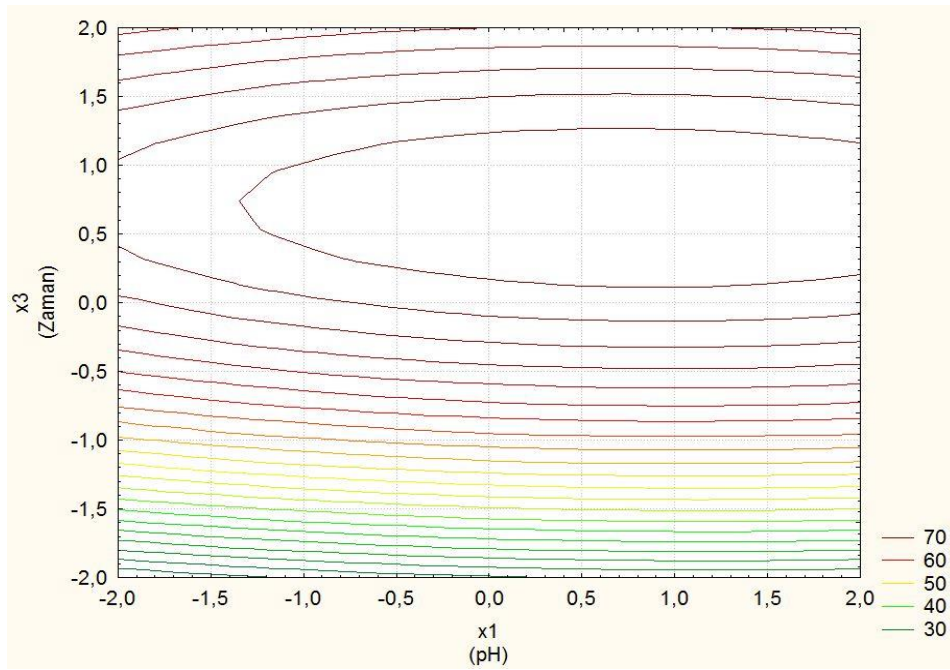


b: Kontur grafiği

Şekil 4.10. Al plaka elektrotlarla gerçekleştirilen denemeler için akım yoğunluğu ve pH'ın KOI giderim verimi üzerindeki etkisi

