



**T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KOT KUMAŞI ÜRETİM TESİSİ ATIKSULARININ
ELEKTROKİMYASAL YÖNTEMLERLE ARITILABİLİRLİĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Önder KAHRAMAN

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi İsmail ŞİMŞEK

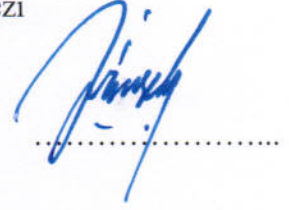
AKSARAY, 2019

Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 162301414 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi **Önder KAHRAMAN** tarafından hazırlanan **“KOT KUMAŞI ÜRETİM TESİSİ ATIKSULARININ ELEKTROKİMYASAL YÖNTEMLERLE ARITILABİLİRLİĞİ”** adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ / OY ÇOKLUĞU ile Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: **Dr. Öğr. Üyesi İsmail ŞİMŞEK**

Aksaray Üniversitesi

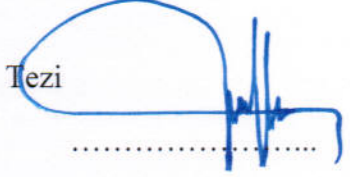
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum~~



Üye: **Prof. Dr. Levent ALTAŞ**

Aksaray Üniversitesi

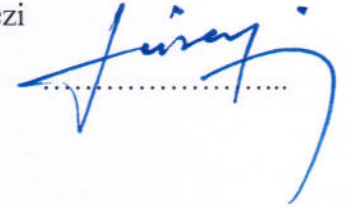
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum~~



Üye: **Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin CÜCE**

Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum~~



Tez Savunma Tarihi: 22.05.2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

...../...../2019

Doç. Dr. Mehmet Ali HINIS

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, çalışmamda kullandığım verilerin orijinallliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

İmza

Önder KAHRAMAN

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, değerli bilgi ve birikimlerini benimle paylaşan, kendisine ne zaman danışsam bana kıymetli zamanını ayırıp sabırla ve büyük ilgiyle bana faydalı olabilmek için elinden gelenin fazlasını sunan her sorun yaşadığımda yanına çekinmeden gidebildiğim, güler yüzünü ve samimiyetinin benden esirgemeyen ve mesleki hayatımda da bana verdiği değerli bilgilerden faydalanacağımı düşündüğüm, kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi İsmail ŞİMŞEK’e teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarımnda her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen Öğr. Gör. Tolga BAHADIR hocama, modelleme aşamasında her türlü yardım ve desteklerini esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Alper ALVER ve Dr. Öğr. Üyesi Emine BAŞTÜRK hocalarıma çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım esnasında bana atıksu temin eden ‘‘Kayseri Şirikçioğlu Mensucat San. Ve Tic. A.Ş.’nin’’ tüm yöneticileri ve değerli Çevre Mühendisi Umut ÜNALAN Beye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek Lisans ders ve tez aşamalarında motivasyonumu üst düzeyde tutmamı sağlayan ve desteklerini esirgemeyen kıymetli arkadaşım ve dostum Biyoloji öğretmeni Ahmet UYGUR’a çok teşekkür ederim.

Hayatım boyunca bana her türlü desteği veren ve hep yanımda olan sevgili eşim Fatma KAHRAMAN ve kızım Elif Dilasa KAHRAMAN’a en derin teşekkürlerimi sunarım.

Önder KAHRAMAN

AKSARAY, 2019

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	4
2.1 Tekstil Endüstrisinin Genel Özellikleri	4
2.1.1 Kot kumaş endüstrisi	5
2.2 Türkiye’de Kot Kumaşın Yeri ve Önemi	5
2.3 Kot Kumaş Üretimi İşlem Kademeleri.....	6
2.3.1 İplik özelliği.....	6
2.3.2 Çözümlü hazırlama	6
2.3.3 Dokuma, haşıllama	7
2.3.4 Terbiye işlemleri.....	8
2.3.5 Kalite kontrol	8
2.4 Kot Kumaş Çeşitleri	9
2.5 Tekstil Endüstrisi Atıksularının Özellikleri	9
2.6 Proseslere Göre Atıksu Karakteristiği	10
2.7 Boyarmadde.....	13
2.8 Tekstil Endüstrisinde Kullanılan Boyarmaddeler	16
2.9 Kot Kumaşı Üretiminde Kullanılan Boyarmaddeler.....	16
2.9.1 İndigo.....	16
2.9.2 Kükürt boyar maddeler	18
2.9.2.1 Suda çözünmez yapıdaki kükürt boyarmaddeler	18
2.9.2.2 Suda çözünebilir hâle getirilmiş kükürt boyarmaddeleri	19
2.9.3 Küp-Kükürt boyarmaddeleri.....	19
2.10 Kot Kumaşı Boyama Prosesi.....	20
2.11 Ulusal ve Uluslararası Mevzuat	21
2.12 Tekstil Endüstri Atıksularının Arıtımı	25
2.12.1 Fiziksel arıtım	25
2.12.1.1 Membran filtrasyonu.....	26
2.12.1.2 İyon değişimi	27
2.12.2 Biyolojik arıtım.....	27
2.12.2.1 Aerobik yöntem	29
2.12.2.2 Anaerobik yöntem.....	30
2.12.2.3 Biyosorpsiyon	31
2.12.3 Kimyasal arıtım	31
2.12.3.1 Adsorpsiyon.....	32
2.12.3.2 Oksidasyon	33
2.12.3.3 Koagülasyon – Flokülasyon	33
2.13 Elektrokimyasal Prosesler	34
2.13.1 Elektrodializ yöntemi	38
2.13.2 Elektroforez yöntemi	39
2.13.3 Elektroflotasyon yöntemi	40
2.13.4 Elektrokoksidasyon yöntemi	43

2.13.5 Elektrokoagülasyon (EC) yöntemi	45
2.13.5.1 EC reaktöründe gerçekleşen reaksiyonlar.....	48
2.13.5.2 Elektrokoagülasyon prosesinin avantajları ve dezavantajları ...	48
2.13.5.3 Elektrokimyasal arıtım prosesini etkileyen faktörler	50
3. MATERYAL VE YÖNTEM	59
3.1 Kot Kumaşı Üretim Tesisi Atıksuyu	59
3.2 Elektrokimyasal Yöntemlerle Arıtılabilirlik Çalışmaları	60
3.3 Renk Ölçüm Yöntemleri	61
3.3.1 Spektrofotometrik metot	61
3.3.2 RES analizinin yapılışı (EN ISO 7887)	62
3.4 Deneysel Kurgulama	64
3.5 Hesaplamalarda Kullanılan Eşitlikler.....	65
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	68
4.1 Elektrotların Seçimi.....	68
4.2 pH'ın Etkisi	75
4.3 Akımın Etkisi	78
4.4 Sürenin Belirlenmesi	81
4.5 Elektrotlar Arası Mesafe Etkisi	84
4.6 İletkenliğin Etkisi	87
4.7 Elektrot Bağlantı Şeklinin Giderim Verimleri Üzerine Etkisi	90
4.8 Regresyon Yöntemi ile Modelleme.....	93
4.8.1 Doğrusal regresyon modelleme	93
4.8.2 Doğrusal olmayan regresyon modelleme	97
4.8.2.1 456 Abs	98
4.8.2.2 Bulanıklık.....	101
4.8.2.3 KOİ	103
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	106
KAYNAKLAR	112
EKLER	121
EK A RES 436, RES 525, RES 620 Çizelgeler	121
ÖZGEÇMİŞ	125

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KOT KUMAŞI ÜRETİM TESİSİ ATIKSULARININ ELEKTROKİMYASAL YÖNTEMLERLE ARITILABİLİRLİĞİ

Önder KAHRAMAN

Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İsmail ŞİMŞEK

ÖZET

Kot kumaşı üretim sektörü son yıllarda tüm dünyada ve ülkemizde talebe bağlı olarak sürekli gelişmekte ve değişmektedir. Kot kumaşı üretiminden kaynaklanan atıksular, kumaşın üretilmesi ve işlenmesi proseslerinde meydana gelmektedir. Kot kumaşın işlenmesi sırasında indigo boyalar ve diğer kimyasal maddeler; ürününün mukavemetini arttırmak, boyayı ürüne sabitlemek için kullanılmaktadır. Ayrıca kotun yıkama işlenmesi sırasında değişik kimyasal maddelerin kullanımı nedeniyle de yüksek KOİ ve renk değerlerine sahip atıksular oluşmaktadır.

Bu çalışmada kot kumaşı üretim tesisi atıksularının elektrokimyasal yöntemlerle arıtılabilirliği araştırılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında, kot kumaşı üretim tesisi atıksuyu alüminyum, demir, paslanmaz çelik, grafit elektrotların her biri anot ve katotda kullanılarak 16 farklı kombinasyonda deneyler yapılmıştır. En yüksek giderim verimleri demir-paslanmaz çelik elektrot materyali ile elde edilmiştir. Arıtılan atıksuyun pH, iletkenlik, elektrotlar arası mesafe, süre, akım ve voltaj değişkenlerine bağlı olarak bulanıklık, KOİ renk giderim veriminin nasıl değiştiği de incelenmiş ve toplam arıtma maliyetleri hesaplanmıştır. Elektrokimyasal metotlar sonucu demir ve çelik elektrotları ile %91,25 KOİ giderim verimi, %94,25 renk giderim verimleri elde edilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında işletme parametrelerinin doğrusal olmayan Regresyon metodu kullanılarak modellenmesi yapılmıştır. SPSS programı ile farklı işletme parametrelerinin kot kumaşı üretim tesisi atıksularının elektrokimyasal arıtım üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. Bu parametrelerinin bireysel ve sinerjik olarak etkileri incelenmiş ve en yüksek verimi elde etmek için uygun işletme şartları belirlenmiştir. Doğrusal Olmayan Regresyon metodu kullanılarak geliştirilen ikinci dereceden model ile deneysel ve tahmini değerler arasında anlamlı bir ilişkinin olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tekstil atıksuyu, Elektrokimyasal arıtım, Demir elektrot, Paslanmaz çelik elektrot, Doğrusal olmayan regresyon, KOİ giderimi, Renk giderimi

May, 2019; 125 sayfa.

M.Sc. THESIS

TREATABILITY OF DENIM PRODUCTION PLANT WASTEWATERS BY ELECTROCHEMICAL METHODS

Önder KAHRAMAN

T.C.

Aksaray University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Environmental Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. İsmail ŞİMŞEK

ABSTRACT

The denim manufacturing sector in recent years depending on the demand in the world and our country constantly develops and changes. Wastewater from the production of denim fabrics occurs in the production and processing of the fabric. During the processing of denim fabrics, indigo dyes and other chemicals are used to increase the strength of the product and to fix the paint to the product. Besides wastewaters with high COD and color values are formed due to the use of different chemicals during the washing process of the jeans.

In this study, the treatment of denim fabric production plant wastewater by electrochemical methods has been investigated. In the first stage of the study, 16 different combinations of iron, aluminum, stainless steel, graphite electrodes are used in anode and cathode. The highest removal efficiency was obtained with the iron-stainless steel electrode material. The effects of turbidity, COD and color removal efficiency of the treated wastewater depending on the pH, conductivity, the distance between the electrodes, time, current and voltage variables were also investigated and the total treatment costs were calculated. As a result of electrochemical chemical methods, 91.25% COD removal efficiency and 94.25% color removal efficiencies were obtained with iron and steel electrodes.

In the second stage of the study, the non-linear regression method was used to model the operating parameters. With SPSS program, the effects of different operating parameters of denim fabric production facility wastewater on electrochemical treatment were observed. The individual and synergetic effects of these parameters were examined and appropriate operating conditions were determined to obtain the highest efficiency. It was determined that there was a significant relationship between the second order model developed using nonlinear regression method with experimental and estimated values.

Keywords: Textile wastewater, Electrochemical treatment, Iron electrode, Stainless steel electrode, Nonlinear regression, COD removal, Color removal

May, 2019; 125 page

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. İplik üretimi ve boyama ünitesi iş akım şeması.....	20
Şekil 2.2. Elektrokimyasal hücrenin şematik görünüşü	36
Şekil 2.3. Elektrodializ sistemi	39
Şekil 2.4. Elektroforezin çalışma şeması	40
Şekil 2.5. Basit bir elektroflotasyon düzeneği	42
Şekil 2.6. Elektrooksidasyon prosesinde kirleticilerin dolaylı parçalanması	44
Şekil 2.7. Elektrooksidasyon prosesinde kirleticilerin doğrudan parçalanması	44
Şekil 2.8. EC reaktörünün şematik görünüşü.....	46
Şekil 2.9. Elektrokoagülasyon prosesinin ilerleyişi.....	47
Şekil 2.10. Paralel bağlı monopolar EC reaktörü.	55
Şekil 2.11. Seri bağlı monopolar EC reaktörü.	56
Şekil 2.12. Paralel bağlı bipolar EC reaktörü.	57
Şekil 3.1. Kot kumaşı üreten tesis atıksuyu arıtımı için deney düzeneği	60
Şekil 3.2. Kalibrasyon eğrisi.....	62
Şekil 4.1. Farklı elektrot materyallerinin renk giderim verimi	68
Şekil 4.2. Farklı elektrot materyallerinin KOİ giderim verimi	69
Şekil 4.3. Farklı pH'ların renk giderim verimine etkisi	75
Şekil 4.4. Farklı pH'ların KOİ giderim verimine etkisi	76
Şekil 4.5. Farklı akım değerlerinin renk giderime etkisi	79
Şekil 4.6. Farklı akım değerlerinin KOİ giderime etkisi	79
Şekil 4.7. Sürenin renk giderim verimine etkisi	82
Şekil 4.8. Sürenin KOİ giderim verimine etkisi	82
Şekil 4.9. Elektrotlar arası mesafenin renk giderim verimine etkisi.....	85
Şekil 4.10. Elektrotlar arası mesafenin KOİ giderim verimine etkisi.....	85
Şekil 4.11. İletkenliğin renk giderim verimine etkisi	88
Şekil 4.12. İletkenliğin KOİ giderim verimine etkisi	88
Şekil 4.13. Elektrot bağlantı şeklinin renk giderim verimine etkisi	91
Şekil 4.14. Elektrot bağlantı şeklinin KOİ giderim verimine etkisi	91

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Tekstil prosesleri atıksu bileşenleri.	11
Çizelge 2.2. Tekstil boyamacılığında kullanılan boyarmaddelerin tipik özellikleri. .	14
Çizelge 2.3. Tekstil sanayii (Açık Elyaf, İplik üretimi ve Terbiye)	22
Çizelge 2.4. Bazı ülkelerin renk parametresi standartları	24
Çizelge 2.5. Elektrot ve atıksuda gerçekleşen bazı kimyasal reaksiyonlar.....	35
Çizelge 2.6. Elektrokimyasal yükseltgenme ve indirgenme reaksiyonları	48
Çizelge 3.1. Atıksu bileşimi.....	59
Çizelge 3.2. Elektrokimyasal arıtım çalışma koşulları	61
Çizelge 4.1. Demir-demir, demir-alüminyum, demir-grafit, demir-çelik çalışmalarına ait arıtım parametreleri.....	71
Çizelge 4.2. Alüminyum-demir, alüminyum-alüminyum, alüminyum-grafit, alüminyum-çelik çalışmalarına ait arıtım parametreleri	72
Çizelge 4.3. Grafit-demir, grafit-alüminyum, grafit-grafit, grafit-çelik çalışmalarına ait arıtım parametreleri.....	73
Çizelge 4.4. Çelik-demir, çelik-alüminyum, çelik-grafit, çelik-çelik çalışmalarına ait arıtım parametreleri.....	74
Çizelge 4.5. Farklı pH değerlerinde elde edilen arıtım parametreleri.....	77
Çizelge 4.6. Farklı akım değerlerinde elde edilen arıtım parametreleri	80
Çizelge 4.7. Farklı sürelerde elde edilen arıtım parametreleri.....	83
Çizelge 4.8. Elektrotlar arası mesafe çalışmasında elde edilen arıtım parametreleri	86
Çizelge 4.9. İletkenlik çalışmalarında elde edilen arıtım parametreleri	89
Çizelge 4.10. Elektrotların bağlantı şekli çalışmalarında elde edilen arıtım parametreleri	92
Çizelge 4.11. Doğrusal regresyon model özeti	94
Çizelge 4.12. Değişken ve bağımlı parametrelere ait ANOVA analizi	95
Çizelge 4.13. 456 Abs, KOİ, Bulanıklık model katsayılar ve VIF tablosu.....	96
Çizelge 4.14. 456 Abs ANOVA analizi.....	99
Çizelge 4.15. 456 Abs parametre model katsayıları	99
Çizelge 4.16. 456 Abs modelleme sonuçları ve korelasyon	99
Çizelge 4.17. Bulanıklık ANOVA analizi	101
Çizelge 4.18. Bulanıklık Abs parametre model katsayıları	101
Çizelge 4.19. Bulanıklık modelleme sonuçları ve korelasyon.....	102
Çizelge 4.20. KOİ ANOVA analizi	103
Çizelge 4.21. KOİ parametre model katsayıları.....	104
Çizelge 4.22. KOİ modelleme sonuçları ve korelasyon	104

SİMGELER VE KISALTMALAR

A	Aktif Anot Yüzey Alanı
AC	Alternatif Akım
ADMI	Amerika Boya Üreticileri Enstitüsü
AOX	Adsorblanabilen Organik Halojenler
aq	Sıvı Ortam
°C	Santigrad
C0	Başlangıç Kirletici Konsantrasyonu
Ce	Arıtım Sonrası Kirletici Konsantrasyonu
C_{KOI} (%)	Yüzde Olarak KOİ Giderim Verimi
C_{renk} (%)	Yüzde Renk Giderim Verimi
CU	Renk Ünite
DC	Doğru Akım
E	Elektrik Enerjisi
EC	Elektrokoagülasyon
Ek	Kimyasal Ekvivalent
EPA	Çevre Koruma Örgütü
F	Faraday Sabiti
I	Akım Şiddeti
J	Akım Yoğunluğu
K	Kelvin
ke	Orantı Faktörü
kWh	Kilo Watt Saat
L	Litre
MA	Pratikte Anot Elektrottaki Çözünme Miktarı
mA	Miliamper
mg	Miligram
MK	Pratikte Katotda Çözünme Miktarı
Nm	Nanometre
NTU	Bulanıklık Birimi
Q	Elektrik Miktarı
RES	Renklilik Sayısı
SM	Standart Metot
St	Saat
t	Zaman
TCU	Gerçek Renk Birimi
TDS	Toplam Çözünmüş Katı Maddeler
TOK	Toplam Organik Karbon
TTSD	Türkiye Tekstil Terbiye Sanayicileri Derneği
UIB	Uludağ İhracatçı Birlikleri
UV	Ultraviyole
v	Elektrolit Hacmi
V	Volt
Z	İndirgenme Reaksiyonlarında Kullanılan Elektron Sayısı
λ0	Seçilen Dalga Boyundaki Başlangıç Absorbans Değeri
λe	Arıtım Sonrası Seçilen Absorbans Değeri
μ	Mikron
\$	Dolar
Σ	Toplam

1. GİRİŞ

Hızla değişen ve büyüyen kot kumaşı üretim sektörü son yıllarda ülkemiz ve tüm dünyada artan talebe bağlı olarak sürekli gelişmektedir. Bununla birlikte kot kumaşı üretim miktarındaki artış, üretim sürecinde suyun daha fazla kullanımına ve atıksu miktarında artışa sebep olmaktadır. Üretim aşamalarında fazla miktarlarda ve yüksek kirletici içerikli atıksu üreten kot kumaşı üretim endüstrileri hem üretimin sürdürülebilirliği hem de çevresel etkiler açısından atıksu arıtımı için önlem almalıdır.

Kot kumaşı üretiminden kaynaklanan atıksular, kumaş üretimi ve kumaşının işlenmesi proseslerinde meydana gelmektedir. Kot kumaşın işlenmesi sırasında indigo boyalar; ürününün (kot pantolon, kot etek, kot yelek, kot elbise vb.) imalat aşamalarında direncini ve kalitesini arttırmak, boyayı ürüne iyice işlemek ve kalıcı olmasını sağlamak gibi özellikleri elde etmek için çok çeşitli kimyasal maddeler kullanılmaktadır. Müşteri isteklerinin proses koşullarını belirlediği yoğun rekabetin yaşandığı kot kumaşı sektöründe istenen ağartma efektlerinin en az zarar ve maliyetle optimal koşullarda elde edilmesi vazgeçilmez bir zorunluluk halini almıştır. Bu gereksinim kot kumaşı mamullerin son yıllarda sektör içindeki paylarını arttırması, konu üzerinde gerek dünyada ve gerekse ülkemizde çalışmaların önemini arttırmıştır.

Kot kumaşı proseslerinde oluşan atıksular üretim de kullanılan reçetelerin içeriğine bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Üretim aşamasında, potasyum permanganat, boyarmaddeler, hidrojen peroksit, çeşitli enzimler ve asitler gibi birçok kimyasal madde kullanılmaktadır. Bu kimyasallar atıksu içeriğinde yüksek KOİ (Kimyasal Oksijen İhtiyacı) ve oldukça dirençli renk özellikleri oluşturmaktadır (Solak ve Öztürk, 2018).

Tekstil endüstrisinin yüksek oranlarda su tüketimi nedeniyle atıksu oluşumu diğer endüstrilerle karşılaştırıldığında oldukça fazladır. Boyahaneler, tekstil endüstrisinin en önemli bölümlerindendir. Yoğun renk ve boyama işlemi için ilave edilen yardımcı kimyasal maddeleri içerdiğinden arıtımı oldukça zordur. Dünyanın gelişmiş birçok

ülkesinde denetlenen bir parametre olan renk ile ilgili yasal düzenleme 24.04.2011 tarihinde 27914 sayılı Resmî Gazetede yayınlanarak yürürlüğe girmiştir.

Kot kumaşı endüstrisi atıksularının alıcı ortama deşarj edildiklerinde çok az boyarmadde konsantrasyonu bırakmaları dahi estetik açıdan istenmeyen durumların oluşmasına sebep olur. Atık suyun sebep olduğu renk, güneş ışığını absorblayarak alıcı ortamda fotosentez sürecinin gerçekleşmesini engeller ve ortamda çözünmüş oksijen değerinin azalmasına neden olur. Bu da alıcı ortamda yaşayan canlıların yok olmasına veya türlerin değişmesine sebep olur.

Endüstriden kaynaklı atıksuların arıtılması için, fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemler tek başına kullanılabildiği gibi bir arada da kullanılabilmektedir. Renk giderimi açısından yetersiz kalan bu sistemler, konvansiyonel parametreler dikkate alındığında başarılıdır. Bu sebeple kot kumaşı endüstrisi atıksularının arıtılması sorunu tam olarak çözülememekte arıtılmış atıksu da kalan rengin de giderilmesi gerekmektedir. Bu amaçla rengin giderilmesine yönelik çok sayıda çalışma yapılmıştır. Kimyasal oksidasyon, adsorpsiyon, kimyasal koagülasyon, membran, iyon değişimi ve elektrokimyasal prosesler renk giderimi amacıyla kullanılabilmektedir. Biyolojik proseslerle diğer yöntemlere kıyasla daha düşük renk giderimi elde edilebilmektedir (Aygün, 2012).

Mevcut klasik arıtma sistemlerinin yanında, uygulanabilir ve ekonomik çözümlerin ortaya konulması için yeni teknolojilerin denenmesi ve elde edilen sonuçların paylaşılması gerekmektedir. Son yıllarda boyarmadde içeren tekstil atıksularının arıtılmasında, uygulama kolaylığı ve ekonomik çözümler sunması nedeniyle elektrokimyasal yöntemler kullanılmaya başlanmış ve bu konudaki çalışmalar büyük önem arz etmiştir.