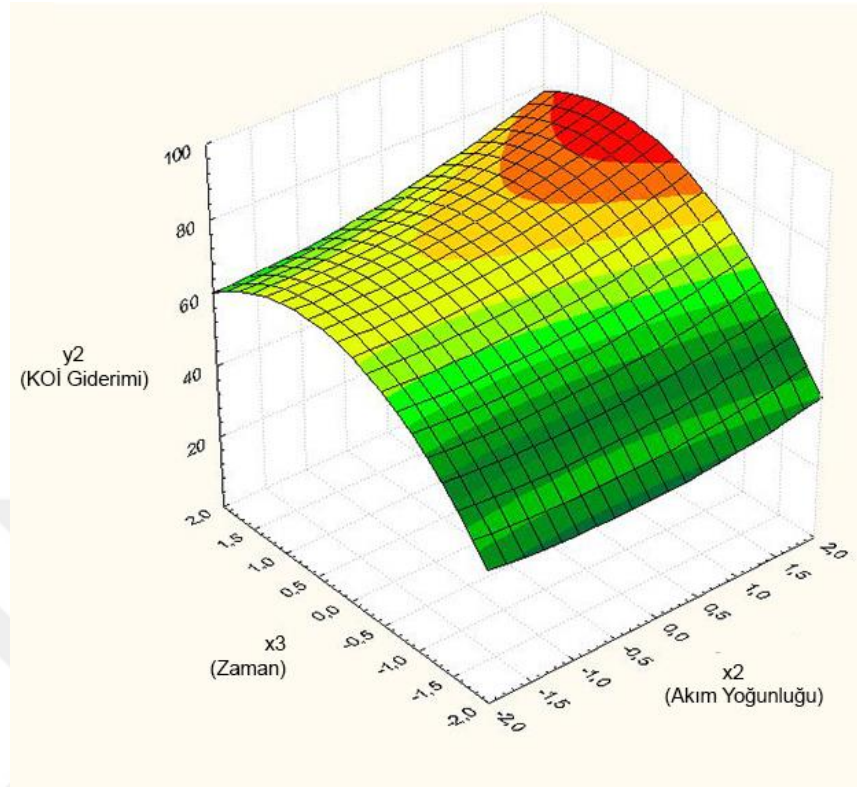


a: Cevap yüzeyi grafiği

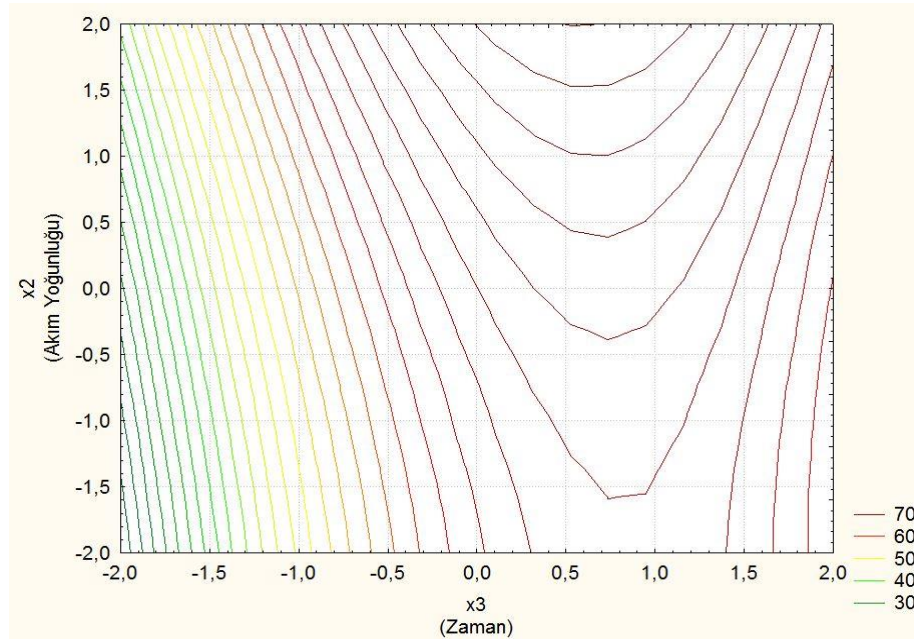


b: Kontur grafiği

Şekil 4.11. Al plaka elektrotlar ile gerçekleştirilen deneyler için zaman ve pH'ın KOI giderimi üzerindeki etkisi



a: Cevap yüzeyi grafiği



b: Kontur grafiği

Şekil 4.12. Al plaka elektrotlar ile gerçekleştirilen denemeler için akım yoğunluğu ve zamanın KOİ giderimi üzerindeki etkisi

Optimizasyon için renk ve KOİ parametreleri kullanılmıştır. Alüminyum plaka elektrotlar için optimum değerlerin bulunabilmesi amacıyla MathCAD programında optimizasyon koşulları belirlenmiştir. Alüminyum elektrotlar için 1,75(A) akım yani 59,17 A/m² akım yoğunluğu, pH=7 ve 27,13 dakikalık reaksiyon süresi optimum işletme şartları olarak belirlenmiştir. Alüminyum elektrotlar için optimum KOİ ve renk giderim verimleri sırasıyla %77,52 ve %99,6'dır. Aşağıda ki çizelge de de optimum sonuçlar gösterilmiştir.

Çizelge 4.9. Alüminyum plaka elektrotlar için optimum değerler

Değişken	Renk	KOİ	Birlikte	Değişken	Renk	KOİ	Birlikte
	Giderimi	Giderimi			Giderimi	Giderimi	
	Kodlu Değerler				Gerçek Değerler		
x ₁	0	0	0	pH	7	7	7
x ₂	0,899	2	1,5	Akım (A)	1,35	2	1,75
x ₃	1,076	0.713	0,713	Zaman	30,76	27,13	27,13

Model sonucunda elde edilen işletme şartlarıyla çalışmalar tekrarlanmış olup elde edilen KOİ ve renk giderim verimleri sonuçları sırasıyla %76 ile %95'dir. Bu giderim verimlerinin model sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmüştür.

Tekstil sanayii atıksularından Al plaka elektrotlarla yapılan denemelerde optimum olarak kabul edilen deney şartlarında (59,17 A/m² akım yoğunluğu, pH=7 ve 27,13 dakikalık reaksiyon süresi) Eşitlik (3.5) kullanılarak enerji tüketimi değerleri hesaplanmıştır. Çalışmalarda optimum olarak kabul edilen deney şartlarında enerji tüketimi 3,79 kW-saat/m³ olarak bulunmuştur. Elektrokimyasal arıtmada enerji tüketiminin %80'i enerji maliyetidir. İşletme maliyeti olarakta elektriğin kW-saat için birim fiyatı 0,40 TL olarak alındığında (sanayi için vergi ve fonlar dahil elektrik fiyatı 2018) optimum şartlar altında arıtma maliyeti 1,89 TL/m³ atıksu olarak hesaplanmıştır.

5. TARTIŞMA, SONUÇ ve ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada akrilik ve yün iplik boya banyosu atıksuyunda elektrokoagülasyon yöntemiyle yapılan çalışmalarda demir ve alüminyum elektrotlar kullanılmıştır. Deneysel şartları belirlemek, modelleme yapmak ve optimizasyon için cevap yüzey metodunun en çok kullanılan iki dizaynından biri olan, merkezi kompozit dizayn kullanılmıştır. CYM kullanılarak pH, akım yoğunluğu ve zaman bağımsız değişkenleri ile KOİ ve renk giderim verimlerinin tahmini için modeller oluşturulmuştur. Çıkan modellemeler incelendiğinde tahmini ve deneysel değerler arasında anlamlı bir ilişkinin olduğunu göstermiştir. Varyans analizi (ANOVA) ile R^2 'ler (modelin uygunluğu regresyon katsayısı) %90'dan büyük çıkmıştır. İkinci dereceden regresyon modeli sonucunda elde edilen optimum işletme şartları kullanılarak yapılan deneyler sonucunda elde edilen verilerin birbirlerine çok yakın çıkmasıyla istenilen uyumu sağlamıştır.

Demir elektrotlar kullanıldığında akrilik ve yün iplik boya banyosu atıksuları için optimum şartlar; reaksiyon süresi 27,35 dk, pH 9, Akım 1,82 A, Akım yoğunluğu 61,53 A/m² olarak belirlenmiştir. Optimum KOİ ve renk giderim verimleri sırasıyla %95,7 ve %100'dür. Bu işletme şartlarıyla gerçekleştirilen çalışmalarda elde edilen KOİ ve renk giderim verimleri sonuçları sırasıyla %90,45 ile %95'dir. Bu giderim verimlerinin model sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmüştür. Cevap yüzey grafikleri incelendiğinde renk gideriminde etkili olan parametreler, akım yoğunluğu ve reaksiyon süresidir. KOİ gideriminde etkili olan parametreler hepsidir fakat en etkilisi sadece zamandır.

Alüminyum elektrotlar kullanıldığında akrilik ve yün iplik boya banyosu atıksuları için optimum şartlar; reaksiyon süresi 27,13 dk, pH 7, Akım 1,75 A, Akım yoğunluğu 59,17 A/m² olarak belirlenmiştir. Optimum KOİ ve renk giderim verimleri sırasıyla %77,52 ve %99,6'dür. Bu işletme şartlarıyla gerçekleştirilen çalışmalarda elde edilen KOİ ve renk giderim verimleri sonuçları sırasıyla %76 ile %95'dir. Bu giderim verimlerinin model sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmüştür. Cevap yüzey grafikleri incelendiğinde renk ve KOİ gideriminde etkili olan parametreler, akım yoğunluğu ve zamandır. Görülmüştür ki pH'ın renk ve KOİ giderim verimi üzerindeki oldukça azdır.

İşletme maliyetlerine bakıldığında ise, optimum koşullarda demir elektrotlar için enerji tüketimi; 4,64 kw-saat/m³, arıtma maliyeti 2,31 TL/m³ atıksu olarak hesaplanmıştır. Alüminyum elektrotlar için enerji tüketimi; 3,79 kw-saat/m³, arıtma maliyeti 1,89 TL/m³ atıksu olarak hesaplanmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde her iki elektrot için işletme maliyetlerinin arasında önemli bir fark olmadığı görülmüştür.

Akım yoğunluğunun 0 olduğu pH:7 de 20 dakika bekleme süreli çalışmada santrifüj etkisini göstermektedir. 330 watt güce sahip cihaz ile 5 dakika süreli olarak 30 ml numunenin santrifüjlenmesinde %63-67 gibi KOİ giderimi sağlanmakta, buna karşılık olarak 900 kW-saat/m³ gibi çok yüksek bir enerji sarfıyatı olmaktadır. Elektrokoagülasyon prosesi ile çok daha düşük maliyetlerle daha yüksek giderim verimleri elde edilebilmektedir.

Her iki elektrotla yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar incelendiğinde verim ve enerji maliyetleri arasında önemli bir fark olmadığı görülmektedir. Yalnız demir elektrot ile yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar daha verimli olduğu için 0,42 TL'lik fark göz ardı edilebileceği düşünülmektedir.

Elektrokoagülasyon prosesinde kullanılan demir ve Alüminyum elektrotlar karşılaştırıldığında demir elektrotların Alüminyum elektrotlara oranla iyi renk ve KOİ giderimi sağladığı görülmüştür. Atıksulardan KOİ gideriminde genellikle demir elektrotların alüminyum elektrotlara göre daha etkili olduğu bilinmektedir. Bunun sebebi demirin oksidasyon kapasitesinin KOİ giderim verimini arttırmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca demir formlarının çevre sağlığı açısından daha zararsız olması tercih edilmesi için diğer bir sebeptir.