Bu çalışmada, kot kumaşı üretim endüstrisinde oluşan atıksuların, diğer arıtım yöntemlerine kıyasla avantajlarıyla öne çıkan ileri arıtım tekniklerinden elektrokimyasal arıtım yöntemleri irdelenmiştir. Bu kapsamda elektrokimyasal arıtım yöntemlerinden en çok kullanılan elektrokoagülasyon (EC), elektrooksidasyon ve elektroflokülasyon yönteminin temel mekanizması, diğer arıtım yöntemlerine göre avantaj ve dezavantajları, işletme parametreleri, elde edilen giderim verimleri ve maliyetleri incelenmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında, elektrokimyasal proseslerin verimi üzerine elektrot tipi (Al, Fe, paslanmaz çelik ve grafit) ve pH, akım yoğunluğu, işletme süresi, iletkenlik ve elektrot bağlantı şekli gibi parametrelerin etkileri incelenmiştir. Arıtılan atıksuyun renk, bulanıklık ve kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) giderim verimlerine, elektrot tüketim maliyeti ve enerji maliyeti dikkate alınarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında, deneysel sonuçlar IBM SPSS Version 24 programı kullanılarak modellenmiş ve pH, süre, akım, voltaj, elektrotlar arası mesafe ve iletkenlik parametrelerindeki değişime bağlı olarak elde edilecek renk, KOİ, bulanıklık giderim verimleri matematiksel olarak ifade edilmiştir. Böylece elektrokimyasal metotlar kullanarak kot kumaşı üretim tesisi atıksuyunun hangi oranda arıtılabileceği ortaya konulmuştur.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Tekstil Endüstrisinin Genel Özellikleri

Tekstil endüstrisi doğal, sentetik ve yapay elyafları kullanarak kumaş ve diğer tekstil ürünlerini üreten endüstrinin bir kolu olarak tanımlanmaktadır. Kimyasal elyafların üretimi, çırçırılama ve hazır giyim dışında, fabrikasyon ve doğal ipliklerin hazırlanması, dokuma, örme veya başka yöntemlerle triko, kumaş, halı gibi tekstil ürünleri elde edilmesi, iplik ve kumaşlara boyama, baskı, apre gibi terbiye işlemlerinin uygulanması faaliyetlerini kapsamaktadır. Tekstil endüstrisinin temel hammadde elyaftır. Bunlardan bir olan doğal elyaflar arasında pamuk, keten, kenevir, yün, ipek, mohair ve kıllar, bir diğeri olan fabrikasyon elyaflar arasında reyon, kazein, asetat-selüloz ester, naylon, polyester, akrilik ve vinil bulunur. Tekstil endüstrisinde yer alan prosesler, işlenen elyaf türüne göre bazı farklılıklar göstermekle birlikte çoğunlukla benzerdir (Vardar, 2006).

Yıkama, boyama ve baskı tekstil endüstrisinin temel prosesleri arasında yer alır. Diğer farklı üretim prosesleri yünlü ürünlere uygulanan karbonizleme ve dinkleme, pamuklu ürünlere uygulanan mersevizasyon işlemleridir.

Tekstil endüstrileri, atıksu karakterizasyonu, kirletici türleri, tesis içi kontrol ve proses farklılıklarına göre bir sınıflandırmaya tabi tutularak, arıtma sistemi seçimini kolaylaştırılmakla birlikte kirlenme bazlı alt kategorizasyonun temelini oluşturur.

Alt kategorizasyon ise imalat proseslerine, kullanılan hammaddelere, son ürünlere, su kullanımına ve atık karakteristiklerindeki benzerliklere dayandırılarak yapılmaktadır. Kirletici bazlı 10 alt kategori bulunmaktadır (Bahadır, 2012).

1. Yapağı yıkama
2. Yünlü kumaş son işlemleri
3. Az su kullanılan işlemleri
4. Dokunmuş kumaş son işlemleri
5. Örgü kumaş son işlemleri
6. Halı üretimi son işlemleri
7. Stok ve elyaf son işlemleri
8. Dokusuz yüzeyli kumaş üretimi

9. Keçeleştirilmiş kumaş retimi

10. Koza işleme ve doğal ipek retimi

Tekstil atıksuları genel olarak gri renkli veya boyama aşamasında kullanılan temel boyanın rengindedir. Temel kirletici parametreler BOI₅ (5 Günlük Biyolojik Oksijen İhtiyacı), KOİ (Kimyasal Oksijen İhtiyacı), AKM (Askıda Katı Madde), yağ ve gres, toplam krom, fenol ve sülfürdür.

Endüstri atıkları, kirlilik yoğunluğu ve hacim bakımından ekstrem değerler gösterir; ayrıca bazen toksik bileşikler de ihtiya edebilir. Atıksuyun miktar ve kalite özelliklerini belirleyen temel faktörler aşağıda sıralanmıştır (Bahadır, 2012).

1. Üretilen elyafın cinsi,
2. Tüm tekstil prosesinin kapsayan temel işlemler,
3. Proseslerde kullanılan kimyasal maddeler,
4. Tesis iş kontrollerin uygulanma derecesi.

2.1.1 Kot kumaş endüstrisi

Kot kumaş, Fransa'nın Nimes kentinde üretilmeye başlanmış ve "Nimes'den gelen" anlamını taşıyan "*de Nimes*" adını almıştır. İlk kez Fransa'nın Nimes ve İtalya'nın Cenova kentlerinde iş giysisi olarak dokunmaya başlanmıştır.

Blue jean'in kökeninde Cenova'lı denizcilerin "*Bleu de Genes*" (Cenova mavisi) diye adlandırılan mavi pamuklu pantolonları yatmaktadır.

Kot kumaş, çoğunlukla %100 pamuk ipliğinden üretilmektedir. Günümüzde pamuk lifi dışında polyester, keten, bambu, viskon da üretimde kullanılmaktadır. Ayrıca elastomerli iplikler, elastik kot kumaş üretiminde atkı ipliği olarak kullanılmaya başlanmış ve gittikçe yaygınlaşmıştır. Bunlar dışında: Modal (doğal, yaş ve kuru mukavemeti yüksek lif) veya Lyocell (selülozik esaslı elyaf) karışımlı ipliklerde kot kumaş üretiminde kullanılmaktadır (şahin, 2017).

2.2 Türkiye'de Kot Kumaşın Yeri ve önemi

Ülkemizin kot kumaş ile tanışması II. Dünya Savaşının bitimine rastlamaktadır. Savaşı sonrasında Türkiye'de Avrupa'daki gibi Amerikan sleri kurulmuştur.

Amerikan askerlerinin üniformalarıyla birlikte sivil hayatta giydiği blue jeans rağbet görmeye başlamıştır.

1940’lardan itibaren hazır giyim üreticileri için başta Silahlı Kuvvetler olmak üzere diğer büyük kamu kuruluşlarının personel giysisi ihtiyaçlarını karşılamaya yönelik açtığı ihaleler, kot kumaş pazarının önemli bir bölümünü oluşturmuştur (UİB, 2017).

Daha sonraki yıllarda Türk blue jeansine marka olarak soyadını veren Muhteşem Kot, Avrupa’ya yaptığı bir gezi sırasında blue jeans ile karşılaşmış ve araştırdığında blue jeans’in Amerika’da kovboylar ve tarım işçileri tarafından giyildiğini öğrenmiştir.

Türkiye’de de işçi ve köylünün giyebileceği sağlam, rahat ve bakımı kolay bir pantolon olabileceğini düşünüp blue jeans üretimine başlamıştır. “Kot” bir marka olarak 1958 yılında tescil edilmiştir. Ülkemizde halk arasında “kot kumaşı” olarak bilinmektedir (Yavuz ve Balcı, 2016).

2.3 Kot Kumaş Üretimi İşlem Kademeleri

Kot kumaş üretim basamakları iplik üretimi, çözgü hazırlama, dokuma, terbiye, kalite kontrol gibi işlemlerden oluşmaktadır (Koç ve Ayyıldız, 2012).

2.3.1 İplik özelliği

Kot kumaşı genellikle %100 pamuk ipliğinden dokunduğu gibi, pamuk lifi dışında poliester (PES) karışımları kullanılmaktadır (Koç ve Ayyıldız, 2012).

Kot kumaş dokumasında genellikle Ne5 ile Ne30 numara aralığında pamuk iplikleri kullanılmaktadır. Rotor ipliğinin kot kumaş üretimindeki payı yalnızca %25 civarındadır. Open-end, Ring, Compact ve diğer ipliklerin (elastomerli, iplik v.b.) üretim miktarı ise %75 civarındadır (şahin, 2017).

2.3.2 Çözgü hazırlama

Çözgü hazırlama kot kumaş üretiminin en önemli bölümlerinden biri olup indigo boyama işlemi bu bölümde yapılmaktadır. Bu aşamadaki çeşitli boyama ve haşıl teknikleri, boya ve haşıl reçeteleri, boyamadaki reaksiyon ve oksidasyon süreleri

yalnızca boya kalitesinde değil sonraki bütün diğer kademelerdeki üretim ve kaliteyi etkilemektedir. Bu da doğal olarak kot kumaşın görüntü ve kalitesini belirlemektedir (Koç ve Ayyıldız, 2012).

Doğal indigo, Afrika, Hindistan, Endonezya ve Çin’de bulunmuş ve “*indigofera tinctoria*” bitkisinin yapraklarından üretilen bir boyarmaddedir.

Günümüzde en yaygın kullanılan ve en iyi sonuç veren indigo boyama, halat boyama tekniği ile yapılmaktadır. 350-500 adet çözgü iplikleri halat formunda boyanmaktadır. Bu proses sırasıyla: halat sarma, çapraz atma, halat boyama, halat açma, haşıllama, kurutma ve dokuma levendine sarma, basamaklarından oluşmaktadır (Şahin, 2017).

Halat sarma işlemi ortalama 350-500 bobin kapasiteli cağlıklara yerleştirilen bobinlerden çözgü ipliği halat halinde 10000-15000 m uzunlukta çekilip sarılmaktadır ve bundan sonra çözgü iplikleri boyamaya hazır hale gelmektedir (Koç ve Ayyıldız, 2012).

İndigo çözgü boyama, Slasher ‘Sheet’ (tabaka) veya ‘Slasher’ (açık en) boyama yöntemi olarak da adlandırılmaktadır. Bu aşamada 350-500 adet yaklaşık 50.000 m uzunluğundaki iplikler çözgü leventlerine sarılırlar ve bu çözgü leventlerinden 12-16 tanesi hattın önüne yerleştirilir. Daha sonra çözgü leventlerindeki ipliklerin hepsi sırasıyla slasher hattı; kontinü boyama, kurutma, haşıllama, tekrar kurutma ve çözgü çekme işlemlerine tabi tutulur. Bu teknikte her bir iplik birbirine paralel olarak boyama işlemine girmekte, boyama işlemi 5-6 boya banyosuna seri daldırma ile gerçekleştirilmektedir. Sonra kurutma, haşıl, tekrar kurutma ve dokuma leventine sarma işlemleri yapılır (Şahin, 2017).

2.3.3 Dokuma, haşıllama

Çözgü ipliklerinin elyaf uçlarını birbirine yapıştırmak ve mukavemetini arttırmak için hazırlanan kimyasal yapıştırıcı özelliği bulunan viskoz bir sıvı olan haşıl ile ipliğin yüzeyini kaplama işlemine haşıllama denir.

Haşılama işlemi, iplik kalitesini değiştirmediği gibi haşıl原因lanan iplikten istenilen kalitede bir dokuma ve dokuma tezgâhlarından yüksek bir randıman alınmasına yardımcı olur (URL-1).

2.3.4 Terbiye işlemleri

Kot kumaşı üretiminde, dokuma işleminden sonra; yakma, merserizasyon, yumuşatma, en ayarı ve sanfor işleminden oluşan bir dizi terbiye işlemleri de uygulanmaktadır.

Yakma işleminde, kumaş ilk önce fırçalanarak üzerinde bulunan elyaf ve yabancı maddelerden temizlenir ve fırçanın kaldırdığı kumaşın yüzeyindeki tüyler giderilmektedir.

Merserizasyon işleminde, pamuklu kumaşı veya ipliği derişik sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisinde kısa süreli şişirme ve gerdirme yapılmaktadır.

Yumuşatma, en ayarı ve kurutma işleminde, temizlenen kumaşa, kumaş tipinin özelliği ve müşterinin talebi doğrultusunda yumuşaklık ve dolgunluk verilmesi, dikiş kolaylığı ve dikiş kaymasını önleyici, yüzey gerilimini düşürücü apre maddesi verilmesidir.

Atkı düzeltmede, yıkama sonrası örgü yapısındaki eğriliği gidermek için, atkıya kumaş nemli iken bir eğim verilir.

Apre işlemi sırasında, çözgü çekme standartlarını korumak için, apre işleminden geçen kumaş daha sonra istenilen nem düzeyi korunarak, en ayarı verilip, kurutulmaktadır.

Sanfor işleminde, kumaş kullanıma hazırlık amacıyla, sanfor yani çekmezlik işlemine alınmaktadır. Bu işlemde ürüne son kullanım özellikleri sağlanarak maksimum bir çekme verilir ve ürünün boyut ayarlaması yapılır (Şahin, 2017).

2.3.5 Kalite kontrol

Bu bölümde kot kumaşın fiziksel ve görsel olarak kalite kontrolü yapılarak sevkiyata hazır hale getirilmesi sağlanır (Cündübey, 2018).

2.4 Kot Kumaş Çeşitleri

Kot kumaşları boyarmadde çeşidi ve dokuma türüne göre; mavi kot kumaş, siyah kot kumaş, basic colored (temel renklerle boyanmış) kot kumaş, çok renkli kot kumaş, çift taraflı kot kumaş, ring efektli kot kumaş, streç kot kumaş, aşındırılmış indigo kot kumaş gibi farklı türleri bulunmaktadır (Özdemir, 2006).

2.5 Tekstil Endüstrisi Atıksularının Özellikleri

Hızlı sanayileşmeye bağlı olarak tekstil endüstrisi atıksu miktarları da her geçen gün artmaktadır. Tekstil endüstrisi, değişik birçok alt sektörlerden kaynaklanan karma bir yapıya sahip olduğundan atıksuları genel olarak miktar ve bileşim açısından farklılıklar gösterir ve oldukça toksik oldukları bilinmektedir (URL-10).

Tekstil endüstrisi atıksuları koyu renge, geniş pH aralığına, yüksek sıcaklığa, yüksek KOİ ile toplam çözünmüş katı madde içereğine, yüksek iletkenliğe ve bazen de yüksek alkaliniteye sahiptirler. Tekstil endüstrisi atıksularının istenmeyen en önemli özelliği kuvvetli renkleridir. Boyarmaddelerin tipine bağlı olarak, boyama atıksularının rengi kırmızı, kahverengi, mavi, mor ve siyahtan farklı olarak yoğunluk ve koyuluğa bağlı olarak değişiklik gösterebilir.

Tekstil endüstrisi atıksularının rengi gün içerisinde bile değişiklikler gösterebilir, çünkü müşteri talepleri nedeniyle boyama proseslerin de farklı boyar maddeler kullanılır. Rengin değişimine bağlı olarak da atıksuyunun KOİ ve pH içeriğinde salınımlar görülebilir. pH değişimi, kimyasal ve biyolojik arıtma proseslerinde sınırlandırılmış pH toleransları dolayısıyla işletme problemlerine sebep olur. Bu yüzden arıtma proseslerinde uygun pH ayarlaması gereklidir.

Boyama atıksuları kullanılan kimyasallar ve boyarmaddelerden kaynaklanan değişik toksik bileşikler ve ağır metaller de içerebilir. Atıksu arıtımında, çamurda kabarma, renkte süreklilik, pH, sıcaklık ve debi salınımları ile birlikte, ağır metal konsantrasyonlarında artışa bağlı olarak problemler yaşanabilir.

Birçok boya çeşidinin kararlı yapısı nedeniyle biyolojik arıtılamaz. Bu sebeple renk giderimi tekstil atıksularında karşılaşılan en önemli çevresel problemlerden biri olmuştur (Karadağ, 2009).

Tekstil atıksularında, doğal elyaftan kaynaklı katı madde miktarı ile tesis içi prosesler de kullanılan boyalar, sodyum karbonat, sodyum klorit, sabun, sodyum sülfat, alkol, pigment, vb. çeşitli kimyasallar da oldukça yüksektir.

Tekstil endüstrisinde kullanılan yüzey aktif madde içeren boya, yağlar ve doğal elyaf atıksuyun yağ-gres miktarını artırmaktadır. Özellikle yünün işlenmesi sırasında, elyafı kayganlaştırmak ve ipliklerin birbirine yapışmasını önlemek için değişik yapıda yağlar kullanılmaktadır. Bu amaçla zeytin ve yerfıstığı yağı birinci sınıf yünler için kullanılmakta, olein yağı ise ikinci kalite yünler için kullanılmaktadır. Pamuklu tekstil endüstrisi atıksularında yağ ve gresin oranı düşüktür ama yünlü tekstil atıksularında yağ ve gres oranı oldukça yüksektir.

Tekstil endüstrisinde kullanılan kükürtlü boyalar, sodyum sülfat, sodyum sülfat, sodyum hidrosülfat gibi kükürtlü kimyasal maddeler fazla miktarda kullanılmaktadır. Buda sülfat ve sülfat konsantrasyonunun artırmaktadır.

Atıksu karakterizasyonunu oluşturan temel kirletici parametreleri şunlardır (Malkoç, 2008);

Fiziksel Parametreler: Renk, koku, radyoaktivite, sıcaklık, AKM, köpük, bulanıklık

Kimyasal Parametreler: pH, KOİ, TOK (Toplam Organik Karbon), inorganik bileşenler, klor, yağ ve hidrokarbonlar, fenol, toplam çözünmüş tuzlar

Biyolojik Parametreler: BOİ (Biyolojik Oksijen İhtiyacı), patajonik mikroorganizmalar, toksisite

Deşarj bilgileri : Ortalama günlük debi, sürekli maksimum debi, debi salınımları

2.6 Proseslere Göre Atıksu Karakteristiği

Tekstil atıksuları için en uygun arıtım alternatiflerinin belirlenebilmesi atıksu kaynaklarının tespit edilmesine ve her bir kaynaktan gelen akımların kalitatif ve kantitatif özelliklerinin ortaya çıkarılmasıyla mümkündür. Tekstil endüstrisinin farklı basamaklarında meydana gelen atıksuların ana kirletici bileşenlerini şu şekilde özetlemek mümkündür (Bahadır, 2012).

- a) Haşılama: İplik atıkları, kullanılmayan nişasta bazlı parçalar kirleticiler olup, atıksuyu BOİ ve KOİ içermektedir.
- b) Haşıl Sökme: Enzimler, nişasta ve amonyak kirleticiler olup, atıksuyu BOİ ve KOİ içermek birlikte sıcaklığı 70-80 °C civarındadır.
- c) Boyama: Renk, metaller, sülfid, tuzlar, asidite/alkalinite ve formaldehit kirleticiler olup, atıksuyu yüksek toksisite, çözünmüş madde ve pH, BOİ içeriğine sahiptir.
- d) Bitim (Apreleme) İşlemleri: Son tekstil dokumasına antimikrobiyal özellik kazandırmak ve ürünü mikrobik saldırılardan korumak için biyosit özellikli apreleme ajanları kullanılır. Biyositler (halojenli difenil alkanlar veya eterler) temelde inorganik veya organik kökenli olup sentetik kimyasallardır. Üretilen tekstil materyalini mikrobiyolojik bozunmadan korumak için kullanılır (Sesler, 2014). Tekstil proseslerinin atıksuların bileşimleri Çizelge 2.1’de verilmiştir (Özden, 2016).

Çizelge 2.1. Tekstil prosesleri atıksu bileşenleri.

Parametre	Elyaf Türü	Haşıl Sökme	Yıkama	Ağartma	Boyama	Baskı
KOİ (mg/L)	Yün	-	5000-90000	-	7920	-
	Pamuk	950-20000	8000	288-13500	1115-4585	-
	Sentetik	-	-	-	620	1515
BOİ ₅ (mg/L)	Yün	-	2270-60000	400	400-2000	-
	Pamuk	-	100-2900	90-1700	970-1460	-
	Sentetik	-	500-2800	-	530	590
Renk (ADMI)	Yün	-	2000	-	2225	-
	Pamuk	64-1900	694	153	1450-4750	-
	Sentetik	-	-	-	1750	-
Toplam Katı (mg/L)	Yün	-	28900-49300	910	-	-
	Pamuk	-	-	2300-14400	-	-
	Sentetik	-	-	-	-	150-250
Toplam Askıda Katı Madde (mg/L)	Yün	-	1000-26200	900	-	-
	Pamuk	18-800	184-17400	130-25000	120-190	-
	Sentetik	-	600-3300	-	140	-

Çizelge 2.1 (devam). Tekstil prosesleri atıksu bileşenleri.

Parametre	Elyaf Türü	Haşıl Sökme	Yıkama	Ağartma	Boyama	Baskı
Toplam Çözünmüş Katı (mg/L)	Pamuk	530-6900	-	4760-19500	-	-
Çözünmüş Organik Karbon (mg/L)	Yün	-	5800	-	-	-
	Pamuk	250-2750	-	320	-	-
Toplam Kjeldahl Azotu (mg/L)	Pamuk	70	-	40	-	-
	Sentetik	-	-	-	-	164
Amonyum Azotu (mg/L)	Yün	-	604	-	-	-
	Pamuk	9-19	-	8-19	-	-
	Sentetik	-	-	-	-	129
Toplam Fosfor (mg/L)	Pamuk	4-10	-	6-60	-	-
	Sentetik	-	-	-	-	21
Fosfat (mg/L)	Yün	-	89	-	-	-
Sülfür (mg/L)	Yün	-	0-2	-	-	-
	Pamuk	-	-	-	325-900	-
Sülfat(mg/L)	Pamuk	-	-	-	1750-2690	-
Klorür (mg/L)	Genel Elyaf	-	-	90-100	26000	-
Yağ-Gres (mg/L)	Yün	-	580-55000	-	-	-
Cr-2 (mg/L)	Yün	-	50	-	-	-
pH	Yün	-	7.6-10.4	6	4.6-8	-
	Pamuk	8.8-9.2	7.2-13	6.5-13.5	9.2-10.1	-
	Sentetik	-	8-10	-	11.7	-
Su Tüketimi (L .kg-1 elyaf)	Yün	-	4-77.5	-	40-150	280-520
	Pamuk	-	2.5-43	30-50	38-143	-
	Sentetik	-	17-67	-	38-143	-

2.7 Boyarmadde

Kumaş, elyaf gibi cisimlerin renkli hale getirilmesinde uygulanan maddelere boyarmadde denir ve boyalarla yapılan renklendirme işleminden farklıdır. Çoğunlukla süspansiyonlar veya çözeltiler halinde farklı boyama metotlarıyla uygulanmaktadır.

Boyarmadde ile boyanan cisimler, dayanıklı ve devamlı bir şekilde boya ile birleşerek dış yüzeyleri yapı bakımından değişmektedir.

Boyarmadde çoğunlukla cismin yüzeyi ile fizikokimyasal veya kimyasal bir etkileşime girmektedirler. Boyarmadde ile boyanan yüzeyler silme, kazıma, yıkama gibi işlemlerle başlangıçtaki işlem görmemiş haldeki renksiz durumlarını geri alamamaktadır (Özden, 2016).

Boyarmadde imalatında benzen, toluen, ksilen, naftalin, ftalik asit anhidriti, fenol gibi aromatik yapıli hidrokarbonlar yer almakta ve bunların esas ana kaynağını kömür ve petrol oluşturmaktadır (Yüce, 2007).

Renkli organik bileşiklerin hepsi, rengi oluşturan doymamış kromofor grubu içermektedir. Bu grubu taşıyan bileşiklere kromojen adı verilir. Bir kromojenin boyarmadde olabilmesi için molekülde kromofordan başka oksokrom adı verilen amino ($-NH_2$), yer değıştiren amino (NHR , $-NR_2$), hidroksil ($-OH$), metoksil (OCH_3), sülfonik (SO_3H) ve karboksil ($COOH$) gruplarının da bulunması gerekmektedir. Bu gruplar aynı zamanda molekülün elyafa karşı afiniteye (boyayı çekebilme yeteneğı) sahip olmasını ve suda çözünmesini de sağlamaktadır.

Kromofor grupları; nitro ($R.NO_2$), nitrozo (N_2O), azo ($-N=N-$), karbonil ($C=O$), etilenik çift bağ ($-C=C-$), tiyokarbonil ($-C=S-$) gibi çift bağli gruplardan oluşmaktadır (Arıcı, 2000).

Dünyada olduğu gibi ülkemizde de boyarmadde kullanım alanları ve gereksinimi gün geçtikçe artmaktadır. Kullanım alanları çok geniş olan sentetik boyar maddelerin %80 gibi büyük bir oranı ile tekstil endüstrisinde, yün, pamuk, ipek, vb. boyanması için kullanılmaktadır.

Tekstil endüstrisinden sonra sentetik boyarmaddeler; plastik sanayi, deri sanayi, sentetik lif üretim sanayi, lastik sanayi, kereste sanayi, selüloz ve kâğıt sanayi, kozmetik sanayi, ilaç sanayi, gıda sanayi, inşaat sanayi, cam ve porselen sanayi, otomotiv sanayi, makine sanayi, matbaacılık, güzel sanatlar, vb. alanlarda kullanıldığı bilinmektedir (Koçak, 2011).