KAYNAKLAR

- 109G083 Numaralı Kamag Projesi El Kitabı, 2013
- Abdulrahman Abdullah Alwarthan.2016, Arabian Journal of Chemistry Production and Hosting by Elsevier B.V. on behalf of King Saud University
- Akan, G., 2013. Biyokütleden Basınçlı Piroliz Yöntemiyle Elde Edilen Ürünlerin Cevap Yüzey Metodu Kullanılarak Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Akbaş, H., 2014, Elektrokoagülasyon Yöntemi ile Renk Gideriminin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Akbulut H.Y., 2000. Siyanür ve krom(VI) içeren galvanik atıksuların elektrokimyasal yöntemler kullanılarak arıtılması, Yüksek Lisans Tezi, GYTE, Gebze.
- Amirtharajah, A., O'melia, C.R., 1990. Water Quality and Treatment, American Water Works Association, Fourth Edition, McGraw- Hill.
- Antony J., 2003. Design of Experiments for Engineers and Scientist, Elsevier Science & Technology Books, Waltham, 1–162.
- APHA, AWWA, and WPCF. 1995, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th Ed., Washington, DC.
- Arıcı, Y., 2000. Tekstil Endüstrisinde Reaktif Boyarmaddelerden Kaynaklanan Rengin Fenton Prosesi ile Giderilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Arslan, H., 2010. Tekstil Endüstrisinde Farklı Proses Atıksularının Arıtımında Membran Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aşkın, Ş., 2011. Bitkisel Tabanlı Metal Kesme Sıvılarının Elektrokoagülasyon Yöntemi ile Giderimi, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.
- Avcu, F., 2010. Atıksulardaki Fenolün Elektrokoksidasyon ile Arıtılması için Elektroaktif Elektrot Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Kimya Anabilim Dalı, Adana.
- Avlonitis S.A., Poulis I., Sotiriou D., Pappas M. ve Moutesidis K., 2008. Simulated cotton dye effluents treatment and reuse by nanofiltration, Desalination, 221:259-267
- Aygün, A., 2012. Reaktif ve Dispers Boya Banyo Atıksularının Elektrokoagülasyon Proseslerle Arıtımı: Cevap Yüzey Metodu ile Optimizasyon. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Endüstrisi, Konya
- Baban A., Yediler A., Lienert D., Kemerdere N. ve Kettrup A., 2003. Ozonation of high strength segregated effluents from a wollen textile dyeing and finishing plant, Dye and pigments, 58:93-98
- Baburşah, S., 2004. Tekstil Endüstrisi Atıksularının Gerikazanımı ve Yeniden Kullanılması İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi, 117s, İstanbul,
- Bahadır, E.B., 2012. Tekstil Endüstrisi Arıtılmış Atıksularında Renk ve Öncelikli Kirleticilerin Ozon Teknolojisi İle Gideriminin Araştırılması Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi, 140s, Tekirdağ.

- Bajpai, S., Gupta, S.K., Dey, A., Jha, M.K., Bajpai, V., Joshi, S. ve Gupta, A., 2012. Application of Central Composite Design approach for removal of chromium (VI) from aqueous solution using weakly anionic resin: Modeling, optimization, and study of interactive variables, *Journal of Hazardous Materials*, 227– 228: 436–444.
- Banga JR, Canto E.B., Moles C.G. ve Alonso A.A., 2003. Improving food processing using modern optimization methods, *Trends in Food Science & Technology*, 14: 131-144.
- Bashir, M.J.K., Aziz, H.A., Aziz, S.Q. ve Amr, S.A., 2012. An Overview of Wastewater Treatment processes Optimization Using Response Surface Methodology (RSM), *The 4th International Engineering Conference*, 15-16 October 2012, Gaza.
- Baş, D. ve Boyacı, İ.H., 2007. Modeling and optimization I: Usability of response surface methodology, *Journal of Food Engineering*, 78: 836–845.
- Başbüyük M., Yüceer A., Yılmaz T., 1998. Tekstil Atıksularında Renk Giderilmesinde Kullanılan İleri Teknolojiler, *Kayseri I. Atıksu Sempozyumu*, S. 82-86, Kayseri.
- Bat -Tekstil Sanayii için En Uygun Teknikler 2002. (BAT) (Best Available Technology) Referans Dokümanı Kasım.
- Bayar, S., Boncukçuoğlu, R., Fil, B., Yılmaz, A., 2012. Elektrokoagülasyon Yöntemi Kullanılarak Direct Red 23 Boyarmaddesinin Gideriminin İncelenmesi, *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2, 21-28.
- Bayramoğlu, M., Eyvaz, M., Kobya, M., 2007. Treatment of the textile wastewater by electrocoagulation economical evaluation, *Chemical Engineering Journal*, 128, 155–161.
- Bayramoğlu, M., Kobya, M., Can, O.T., Sözbir, 2004. Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. *Separation and Purification Technology*, 37, 117–125.
- Benefield, L.D., Judkins, J.J.Jr., Weand, L.B. 1982. *Process Chemistry for Water and Wastewater Treatment*, Pretice-Hall, Inc., Endlewood.
- Bes-Piá, A., Mendosa-Roca J.A., Alcaina-Miranda, M.I., Iborra-Clar A. ve Iborra-Clar M.I., 2002. Reuse of wastewater of textile industry after its tretment with a combination physico-chemical treatment and membrane Technologies, *Desalination*, 149:169-174.
- Bes-Piá, A., Mendosa-Roca J.A., Alcaina-Miranda, M.I., Iborra-Clar A., Iborra-Clar M.I. ve Cuartas-Urbe, B., 2005. Nanofiltration of textile industry wastewater using physico-chemical process as a pretreatment, *Desalination*, 178:343-349.
- Bradley, N., 2007. *The Response Surface Methodology*, Yüksek Lisans Tezi, Indiana University South Bend, IUSB Master of Science in Applied Mathematics and Computer Science, South Bend.
- Can O.T., Kobya M., Demirbaş E. ve Bayramoğlu M., 2006. Treatment of textile wastewater by combined electrocoagulation, *Chemosphere*, 62:181-187.
- Can, B.Z., 2010. Sulu Çözeltilerden Arsenik ve Bor'un Birlikte ve Seçimli Olarak Elektrokoagülasyon Yöntemi ile Giderimi, *Doktora Tezi*, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Can, O. T., Bayramoğlu, M., Kobya, M., 2002. Decolorization Of Reactive Dye Solutions By Electrocoagulation Using Aluminium Electrodes, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 42, 3391-3396.