Boyarmaddelerin hepsi aynı oranda problem oluşturmazlar. Boyarmaddelerin yapıları arıtım işlemlerine karşı davranışı belirlediği gibi boyarmaddelerin liflere bağlanma yetenekleri, dolayısıyla atıksu da kalan boyarmadde miktarları da farklılık göstermektedir.

Tekstil boyamacılığında kullanılan farklı boyarmaddelerin uygulama alanları ve fikse oranları Çizelge 2.2’de verilmiştir (Eren ve Anış, 2006).

Çizelge 2.2. Tekstil boyamacılığında kullanılan boyarmaddelerin tipik özellikleri.

Boyarmadde	Karakteristik	Lif	% Fikse Oranı	Tipik kirleticiler
Asit	Suda çözünabilir anyonik bileşikler	Poliamid, yün	80-93	Renk, organik asitler
Bazik	Suda çözülebilir, parlak renkli	Akrilik, bazı Poliesterler	97-98	Renk
Direkt	Suda çözülebilir anyonik bileşikler Selüloz	Selüloz, rayon	70-95	Renk, katyonik fiksator, yüzey aktif madde, köpük kırıcı, egalizatör
Dispers	Suda çözülmez	Poliester, asetat, diğer sentetikler	80-92	Renk, organik asitler, keriyer, egalizatör, köpük kırıcı, dispergator
Reaktif	Suda çözülebilir anyonik bileşikler, en geniş sınıf	Selüloz ve türevleri, yün	60-90	Renk, tuz, alkali, köpük kırıcı ve yüzey aktif maddeler
Kükürt	Kükürt içeren organik bileşikler	Selüloz ve türevleri	60-70	Renk, alkali, oksidatif ve redüktif maddeler
Küp	Suda çözünmez, kompleks yapılar	Selüloz ve türevleri	80-95	Renk, alkali, oksidatif ve redüktif maddeler

Alıcı ortama verilen renkli atıksular buradaki ışık geçirgenliğini azaltır ve fotosentetik aktiviteyi olumsuz yönde etkiler. Ayrıca boyarmaddelerin bazı sucul organizmalarda birikmesi toksik ve kanserojen ürünlerin meydana gelme riskini de beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda boyarmadde içeren tekstil endüstrisi atıksularının renk giderim prosesleri ekolojik açıdan önem kazanmaktadır. Ancak kompleks kimyasal yapılarına ve sentetik kökenlerine bağlı olarak, boyarmaddelerin giderilmesi oldukça zor bir işlemdir (Gürbüz ve Akıncı, 2002).

Boyarmaddenin tekstil boyama prosesin de kullanılabilmesi için önemli iki özelliğe sahip olması gerekir. Bunlar boyarmaddenin renkliliği ve elyaf üzerine bağlanabilmesidir (Arıcı, 2000).

Literatürde kimyasal yapısına göre veya uygulandığı ipliğin tipine göre sınıflandırılmış oldukça fazla ve değişik boya mevcuttur. Boyanın iplik üzerine tamamen adsorbe olması tekstil ipliğinin ve boyanın tipine bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Adsorbsiyonun derecesi zaman, sıcaklık, pH ve yardımcı kimyasallar gibi çeşitli faktörlerden de etkilenmektedir.

Tek bir boyama işlemi için farklı kimyasal sınıftaki boyar maddelerin birlikte kullanılabilir olması çıkış suyu bileşimini oldukça karmaşık hale getirmektedir. Ürünlerde ve üretim yöntemlerindeki bu çeşitlilik tekstil atıksularında kendini gösterir.

Boyama prosesi çıkış sularındaki kimyasal yük, prosesin kimyasının yanı sıra boyama işleminin kesikli ya da sürekli olmasına bağlı olarak farklılıklar göstermektedir (Gürbüz ve Akıncı, 2002).

Tekstil endüstrisinde kullanılan boyarmaddeler, tehlikeli atık olarak kabul edilmektedirler. Boyalar karmaşık organik bileşikler olup, biyolojik olarak indirgenmeye uygun değildirler.

Boyarmaddeler genellikle suda çözünabilir yapıda oldukları halde, bazılarında süreç sırasında çözünabilirlik kazandırılır ve sonra çözünemez duruma getirilirler (Aytaç, 2011).

2.8 Tekstil Endüstrisinde Kullanılan Boyarmaddeler

Boyarmaddelerin çözünürlüklerine, kimyasal yapılarına ve boyama özelliklerine göre sınıflandırılması şu şekildedir (Malkoç, 2008).

Çözünürlüklerine göre: Suda Çözünen boyarmaddeler, Zwitter iyonik karakterli boyarmaddeler, Suda çözünmeyen boyarmaddeler, Substratta çözünen boyarmaddeler, Katyonik boyarmaddeler, Anyonik boyarmaddeler

Kimyasal yapılarına göre: Azo boyarmaddeler, Nitro ve Nitroz boyarmaddeler, Polimetin boyarmaddeler, Arilmetin boyarmaddeler, İndigo boyarmaddeler

Boyama özelliklerine göre: Bazik boyarmaddeler, Asidik boyarmaddeler, Direkt boyarmaddeler, Metal kompleks boyarmaddeler, Reaktif boyarmaddeler, Pigment boyarmaddeler, Sülfür boyarmaddeler, Dispers boyarmaddeler, Küp boyarmaddeler, Mordan boyarmaddeler.

2.9 Kot Kumaşı Üretiminde Kullanılan Boyarmaddeler

2.9.1 İndigo

Kot kumaşların dokunacağı çözgü iplikleri indigo boyarmaddeleriyle renklendirilmektedirler. Doğal indigo; tropik iklimlerde (özellikle Hindistan ve Çin'de) bulunan mavi renkli "*Indigofera tinctoria L.*" bitkisinin yapraklarından üretilen doğal orijinli ve geleneksel küp boyarmaddesi türüdür (Özdemir, 2006).

İndigotin de denilen indigo, bitki boyar maddelerinin en önemlisi olup, 390-392°C'de erir, mavi renkte tozdur, su, alkol, eterde çözünmez. Fakat kloroform, 8 nitrobenzen, onilin ve fenolda mavi renkte kristalize halinde çözünür.

İndigo, diğer bütün boyarmaddeler içerisinde en önemlisi ve dayanıklıdır. Bundan dolayı boyanan elyaf, ışık, asit ve alkalilere karşı dayanıklıdır (Kunt, 2006).

İndigo boyarmaddeler, başlıca selüloz esaslı ve kısmen de protein elyafın boyanmasında ve baskısında kullanılmaktadır. Suda çözünmeyen bir yapıda olduğundan liflere karşı bir düşük afiniteye sahiptir. Bundan dolayı indigo ile boyama yapılabilmesi için, ilk önce indigonun alkali ve indirgen ortamda suda çözündürülmesi gerekmektedir. Çözünen bu yapıya "sodyum löyko (leuco) indigo" adı

verilir. Bu işleme de ya indirgeme (redüksiyon) ya da "küpleme" adı verilmektedir. Daha sonra löyko indigo, oksidasyon işleminde oksitlenerek tekrar indigo haline dönüşür. Böylece çift yönlü bir reaksiyon olmaktadır.

İndigonun yapısındaki kromofor gruplar (C=O) indirgendiğinde; mavi renkli indigo çözültisi sarı renkli olmaktadır. Suda çözünen sarı renkli bu bileşik, lifler tarafından daha kolay çekilir. Lif içindeki bu indirgeme ürünü daha sonra havada bekletilir. Sarı renkli sodyum löyko bileşiği; lif içindeyken oksijen tarafından önce yeşile daha sonra da mavi renkli indigoya yükseltgenir ve lif içinde suda çözünmez hale dönüşür. Bundan dolayı yıkama haslıkları yükselir, fakat sürtünme haslıkları düşük olarak kalmaktadır.

Küp boyarmaddeleriyle boyamada olduğu gibi, kullanılan başlıca indirgen madde hidrosülfid olarak da bilinen Sodyumditiyonittir ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$). Günümüzde eski çağlarda indigonun indirgenmesi için kullanılan zehir özelliğine sahip alkali çözültide Arseniktrisülfür (As_2S_3) yerini hidrosülfid almıştır.

İndirgemedde yaygın olarak kullanılan kostik-hidrosülfid yönteminde; çözünme sorunu olduğundan 80 g/L'den fazla indigo küpü hazırlamak mümkün olmamaktadır.

Küpleme 50°C 'de ve 30 dakika olarak gerçekleşmektedir. İndirgeme tamamlandığında; boyarmadde çözültisi sarı renkte olmalı ve temiz bir cam daldırılıp çıkarıldığında 12-15 saniye sonra renk yeşile dönmelidir. Eğer bu süre zarfında renk berrak ve sarı değilse ya da yeşile çok çabuk dönüyorsa, çözültiye bir miktar daha hidrosülfid ilave edilmelidir. Eğer Hidrosülfid fazla eklenir ise, düzgün olmayan boyama meydana gelmekte ve boyama atık suları ile çevreye verilen zarar da artmaktadır.

Kot kumaşlar iki türde olmaktadır. Bunlar indigo ve indigo dışındaki boyarmaddelerle boyanmış kumaşlardır. Çözülti iplikleri; sadece küp boyarmadde türü olan indigo ile boyanabildiği gibi indigo üzerine kükürt ya da kükürt üzerine indigo boyalı da olabilmektedirler.

İndigo boyarmaddelerle mavi veya lacivert, indigo dışındaki diğer boyarmaddelerde farklı renklerde olabilmektedir. Her durumda; çözgü ipliği boyalı, atkı ipliği beyaz olmaktadır (Özdemir, 2006).

2.9.2 Kükürt boyarmaddeler

Yapılarında kükürt atomları bulunan ve normal olarak sodyum sülfürlü çözeltide boyama yapan boyarmadde sınıfındadır. Kükürt boyarmaddeleri ilk kez 1879 pamuk keten için kullanılmaya başlanmıştır. Boyarmadde-kükürt, kükürt-boyarmadde şeklinde sembolize edilebilmektedir. Hâkî, lacivert, kahverengi ve siyah gibi koyu ve mat renklerde daha çok kullanılmaktadır.

Yaş, ter ve ışık haslıkları iyi, ısı ve kimyasal madde dayanımları genellikle ılımlı, ucuz olması gibi avantajlarına rağmen, klor haslıkları genellikle kötü, uzun süre depolamada kumaşın mukavemetinin düşmesi, renk nüanslarının değişebilir olması ve parlak renkli olmaması dezavantajları olarak sayılabilmektedir.

Boyama işlemi asetik asitli ortamlarda yapıldığında renk tonları donuklaşmasına rağmen yaş haslıkları artmakta ve tekrar elde edilebilmesi kolaylaşmaktadır. Sodyum perborat ile canlı renk tonları elde edilebilmektedir. Bu durumda yaş haslıkları biraz düşmektedir. En iyi sonuçlar, potasyum bikromatla elde edilmektedir. Ancak bunlar da çevre açısından sakıncalı durumlar oluşturmaktadır. Bundan dolayı günümüzde; hidrojen peroksit, sodyum bikromat, sodyum klorit, sodyum iyodat, bunların karışımları veya özel oksidasyon maddeleri kullanılmaktadır.

Asidik ortamda yapılan oksidasyon işlemi 70°C’de, alkali ortamda oksidasyon ise 40°C’de yapılmaktadır. Kükürt boyarmaddeler üç gruba ayrılmaktadır. Bunlar suda çözünmez kükürt boyarmaddeler, suda çözünür kükürt boyarmaddeler, küp-kükürt boyarmaddeler (URL-9).

2.9.2.1 Suda çözünmez yapıdaki kükürt boyarmaddeler

Suda az çözünen, selüloza afinitesi olmayan ve indirgenerek çözünür duruma getirilebilen kükürt boyarmadde türüdür. İndirgeme bazik ortamda ve çoğunlukla sodyum sülfür (Na_2S) kullanılarak yapılmaktadır. Halk arasında zırnık olarak da bilinmektedir. İndirgenmiş kükürt boyar maddenin selüloz liflerine afinitesi fazladır. Boyama; yüksek sıcaklıkta, bazik, tuz niceliği fazla ortamda yapılmaktadır.

Yükseltgeme (oksidasyon) işlemi ise hava ile bol soğuk su ve ılık yıkama ile gerçekleştirilmektedir. Ancak renk tonlarını tam vermediği için önerilmemektedir.

Hidrojen peroksit kullanılarak daha canlı renk tonları elde edilmektedir. Ancak yaş haslıkları düşmekte ve oluşan renk tonunun tekrar elde edilebilmesi güçleşmektedir.

Suda çözünmez yapıdaki kükürt boyarmaddeler, çekirme yöntemiyle (overflow, jet) boyamaya daha uygun olmaktadır.

Kükürt boyarmaddenin çözünür durumda kalması için banyonun sıcak tutulması gerekmektedir. Çünkü sıcaklık arttıkça boyarmadde alımı artmaktadır. Bu emdirme yönteminde özellikle açık renklerde kumaşın başı ile sonu arasında ton farklılıklarının oluşmasına neden olmaktadır (URL-9).

2.9.2.2 Suda çözünebilir hâle getirilmiş kükürt boyarmaddeleri

İndirgenen kükürt boyarmaddelerinin Tiyosülfat ($S_2O_3^{-2}$)'lama işlemine tabi tutulması ile suda çözünen ve normal şartlarda oksitlenmeyen forma getirilmiş kükürt boyarmadde türü olup afinitesi yoktur, ancak suda çözünmektedir. Bu özellikleri nedeniyle bu gruptaki kükürt boyarmaddeler kesikli ve kesiksiz (fırça ve tabanca) boyama yöntemleri ile uygulanabilmektedir (URL-9).

2.9.3 Küp-Kükürt boyarmaddeleri

Kükürt ve küp boyarmaddeleri arasında yer alan boyarmadde sınıfı olup, küp boyarmaddelerine nazaran daha ucuz, iyi ışık ve yıkama haslıklarına sahip olmasına rağmen klor haslıkları kötüdür, kolaylıkla indirgenebilmektedir. Bu boyamada nişasta apresi uygulanmasından kaçınılmaktadır. Boyamada kullanılan kimyasallar ve görevleri şu şekildedir; Zırnık (sodyum sülfür), boyarmaddenin çözünmesini sağlamaktadır.

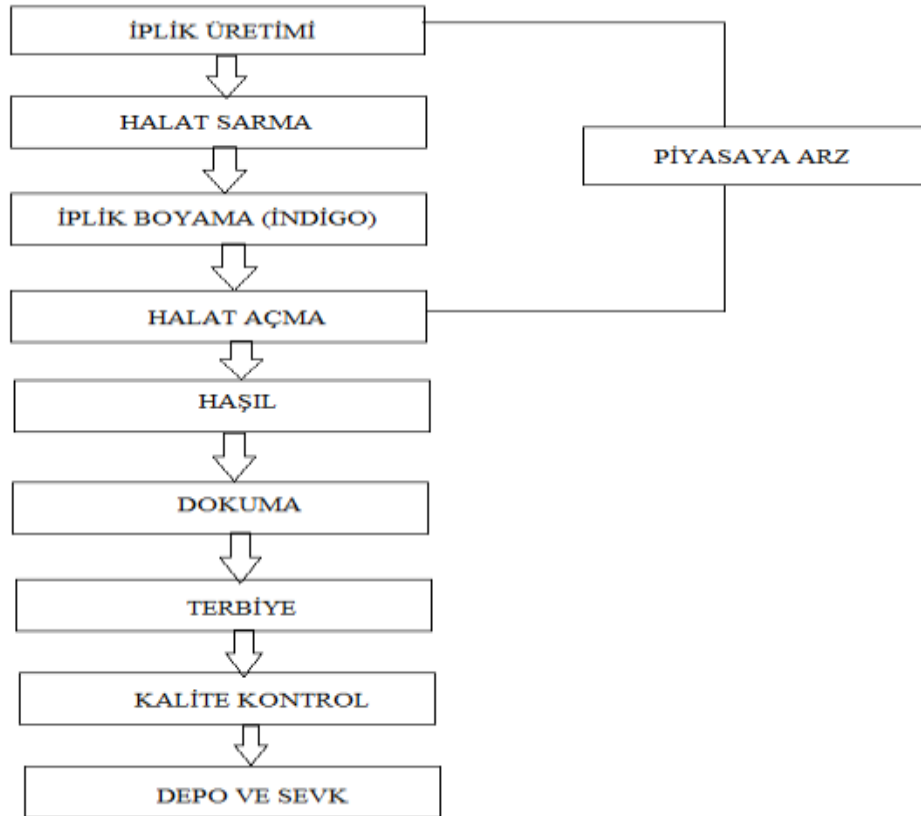
Redüksiyon malzemesi, boyarmaddenin indirgenerek suda çözünmesine yardımcı olmaktadır. Soda, flotteyi stabilize etmekte ve kalsiyum tuzlarının çökmesini engellemektedir.

Tuz, boyarmaddenin çektilmesini sağlamakta ve alınmayı hızlandırmaktadır. İyon tutucu, çözülmüş metal iyonlarını ve sudaki metal iyonlarını bağlamaktadır (URL-9).

2.10 Kot Kumaşı Boyama Prosesi

Bu çalışmada kullanılan atıksuyun temin edildiği firma yetkililerinden edinilen bilgilere göre kot kumaşı üretim tesisi ünitelerinde kullanılan maddeler ve proses akım şemaları şu şekildedir. İplik üretim ünitesinde pamuk, iplik boyama ünitesinde indigo boya, kükürt boya, sitrik asit, sodyum hidrosülfid, dispersan, kostik, ıslatıcı ve yumuşatıcı, haşıl ünitesinde nişasta ve sitrik asit, terbiye ünitesinde ise pe(polietilen) emülsiyonu, ıslatıcı ve yumuşatıcı, akrilik reçine, kostik, muhtelif ıslatıcılar, soda, sabun, perborat, bikromat, kükürt boya ve boyarmaddeler kullanılmaktadır.

Kot ürün üretimi; kot ipliğin üretimi, kumaşının üretimi ve üretilen kot kumaşın işlenmesi basamaklarından meydana gelmektedir. Bu aşamalarda, kot üretimi açısından arıtma tesislerine gelen yükler, kimyasal işlemler ve su kullanımını gerektiren farklı özelliklere sahip proseslerden kaynaklanmaktadır. Özellikle kot ürünleri üretim süreçlerinde indigo boyarmaddeleri arıtma tesisleri açısından problem oluşturabilmektedir. Söz konusu tesisin iplik üretim ve boyama, prosesi akım şeması Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. İplik üretimi ve boyama ünitesi iş akım şeması.

2.11 Ulusal ve Uluslararası Mevzuat

Su, insan için gerek kırsal yaşam gerekse endüstrileşmiş toplumlarda yaşamsal önem taşımaktadır. Ayrıca su, endüstrinin kullanmaktan vazgeçemeyeceği olmazsa olmaz bir hammadde ve yardımcı maddedir. Bu nedenlerle doğal su kaynaklarının korunması ve kirliliğinin önlenmesi bir insanlık görevi olduğu kadar yasalarla da düzenlenmiş bir zorunluluktur.

Atık ve atıksu denetimi; şehirlerin, endüstri kuruluşlarının kullanılmış su ya da atıksularını ortak su kaynaklarına kabul edilebilir nitelikte vermelerini sağlamak için zorunluluktur. Su kalitesi çizgisinin, bir ucunda lezzetli ve güvenilir içme suyu hedefi ve standartları, diğer ucunda ise alıcı su kitlelerine boşaltılan atıksuların kalite parametreleri ve gereksinimleri bulunmaktadır. Atıksuların arıtım parametrelerinin hedefi değişik amaçlarla kullanılan su kitlelerinin korunması amaçlar.

Ülkemizde su kaynaklarının kirlenmesini önlemek amacıyla yapılan ilk düzenleme 22 Mart 1971 tarih ve 13799 sayılı Resmî Gazetede yayımlanan 1380 sayılı ‘Su Ürünleri Kanunu’ uyarınca her yıl yayınlanmakta olan sirkülerdir. Bu sirkülerde ‘sulara boşaltılacak atıklar için deşarj kriterleri’ başlığı altında, alıcı ortamında en az 1/10 oranında seyreltme olması durumunda çeşitli kirletici parametreler için sınır değerler verilmiştir. Ancak bu sirkülerin en zayıf yanı çeşitli endüstriyel atıksular için ayrı ayrı olarak değil de tek bir çizelgede hepsinin verilmesidir. Daha sonra 4 Eylül 1988 tarih ve 19919 sayılı Resmî Gazetede ‘Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği’ yayınlanmıştır. Bu yönetmelik konu ile ilgili temel tanımları verdikten sonra ilkelere değinmektedir. Beşinci bölümde atıksuların boşaltım ilkelerinden bahsedilmiştir. Beşinci bölüm uygulamada en çok yararlanılan ve kullanılan bölümdür. Numunelerin alınma ve değerlendirme kriterleri de bu bölümde yer almaktadır. Numuneler için öngörülen, anlık, 2 saatlik ve 24 saatlik çıkış suyu numuneleridir. Yönetmeliği göre esas olan en az üç ayrı işgününde 2 saatlik kompozit numuneler alınıp analiz edilmesi ve bunların aritmetik ortalamalarının sınır değerlerle karşılaştırılma yapılmasıdır.

Kurulacak yeni arıtım tesislerinin tasarım aşamasında ve işletilmesi amacıyla alınacak numunelerin 24 saatlik kompozit numuneler olması yine beşinci bölümde tavsiye edilmektedir. Endüstriyel atıksu deşarj standartları parametreleri, tesisin

Üretim tiplerine göre gruplandırılarak oluşturulan sektörlere göre ayrı ayrı verilmiştir. Bu sektörler de çeşitli endüstri kollarına ayrılarak bunların her biri için kirlilik parametreleri limit değerleri ayrı ayrı verilmiştir (Biroğul, 2012).

Su ortamlarının kalite sınıflandırmaları ve kullanım amaçlarını, su kalitesinin korunmasına ilişkin planlama esasları ve yasaklarını, atıksuların boşaltım ilkelerini ve boşaltım izni esaslarını, atıksu altyapı tesisleri ile ilgili esasları ve su kirliliğinin önlenmesi amacıyla yapılacak izleme ve denetleme usul ve esaslarını Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği kapsamındadır (SKKY, 2004). Bu usul ve esaslara bağlı olarak tekstil endüstrisinden kaynaklanan atıksuların alıcı ortamlara değarj sınırları farklı olan her bir tekstil endüstrisi kolu için ayrı ayrı standartlar belirlenmiştir.

Bu çalışmaya konu olan kot kumaşı üretim tesisinin atıksularının değarj standartları Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği Tekstil Sanayii (Açık Elyaf, İplik retimi ve Terbiye)’nde Tablo 10.1 kısmında verilmiştir. Tekstil Sanayii (Açık Elyaf, İplik retimi ve Terbiye) atık su değarj kriterleri izelge 2.3’ de verilmiştir (SKKY, 2004).

Çizelge 2. 3. Tekstil sanayii (Açık Elyaf, İplik retimi ve Terbiye).

PARAMETRE	BİRİM	KOMPOZİT NUMUNE 2 SAATLİK	KOMPOZİT NUMUNE 24 SAATLİK
KİMYASAL OKSİJEN İHTİYACI (KOİ)	(mg/L)	350	240
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	-
SÜLFİT	(mg/L)	1	-
YAğ VE GRES	(mg/L)	10	-
BALIK BİYODENEYİ (ZSF)	-	4	3
pH	-	6-9	6-9
RENK (Ek satır: RG-24.4.2011-27914)	(Pt-Co)	280	260

Boyarmadde içeren renkli atıksuların, boyarmaddelerin ve parçalanma ürünlerinin toksik ve/veya mutajenik etkileri yüzden alıcı ortamlara deşarjı istenmemektedir. Bununla birlikte renkli atıksu deşarjları çevrede estetik açıdan kötü bir görünüm arz etmektedir.

Boyarmaddeler yetersiz arıtma sonucunda alıcı ortamda çok uzun yıllar boyunca kalabilmektedir. Alıcı ortama deşarj edilen atıksulardaki renk veren maddelerin konsantrasyonu 1 ppm'den küçük olsa dahi renk gözle görülebilir.

Çevresel problemlerin yanı sıra, boyarmadde kullanılan sektörlerde, özellikle tekstil endüstrisinde yüksek miktarlarda su kullanılmaktadır. Bu nedenle yüksek su tüketimini önlemek ve kullanılan suların tekrar üretim prosesine kazandırılması amacıyla, atıksu deşarj kriterlerinin tekrar değerlendirilmesi ve birçok ülkenin mevzuatında bulunmayan renk deşarj kriterlerini belirlemeleri çok büyük önem arz etmektedir (Dos Santos vd., 2007).

Bazı ülkeler renkli atıksu deşarjı ile ilgili sadece kendi durumlarına özel kantitatif standartlar geliştirmekte ya da 'kabul edilebilir' veya 'çıkış suyunda renk istenmemektedir' benzeri kalitatif standartları baz alabilmektedirler (EPA, 1986). Bununla birlikte yapılan araştırmalar, maalesef dünya çapında bazı ülkelerin renk deşarj kriterlerini henüz belirlemediği gerçeğini de gözler önüne çıkarmaktadır.

Alıcı ortama deşarj edilen endüstriyel atıksuda renk parametre kontrolünün ulusal ve uluslararası önemi her geçen gün artmakta olup, renk parametresi ve limit değeri Çin, Hindistan, İngiltere ve Avrupa Birliği (AB) gibi ülkelerde uzun zamandan beri uygulanmaktadır.

AB'ye üye ülkelerde endüstriyel atıksuların alıcı ortamlara deşarjlarında renk parametresi için deşarj limitleri mevcuttur.

Bazı ülkelerin renk parametresi için alıcı ortama atıksu deşarj kriterleri veya su kaynaklarında/içme sularında olması gereken kalite değerleri Çizelge 2.5'de verilmiştir (Tübitak, 2013).

Çizelge 2.4. Bazı ülkelerin renk parametresi standartları.

Ülke	Deşarj/Su Ortamı	Renk Standardı	Kaynak
Avrupa Birliği	Alıcı ortama atıksu deşarjı	7 RES 436 nm (m^{-1}) 5 RES 525 nm (m^{-1}) 3 RES 620 nm(m^{-1})	(Tübitak, 2013)
Tayvan	Alıcı ortama atıksu deşarjı	4000 ADMI	(Kao vd, 2001)
Malezya	I.sınıf sularda (su kaynağı olarak kullanılan su) II. sınıf sularda (su kaynağı olarak kullanılan su)	15 TCU 150 TCU	(URL-2)
Dubai	Denize atıksu deşarjı	50 renk brimi	(URL-5)
Kenya	Kanalizasyon deşarjı Alıcı ortama atıksu deşarjı Rekreasyon amaçlı kullanılan su	40 Hazen 15 Hazen 100 TCU	(URL-11)
İngiltere	Su kaynaklarında su kalitesi	550 nm'de 0,055 Abs	(O'Neill vd., 2000)
Singapur	Alıcı ortama atıksu deşarjı	7 Lovibond	(URL-4)
Guatemala	Kanalizasyon deşarjı	50 Pt-Co	(Tübitak, 2013)
ABD EPA	Alıcı su ortam kalitesi	15 Renk Birimi	(Mendez-Sanches, 2009)
ABD Kaliforniya	İçme suyu	Suya Renk verici maddeler olmamalı	(URL-6)
ABD Atlanta	İçme sularında (Zorunlu değil)	15 RES	(URL-7)
Kanada	İçme Suyu	15 TCU	(URL-8)
Hindistan	İç Suyu Alternatif kaynak yokluğunda Yüzey suları A, B, C sınıfı sular	5 Hazen 25 Hazen 10,300,>300 Hazen	(URL-3)
Çin	Atıksulardaki kalıntı boya	300 ADMI	(Lu vd., 2010)

Bu çizelgeden de görüldüğü üzere; renk deşarj kriterini belirleyen ülkeler arasında renk birimleri konusunda farklılıklar bulunmaktadır. Bu durum kirlilik değerlerini ülkeler arasında karşılaştırmak açısından sorunlar teşkil etmektedir.

2.12 Tekstil Endüstri Atıksularının Arıtımı

Tekstil atıksularının Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği deşarj standartlarını sağlayacak şekilde arıtılması için genellikle birden fazla temel sürecin uygulanmasına ihtiyaç vardır. Bu süreçlerin seçimi için, tesis ve işletim masrafları, arazi gereksinimi, atıksu krakterizasyonundaki değişikliklere karşın istenilen çıkış suyu kalitesinin sağlanması gibi hususlar muhakkak göz önüne alınmalıdır. Kirletici parametrelerin birçoğu, renk hariç, fiziksel, kimyasal ya da biyolojik yöntemlerle arıtılabilmektedir. Dolayısıyla, tekstil atıksularında boyama süreci sırasında kalıntı boyaların oluşturduğu renkli atıksularının arıtılması daha fazla çaba ve daha fazla çalışma gerektirmektedir (Aytaç, 2011).

Tekstil endüstrilerinde boyama aşamasında ve diğer işlemlerde kullanılan organik ve inorganik yapıdaki bileşiklerin farklılığına bağlı olarak, meydana gelen atıksuların özellikleri de birbirinden farklı olmaktadır. Kompleks kimyasal yapılarına ve sentetik kökenlerine bağlı olarak boyar maddelerin giderilmesi oldukça zor bir işlemdir.

Boyalı atıksuların karakterizasyonu belirlemek de boyaların kimyasal yapılarındaki farklılıklardan ve boyama işlemlerinin değişim göstermesinden dolayı oldukça zordur.

Günümüzde boyarmaddelerin arıtımı büyük ölçüde fiziksel, kimyasal, biyolojik arıtım ve bunların bir arada kullanıldığı elektrokimyasal yöntemlerle gerçekleştirilmektedir (Yamaç, 2016).

2.12.1 Fiziksel arıtım

Fiziksel arıtım işlemleri; dışarıdan bir fiziksel kuvvetlerin uygulanmasının baskın olduğu arıtım yöntemleridir. Fiziksel arıtım yöntemlerinin birçoğu insanın doğayı gözlemlemesinden kaynaklandığı için atıksu arıtımında kullanılan ilk proseslerdir. Temel fiziksel atıksu arıtım işlemleri eleme, karıştırma, çökeltme, yüzdürme ve süzmeden oluşmaktadır (Biroğul, 2012).

2.12.1.1 Membran filtrasyonu

Membran filtrasyonu yöntemi ile boyanın sürekli olarak arıtılması, permeat-süzüntü ve de en önemlisi boyanın atıksudan ayrılması mümkün olmaktadır. Bu yöntemin diğer yöntemlere göre en önemli avantajı sistemin sıcaklığa, dış çevreye ve mikrobiyal aktiviteye karşı dirençli olmasıdır.

Ters osmoz membranları çoğu iyonik türler için %90'ın üzerinde verim kapasitesine sahiptir ve yüksek kalite bir süzüntü özelliği sağlar. Böylece boya banyoları çıkış sularındaki boyalar ve yardımcı kimyasallar tek bir aşamada giderilmiş olur. Fakat yüksek ozmotik basınç farklılığı ters osmoz uygulamalarını sınırlandırıcı etki yapmaktadır.

Nanofiltrasyon membranları negatif yüzeysel yüklerinden dolayı iyon seçici özelliktedir. Yani çok değerlikli anyonlar tek değerlikli anyonlara göre daha sıkı tutulurlar. Membranların bu özelliğine bağlı olarak boyalı atıksularda bulunan bir kısım yardımcı kimyasal membrandan geçebilmektedir.

Membran teknolojileri dezavantajları, ayırmadan sonra kalan yoğunlaşmış atığın bertaraf problemlerine neden olması, maliyetinin yüksek olması, membranın tıkanma olasılığı ve yenilenme gerekliliğidir (Kocaer ve Alkan, 2002).

Mikrofiltrasyon, boya banyolarından ve yıkama sularından koloidal boyaların giderilmesi için uygun bir yöntemdir. Bu yöntemde yardımcı kimyasallar yoğunlaşmış bir şekilde kalmakta ve geri kazanılabilmektedir. Mikrofiltrasyon yöntemi, sülfür, vat, azoik ve poliester boyanmasında kullanılan dispers boyaların atıksudan ayrılması için kullanılmaktadır.

Nanofiltrasyon prosesi, ters osmoz ile ultrafiltrasyon arasındaki kolloidlerin atıksudan ayrılması için kullanılmaktadır. Bu proses pamuklu boyama yapan boya banyosu atıksularının arıtılması için uygundur. Nanofiltrasyon membran ile atıksudan boyarmaddelerin giderilebildiği gibi yeniden kullanılmak üzere elektrolit geri kazanımı sağlamaktadır. Nanofiltrasyon yöntemi ile haşıllamada kullanılan kimyasallar da geri kazanılabilmektedir (Şahin, 2006).

Ters osmoz yöntemi, boya banyolarından gelen iyonların ve atıksudaki daha büyük maddelerin ayrılması için kullanılmaktadır. Asit, metal kompleks, direk, bazik ve reaktif boyalar gibi çözünen boyaların atıksudan tamamen ayrılması mümkün olmaktadır.

Direk ve reaktif boyamada yüksek elektrolit konsantrasyonları gerektiği için, boya banyo atıksularında ters osmoz uygulanamamasına rağmen, kazan yıkama sularına uygulanabilmektedir. Proses uygulandığında permeat-süzüntü renksiz ve toplam katı madde miktarı çok düşüktür. Ters osmoz, yıkama kimyasalları ve pamuk mumu gibi maddelerin membranı tıkaması nedeniyle pamuk kumaş boyamasından gelen atıksuların arıtılmasında kullanılması tavsiye edilmemektedir.

Bu uygulama yüksek maliyet, konsantre akımın atıksu kaynağındaki hemen hemen tüm kirleticileri içermesi, konsantre akımın arıtılma zorunluluğu, toplam çıkış suyunun yaklaşık %20'sinin arıtılamaması, arıtılmış akımın geri dönüşüm için hala yüksek miktarda kirletici içerme olasılığı gibi dezavantajları içermektedir (Birgül, 2006).

2.12.1.2 İyon değişimi

Boya içeren atıksuların arıtılmasında iyon değiştiricilerin kullanılması henüz yeterince yaygın değildir. Bunun başlıca sebebi, iyon değiştiricilerle arıtılarak olumlu sonuç alınan boya sınıfının kısıtlı olmasıdır. Bu yöntemde atıksu, mevcut iyon değişim bölgeleri doygunluğa ulaşmaya kadar iyon değiştirici reçineler üzerinden geçer ve bu şekilde boyarmadde içeren atıksulardaki hem katyonik hem de anyonik boyalar atıksudan uzaklaştırılabilmektedir. İyon değişimi yönteminin avantajları, rejenerasyon sayesinde iyon değiştirici kaybının bulunmaması, çözücünün kullanıldıktan sonra iyileştirilebilmesi ve çözünebilir boyaların etkin şekilde giderilebilmesidir. En büyük dezavantajı ise organik çözücülerin oldukça pahalı olmasından dolayı maliyetidir (Kocaer ve Alkan, 2002).

2.12.2 Biyolojik arıtım

Biyolojik arıtım temel süreçleri ise; kirliliklerin biyolojik olaylarla uzaklaştırılması ve giderilmesi işlemleridir. Biyolojik arıtım, atıksudaki biyolojik olarak parçalanabilen organik maddelerin (çözülmüş ya da kolloidal) giderilmesi veya

bunların atıksudaki derişiminin azaltılması için kullanılmaktadır. Atıksuda bulunan bileşikler temel olarak atmosfere kaçabilen gazlara ve çökelti olarak uzaklaştırılabilen biyolojik hücre dokusuna dönüştürülmektedir. Biyolojik arıtım atıksudaki azotu gidermek için de kullanılmaktadır (Biroğul, 2012).

Günümüzde biyoteknoloji alanında özellikle atıksuların arıtılması konusunda pek çok çalışmalar yapılmaktadır. Atık ve çevre biyoteknolojisinin en önemli amaçlarından birisi atıkların içeriğini doğanın özümleyebileceği düzeye indirmektedir. Normalde kullanılan arıtım sistemleri doğadakilerin modifiye şeklidir. Biyolojik arıtım da bunu hedeflemektedir. Çünkü doğada mikroorganizmalar belirli bir hızda organik molekülleri yıkıma uğrattır.

Biyoteknoloji bu modelleri erlenlere, havuzlara, fermentörlere uygular. Yürütülen çalışmalar arasında tekstil boya fabrikası atıklarının arıtılması ve renginin giderilmesi sayılabilir. İçerdikleri kompleks aromatik moleküler yapıdaki boyarmaddelerden dolayı arıtılması pahalı ve zor olan tekstil atıksuları için bazı fiziksel ve kimyasal yöntemler kullanılmaktadır. Fakat bu yöntemlerin uygulanmasında yaşanan dezavantajlar ve maliyetlerinin yüksek oluşu, çevreye daha az zarar verecek, işletmesi kolay ve ucuz yeni arıtma tekniklerinin araştırılmasına neden olmuştur. Bu amaçla tekstil atıksularının uzaklaştırılmasında biyolojik arıtma yöntemlerinin kullanılması yaygınlaşmaktadır.

Biyolojik arıtımda mikroorganizmaların önemi büyüktür. Biyolojik arıtımda mikroorganizmalar (bakteriler, mantarlar, algler, protozoalar) atıksuda bulunan organik maddeleri besin ve enerji kaynağı olarak kullanmaktadırlar. Mikroorganizmalar atıksuların arıtımında anahtar rol oynayan bazı katabolik enzimler sentezleyerek arıtımın mineralizasyon seviyesine kadar gerçekleşmesini sağlamaktadır.

Biyolojik yöntemler aerobik ve anaerobik ikiye ayrılmaktadır, azo boyarmadde içeren tekstil atıksularının arıtılması çalışmalarında aerobik ve anaerobik şartların tek başına yeterli olmadığı ve arıtımın tam olarak sağlanamadığı gözlenmiştir (Temur, 2012).

2.12.2.1 Aerobik yöntem

Aerobik proseslerde arıtma oksijenli ortamda gerçekleşir. Bu prosesler, mikroorganizmanın konumuna göre askıda büyüme, bağlı büyüme ve ikisinin birlikte uygulandığı kombine sistemler olarak sınıflandırılmaktadır.

Askıda büyüme sistemlerinde mikroorganizmaların oksijen ihtiyacı çeşitli tipteki havalandırıcılar ile karşılanmaktadır. Bazı durumlarda ise oksijenin biyolojik olarak algler ile karşılanması mümkün olmaktadır. Aerobik giderme; bakteri ve küf (mantar, fungi) boya atıksularının giderilmesinde yaygın olarak kullanılan iki mikroorganizma grubudur. Aerobik koşullarda, bakterilerde bulunan enzimler atıksulardaki organik bileşikleri parçalamaktadır.

Beyaz çürükçül mantar *Phanerochaete chrysosporium* tarafından üretilen lignin peroksidaz, manganeze bağlı peroksidaz gibi enzimlerin kullanılmasıyla boyaların parçalanabildiği bilinmektedir. Bu beyaz çürükçül mantarların içerdiği ligninolitik enzimlerin optimum değerinin asidik pH değerlerinde olması ve atıksularda bulunma ihtimali düşük olan tiamin ile veratril alkol maddelerine ihtiyaç duyması gibi dezavantajları bulunmaktadır.

Bir atığın aerobik olarak stabilizasyonunu gerçekleştirebilen aktif kütle üretiminin meydana gelmesi sebebiyle aktif çamur olarak adlandırılmıştır. Aktif çamur tesislerinde temel amaç, karbonlu organik maddelerin giderilmesidir. Ancak BOİ meydana getiren azotlu maddelerinde oksidasyonu istenebilir. Söz konusu azot bileşiklerinden en önemlisi amonyumdur.

Nitrifikasyon işlemi ile amonyak biyolojik olarak nitrata yükseltilmektedir. Denitrifikasyon işleminde ise azot bileşiklerinin nitrata oksitlenmesinden sonra, nitrat anoksik şartlarda parçalanarak azot gazına dönüştürülmektedir.

Geleneksel olarak kullanılan aktif çamur sistemi tekstil endüstrisindeki bazı boyaların parçalanmasında yetersiz kalmaktadır. Azo boya gibi birçok sentetik boyanın, aerobik şartlar altında mikrobiyal parçalanmaya karşı direnç gösterdikleri bilinmektedir.

Boyaların biyodegradasyonunun azalmasını etkileyen diğer faktör ise, boyaların sudaki yüksek çözünürlüğü ve molekül ağırlıklarının yüksek olması nedeniyle hücre membranlarının içine nüfuz etmelerinin güçlüğünden kaynaklanmaktadır (Çelebi, 2013).

2.12.2.2 Anaerobik yöntem

Anaerobik arıtımın ilk basamağında asitojenik bakteriler; karbonhidratlar, yağlar ve proteinler gibi organikleri düşük molekül ağırlıklı ana ürünlere dönüştürebilirler. Bu fermentasyon ürünleri daha sonra asetojenik bakteri tarafından kullanılır ve asetat, karbondioksit ve moleküler hidrojen açığa çıkar. Son olarak metanojenik bakteriler asetat ve karbondioksiti metana indirgerler. Metan ve karbondioksit içeren biyogaz, anaerobik parçalanma testlerinde parçalanmanın seviyesini belirleme amacıyla kullanılabilir (Kocaer ve Alkan, 2002; Biroğul, 2012).

Boyarmaddelerle yapılan anaerobik arıtma çalışmaları, özellikle aerobik ortamda parçalanamayan suda çözünabilir reaktif azo boyarmaddeler üzerinde yoğunlaşmıştır.

Çift bağlı azot halkasından kaynaklı bu boyaların aerobik süreçlerle arıtılabilirliğinin mümkün olmaması anaerobik arıtımın ön arıtma olarak kullanılmasını gerektirmektedir. Anaerobik olarak renk gideriminin gerçekleştirilmesi için ilave karbon kaynağına ihtiyaç vardır.

İlave karbon metan ve karbondioksite dönüştürülmekte ve elektronlar açığa çıkmaktadır. Bu elektronlar elektron taşıma zincirinden son elektron alıcısına yani azo-reaktif boyaya taşınmakta ve boyayla reaksiyona girerek azo bağındır indirgenmektedir. Böylece anaerobik bağlanma sonucunda azo boyarmaddelerdeki renkten sorumlu azo bağı kırılmakta ve renk giderimi sağlanmaktadır. Bu olay oksijen tarafından inhibe edilmektedir. Bu nedenle boya atıklarını renksizleştirmek için ilk adım azo köprüsünün indirgenerek parçalandığı anaerobik koşullar altında arıtım olmalıdır (Biroğul, 2012).

Azo bağı kırılmasıyla, anaerobik olarak parçalanamayan aromatik aminler de oluşabilmektedir. Boyarmaddeler genelde sitotoksik, mutajenik veya kanserojenik değilken, anaerobik parçalanma sonucu oluşan aminler bu özellikleri gösterebilmektedir. Bu nedenle anaerobik sistemler aerobik arıtmadan önce yer alan

bir ön arıtım yöntemi olarak önerilmektedir. Çünkü aromatik aminler, aromatik bileşiğin halkasının açılması ve hidroksilasyonla aerobik ortamda mineralize olabilmektedir.

Böylece boyarmadde içeren atıksuların kombine anaerobik-aerobik süreçlerle arıtılması sonucu ilk basamakta etkili bir renk giderimi sağlanmakta ve anaerobik ortamda dirençli olan aromatik aminler aerobik basamakta giderilebilmektedir (Kocaer ve Alkan, 2002; Biroğul, 2012).

2.12.2.3 Biyosorpsiyon

Kimyasal maddelerin mikrobiyal biyokütle tarafından adsorbsiyonu veya kütlede birikimi “biyosorbsiyon” olarak ifade edilebilmektedir. Ölü bakteriler, maya ve mantarlar boyarmadde içeren atıksuların renginin giderilmesinde kullanılabilmektedir.

Tekstil boyalarının kimyası geniş bir yelpazede değişiklik gösterdiği için mikroorganizmalarla olan etkileşimler boyanın kimyasına ve mikrobiyal kütlenin spesifik kimyasına dayanmaktadır. Bu nedenle kullanılan mikroorganizmaların cinsine ve boyaya bağlı olarak farklı bağlanma hızları ve kapasiteleri söz konusudur (Kocaer ve Alkan, 2002; Çelebi, 2013).

2.12.3 Kimyasal arıtım

Kimyasal arıtım temel süreçleri; kirleticilerin uzaklaştırılma ya da dönüştürülmelerinin kimyasal maddelerin katılmasıyla ya da diğer kimyasal tepkimelerle gerçekleştirildiği süreçlerdir. Bunlardan çöktürme, koagülasyon, flokülasyon, gaz aktarımı ve dezenfeksiyon atıksu arıtımında kullanılan yöntemlerdir (Biroğul, 2012).

Tekstil atıksularının kimyasal arıtımı yıllardan beri en çok tercih edilen yöntem olmuştur. Bunun başlıca nedeni, atıksu kalitesinde meydana gelen değişikliklerin kullanılan kimyasalda veya uygulanan dozda yapılan değişikliklerde kolayca tolere edilebilir olması ve aynı zamanda uygulamalarının da basit oluşundan kaynaklanmaktadır.

Yaygın olarak kullanılan kimyasal yöntemler şunlardır; adsorpsiyon ve aktif karbon, oksidasyon yöntemleri (Fenton ayırıcı-Fe(II) tuzlarıyla aktive edilmiş hidrojen peroksit, ozon, fotokimyasal yöntem, sodyum hipoklorit (NaOCl), elektrokimyasal yöntem), kimyasal çöktürme ve flokülasyon (Koagülasyon – Flokülasyon) (EPA, 1997).

2.12.3.1 Adsorpsiyon

Adsorpsiyon teknikleri geleneksel metodlar için fazla kararlı olan kirleticilerin giderimindeki verimlilikten dolayı son yıllarda oldukça fazla rağbet görmektedir. Adsorpsiyon ekonomik yöntemdir. Yüksek kalitede ürün oluşumu sağlar. Adsorpsiyon prosesi, boya/adsorban etkileşimi, adsorbanın yüzey alanı, tanecik büyüklüğü, sıcaklık, pH ve temas süresi gibi pek çok fizikokimyasal faktörün etkisi altındadır.

Birçok asit ve reaktif boyalar suda çok iyi çözündükleri için adsorbsiyonla atıksudan giderilmeleri çok zordur. Bu nedenle asit, reaktif, direk, metal kompleks ve bazik boyarmaddelerin atıksudan giderilmesinde iki aşamalı proses uygulanmaktadır.

Prosesin ilk aşamasında adsorban olarak geniş yüzey alanına sahip noniyonik polimerler kullanılmaktadır. İkinci aşamasında atıksu zayıf bazik iyon değiştiriciden geçirilir. Dispers boyalar gibi suda çözünmeyen boyarmaddeler için bu yöntem uygun değildir.

Reaktif, direk, sülfür ve asit boyarmaddeleri içeren atıksuların gideriminde modifiye edilmiş selüloz da kullanılabilir. Ancak aktif karbon, diğer bütün boyalar için iyi sonuçlar vermektedir (Bahadır, 2012).

Aktif karbonla renk giderimi özellikle katyonik ve asit boyalar için etkili olmasına rağmen, dispers, direkt, vat, pigment ve reaktif boyalar için daha az bir renk giderimi söz konusudur. Metodun performansı kullanılan karbonun tipine ve atıksuyun karakteristiğine bağlıdır. Rejenerasyon ve tekrar kullanım performansta azalmaya neden olurken bu dezavantaj aşırı miktarda aktif karbon kullanımı da maliyeti artırır.

Adsorban olarak kullanılabilecek diğer malzemeler arasında bataklık kömürü, ağaç kırıntıları, uçucu kül+kömür karışımı, silika jeller, doğal killeri, mısır koçanı da yer almaktadır (Kocaer ve Alkan, 2002).

2.12.3.2 Oksidasyon

Uygulamasının basit olmasından dolayı en yaygın kullanılan kimyasal renk giderim yöntemidir. Kimyasal oksidasyon sonucu boya molekülündeki aromatik halka kırılarak atıksudaki boyarmadde giderilir (Kocaer ve Alkan, 2002).

Temel okside edici ajanlar klor, ozon, fenton ajanı, UV/peroksit, UV/ozon'dur. En yaygını ise hidrojen peroksittir (H_2O_2). Bu ajan UV ışık gibi bazı yollarla aktive edilmelidir. Pek çok kimyasal renk giderim yöntemi H_2O_2 'in aktive edildiği şekle göre değişkenlik göstermektedir.

Klorun iyi bir oksitleyici ajandır. Ancak azotlu bileşikler içeren atıksularda istenmeyen bileşiklerin oluşumuna yol açabileceği için uygulanabilirliği sınırlandırılmıştır.

Oksidasyon, H_2O_2 -Fe(II) tuzları (Fenton reaktifi), ozon, fotokimyasal yöntem, elektrokimyasal yöntem ve sodyum hipoklorit vb. ile gerçekleştirilir (Uçar, 2008).