- Can, O.T., Kobya, M., Demirbas, E. and Bayramoglu, M., 2005. Treatment of the textile wastewater by combined electrocoagulation. *Chemosphere*, 62, 181 – 187.
- Chen, G., 2004. Electrochemical technologies in wastewater treatment, *Separation and Purification Technology*, 38, 11 – 41.
- Chmielewski A. G., Urbanski M. W., 1977. Separation Technologies for Metals Recovery From Industrial Wastes, *Hydrometallurgy*, 45, 333-344.
- Correia, V.M., Stephenson, T., Judd, S.J., 1994. Characterization of Textile Wastewaters: a Review, *Environmental Technology*, 15, 917-929.
- Çalışır, M., 2010. Ardışık Kesikli Aktif Çamur Sisteminde Arıtılmış Sentetik Tekstil Terbiyesi Atık Sularında Renk Giderimi ve Ekonomik Analizi, Y.L.Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Çevre ve Orman Bakanlığı, Su Kirliliği ve Kontrol Yönetmeliği, 31.12.2004 Tarih ve 25687 Sayılı Resmi Gazete.
- Çınar Ö., Yaşar S., Kertmen M., Demiröz K., Yiğit A.Ö. ve Kitis M., 2008. Effect of cycle on biodegradation of azo dye in sequencing batch reactor, *Process Safety and Environment Protection* 86:455-460.
- Daneshvar N., Ashassi S. H., Tizpar A., 2003. Decolourisation of Orange II by Electrocoagulation Method, *Separation and Purification Technology*, 31, 153-162.
- Delipınar, Ş., 2007. Maya Endüstrisi Atıksularının Elektrokoagülasyon ve Kimyasal Koagülasyon ile Arıtımı, Yüksek Lisans Tezi, GYTE Müh. ve Fen Bil. Ens., 3-81.
- Dilek F.B., Şahinkaya E., Uzal N. ve Yetis U., 2008. Biological treatment and nanofiltration of denim textile wastewater for reuse, *Journals of hazardous materials*, 153:1142-1148.
- Doğan, C., 2010. Yün ve akrilik iplik boyahane atıksularında fenton ve elektrokoagülasyon yöntemleri ile renk ve koi giderimi, Y.Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Dündar, A., 2011. Farklı Sıcaklık ve Sürelerde Pişirilen Köftelerde Heterosiklik Aromatik Aminlerin Oluşumunun Sınırlandırılmasında Optimum Tuz, Askorbik Asit ve Yağ Kullanım Seviyelerinin Yanıt Yüzey Yöntemi İle Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Emamjomeh, M.M. ve Sivakumar, M., 2006, An Empirical Model for Defluoridation by Batch Monopolar Electrocoagulation/Flotation (ECF) Process, *Journal of Hazardous Materials*, B131, 118–125.
- Etki, E., 2013. Tekstil Sektörü Raporu-Sektörel Raporlar Serisi V, T.C. Doğu Marmara Kalkınma Ajansı Düzce Yatırım Destek Ofisi.
- Eyvaz, M., 2005. Demir ve Alüminyum Elektrotların Farklı Bağlantıları ile Tekstil Atıksularının Elektrokoagülasyonu, Yüksek lisans Tezi, GYTE Müh. ve Fen. Bil. Ens., Gebze, 41.
- Gezer A., Keskinler B., 2006. Elektrokimyasal Depolama Tekniği ile Ağır Metal Giderimi, 10. Endüstriyel Kirlenme Kontrolü Sempozyumu, İstanbul, Türkiye, 7-9 Haziran.
- Gourich B., Merzouk B., Seki A., Madani K., Vial Ch., Barkaoui M., 2009. Studies on the decolorization of textile dye wastewater by continuous electrocoagulation process, *Chemical Engineering Journal*, 149:207-214