2.12.3.3 Koagülasyon – Flokülasyon

Bu yöntemde flokleşme ve çökeltme kimyasal maddeler yardımıyla sağlanır. Atıksuya katılan kimyasal maddeler yardımıyla meydana gelen flokleşme ile çözünmüş maddeler ve kolloidler giderilmektedir.

En çok kullanılan kimyasallar arasında, $Al_2(SO_4)_3$, $FeCl_3$, $FeSO_4$ ve kireç sayılabilir (Kocaer ve Alkan, 2002).

Kimyasal çöktürme yönteminde inşaat masraflarından ziyade işletme masrafları önem taşımaktadır. Özellikle meydana gelen çamurun bertaraf edilmesi, giderlerin önemli bir kısmını teşkil etmektedir. Kısa alıkoyma süresi bu yöntemin tercih sebeplerinden biridir.

Çökelme için kimyasalların yüksek maliyeti, pH ayarlama ve süpernetantta kalan artık katyon düzeyi bu yöntemin dezavantajlarından (Uçar, 2008).

2.13 Elektrokimyasal Prosesler

Elektrokimyasal reaksiyonlar çözeltilerde bulunan elektrotlara bir voltaj uygulanarak çözeltiden akım geçirilmesiyle meydana gelmektedir. Elektrokimya ise reaksiyonlardaki akım ve kimyasal tepkimeleri inceleyen bilim dalıdır. Kimyasal reaktörden elektrokimyasal reaktörlerin farkı elektrot içeren reaktörler olmasıdır.

Elektrokimyasal reaktörlerde gerçekleşen elektrot tepkimeleri, katı-sıvı ara yüzeyinde yer alan heterojen indirgenme ve yükseltgime tepkimeleridir.

Elektrokimyasal reaktörde reaksiyonlar sürekli ve kesikli olmak üzere iki farklı şekilde ilerlemektedir. Sürekli sistemlerde reaktör kesintisiz olarak elektrolit ile beslenmekte ve işlem görmüş elektrolit sistemden uzaklaştırılmaktadır. Kesikli sistemlerde ise elektrolitin değiştirilmesi sırasında proses durdurulmakta sonrasında yeniden başlatılmaktadır (Akbaş, 2014). Son yıllarda endüstriyel atıksuların arıtımında dirençli kirleticilere karşı elektrokimyasal arıtım metotları oldukça fazla kullanılmaya başlanmıştır.

Kimyasal madde gerektirmemesi ve buna bağlı olarak da çamur oluşumunun azalması, kullanımının yaygın olmasının temel nedenlerindendir. Bu yöntemin en önemli avantajı ana reaktifin elektron olması ve arıtım için gerekli ürünlerin işlem sonunda oluşmasıdır.

Elektrokoagülasyon diğer elektrokimyasal metotlara göre daha karmaşık bir arıtım prosesidir. Bu durumun temel nedeni elektrokoagülasyon prosesinin, elektrokimya, koagülasyon, oksidasyon ve flotasyon mekanizmalarının hepsine dayalı olarak gerçekleşmesidir. Bunların her biri kendi içinde pek çok çalışmanın konusunu oluşturmaktadır. Elektrokoagülasyon prosesinin güvenilir bir arıtma teknolojisi olabilmesinde, çalışmaların hedef kirletici odaklı yürütülmesi etkilidir.

Elektrokimyasal proseslerde tepkimeler, elektrolitten ayrılan iyonik bileşiklerin anotta ve katotta yükseltgendiği veya indirgendiği heterojen iyon transferi tepkimeleridir.

Anot ve katotta genellikle metal, karbon veya bir yarı iletken elektrot kullanılmaktadır. Elektrotlarda ve atıksu da gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar Çizelge 2.6.'da verilmiştir (Alver, 2012).

Çizelge 2.5. Elektrot ve atıksuda gerçekleşen bazı kimyasal reaksiyonlar.

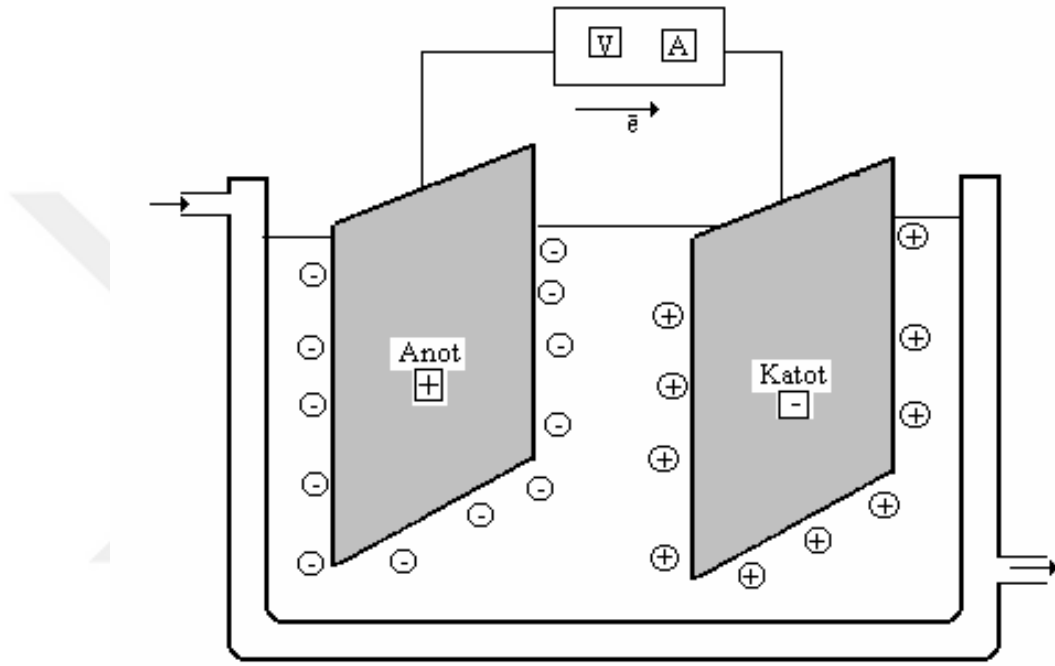
Anot	Katot
$4OH^- - 4e^- = 2H_2O + O_2(g)$	$2H_3O^+ + 2e^- = H_2(g) + 2H_2O$
$2H_2O - 4e^- = O_2(g) + 4H^+$	(Asidik çözeltilerde)
$2Cl^- - 2e^- = Cl_2(g)$	$2H_2O + 2e^- = H_{2(g)} + 2OH^-$ (bazik çözeltilerinde)
$Cl_2(g) + H_2O = HOCl + H^+ + Cl^-$	$O_2 + 2H_2O + 4e^- = 4OH^-$
Al-Anot	
$Al(s) - 3e^- = Al(aq)_{+3}$	$Al(s) + 4OH^- = [Al(OH)_4]^- + 3e^-$ (yüksek pH)
$Al(aq)_{+3} + 3H_2O = Al(OH)_3 + 3H^+$	
Fe-Anot	
$Fe(s) - 2e^- = Fe(aq)^{+2}$	
$Fe(aq)^{+2} + 2H_2O = Fe(OH)_2 + 2H^+$	$Fe(OH)_3 + OH^- = [Fe(OH)_4]^-$
$2H_2O$	$[Fe(OH)_4]^- + 2OH^- = [Fe(OH)_6]^{-3}$
$Fe(OH)_2 + HOCl = Fe(OH)_3 + Cl^-$	(yüksek pH)
$Fe^{+2} - e^- = Fe^{+3}$	
$Fe^{+3} + 3H_2O = Fe(OH)_3 + 3H^+$	

Elektrokimya teknolojisinden son 20 yıldır kirlilik kontrolünde oldukça yoğun şekilde yararlanılmaktadır. Ülkemizde ise bu sistemlerin içme suyu, evsel ve endüstriyel atıksuların arıtmada kullanılmasına yönelik çalışmalar diğer ülkelere göre oldukça yetersizdir.

Özellikle metal endüstrisi, galvaniz sanayi, tekstil endüstrisi, gıda ve yem endüstrileri, gübre sanayi ve yan kuruluşları, petrol rafinerileri ve petrokimya sanayi

gibi atıksu problemi olan endüstrilerde, elektrokimyasal arıtım proseslerinin uygulanması, bu problemin çözümünde kolaylık sağlayacaktır (Alver, 2012).

Elektroliz işleminin gerçekleşebilmesi için; anot ve katot arasında bir bağlantı ve çözeltisinde belli bir iletkenlik (anyon ve katyonlar) olması gerekir. Bir elektrokimyasal hücrenin şematik olarak görünüşü Şekil 2.2.'de verilmiştir (Delipınar, 2007).



Şekil 2.2. Elektrokimyasal hücrenin şematik görünüşü.

Elektrokimyasal arıtım teknolojisi diğer arıtım teknolojileri ile sadece maliyet açısından değil, yeterlilik ve verimlilik açısından da karşılaştırılmaktadır. Arıtımı zor kirleticilerin gideriminde elektrokimya teknolojisini kullanmak zorunlu hale gelmiştir (Chen, 2004).

Elektrokimyasal arıtım teknolojilerinin çevre kirliliğini önlemede ve çözmede öne çıkan avantajları şu şekildedir (Kırlaroğlu, 2008):

Çok yönlülük: Elektrokimyasal prosesler çevre probleminin çözümünde doğrudan veya dolaylı olarak kullanılabilir. Elektrokimyasal prosesler de yükseltgenme ve indirgenmeyle, çözeltelerin yoğunlaştırılması veya seyreltilmesi yani faz ayırmaları gerçekleştirilir. Böylece maddelerin daha etkin ayrımı söz konusudur.

Enerji verimliliği: Elektrokimyasal prosesler klasik proseslerden diğer bir farkı da daha düşük sıcaklıklara ihtiyaç duymasıdır (termal yanma gibi). Düşük elektriksel akım dağılımları, voltaj düşmeleri ve yan reaksiyonlar ile oluşan güç kayıplarını minimize etmek için uygun elektrot ve hücre dizaynlarıyla enerji verimleri daha da artırılabilir. Böylece diğer klasik sistemlere göre daha az enerji tüketimi ortaya çıkmış olacaktır.

Otomasyona uyma kabiliyeti: Elektrokimyasal proseslerde voltaj ve akım gibi elektriksel değişkenler genellikle proses kontrolü ve otomasyonu aynı zamanda veri elde etmeyi kolaylaştırma, için uygundur.

Çevre uyumu: Elektrokimyasal proseslerde ana reaktif elektrottur ve temiz bir reaktiftir. Proseste genellikle fazladan reaktif gerekmemektedir. İlave olarak bu proseslerin birçoğunun yüksek seçicilik özelliğinden dolayı ikincil ürünlerin oluşumu gözlenmemektedir.

Maliyeti: Elektrokimyasal proseslerde ekipmanın üretimi, işletilmesi ve kontrolünün tasarlaması basit ve ucuzdur. Birçok ekipmana göre çok az bir alan işgal etmektedir.

Atıksu arıtımında elektrokimyasal metotlardan en fazla elektrooksidasyon ve elektroflotasyon kullanılmaktadır. Bu prosesler birlikte veya ayrı olarak kullanılabilir.

Elektrokimyasal atıksu arıtım proseslerini birbirinden ayıran en önemli özellik kirleticilerin giderilmesini sağlayan prosesin şekli ve yapısıdır. Bu durumu belirleyen kullanılan elektrotların özellikleridir.

Elektrooksidasyon ve elektroflotasyon proseslerinde ortama karşı dayanıklı çözünmeyen kararlı metal veya metal alaşımlarından yapılmış elektrotlar (Ti/Sn, Ti/Ru, Pt/Ti/Ir, çelik gibi) kullanılmaktadır.

Elektrotlardan çıkan gazlar (O_2 ve H_2) ile organik maddelerin oksidasyonu gerçekleşmektedir. Elektroflotasyonda ise oksidasyondan ziyade çıkan gazlar yardımıyla kirleticilerin reaktör yüzeyinde toplanarak ayrılması sağlanır.

Elektrokoagülasyonda ortamda çözünen metal elektrotlar (Al ve Fe gibi) kullanılmaktadır. Bu elektrotlardan çözünen metal iyonları ortam koşullarına göre metal-polimer kompleksleri oluşturarak kirleticileri adsorplayarak koagüle olmaktadır.

Elektrokoagülasyon prosesinde kirleticilerin kısmen de elektooksidasyonu gerçekleşmektedir. Elektrokoagülasyonun diğer proseslerden farkı ortamdaki kirletici gideriminin oksidasyon, koagülasyon ve flotasyon olaylarının birlikte olabilmesidir.

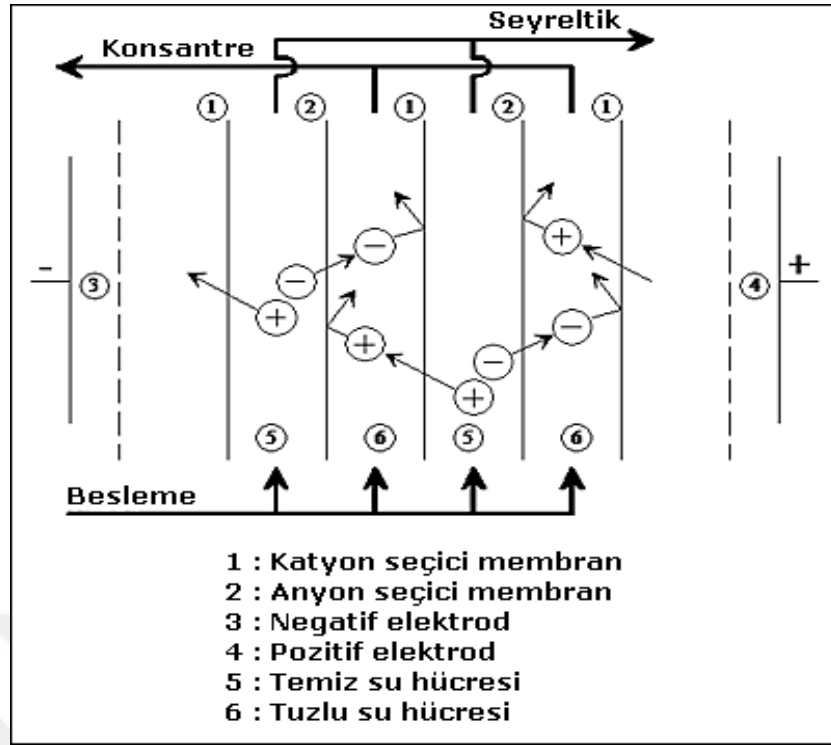
Elektrokimyasal arıtım prosesleri başta elektrokoagülasyon olmak üzere, elektrodializ, elektroforez, elektooksidasyon ve elektroflotasyon gibi çeşitli başlıklar altında toplanmaktadır (Kırlaroğlu, 2008).

2.13.1 Elektrodializ yöntemi

Bir elektrodializ sistemi, reaktör içinde, anot ve katot arasına yerleştirilmiş iyon değiştirici membranlardan oluşmaktadır. Bu membranlar, gidermek istenen maddelere göre, sadece anyon veya katyon değiştirici membranlar ya da hem anyon değiştirici hem de katyon değiştirici membranlardan oluşabilmektedir. Kutuplar arasına belli bir potansiyel uygulanarak, çözeltideki katyonlar katoda doğru, anyonlar ise anoda doğru hareket etmektedir.

Anyon değiştirici membranlar anyonların, katyon değiştirici membranlar ise katyonların geçmesine izin vererek, çözeltideki anyon ve katyonlar birbirinden ayrılarak çözelti temizlenmiş olmaktadır (Ergün, 2008).

Basit bir elektrodializ şeması Şekil 2.3’de verilmiştir (URL-12).



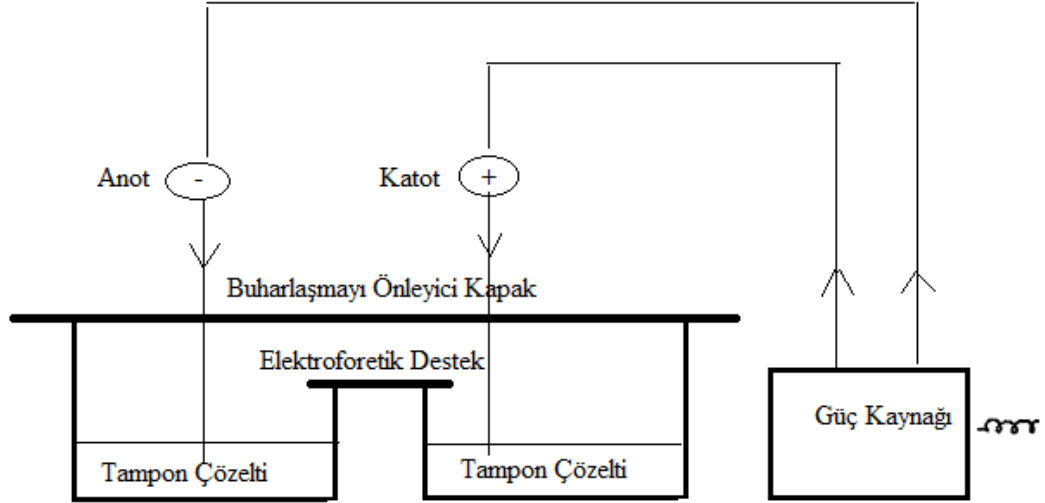
Şekil 2.3. Elektrodializ sistemi.

2.13.2 Elektroforez yöntemi

Elektroforez yöntemi, elektriksel alanda yüklü partiküllerin hareketine dayanmaktadır (Çelik, 2002). Ortam pH'ına göre, (+) ya da (-) olarak yüklenen taneciklerin, bir elektrik alanda, kendi yüklerine zıt yük taşıyan anot veya katoda doğru farklı hızlar da sürüklenmeleri prensibi ile çalışmaktadır (URL-12).

Böylelikle yüklü moleküller farklı taşınma yetenekleri ile sudan ayrılmaktadırlar. Bu harekette elektriksel alanın gücü, partikülün net yükü ve ortamın yoğunluğu taşınım sırasındaki önemli değişkenlerdir (Akbaş, 2014).

Şekil 2.4'de bir elektroforez ünitesinin çalışma prensibi verilmektedir (Berik, 2002).



Şekil 2.4. Elektroforezin çalışma şeması.

Elektroforez çalışma şemasındaki güç kaynağında tek yönlü sabit bir akım kullanılarak elektriksel alan oluşturulmaktadır. Tampon çözeltiler, oluşan bu elektrik akımını iletme, pH'ı sabit tutmak ve moleküllerin tek yönde transfer etmelerini sağlamaktadır.

2.13.3 Elektroflotasyon yöntemi

Elektroflotasyon, proses süresince reaktör içerisinde üretilen hidrojen ve oksijen gaz kabarcıklarının çözeltilerden ayrılması istenen maddeleri su yüzeyine taşımasını sağlayan yöntemdir. Elektroflotasyon ilk olarak 1904 yılında Elmore tarafından cevherlerden değerli minerallerin ayrılması için önerilmiş bir prosestir.

Elektroflotasyon sisteminin performansı, kirlenici giderme verimi, kimyasal madde ve enerji ihtiyacı ile değerlendirilmektedir. Elektroflotasyon prosesinde atıksuyun iletkenliği düşükse, enerji tüketimi çok artmaktadır.

Kirlenici giderme verimi ve hızı, üretilen kabarcıkların sayısı ve boyutu ile büyük oranda ilişkilidir. Güç tüketimi, hücre tasarımı ve elektrot malzeme yanı sıra akım yoğunluğu, pH ve sıcaklık gibi çalışma koşulları ile bağlantılı olarak değişmektedir (Chen, 2004).

Elektroflotasyon prosesinde meydana gelen kabarcıklar, genel olarak 5-100 µm çapında olup, yüksek dispersiyon özelliğine sahiptirler. Oluşan kabarcıkların sayısı

proseste kullanılan elektrotların yüzey alanına bağlı olarak (10-20 milyon adet/cm²) değişmektedir. Elektroflotasyon hücrelerinde, yüzeyde toplanan yumaklar, köpük sıyrıcılar vasıtasıyla sıyrılarak filtrasyona gönderilir.

Flotasyonda 20 µm'den daha küçük boyuttaki partiküllerin giderimin de sorun yaşanmaktadır. Fakat bu sorun, elektroflotasyonla oluşturulan ince gaz kabarcıkları ile giderilebilir.

Elektroflotasyon, çözeltilerden çözünmüş hava flotasyonuna oranla daha küçük boyuttaki partiküllerin ayrılmasını sağlamaktadır. Elektroflotasyon prosesinde, proses için uygulanan akım yoğunluğu değiştirilerek, farklı ebatlarda gaz kabarcıkları oluşturulabilir. Bu da daha büyük bir yüzey alanı sağlamakta, böylece ayırma verimi ve etkinliği artmaktadır.

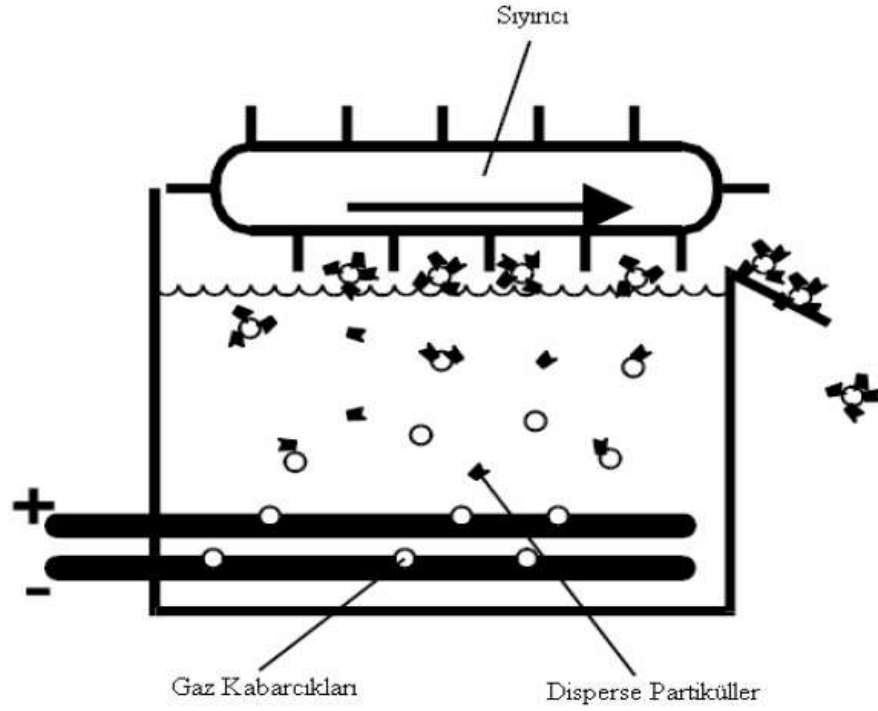
Elektroflotasyon prosesinde tercih edilen akım yoğunluğu 0,1-10 mA/cm²'dir. Proses potansiyeli 10 V değerine çıktığında enerji tüketimi 0,2-0,4 kWh/m³ aralığında değişiklik göstermektedir (Alver, 2012).

Elektroflotasyon prosesi boyutları küçük olmasına rağmen dispersiyon yeteneğine sahip gaz kabarcıklarına dayalı olarak ilerler ve burada gaz kabarcıkları prosesin temelini oluşturmaktadır. Genel olarak elektroflotasyon prosesinin işletme şartlarının optimizasyonunda akım, elektrot tipi, pH ve sıcaklık gibi parametreler değiştirilerek sistem için optimum işletme şartları belirlenmektedir.

Atıksulardan elektroflotasyon yöntemiyle yağ ve emülsiyonlar gibi düşük yoğunluklu maddelerin yanı sıra askıda katı madde giderimi de sağlanabilmektedir. Özellikle bazı tesislerde problem oluşturan KOİ'nin bir kısmı bu yöntemle giderilebilmektedir.

Elektroflotasyon yöntemi metal kaplama, tekstil, boya ve kimya sanayi atıksuların arıtımında kullanılmaktadır (İlhan vd., 2007).

Basit bir elektroflotasyon düzeneği Şekil 2.5'de verilmiştir (Alver, 2012).



Şekil 2.5. Basit bir elektroflotasyon düzeneği.

Elektrokimyasal arıtım türleri içerisinde önemli bir yeri olan elektroflotasyonun avantajları ve dezavantajları şöyle özetlenebilir;

Avantajları;

- Akım yoğunluğu değiştirilerek kabarcık sayısı ve boyutu kontrol edilebilir.
- Yüklü olan kabarcıklar bir bütün halini almazlar,
- Meydana gelen yüksek flok yapısını bozmaz,
- Yüksek sıcaklıklarda da uygulanabilir,
- Kimyasal kullanımı azdır,
- Anodik klor dezenfektan özelliği gösterir.

Dezavantajları;

- Tank yükseklikliği 1m'den azdır,
- Elektrotlarda korozyon meydana gelir,
- Elektrot pasivizasyonu meydana gelir,
- DC (Doğru akım) gücü gereklidir,
- Yüksek spesifik yoğunluklu materyallere göre daha düşük performansa sahiptir (Çolak, 2017).

2.13.4 Elektrooksidasyon yöntemi

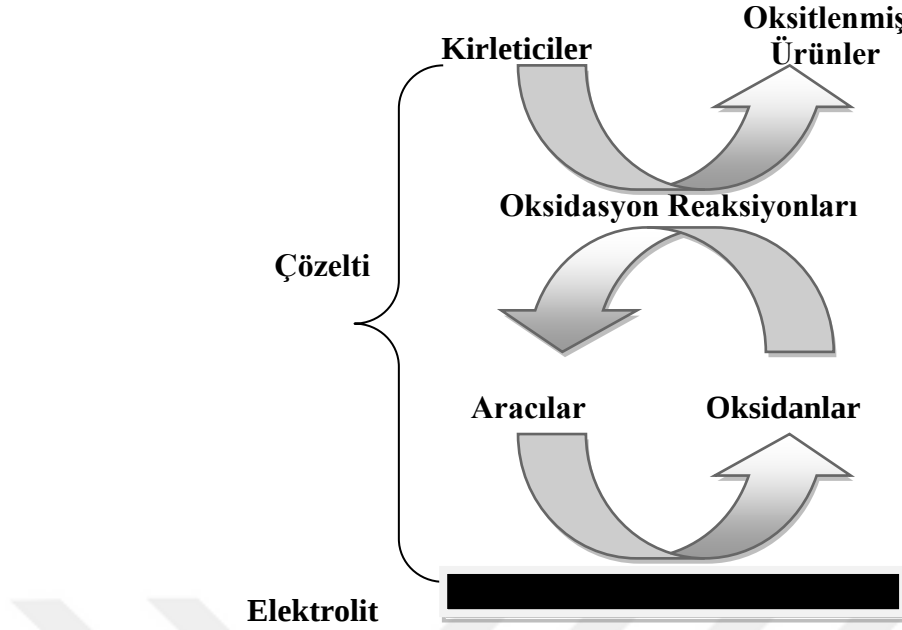
Bu proses, çözünmeyen bir anot malzemesi kullanılarak organik maddelerin elektrokimyasal olarak doğrudan veya dolaylı olarak oksitlenmesi prensibine dayanmaktadır (Avcu 2010; Fil vd., 2012).

Elektrooksidasyon prosesinde temel ve aktif rolü oynayan elektrot anottur. Bu yüzden proste etkili olan parametrelerin başında anodun katalitik aktivitesi gelmektedir. Ayrıca akım, sıcaklık, pH ve organik bileşiklerle diğer oksidantların difüzyon hızı da önem taşımaktadır. Elektrooksidasyon prosesleri literatürde genellikle Ti/Pt-Ir, Ti/RhOx-TiO₂, Ti/PdO-CO₃O₄, TiO₂/TiRuO₂, Ti/Pt, PbO₂/SnO₂, PbO₂/Ti, SnO₂, PbO₂, BDD vb. anot elektrotlar kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

Etkili giderim ve çamur oluşumunun çok az olması nedeni ile elektrokimyasal yöntemler arasında tercih edilen bir yöntem olarak yer almaktadır. Anodun yüksek potansiyeli nedeni ile atıksuda bulunan klorür iyonları klora dönüşebilmekte veya organik bileşiklerin doğrudan oksidasyonu gibi ikincil reaksiyonlar da meydana gelebilmektedir (İlhan vd., 2007).

Klorlu organik bileşiklerin ara veya son ürüne dönüşümleri bu tekniğin uygulamasını engellemektedir (Vardar, 2006). Ayrıca bu uygulamada atıksuyun klorür içeriğinin düşük olması durumunda proses verimini artırmak için yüksek miktarda tuz ilavesi gerekmektedir (Chen, 2004).

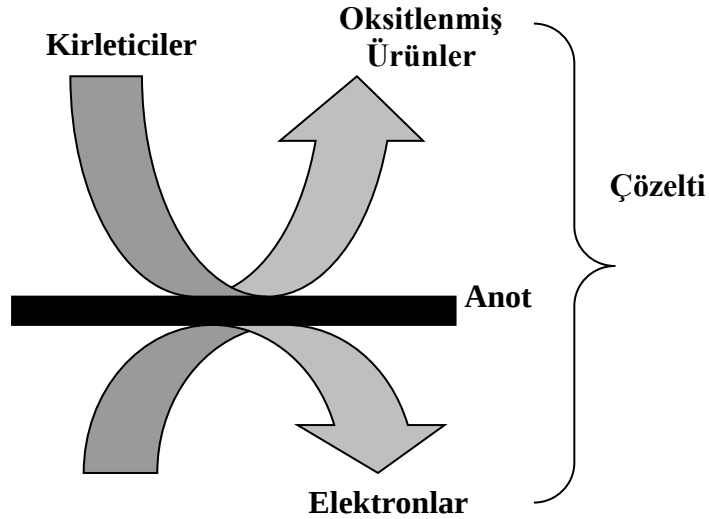
Şekil 2.6'da elektroksidasyon prosesinde kirleticilerin dolaylı parçalanması ve Şekil 2.7'de elektroksidasyon prosesinde kirleticilerin doğrudan parçalanması şematik olarak verilmektedir (Fil vd., 2012).



Şekil 2.6. Elektrooksidasyon prosesinde kirleticilerin dolaylı parçalanması.

Doğrudan anodik proste kirleticiler ilk önce anot yüzeyine adsorbe olmakta ve daha sonra anot yüzeyinden elektron transferi gerçekleşmektedir.

Organik kirleticilerin doğrudan oksidasyon hızı, anodun aktif noktalarına organik bileşiklerin difüzyon hızı ve uygulanan akım şiddeti yardımıyla anodun katalitik aktivitesine bağlı olarak gerçekleşmektedir.



Şekil 2.7. Elektrooksidasyon prosesinde kirleticilerin doğrudan parçalanması.

Dolaylı elektrooksidasyon süresince organik maddelerin oksidasyonunda etkili olan klor, hipoklorit, hidrojen peroksit ve ozon anodik olarak üretilmektedir (Fil vd., 2012).

Toksik ve biyolojik parçalanabilirliği düşük kirleticilerin arıtımında dolaylı oksidasyon tercih edilmektedir. Dolaylı elektrooksidasyon yönteminde, anodik olarak oluşan klor ve hipoklorürün kullanılması çok yaygındır.

Bu teknikle, yüksek klorür konsantrasyonunda birçok organik ve inorganik kirleticinin oksitlenmesi sağlanmaktadır. Ara ve son ürün olarak klorlu organik bileşiklerin oluşması, bu teknolojinin uygulama alanlarını sınırlar.

Kirleticiler elektrokimyasal olarak oluşturulan H_2O_2 ile de oksitlenebilmektedir. Bu sistemde katot gözenekli karbon politetrafloroetilen (PTFE) malzemeden, anot ise Pb/PbO₂, Ti/Pt/PbO₂ veya Pt'den yapılmaktadır.

Anodik oksidasyon veya direkt oksidasyon ise kirletici mineralizasyonunda kolaylık sağlayan teknolojilerden biridir. Anodik oksidasyonda atıksuya çok fazla kimyasal eklemeye ve katodu oksijen ile beslemeye gerek olmadığından, bu özellikler anodik oksidasyonu, diğer oksidasyon proseslerine göre daha avantajlı hale getirmektedir.

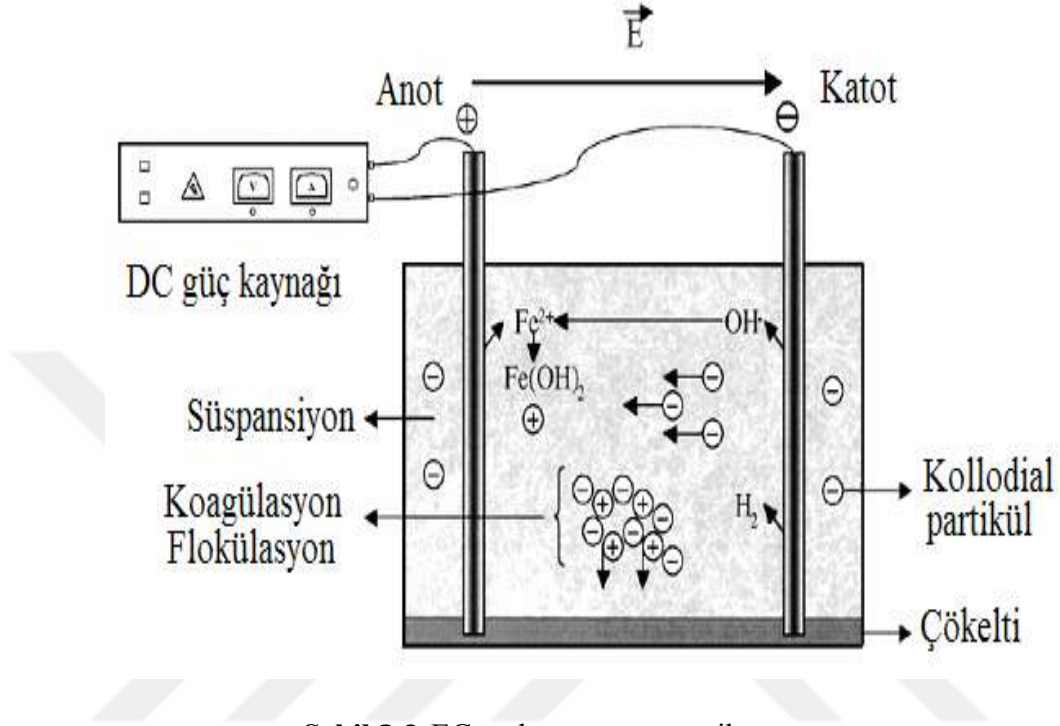
Anodik oksidasyonda en önemli husus anot materyalidir. Anot olarak paslanmaz çelik, camsı karbon, Ti/RuO₂, Ti/Pt-Ir, fiber karbon, MnO₂, Pt-karbon siyahı ve gözenekli karbon kullanılmaktadır (Chen, 2004).

2.13.5 Elektrokoagülasyon (EC) yöntemi

EC prosesi koagülasyon, adsorpsiyon, flotasyon ve oksidasyonun eş zamanlı olarak meydana geldiği ve son yıllarda gelişmiş ülkelerde endüstriyel atık suların arıtımı için yaygın olarak kullanılmaya başlanan bir yöntemdir.

Kimyasal madde ilavesi söz konusu olmadığı için ikincil kirlilik problemi ile karşılaşılması, basit ekipman, daha az iş gücü ve daha küçük alanlarda uygulanabilir olması tercih edilmesinin başlıca sebeplerindendir (Bayar vd., 2012).

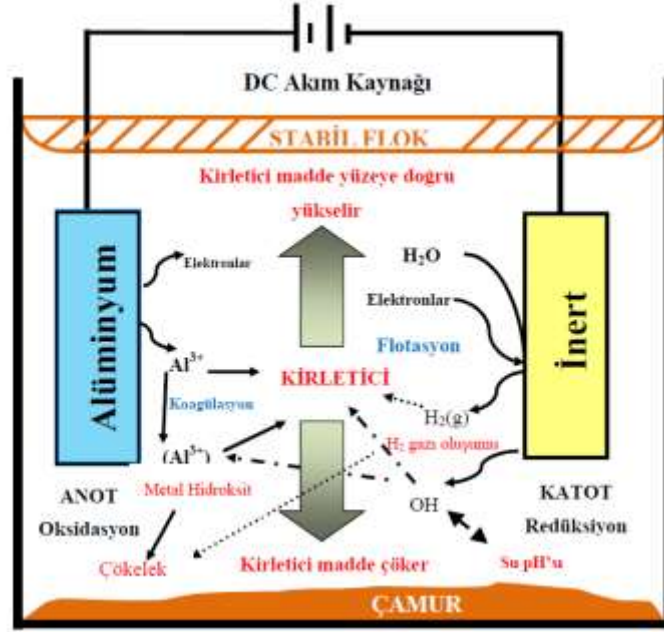
EC reaktörü, basit olarak anot ve katot elektrodun bulunduğu elektrolitik hücre ile anot ve katot elektrotların bağlandığı DC güç kaynağından oluşmaktadır (Mollah vd., 2001). Basit EC reaktörü Şekil 2.8’de görülmektedir (Malkoç, 2008).



Şekil 2.8. EC reaktörünün şematik görünüşü.

EC prosesi kolloidlerin, süspansiyonların ve emülsiyonların elektriksel yüklerden etkilenmesi prensibine dayanmaktadır. Proseste anotun çözünmesi ile metal iyonları açığa çıkmakta ve bu metal iyonlarının oluşturduğu metal hidroksit floklarının koagülasyon, adsorpsiyon ve çöktürme proseslerini gerçekleştirmesiyle kirletici giderimi sağlanmaktadır.

Şekil 2.9’da elektrokoagülasyon prosesinin ilerleyişi verilmektedir (Bayar vd., 2012; Özyonar ve Karagözoğlu, 2012).



Şekil 2.9. Elektrokoagülasyon prosesinin ilerleyişi.

Elektrokoagülasyon prosesinin teorisi Mollah vd., (2001), tarafından ele alınmıştır. EC'nin birbirini izleyen 3 aşamada gerçekleştiği kabul edilmektedir.

1.Aşama: Kullanılan elektrodun, elektrolitik oksidasyonu ile koagülantların oluşturulması.

2.Aşama: Kirlenicilerin, askıdaki partiküllerin destabilizasyonu ve emülsiyonların kırılması.

3.Aşama: Flokları oluşturmak için destabilize fazların birleşmesi ya da toplanması.

Askıdaki partiküllerin ve kirlenicilerin destabilizasyonu ve emülsiyonların kırılma mekanizmaları aşağıdaki basamaklarla özetlenebilir.

a) Solüsyon içerisinde akımın geçmesi ve kullanılan elektrodun çözünmesi ile üretilen iyonların etkileşimi sonucu meydana gelmiş yüklü türler etrafındaki difüze çift tabakanın sıkıştırılması.

b) Kullanılan elektrotların elektrokimyasal olarak çözünmesi ile üretilen zıt iyonların sebep olduğu, atıksu içerisindeki mevcut iyonik türlerin yük nötralizasyonu (Bu zıt iyonlar, elektrostatik partiküllerin içsel itme kuvvetini azaltmasından dolayı Van der Waals kuvvetleri baskın hale gelerek koagülasyon prosesini etkin hale getirir).

c) Flok yapısı ve koagülasyon sonucundaki flok oluşumu, kompleksleşmeyen kolloidal partikülleri yakalayan ve köprü kuran çamur tabakası oluşumudur (Mollah vd., 2001).

2.13.5.1 EC reaktöründe gerçekleşen reaksiyonlar

EC reaktöründe elektrotlara DC güç kaynağı ile akım verildiğinde anot elektrot elektron vererek yükseltgenir, katot elektrot ise elektron alarak indirgenir.

EC reaktöründe anot ve katotta gerçekleşen elektrokimyasal yükseltgenme ve indirgenme reaksiyonları Çizelge 2.7’de özetlenmiştir (Solak, 2007).

Çizelge 2.6. Elektrokimyasal yükseltgenme ve indirgenme reaksiyonları.

Anot Reaksiyonları	Katot Reaksiyonları
Anotta yükseltgenme (elektron verir)	Katotta indirgenme (elektron alır)
Anodik Çözünme $Al \rightarrow Al^{+3} + 3e^{-}$	Katodik Birikme $Cu^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Cu$
Anyonlar anotta toplanır	Katyonlar katotta toplanır
Anolit bölge oluşur	Katolit bölge oluşur
Anotta Oksijen: $2H_2O \rightarrow O_2 \uparrow + 4H^{+} + 4e^{-}$	Katotta Hidrojen $2H_2O + 2e^{-} \rightarrow H_2 \uparrow + 2OH^{-}$
Klor var ise Anotta Klor: $2Cl^{-} - 2e^{-} \rightarrow Cl_2 \uparrow$	Gazın İndirgenmesi $O_2 + 4H^{+} + 4e^{-} \rightarrow 2H_2O$

2.13.5.2 Elektrokoagülasyon prosesinin avantajları ve dezavantajları

EC’de koagüle edilen partiküller atık sularda bulunan mikro koloidal partikülleri ve iyonları kendilerine doğru çekerek absorbe etmektedir. Oluşan yumaklar hem çökelmekte hem de elektroflotasyonda oluşan gazlar yardımıyla su yüzeyine

kaldırılabilir. Bu yöntem renk, askıda katı madde ve ağır metallerin atıksulardan giderilmesinde kullanılmaktadır.

Diğer atıksu arıtım işlemlerine göre EC prosesinin avantaj ve dezavantajları yıllarca gerçekleştirilen birçok bilimsel projede ortaya konulmuş olup, bu avantaj ve dezavantajlar aşağıda sıralanmıştır (Mollah vd., 2001).

EC'nin avantajları;

- EC, basit ekipman gerektirir ve çalışma sırasında karşılaşılan çoğu sorunu kolaylıkla tolere edebilir.
- EC ile arıtılmış atıksular berrak, renksiz ve kokusuzdur.
- EC'nin oluşturduğu çamur, temel olarak metal oksitler / hidroksitlerden oluştuğu için kolayca sudan ayrılabilir, düşük çamur üretimine sahiptir.
- EC tarafından oluşturulan floklar, kimyasal floklara benzer, ancak flokların daha büyük, daha az bağlanmış su içeriği, aside dayanıklı ve daha stabil olmaları sayesinde filtrasyon işlemi ile kolayca ayrılır.
- EC, kimyasal işlemlerle karşılaştırıldığında daha az toplam çözünmüş katı madde (TDS) içeriğine sahiptir. Su tekrar kullanılacaksa, geri kazanım maliyetine katkıda bulunacaktır.
- EC işlemi, en küçük kolloidal partikülleri sudan ayırma kabiliyetine sahiptir, uygulanan elektriksel alan onları daha hızlı harekete geçirir, böylece pıhtılaşmayı kolaylaştırır.
- EC süreci fazla kimyasal kullanımından kaçınır ve bu nedenle kalıntı kimyasalları nötralize etme sorunu yoktur ve fazla kimyasal kullanılmadığından bu maddelerin neden olduğu ikincil kirlenme olasılığı yoktur.
- Elektroliz sırasında üretilen gaz kabarcıkları kirletici maddeyi daha kolay konsantre edebilecek, toplanabilecek ve ayrırabilecek yer olan çözeltinin yüzeyine taşıyabilecektir.
- EC hücresindeki elektrolitik işlemler, hareketli parçaları olmadan elektrikle kontrol edilir, böylece daha az bakım gerektirir.

EC'nin dezavantajları;

- Anot elektrotlar oksidasyon sonucu atıksu içerisinde çözünüp tükendiğinden düzenli olarak değiştirilmeleri gerekir.
- Elektrik kullanımı birçok yerde pahalı olabilir.
- EC'de verim kaybına neden olan katot üzerinde geçirimsiz bir oksit film tabakası oluşabilir.
- Atıksuyun yüksek iletkenliğe sahip olması istenir.
- Bazı durumlarda çözünebilir maddeler hidroksit şeklinde çökebilir.

2.13.5.3 Elektrokimyasal arıtım prosesini etkileyen faktörler

Elektrokimyasal arıtım proses verimini etkileyen parametreler pH, akım yoğunluğu, elektrolit ilavesi, elektrot malzemesi ve elektrotlar arası mesafe, sıcaklık, arıtım süresi olarak sıralanmaktadır. Bu parametrelerin elektrokimyasal uygulamasındaki etkileri aşağıda özetlenmiştir.

pH: Ortam pH'sı elektrokimyasal prosesinde arıtım süresince sürekli olarak değişmektedir. Bazı çalışmalarda geniş pH aralığında istenilen verim elde edilmekte ve sistemde başlangıç pH ayarlamasına ihtiyaç duyulmamaktadır. Fakat bazı çalışmalarda istenilen arıtım performansı için uygun pH değerinin belirlenmesi ve ayarlanması zorunludur.

Asidik şartlarda, elektrokimyasal prosesi çıkış suyunda pH'da artış görülürken, alkali şartlarda pH'da azalma meydana gelmektedir. Asidik şartlarda pH'deki artış sadece katotlardaki hidrojenden oluşmaktadır. Buna ek olarak asidik şartlarda karbondioksit aşırı doygunudur ve ortamdan uzaklaşması ile pH'da artış olmaktadır. Ayrıca ortamda Cl^- ve SO_4^{2-} olması durumunda, metal hidroksit oluşumu sırasında OH^- iyonları ile yer değiştirerek serbest kalan OH^- iyonlarının ortam pH'ını artırmaktadır.

Alkali şartlarda, pH 9'dan büyük olduğunda pH'da düşüş meydana gelmektedir. pH'daki düşüş, çözünen metal iyonları ve ortamda oluşan $\text{Al}(\text{OH})_3$ 'ün ortamda fazla olan OH^- iyonlarıyla tepkime vermesiyle açıklanmaktadır. Bu durum, elektrokimyasal prosesinin çıkış suyunu nötralize edebilmesine olanak sağlamaktadır. Giriş atıksuyunun başlangıçta asidik olması ve Cu^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} ve

Cr^{3+} gibi iyonik metal türleri içermesi durumunda, pH artışı ile çökeltme veriminin artması sayesinde iyonik metal türlerin giderimin de iyileşme görülmektedir. Arıtım performansı hem başlangıç pH'ına hem de son durumdaki pH değerine bağlıdır (Pekel, 2013).

Akım yoğunluğu: Elektrokimyasal arıtım reaktör ünitesinin büyüklüğünü elektrotlardan çözünen Al^{3+} veya Fe^{2+} iyonlarının miktarını belirlemektedir. Alüminyum için elektrokimyasal eşdeğer kütle 335,6 mg/A-saat, demir için ise bu değer 1041 mg/A-saat'tir. Büyük akım değerleri küçük bir elektrokimyasal ünitesini ifade etmektedir.

Çok büyük akım değerleri kullanıldığında, elektrik enerjisinin suyun ısıtılması için kullanılma olasılığı oldukça yüksektir. Daha önemlisi, çok büyük akım yoğunluğu değeri akım veriminde önemli bir düşüşe sebep olmaktadır. elektrokimyasal sisteminin uzun süre bakım gerektirmeden kullanılabilmesi için akım yoğunluğu değerinin 20–25 A/m² arasında olması önerilmektedir.

Akım yoğunluğu seçimi, yüksek akım verimi sağlamak üzere pH, sıcaklık ve debi gibi diğer işletme parametreleri ile birlikte yapılmalıdır. Alüminyumda akım veriminin %100'ün üzerinde olması özellikle ortamda Cl^- iyonları mevcut iken çukur korozyon etkisi nedeniyle. Akım verimi akım yoğunluğunun yanı sıra anyonların türüne de bağlıdır. Arıtılan suyun kalitesi üretilen iyonların miktarına (mg) veya yük yüklemesine bağlıdır (Chen, 2004).

Araştırmacılar akım yoğunluğu ve süre etkisinin birbirine benzer olduğunu, bu iki değişken işletim parametresinin tek bir değişken ile ifade edilebileceğini, bu tek değişkeninde yük yükleme kavramı (F/m³) ile açıklandığını ve proses optimizasyon çalışmalarını büyük ölçüde kolaylaştıracağını ifade etmişlerdir (Koby vd., 2003).

Akım yoğunluğu veya yük yükleme değeri deneysel olarak bulunabilmekte ve her deneysel çalışmada gerekli kritik bir yük yükleme değeri oluşmaktadır. Yük yükleme kritik değere geldiğinde çıkış suyu kalitesi daha sonraki akım göstermeyecek anlamına gelmektedir (Chen, 2004).

Elektrolit İlavesi: Elektrokimyasal arıtım verimini arttırmak ve atıksuyun iletkenliğini istenilen seviyeye getirmek amacıyla sodyum nitrat, sodyum sülfat gibi

inert tuzlar, sodyum klorür ve potasyum bromür gibi halojenli tuzlar kullanılmaktadır. Yüksek iletkenlik, yüksek çözünürlük, düşük klorür maliyeti ve aktif klorun güçlü oksitleme özellikleri nedeniyle destekleyici elektrolit ve elektrokimyasal prosesler için klorür reaktantının bir kaynağı olarak genellikle sodyum klorür kullanılmaktadır. Bu elektrolit tekstil boyama prosesinde yaygın olarak kullanılmakta ve atıksuda doğal olarak bulunmaktadır (Akbaş, 2014).