- Göknıl, H., Toröz, İ., ve Çimşit, Y., 1984. Tekstil endüstrisi atıksularında kontrol ve kısıtlama esasları projesi, T.C. Başbakanlık Çevre Genel Müdürlüğü, Aralık.
- Güneş, E., 2018. Hibrit Elektrokoagülasyon-Membran Filtrasyon Prosesi İle Tekstil Atıksularından Renk ve Koi Giderimi , Yük. Lis. Tezi, İÜ, İstanbul.
- Güney, S., 2013. Elektrokoagülasyon Prosesinin Çevre Mühendisliğindeki Uygulamaların Araştırılması, Yük. Lis. Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Gürbüz, G., 2015. Düzlemsel Homotetik Hareketler Altında Deri Endüstrisi Atıksularının Elektrokoagülasyon ve Elektro-Fenton Yöntemleri İle Arıtımında Rsm Kullanılarak Proses Optimizasyonu, Yük. Lis. Tezi, YTÜ, İstanbul.
- Holkar, C.R., Jadhav, A.J., Pinjari, D.V., Mahamuni, N.M., Pandit, A.M., 2016. A critical review on textile wastewater treatments: Possible approaches Journal of Environmental Management, 182, 351-366.
- Hu, T.L., 1994. Decolourization of Reactive Azo Dyes By Transformation with Pseudomonas Luteolai Bioresource Tech., 49, 47.
- Ifill R. O., 2010. Alternating Current Electrocoagulation (AC/EC) of Fine Particulate Suspensions”, Doktora Tezi, University of Alberta.
- Işık, M. ve Sponza D.T., 2004. Simüle Tekstil Atıksuyunun Anaerobik/Aerobik Arıtımı, Ekoloji Dergisi, 14, 53,1-8.
- İlhan, F., 2006. Sızıntı Sularının Elektrokoagülasyon Yöntemiyle Arıtılması, Yük. Lis. Tezi, YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- İlhan, F., Kurt, U., Apaydın, Ö., Arslankaya, E., Gnüllü, T., 2007. Elektrokımyasal Arıtım Ve Uygulamaları: Katı Atık Sızıntı Suyu Çalışması, YTÜ Makine Fakültesi, TURKAY, İstanbul.
- Kara, L., 2009. Elektrokoagülasyon Yöntemi ile Bazik Boyarmaddelerin Giderilmesi, Yük. Lis. Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Khataee A.R., Vatanpour V. ve Amani Ghadim A.R., 2009. Decolorization of C.I. acid blue 9 solution by UV/Nano-TiO₂, Fenton, Fenton-like, Electro-fenton and Electrocoagulation processes: A comparative study”, Journal of hazardous materials, 161:1225-1233.
- Kınacı, C., Germirli, B.F., Görgün, E., Sözen, S., ve Büyükdere, A., 2006. Türkiye’ye Uyarlanması Teknolojik Açıdan Yol Haritası Olusturulması: Tekstil Endüstrisi, Avrupa Birliği Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrol Direktifinin (ippc) DPT Proje Raporu, İstanbul.
- Kiernan J. A., 2001. Classification and Naming of Dyes, Stains and Fluorochromes, Biotechnic & Histochemistry, 76 (5-6), 261-277.
- Kim S., Shin E.B., Park C. ve Kim T.H., 2002. Decolorization of disperse and reactive dyes by continuous electrocoagulation process”, Desalination, 150:165-175.
- Kobyas M., Demirbaş E., Can O. T., Bayramoğlu M., 2006. Treatment of Levafix Orange Textile Dye Solution by Electrocoagulation”, Journal of Hazardous Materials, B132, 183-188.
- Kobyas M., Bayramoglu, M., Eyvaz, M., 2007. Techno-Economical Evaluation of Electrocoagulation For the Textile Wastewater Using Different Electrode Connections, Journal of Hazardous Materials, 148, 311–318.
- Kobyas M., Can, O.T., 2003. Bayramoğlu, M., “Treatment Textile Wastewater by Electrocoagulation Using Iron and Aluminum Electrodes” J. of Hazardous Material B100 163-178.

- Kocaer, F.O. ve Alkan, U., 2002. BoyarMadde İçeren Tekstil Atıksularının Arıtım Alternatifleri, Uludağ Üniversitesi Mühendislik- Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 7, Sayı 1.
- Koç, B. ve Kaymak Ertekin, F., 2009. Yanıt Yüzey Yöntemi ve Gıda İşleme Uygulamaları, Gıda Dergisi, 35(1): 1-8.
- Koçyiğit H., 2008. Tekstil Atıksularındaki Reaktif Boyaların (Reaktif Mavi 19, Reaktif Kırmızı 198) Ardışık Kesikli Reaktörlerle Arıtılabilirliğinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- Koyugölge, T., 1994. Yünlü Tekstil Endüstrisi Atıksuyunun Biyolojik Arıtımı ve Renk Giderimi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kurt, E., 2012. Tekstil Endüstrisi Ayrılmış Atıksularının Pilot Ölçekli Membran Sistemi ile Arıtımı ve Geri Kazanımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Larue, O. ve Vorobiev, E., 2003. Floc Size Estimation in Iron Induced Electrocoagulation and Coagulation Using Sedimentation Data, Int. J. Miner. Process, 71, 1–15.
- Larue, O., Vorobiev, E., Vu, C., Durand, B., 2003. Electrocoagulation and Coagulation by Iron of Latex Particles in Aqueous Suspensions, Separation Purification Technology, 31:177-192.
- Lin, H.S., Lai, L.C., 2000. Kinetic Characteristic of Textile Wastewater Ozonationin Fluidized and Fixed Activated Carbon Beds, Wat. Res, 34 (3)763-772.
- Lin, S., Peng, C., 1994. Treatment Of Textile Wastewater By Electrochemical Method. Water Res; 28:277-82.
- Machenbach, I., 1998. Membrane Technology for Dyehouse Effluent Treatment, Membrane Technology, 96, 7-11.
- Martinez H. C. A., Brillas E., 2009. Decontamination of Wastewaters Containing Synthetic Organic Dyes by Electrochemical Methods: A General Review”, Applied Catalysis B: Environmental, 87, 105-145.
- Matis K. A., Zouboulis A. I., 1995. Electrolytic Flotation: An Unconventional Technique, Flotation Science and Engineering, University of Newcastle upon Tyne, published by M. Dekker, New York, 14, 385-413.
- Mead, R. ve Pike, D.J., 1975. A Biometrics İnvited Paper, A Rewiev of Response Surface Methodology from a Biometric Viewpoint, Biometrics, 31(4): 803-851.
- Mıdık, F., 2011. Reaktif Sarı 145 Azo Boyar Maddesinin Ve 2,4-Diklorofenoksiasetik Asit Pestisitinin Yüksüz Nano Demir, Fenton Ve Foto-Fenton Prosesleri İle Karşılaştırmalı Giderilmesi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi, Adana.
- Mollah M.Y.A., Schennach R., Parga J.R., et. al., 2001. Electrocoagulation (EC) – science and application, Journal of Hazardous Materials, B84, 29-41.
- Mollah, M.Y., Morkovsky, P., Gomez, J.A.G., Kesmez, M., Parga, J. ve Cocke, D.L., 2004. “Fundamentals Present and Future Perspectives of Electrocoagulation”, Journal of Hazardous materials, B114:199-210.
- Müller K., 1992. Electroflotation From The Double Layer to Troubled Waters, In: Oliver J et. al, Editors, Electrochemistry in Transition. Plenum Press.
- Myers, R.H. ve Montgomery, D.C., 1995. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, Second Edition, John Wiley and Sons, New York.