Klorür iyonları ortamda bulunan HCO_3^- , SO_4^{2-} gibi anyonların olumsuz etkilerini azaltmaktadır. Karbonat ve sülfat iyonları elektrot yüzeyinde izole bir tabaka oluşturacak şekilde Ca^{2+} veya Mg^{2+} iyonlarının çökmesine neden olmaktadır. Oluşan bu tabaka elektrotlar arası potansiyeli arttırmakta ve akım verimini azaltmaktadır. Su ve atıksu arıtımında elektrokoagülasyon prosesinin verimli bir şekilde yürütülebilmesi için ortamda bulunan anyonların %20'sinin klorür iyonu olması önerilmektedir. Ayrıca sodyum klorür ilavesi iletkenliği artırdığı için güç tüketimini azaltmaktadır (Chen, 2004).

Elektrot malzemesi ve elektrotlar arası mesafe: Kirleticilerin hangi metal hidroksitlerle giderileceği seçilecek elektrot türü ile belirlenir. Yaygın olarak demir, alüminyum ve çelik elektrotlar kullanılmaktadır. Arıtılacak suyun kompozisyonuna bağlı olarak farklı elektrot türleri ile istenen arıtma verimi sağlanabilmektedir.

Genel olarak, elektrot çiftleri anot ve katotta aynı elektrot malzemesinin kullanılması ile oluşturulur. Bunun dışında, alüminyum ve demir elektrotların anot ve katot çifti oluşturduğu sistemler de geliştirilmiştir. Anot materyali olarak demir ve alüminyum kullanıldığı, katotta ise çözünmeyen grafit, titanyum gibi elektrot materyalleri de kullanılmıştır.

Demir ya da çelik elektrot kullanılması durumunda kirletici maddelerin metal hidroksitlere adsorbsiyonuna ilaveten anotta kısmi direkt oksidasyon ve katotta indirgenme gerçekleşmektedir.

Suda önemli miktarda Ca^{2+} veya Mg^{2+} iyonları bulunuyorsa katot malzemesi olarak paslanmaz çelik kullanılması tavsiye edilmektedir (Chen, 2004).

Elektrokimyasal arıtım prosesi için uygun elektrot materyalinin seçiminde dikkate alınması gereken hususları aşağıdaki gibi özetlemiştir (Aygün, 2012).

Elektrot materyali elektrokimyasal olarak oksitlenmeli ve suda çözünmelidir, Metal hidroksitler düşük çözünürlük çarpımına sahip olmalıdır. Böylece çözeltideki kalıntı miktarı en alt düzeye çekilmiş olur. Alüminyum ve demir hidroksitler için K_{çç} değerleri: Al(OH)₃, 5×10^{-33} ; Fe(OH)₂, $1,8 \times 10^{-15}$; Fe(OH)₃, 6×10^{-38} . Demir hidroksitlerden Fe(OH)₃ daha düşük K_{çç} değeri sayesinde daha verimlidir.

Isı şeklinde ortaya çıkan enerji kaybını azaltmak için elektrot materyali, yüksek elektriksel iletkenlik özelliğine sahip olmalıdır. Alüminyum ve demir için 273 K'de elektriksel iletkenlikler sırasıyla $4,14 \times 10^7$ S/m ve $1,17 \times 10^7$ S/m'dir.

Elektrot materyali ucuz ve kolay temin edilebilir olmalıdır. Elektrot materyali toksik olmamalıdır.

Elektrotlar arası mesafenin, elektrokimyasal prosesinin arıtım performansı üzerine etkisi diğer faktörlerle karşılaştırıldığında ihmal edilebilecek düzeydedir. Elektrotlar arası mesafe arttırıldığında potansiyel fark ve buna bağlı olarak elektrik tüketimi artmaktadır. Bununla birlikte elektrotlar arası mesafenin ne çok az ne de çok fazla olması istenir.

Uygun mesafenin sağlanması ile elektrokimyasal prosesi istenen performansta çalıştırılır. Çok yakın olduğunda flok oluşumu ve oluşan flokların adsorplama yetenekleri az olur. Çok uzak olduğunda potansiyel farktaki artışa bağlı olarak elektrokoagülasyon prosesi ekonomik bir çözüm olmaktan uzaklaşır.

Sıcaklık: Elektrokimyasal arıtım prosesinde diğer tüm kimyasal proseslerde olduğu gibi sıcaklığın artması reaksiyon hızını arttırmaktadır. Ancak sıcaklığın çok yüksek değerlere ulaşmasıyla iyon hareketinin artması yumak ve metal hidroksit floklarının tekrar çözünmesine buna bağlı olarak da veriminin azalmasına neden olmaktadır (Türkoğlu, 2007).

Akım veriminin 60°C sıcaklığa kadar artması elektrot yüzeyindeki alüminyum oksit filmin bozunmasıyla artan aktiviteye bağlanmaktadır. Sıcaklığın çok daha yüksek değerlere ulaşması elektrot yüzeyinde birikmeye daha elverişli flokların oluşumuna yol açmaktadır. Bunun yanı sıra sıcaklığın artması ile iletkenlik artmakta dolayısıyla enerji tüketimi azalmaktadır (Chen, 2004).

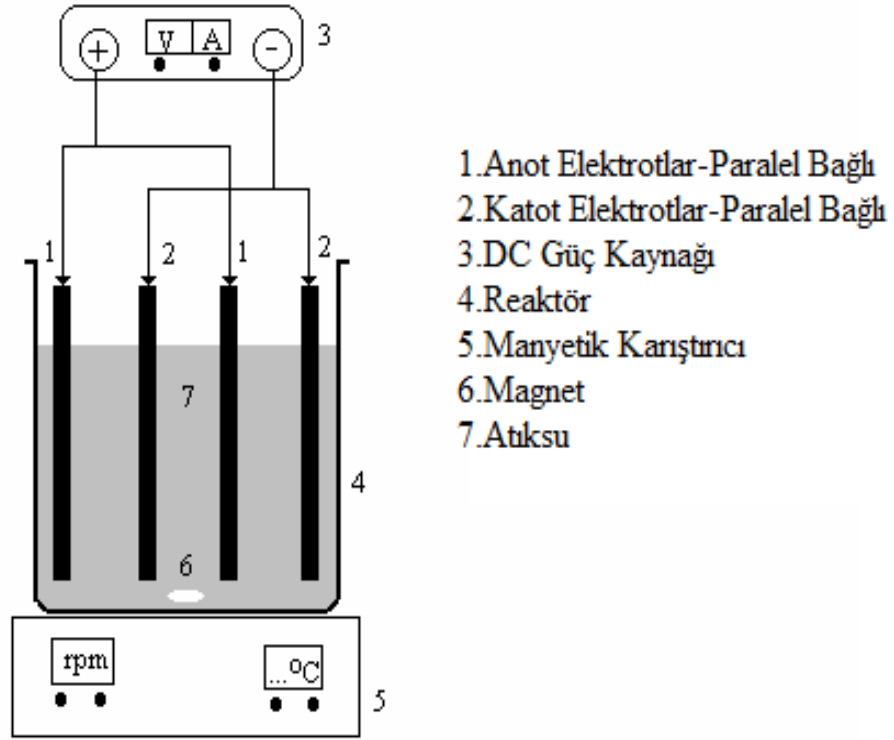
Arıtım süresi: Elektrokimyasal proseslerde kirleticilerin türü ve konsantrasyonu arıtım süresine etki eden en önemli faktörlerdir. Gerekenden az bir arıtım süresi uygulandığında ihtiyaç duyulan verim sağlanamayabileceği gibi uzun süreli arıtmalar ise maliyeti artıracak gibi çamur ve köpük oluşumu problemlerine sebep olmaktadır (İlhan vd., 2007).

Yapılan çalışmalar ile elektrokimyasal için belirlenen optimum arıtım süresinden sonra sürenin arttırılması ile kirletici giderim veriminde iyileşme meydana gelmemekte ve genellikle sabit kalmaktadır (Pekel, 2013). Buna karşın Yang ve McGarrahan (2005), alüminyum elektrot kullanılması durumunda optimum renk gideriminin elde edildiği elektroliz süresinden sonra oluşturulan metal hidroksitler tarafından adsorplanan boyarmadde moleküllerinin pH'daki değişim, flokların çözünmesi gibi sebeplerden dolayı tekrar suya geçmesiyle süre artışına bağlı olarak verimde önemli bir düşüş tespit etmiştir.

Elektrot bağlantı şekilleri: Bir elektrokimyasal reaktörü en basit yolla elektrolit içine daldırılmış bir anot, bir katot ve bunların bir güç kaynağına bağlanmasıyla oluşturulmaktadır.

Anot materyali oksidasyon nedeniyle elektrokimyasal çözünmeye maruz kalacaktır, katot materyali ise pasivasyona maruz kalacaktır. Ancak, bu düzenleme atıksu arıtımı için uygun değildir, çünkü uygulanabilir bir metal çözünme hızı için, geniş yüzey alanına sahip elektrotların reaktörde, kullanılması gerekmektedir.

Etkin metal çözünme hızı, paralel veya seri bağlantılarda monopolar elektrotlu hücreler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Çift anot ve katotdan ibaret paralel bağlı bir monopolar EC reaktörü Şekil 2.10'da görülmektedir (Mollah vd., 2001).

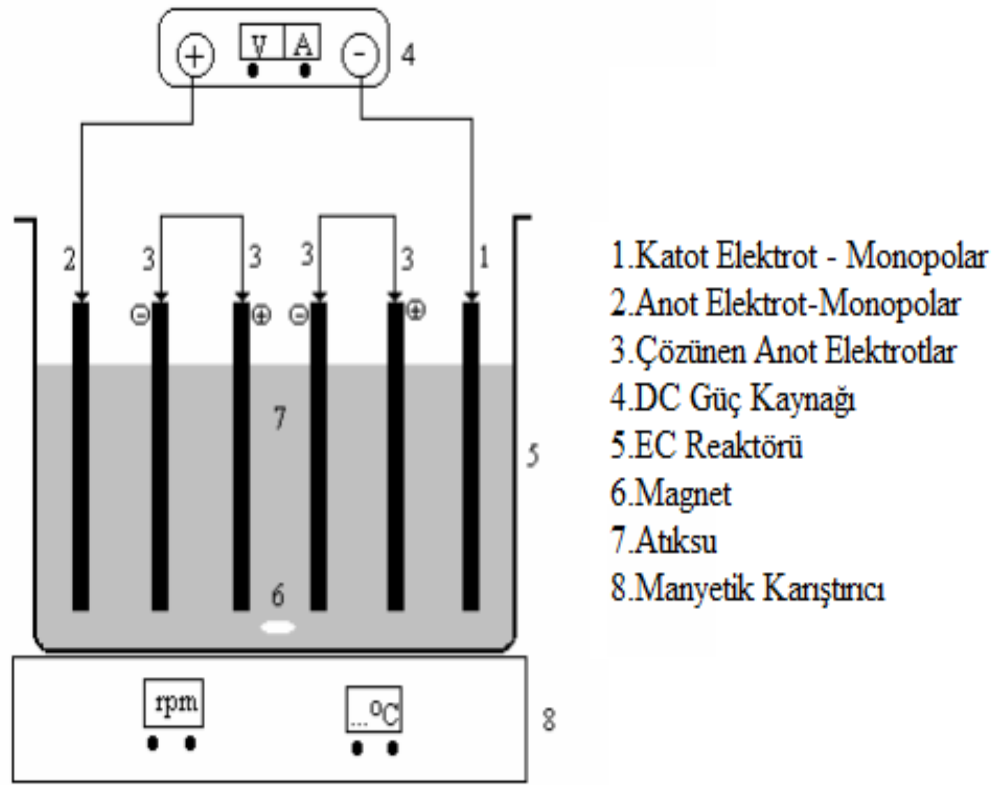


Şekil 2.10. Paralel bağlı monopolar EC reaktörü.

Tek kutuplu (monopolar) elektrotların seri bağlanması ile Şekil 2.11’de gösterilen elektrokoagülasyon reaktörü ortaya çıkmaktadır.

Şekil 2.11’de gösterildiği gibi, monopolar bir reaktörde birbirine paralel iki elektrot, bir DC güç kaynağı arasına yerleştirilmektedir. Anot elektrotlar kendi aralarında katot elektrotları kendi aralarında birbirleriyle bağlıdır.

Seri bağlı tek kutuplu (monopolar) elektrokoagülasyon reaktörü Şekil 2.11 ’de görüldüğü gibi her bir tükenen veya çözünen anot elektrot çiftleri birbirine bağlanmaktadır. Diğer taraftan monopolar anot ve katot elektrotlar bir güç kaynağına bağlıdır. İçteki çözünen anot elektrotların en dıştaki monopolar anot veya katot elektrotlar ile bir bağlantısı bulunmamaktadır.

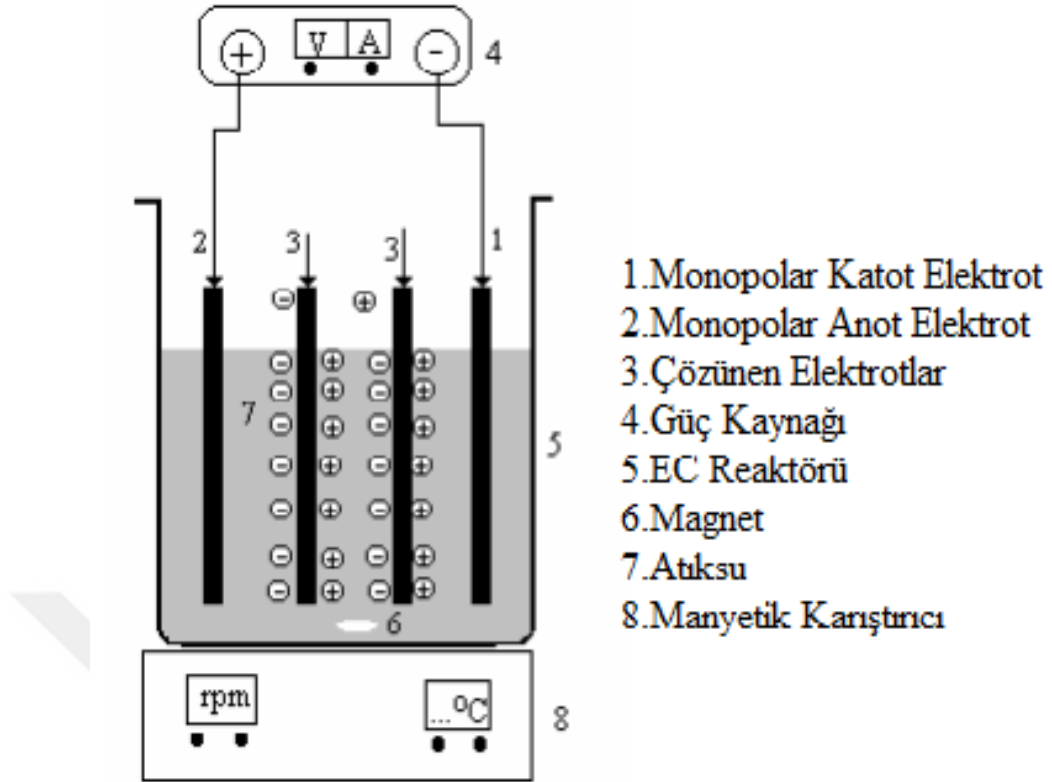


Şekil 2.11. Seri bağlı monopolar EC reaktörü.

Seri bağlı monopolar EC reaktöründe, reaktör içerisinde belirli bir akımın geçmesi için daha yüksek bir potansiyel farkı gereklidir, çünkü seri halde bağlanan elektrotlar daha yüksek bir dirence sahiptir.

Uygulanan akım, reaktör içerisinde her yerde aynı değerdedir. Öte yandan, paralel düzenlemede elektrik akımı, hücrelerin direncine bağlı olarak tüm elektrotlar arasında bölünmüştür.

Bir diğer elektrotları yerleştirme şekli ise elektrotların çift kutuplu(bipolar) olarak bağlanmasıdır. Bu durumda, bir DC güç kaynağına bağlı anot ve katot arasına harcanan elektrotlar, Şekil 2.12’de gösterildiği gibi, hiçbir elektrik bağlantısı olmayacak şekilde paralel olarak yerleştirilir.



Şekil 2.12. Paralel bağlı bipolar EC reaktörü.

Bu şekilde bağlı reaktör, öncelikle basit kurulum ve kullanım sırasında kolay bakım yapılmasını sağlar. İki elektrot içinden elektrik akımı geçtiğinde, iletken plakanın nötr tarafları, yanındaki paralel tarafla karşılaştırıldığında zıt yük ile yüklenir. Yani ortadaki çözünen bağımsız anot elektrotların bir yüzü anot diğer yüzü katot gibi davranmaktadır (Mollah vd., 2001).

Elektrokoagülasyon reaktörlerinde hem doğru akım (DC) hemde alternatif akım (AC) uygulanmaktadır. DC akımın çeşitli dezavantajları vardır. Doğru akım elektrokoagülasyon teknolojisinde; oksitlenmeden kaynaklı anot materyalinde bir çözünmeye sebep olurken, aynı zamanda katotta su geçirmeyen bir oksit tabakasının oluşmasına sebep olmaktadır. Bundan dolayı elektrokoagülasyon reaktöründe verim kaybına neden olmaktadır.

Akım kayıplarını azaltmak için EC reaktöründe çözünen paralel plaka elektrotlar eklenmektedir. Ancak birçok elektrokoagülasyon işleminde alternatif akım tercih edilmektedir (Mollah vd., 2001; Delipinar, 2007).

Elektrokimyasal arıtım da elektrotların anot tarafında anodik katot tarafında ise katodik reaksiyonlar meydana gelmektedir. Elektrotların iyon oluşturduğu sistemde demir ve alüminyum gibi çözünen metal levhalar kullanılabilir. Ortamda çözünen demir ve aliminyum levhalar çözeltide yüklü partikülleri nötralize ederek koagülasyon işleminin başlamasını sağlamaktadır.

Elektrotlardan çözünen iyonlar, kimyasal reaksiyon gerçekleşmesi ile koloidal maddelerin reaktör dibine çökmesine ve elektroflotasyonla reaktör yüzeyine doğru çıkmasına sebep olmaktadır. Ayrıca oluşan elektriksel alandan dolayı sudaki mevcut kolloidal partiküller, yağlar veya diğer bileşiklerin ayrılması da sağlanmaktadır.

Elektrokoagülasyon anot ve katot da meydana gelen reaksiyonlar sonucu ortamda oluşacak serbest radikal türleri, reaktör içindeki su ve bileşiklerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirebilir. Tüm bu karmaşık elektrokoagülasyon işleminde kirleticiler atıksulardan uzaklaştırılmış ve arıtım gerçekleştirilmiş olunur (Mollah vd., 2001).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Kot Kumaşı Üretim Tesisi Atıksuyu

Çalışmada kot kumaşı üretim tesisi atıksuyunun elektrokimyasal yöntemler ile renk ve KOİ giderim verimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışma süresince kullanılan atıksu Kayseri Organize Sanayi Bölgesinde faaliyet gösteren bir kot kumaşı üretim tesisi atıksu artıma tesisi dengeleme havuzu çıkışından temin edilmiş olup atıksu bileşimi Çizelge 3.1’ de verilmiştir.

Çalışmada renk (SM 2120 C), KOİ (SM 5220 C), BOİ (SM 5210 B), Toplam Azot (EN ISO 12260), Amonyum $\text{NH}_4\text{-N}$ (SM 4500), Klor (SM 4110 B), Toplam Krom (SM 3500-Cr C), Fosfat $\text{PO}_4\text{-P}$ (SM 4500 P), Sülfür (SM 4500 S^{2-} D), Metal analizleri (SM 3120 B), AKM (SM 2540 B), UAKM (2540 C), bulanıklık (SM 2130 B), iletkenlik (SM 2510 B), pH (SM 4500 H^+ B), analizleri gerçekleştirilmiştir (APHA, 2005).

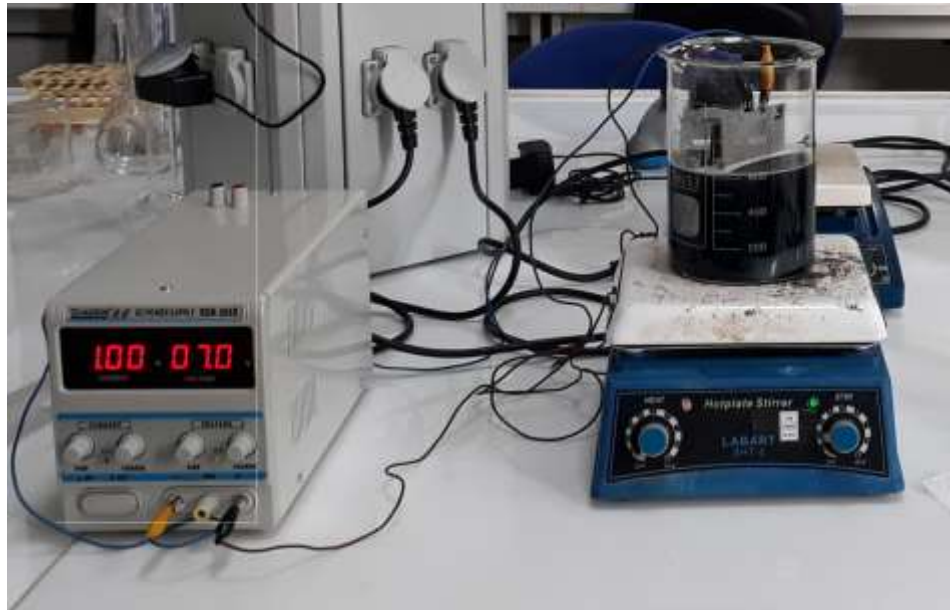
Çizelge 3.1. Atıksu bileşimi.

Parametreler	Değerleri
KOİ (mg/L)	714,75
BOİ (mg/L)	285
TOPLAM AZOT (mg/L)	2,167
AMONYUM $\text{NH}_4\text{-H}$ (mg/L)	7,95
KLOR (mg/L)	1,878
TOPLAM KROM (mg/L)	0,0634
FOSFAT $\text{PO}_4\text{-P}$ (mg/L)	14,5765
SÜLFÜR(S^{2-}) (mg/L)	0,33
AKM (mg/L)	96,875
UAKM (mg/L)	131,875
BULANIKLIK (NTU)	14,655
İLETKENLİK ($\mu\text{S/cm}$)	4080
pH	8,27
RENK (Pt-Co)	1172,75

3.2 Elektrokimyasal Yöntemlerle Arıtılabilirlik Çalışmaları

Yapılan çalışma ile kot kumaşı için açık elyaf, iplik üretimi tesisi atıksularının 4 farklı elektrot (demir, alüminyum, paslanmaz çelik ve grafit) kullanılarak elektrokimyasal metotlarla kesikli olarak çalıştırılarak renk ve KOİ giderimi amaçlanmıştır. Elektrokimyasal arıtım işlemi cam ve 1000 mL elektrolit alma kapasitesine sahip 14,5 x 10,5 cm boyutlarındaki reaktörde gerçekleştirilmiştir. Kot kumaşı üretim tesisi atıksuyu giriş iletkenlik değeri 4080 $\mu\text{S}/\text{cm}$ olup yüksek iletkenliğin elektrotlar arası potansiyelin düşmesine ve anodik oksidasyonun azalmasına bunların sonucu olarak da renk giderim verimin düşmesine neden olduğundan (Karagözoğlu ve Malkoç, 2017); deneyler öncesinde atıksu 1/1 hacimsel oranda distile su ile seyreltilerek tüm deneylerde ham atıksu olarak kullanılmıştır.

Reaktörde 1 anot 1 katot olmak üzere toplam 2 adet monopolar seri bağlı demir, alüminyum, paslanmaz çelik ve grafit plaka elektrotlar kullanılmıştır. Elektrotlar 1 cm aralıklarla yerleştirilmiştir. Elektrotların boyutları 10 cm x 7 cm olup, 5,5 cm x 7 cm'lik kısmı elektrolite batmış durumdadır. Aktif yüzey alanı 38,5 cm^2 'dir. Reaktördeki kullanılan akım Zhaoxin RXN-305D marka güç kaynağı ile sağlanmıştır. Reaktördeki karıştırma işlemi Labart SHT-5 marka manyetik karıştırıcı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1' de deney düzeneği, Çizelge 3.2' de Elektrokimyasal arıtım çalışma koşulları verilmiştir.