- Neşeli, S., Asiltürk, İ., Yıldız, S. ve Sağlam, H., 2012. Tornalama İşleminde Cevap Yüzey Metodu İle Kesme Kuvvetlerinin Kesme Parametrelerinin Kesme Parametrelerine Bağlı Olarak Modellenmesi. 3. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, 04-05 Ekim 2012, Ankara.
- Oba, Ş., 2012. Ekstraksiyon Koşulları Optimize Edilmiş Bazı Baharat Ekstraktlarının Köftenin Depolama Stabilitesi Üzerine Etkilerinin Cevap Yüzey Metodu Kullanılarak Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Ong, S.A., Toorisaka H., Hirata M. ve Hano, T., 2005. Decolorization of azo dye (Orange II) in a sequential UASB-SBR system, Sep. Purif. Technol., 42:297-302.
- Özcan Y, Ulusoy E 1984. Tekstil Elyaf ve Boyama Tekniği, Fatih Yayınevi, İstanbul, 598 s.
- Özden, M., 2016. Boyar Maddelerin Elektrokoagülasyon İle Arıtılabilirliğinin İncelenmesi, Yük. Lis. Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- Özkan, Ü., 2007. Tekstil Endüstrisi Proses Suyu Hazırlanmasında Membran Proseslerin Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Öztürk, İ., Timur H. ve Koşkan, U., 2005. Atıksu Arıtımının Esasları, T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı Yayınları, Ankara.
- Öztürk, İ., Timur, H., Koşkan, U., 2005. Atıksu Arıtımının Esasları: Evsel, Endüstriyel Atıksu Arıtımı ve Arıtma Çamurlarının Kontrolü. 459 s, Türkiye.
- Özyonar F., Karagözoğlu B., 2012. Elektrokoagülasyon Prosesi ile Tekstil Sanayi Atıksuyunun Arıtımı”, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 28 (1), 29-37.
- Özyonar, F., 2007. Entegre Et Ve Et Ürünleri Tesisleri Atıksularının Kimyasal Koagülasyon Ve Elektrokoagülasyon Yöntemleriyle Arıtılabilirliğinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.
- Peres, J.A., Lucas M.S., Dias A.A., Sampaio A. ve Amaral C., 2007. Degradation of textile reactive azo dye by a combined chemical-biological process: Fenton’s reagent-yeast”, water research 41:1103-1109.
- Persin F., Suksaroj C., Héran M. ve Allégre C., 2005. Treatment of textile plant by nanofiltration and/or reverse osmosis for water reuse”, Desalination, 178:333-341.
- Phalankornkule C., Polgumhang S., Tongdaung W., Karakat B. ve Nuyut T., 2010. Electrocoagulation of blue reactive, red disperse and mixed dyes and application in treating textile effluent. Journal of Environmental Management, 94:918-926.
- Pinheiro H.M., Lourenço N.D. ve Novais J.M., 2001. Effect of some biological parameters on textile dye biodegradation in a sequential batch reactor. Journal of biotechnology, 89:163-174.
- Romanov A., Kobya M., Dımoğlu A., 2000. Atıksulardaki Kolloidal Partiküllerin Elektroflotokoagülasyonla Giderimi, İstanbul Teknik Üniversitesi 7. Endüstriyel Kirlenme Kontrolü Sempozyumu, 67-74, İstanbul, Türkiye, 20-22 Eylül.
- Scott, K., 1995. Electrochemical Processes for Clean Technology, The Royal Society of Chemistry, Cornwall.

- Sengil, I.A. and Ozacar, M, 2009, The decolorization of CI reactive black 5 in aqueous solution by electrocoagulation using sacrificial iron electrodes, *Journal of Hazardous Materials*, 161, 1369-1376.
- Sevimli, M.F., 2000. Tekstil Endüstrisi Atıksularından Ozonlama ile Renk Giderimi ve Ozonlamanın Biyolojik Arıtılabilirliğine Etkisi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Sirianuntapiboon S., Chairattanawan K. ve Jungphongsukpanich A., 2006. Some properties of sequencing batch reactor system for removal of vat dyes. *Bioresource technology*, 97:1243-1252.
- Solak, M., 2007. Elektrokoagülasyon Prosesi ile Mermer Atıksularının Arıtılması. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Sözen, S., 1991. Tekstil Endüstrisinde Kirlenme Kontrolü, Su Kalitesi Kontrolü Dergisi, İ.T.Ü. İstanbul, 3, 133-144.
- Sponza, D.T. ve Isik M., 2002. Decolorization and azo dye degradation by anaerobic/aerobic sequential process. *Enzyme Microb. Technol.*, 31(1-2):102-110.
- Subaşı, A., 2010. Yanıt Yüzey Yöntemi Yardımı İle Isı Değiştirici Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Sundrarajan M., Vishnu G. ve Joseph K., 2007. Ozonation of light-shaded exhausted reactive dye bath for reuse. *Dyes and pigments*, 75:273-278.
- Şahin, Y., 2006. Asit Boya Banyosu Atıksularının Kimyasal Prosesler İle Ön Arıtılabilirliğinin İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi, 137s, İstanbul.
- Şanlı, N., 2006. Deri Sanayi Atıksularının Kimyasal Koagülasyon ve Elektrokoagülasyon ile Arıtımı. Yüksek Lisans Tezi, T.C. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik Ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- Takımcı, F., 1996. Azo Boyası İçeren Tekstil Atıksuyunun Anaerobik Olarak Arıtılması ve Renk Giderimi. Yük. Lis. Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bil. Ens. İstanbul.
- Tanzer T., 2006. Katyonik Alkiltrimetilamonyum Bromür Surfaktanlar ile C.I. Reaktif Orange 16 Etkileşimi. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Edirne.
- Turabik, M., Kumbur, H., 2002. İstanbul Teknik Üniversitesi 8. Endüstriyel Kirlenme Kontrolü Sempozyumu EKK 2002. Bildiriler, 390- 400, İstanbul.
- Turan, M.D. ve Altundoğan, H.S., 2011. Hidrometalurjik Araştırmalarda Yanıt Yüzey Yöntemlerinin Kullanımı. *Madencilik*, 50: 11-23.
- Tünay, O., 1988. Tekstil Endüstrisi Atıksularının Arıtılmasında Kullanılan Yöntem ve Yaklaşımlar, *Tekstil ve Teknik*, 40, 98-101.
- Türkoğlu, G., 2007. Dispers Boya Banyo Atıksularının Elektrokoagülasyon ile Arıtılabilirliğinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Türkyılmaz, H., 2011. Kurşun iyonlarının kesikli adsorpsiyon prosesi ile gideriminin cevap yüzey yöntemiyle optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Uygun, R., 2003. Demir ve Alüminyum Elektrotlar Kullanılarak Tekstil Boyalarının Elektrokoagülasyon ile Arıtımı, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli.

- Uzunoğulları, P., 2010. Patates Atığında Aureobasidium pullulans ile Pullulan Üretimi ve Cevap Yüzey Yöntemi ile Proses Koşullarının Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Üçevli, O., 2017. Gri Suların Fiziksel ve Kimyasal Yöntemlerle Arıtımı ve Yeniden Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ürküt, Z., 2007. Kalsiyum aljinatta immobilize edilmiş Aureobasidium pullulans P56 hücreleri ile pullulan üretiminin optimizasyonu. Yüksek lisans tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Van der Zee F.P., Bouwman R. H. M., Strik D. P. B. T. B., Lettinga G., Field J. A., 2001. Application of Redox Mediators to Accelerate the Transformation of Reactive Azo Dyes in Anaerobic Bioreactors. *Biotechnology and Bioengineering*, 75, 691-701.
- Vandervivere, P.C., Bianchi R., Versraete W., 1998. Treatment and Reuse of Wastewater from the Textile Wet-Processing Industry: Review of Emerging Technologies, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 72, 289-302.
- Vardar B., 2006. Tekstil Endüstrisi Reaktif Boya Banyolarının Elektrokimyasal Yöntemler ile Arıtımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Verma, A.K., Dash, R.R., Bhunia, P., 2012. A review on chemical coagulation/flocculation technologies for removal of colour from textile wastewaters” *Journal of Environmental Management*, 93, 154-168.
- Vik, E.A., Carlson, D.A., Eikum, A.S., Gjessing, E.T., 1984. Electrocoagulation of Potable Water. *Water Research*, 18, 1355-1360.
- Woerner, D.L., 2003. Membrane Technology in Textile Operations. Koch Membrane Systems.
- Xiong, Y., Strunk, P. J., Xia, H., Zhu, X., Karlsson, H. T. 2001. Treatment of dye wastewater containing acid orange II using a cell with three-phase threedimensional electrode, *Water. Res.*, 35, 4226-4230.
- Yang C. L., Mcgarrahan J., 2005. Electrochemical Coagulation for Textile Effluent Decolorization. *Journal of Hazardous Materials*, B127, 40-47.
- Zee F. P., 2002. Anaerobic Azo Dye Reduction. Doktora Tezi, Wageningen University.

ÖZGEÇMİŞ

1991 yılında İstanbul’da doğdu. İlk, ortaöğretim ve lise eğitimini İstanbul’da tamamladı. 2009 yılında Fatih Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2013 yılında bu bölümden mezun oldu. 2014 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans yapmaya başladı.