Şekil 3.1. Kot kumaşı üreten tesis atıksuyu arıtımı için deney düzeneği.

Çizelge 3.2. Elektrokimyasal arıtım çalışma koşulları.

Özellikler	Kesikli Elektrokimyasal Prosesi
Reaktör Hacmi (mL)	1000
Reaktörde Kullanılan Atıksu Hacmi (mL)	500
Reaktör Boyutları (cm)	14,5 x 10,5
Kullanılan Elektrot Sayısı (adet)	2
Elektrotların Boyutları (cm)	7x10
Kullanılan Anot Sayısı (adet)	1
Kullanılan Katot Sayısı (adet)	1
Aktif Elektrot Yüzey Alanı (cm ²)	7 x 5,5=38,5
Elektrotlar Arası Mesafe (cm)	1
Elektrotların Bağlantı Şekli	MP-S
Kullanılan Anot Elektrot Materyali	Demir, Alüminyum, Çelik, Grafit
Kullanılan Katot Elektrot Materyali	Demir, Alüminyum, Çelik, Grafit
DC Akım Aralığı (A)	0-2
DC Voltaj Ölçüm Aralığı (V)	0-20

3.3 Renk Ölçüm Yöntemleri

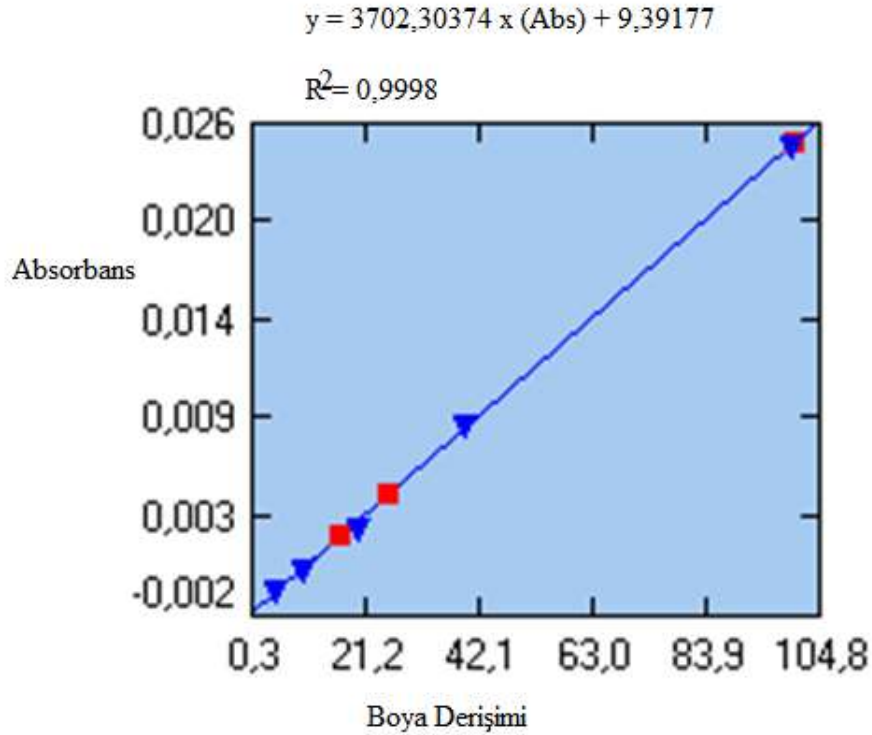
Ülkemizde atıksu arıtımının yasal mevzuatı olan Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliğinde 24.04.2011 tarih 27914 sayılı Resmî Gazete ile renk parametresi deşarj kriterleri Pt-Co olarak belirtilmiştir. Tez çalışmamızda tüm deneysel sonuçlar Pt-Co biriminde verilmiş olup renk sayısı RES 436 nm, RES 525 nm ve RES 620 nm cinsinden ölçümler EK A'da verilmiştir.

3.3.1 Spektrofotometrik metot

Spektrofotometrik renk ölçümünde renk, absorbans ya da tutulan ışığın fiziksel rengi demektir. Spektrofotometre yardımıyla rengin absorplama miktarı tespit edilir ve renklilik miktarı hassas bir şekilde ölçülür.

Renk (kırmızı, yeşil, sarı vb.) “baskın dalga boyu” terimi ile parlaklık derecesi “luminans” terimi ile doygunluğu ise “saflık” terimi ile ifade edilir ve filtre edilmiş numunenin ışık geçirgenliği karakteristiğinden spektrofotometre yardımıyla tespit edilir. Spektrofotometrik Standart eğrinin oluşturulabilmesi için 450 ve 465 nm arasında dalga boyu seçilmektedir (APHA, 2005).

Çalışma öncesinde dalga boyu taraması yapılmıştır. Atıksuyun dalga boyu Pt-Co absorbansının maksimum dalga boyu aralığı içinde olduğu 456 nm seçilerek hazırlanan 5,10,20,50 ve 100 CU (renk ünite) standartlarına göre kalibrasyon eğrisi oluşturulmuştur. Kalibrasyon eğrisi Şekil 3.3’ de verilmiştir.



Şekil 3.2. Kalibrasyon eğrisi.

3.3.2 RES analizinin yapılışı (EN ISO 7887)

Renk ölçümünde RES metodu ile üç farklı dalga boyunun kullanılmasının amacı; 400-500 nm bandında sarı ve tonları, 500-600 nm bandında kırmızı ve tonları, 600-700 nm bandında ise mavi ve tonlarının absorbans vermesinden kaynaklanmaktadır. Bu metoda göre 400-700 nm bandında dalga boyu arttıkça renkler koyu tonlarına doğru geçiş göstermektedir.

EN ISO standardında ölçülen RES değeri eğer 10 m^{-1} 'den daha düşük değerlerde (düşük renklilik) ise, kullanılan küvet genişliğinin 10 mm 'den daha fazla olması gerektiği vurgulanmaktadır. Eğer elde edilen sonuçlar 10 m^{-1} 'den daha düşük olursa RES ölçümünde 1 inç ($25,4 \text{ mm}$) kalınlığında olan (daha fazla numune hacmi alan) küvet kullanılır (Tübitak, 2013).

Bu metotta söz konusu olan renk, numunenin filtreden süzülmesinden sonra ölçülen gerçek renktir. Bir su numunesinin renginin şiddeti, en yüksek maksimum absorpsiyonlarının görüldüğü dalga boylarındaki ışık absorpsiyonları ile karakterize edilir. Renk gideriminin bir spektrofotometre yardımıyla ölçülmesiyle de niceleyici olarak belirlenir. 1994 yılında yayınlanan uluslararası Avrupa Normu EN ISO 7887'ye göre endüstriyel atıksuların rengini belirleyebilmek için görünür ışık spektrumu içinde yer alan üç farklı dalga boyu seçilmiştir ve bu dalga boyları ve getirilen sınır değerleri şu şekildedir:

$$\lambda(1)=436 \text{ nm (Sarı):} 7 \text{ m}^{-1}$$

$$\lambda(2)=525 \text{ nm (Kırmızı):} 5 \text{ m}^{-1}$$

$$\lambda(3)=620 \text{ nm (Mavi):} 3 \text{ m}^{-1}$$

Renklilik sayısı (RES) göre 436 nm 'de ölçüm zorunludur. Diğer dalga boyları olan 525 nm ve 620 nm ise belirlenen değerlerde çok az sapmalar olabilir. Ölçümden önce çözünmemiş maddelerin girişimini önlemek için su numunesi mutlaka filtre ya da santrifüj edilmelidir. Sudaki mevcut bulanıklık içindeki kil, silt, parçalanmış organik ve inorganik maddeler, çözünmüş renkli organik bileşikler, plankton ve mikroskobik organizmaların meydana getirdiği askıdaki katı maddelerden kaynaklanır. Bulanıklık, çözeltide ışığın saçılma ve absorbe olmasına neden olan optik bir özelliktir.

Renk parametresinin kabul edilen metotlarla ölçülebilmesi için, analizden önce atıksu içerisindeki bulanıklığın giderilmesi gerekmektedir. Dikkat edilmesi gerek husus bulanıklık gidermek için kullanılan yöntemler suyun rengi gidermemelidir. Bazı filtrasyon teknikleri (özellikle membran filtre kağıtları kullanımında), bulanıklıkla beraber gerçek rengin bir kısmını da giderebilmektedir. Bu yüzden filtre kâğıdı seçimlerine dikkat edilmelidir.

Bulanıklık giderimi için uygulanan diğer bir proses ise santrifüj uygulamasıdır. Santrifüj uygulanması ile bazı filtre kağıtları ile yapılan filtrasyonun sebep olduğu dezavantaj önlenebilmekte, ancak numunenin yapısı ve boyutu, santrifüjün hızı, gibi faktörlerde santrifüjleme işlemini olumsuz etkileyebilmektedir. Numunenin seyrelmesi gerektiğinde, ölçülen renk değerinde farklılıklar olabilmektedir. Burada konu edilen metotların her biri ön işlem olarak kullanılabilir. Sonuçlar rapor edilirken mutlaka hangi ön işlemin kullanıldığının belirtilmelidir (Sesler, 2014).

Analizi yapılacak numuneler ilk önce süzme işlemine tabi tutulur. Spektrofotometre cam küveti (10 mm veya 25,4 mm) numune ile yıkanır. Daha sonra numune kullanılan cam küvete aktarılır. Cam küvetin dış kısmı yumuşak kâğıt bir peçete ile iyice silinmelidir ki cam küvetin dışında herhangi bir parmak izi veya leke kalmamalıdır.

Spektrofotometrede sırasıyla 436, 525 ve 620 nm dalga boylarında numunenin absorbans değerleri ölçülür ve kaydedilir (Tübitak, 2013).

3.4 Deneysel Kurgulama

Elektrokimyasal yöntem ile renk gideriminin incelendiği çalışma iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında kot kumaşı üretim tesisi atıksuyu Fe, Al, grafit ve paslanmaz çelik elektrotların her biri anot ve katotda kullanıldığı 16 farklı kombinasyonda giderim verimleri araştırılmıştır. Bu amaçla öncelikle atıksu ve elektrot malzemesi için proses verimi üzerinde doğrudan etkili olan akım, pH, seyrelme gibi parametreler sabit tutularak en uygun elektrot tipi belirlenmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise, en uygun arıtım verimi sağlayan Fe ve paslanmaz çelik elektrotları için optimum deney şartları (pH, akım, süre, elektrotlar arası mesafe, iletkenlik ve elektrot bağlantı şekli) belirlenerek arıtım verimi incelenmiştir. Bütün deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

Reaktörde kullanılan elektrotlar her deney sonrası 0,25 M H₂SO₄ asit çözeltisinde 5 dakika bekletilerek yüzeylerinin temizlenmesi sağlanmıştır. Saf su ile yıkanan

elektrotlar 100°C etüvde kurutulmuş, desikatörde sabit tartıma hazır hale getirilerek bir sonraki deney düzeneği için hazırlanmıştır.

Deneylein yapıılışında WTW CR 4200 marka termoreaktör, pH ile iletkenlik ölçümlerinde HACH HQ440d marka multimetre, elektrotların tartımında AND Gf-600 marka hassas terazi, renk ölçümünde spektrofotometre (TETRA T80+ UV/VIS) kullanılmıştır.

3.5 Hesaplamalarda Kullanılan Eşitlikler

Akım Yoğunluğu: Elektrodun yüzeyinden geçen birim akıma denir (Göç, 2018). Akım yoğunluğunu hesaplama kullanılan eşitlik (Zoroğlu, 2019);

$$J = \frac{I}{A} \quad (3.1)$$

J: Akım yoğunluğu mA/cm², I: Akım Şiddeti mA, A: Aktif Anot yüzey alanı cm²

Akım verimi: Anotta çözünen maddenin mol miktarı olup Faraday kanunuyla heplanır. ‘m’ ile gösterilir (Yaşar, 2018).

$$m = \frac{I \cdot t}{n \cdot F} \quad (3.2)$$

m: Akım Verimi, I: Akım Şiddeti(Amper), t: zaman (saniye), n: iyon yükü (Alüminyum için +3, Demir için +2), F: Faraday Sabiti (96485 C mol⁻¹).

M_A: Molekül ağırlığı alüminyum elektrotlar için 26,982 gram, demir elektrotlar için 55,845 gram olarak alınır.

$$E = \frac{M_A}{M_{ATe}} \quad (3.3)$$

Anotta teorik çözünme miktarı M_{ATe} (gram) ise şöyle hesaplanır (Özyurt, 2018);

$$M_{ATe} = m \times (M_A) \quad (3.4)$$

E: Akım Verimi, M_A: Pratikte anot elektrottaki çözünme miktarı olup birimi gram’dır.

Toplam Çözünen Elektrot Miktarı (MT): Toplam çözünen elektrot miktarı şu şekilde hesaplanır (Aygün, 2012).

$$MT = MA + MK \quad (3.5)$$

M_K : Pratikte Katotda çözünme miktarı olup birimi Gram (g)'dır.

Enerji Tüketimi: Toplam harcanan elektrik enerjisidir. KiloWatt-saat (kWh) ile ifade edilir ve şu şekilde hesaplanır (Durmaz, 2018);

$$E = V \cdot I \cdot t \quad (3.6)$$

E: Elektrik Enerjisi (kWh), V: Volt, I: Akım şiddeti (A) t: Zaman (Saat)

Faraday/m³: Faraday hesaplanması;

$$\frac{\text{Faraday}}{m^3} = \frac{I \cdot t}{F \cdot v} \quad (3.7)$$

I: Akım Şiddeti (Amper), t: zaman (Saat), v: elektrolit hacmi (m³)

Arıtma Verimi: Arıtma verimi hesaplamasında kullanılan eşitlik (Sabuncu, 2018);

$$C_{KOİ}(\%) = \left(\frac{C_0 - C_e}{C_0} \right) \times 100 \quad (3.8)$$

$C_{KOİ}(\%)$ Yüzde olarak KOİ giderim verimi, C_0 : başlangıç kirletici konsantrasyonu (KOİ, mg/L), C_e : Arıtım sonrası kirletici konsantrasyonu (KOİ, mg/L)

$$C_{renk}(\%) = \left(\frac{\lambda_0 - \lambda_e}{\lambda_0} \right) \times 100 \quad (3.9)$$

$C_{renk}(\%)$: Renk giderim verimi, λ_0 : Seçilen Dalga boyundaki başlangıç absorbens değeri (Abs), λ_e : Arıtım sonrası seçilen absorbens değeri (Abs)

Elektrik Enerjisi Maliyeti: Elektrik kW saati 0,11570\$ olarak alınmıştır (URL-13).

$$\text{Elektrik Sarfıyatı} = \frac{0,11570\$}{1Kwh} \quad (3.10)$$

Elektrot Tüketim Maliyeti: Elektrokimyasal arıtım sonucu elektrot türüne bağlı olarak tükenen elektrot maliyeti değişkenlik göstermektedir. Buda işletme maliyetine doğrudan etki yapmaktadır (Aygün, 2012).

$$\text{Elektrot Tüketim Maliyeti} = M_{\text{Toplam}} \times \text{Birim Elektrot Maliyeti} \quad (3.11)$$

Birim elektrot maliyeti alüminyum elektrotlar kullanılması durumunda 5,5608 \$, demir elektrotlar kullanılması durumunda 0,6940 \$, çelik elektrotlar kullanılması durumunda 4,9621\$ ve grafit elektrotlar kullanılması durumunda ise 338,42 \$ olarak alınmıştır (URL-14; URL-15).

Toplam Arıtma Maliyeti: Toplam arıtma maliyeti hesaplanırken elektrik sarfıyatı ve toplam elektrot tüketim maliyeti dikkate alınmıştır (Aygün, 2012).

$$\text{Toplam Arıtma Maliyeti} = \text{Elektrik enerji M.} + \text{Elektrot Tüketim M.} \quad (3.12)$$

RES (Renklilik Sayısı): Spektrofotometrede sırasıyla 436 nm, 525 nm ve 620 nm dalga boylarında numunenin absorbans değerleri ölçülür ve kaydedilir. Ölçülen bu absorbans değerleri aşağıdaki denklemde yerine koyularak RES 436 nm, RES 525 nm ve RES 620 nm değerleri hesaplanır (Tübitak,2013).

$$\text{RES}(\lambda) = \frac{A}{d} \cdot f \quad (3.13)$$

A: λ dalga boyunda numunenin absorbans değeri (okunan absorbans) (cm^{-1})

d: Küvet kalınlığı (mm)

f: Spektral absorbans değerini m^{-1} biriminde elde etmek için faktör, $f=1000$

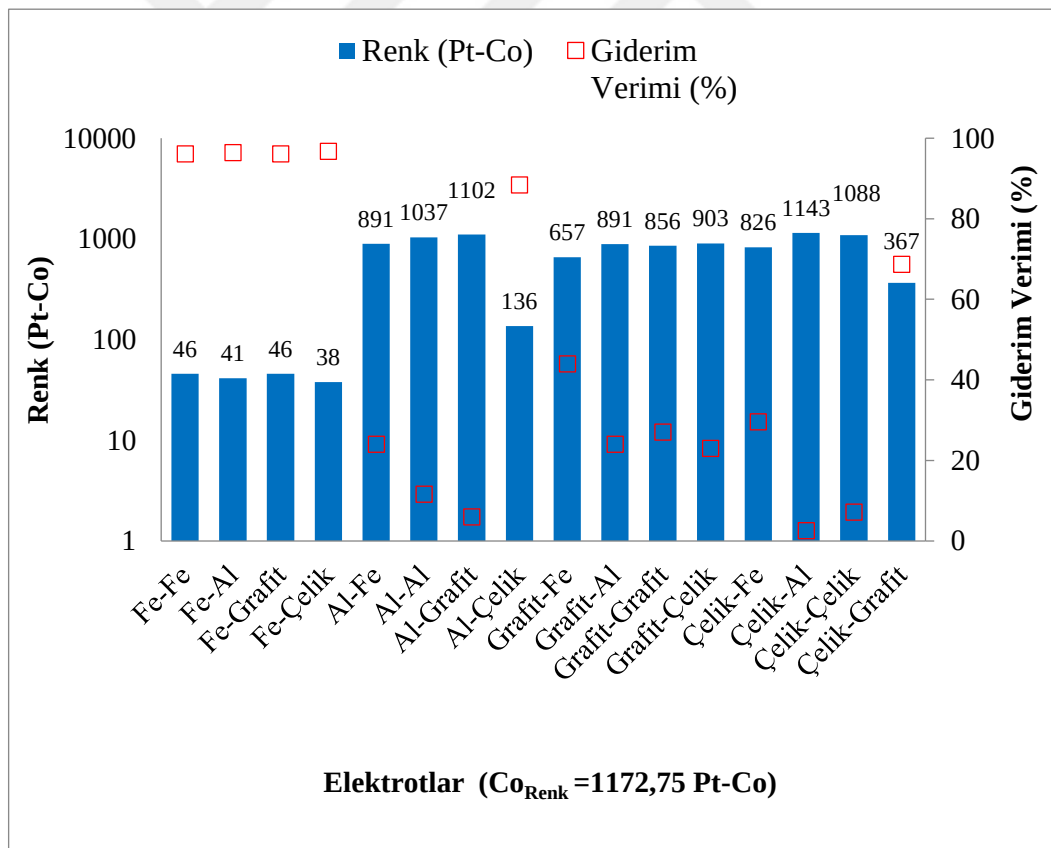
RES (λ): λ dalga boyundaki renklilik sayısı (RES) değeri (m^{-1})

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

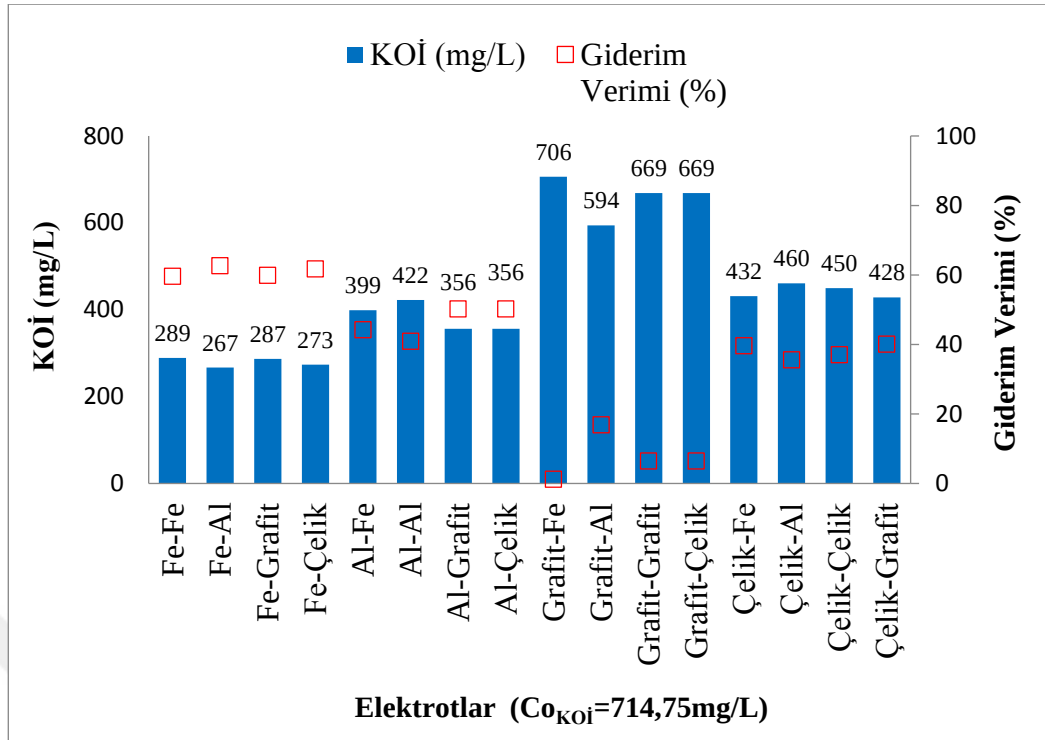
4.1 Elektrotların Seçimi

Çalışmanın ilk aşamasında, kot kumaşı üretim tesisi atıksuyun anodun elektrolitik oksidasyonuna dayanan, elektrokimyasal arıtım yöntemi ile renk giderimi incelenmiştir. Fe, Al, grafit ve paslanmaz çelik materyali anot ve Fe, Al, grafit ve paslanmaz çelik katot materyali olarak kullanılması ile iki basamaklı olarak yürütülen çalışmada her bir elektrot materyali için pH, bulanıklık, iletkenlik, akım ve voltajın giderim verimi üzerindeki etkisi belirlenmiştir.

Çalışmada ilk olarak Fe elektrot anot malzemesi olarak, Fe, Al, grafit ve paslanmaz çelik elektrotlarda sırasıyla katot malzemesi olarak kullanılarak pH 8.27, 1 amper akım değerinde 15 dakika reaksiyon süresi boyunca ve oda sıcaklığında elektrokimyasal arıtım verimleri incelenmiştir. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de farklı elektrot materyallerin renk ve KOİ giderim verimleri üzerine olan etkileri verilmiştir.



Şekil 4. 1. Farklı elektrot materyallerinin renk giderim verimi.



Şekil 4.2. Farklı elektrot materyallerinin KOİ giderim verimi.

Şekil 4.1 incelendiğinde 15 dakika reaksiyon süresi ve 1 amper akım değerinde anot elektrotu demir olarak katot elektrotu da demir, alüminyum, grafit ve paslanmaz çelik materyalleri olarak seçilerek yapılan 4 farklı çalışmaların tamamında renk giderim verimlerinin %95 'in üzerinde olduğu görülmektedir.

Kot kumaşı üreten tesis atık suyun arıtımında anot malzemesi grafit, katot malzemesi olarak da demir, alüminyum, grafit ve paslanmaz çelik kullanıldığında renk giderim verimlerinin diğer alternatiflere göre oldukça düşük olduğu görülmektedir.

Şekil 4.2 incelendiğinde 15 dakika reaksiyon süresi ve 1 amperlik akım değerinde KOİ giderim verimlerinin anot elektrotu olarak demir, katot elektrotu olarak da demir, alüminyum, grafit ve paslanmaz çelik seçildiğinde %55 üzerinde olduğu görülmüştür. En düşük KOİ giderim verimlerinin anot materyali olarak grafit, katot materyali olarak da demir, alüminyum, grafit ve paslanmaz çelik materyali seçildiğinde elde edilmiştir.

Koby vd., (2003), elektrokoagülasyon prosesi ile demir ve alüminyum elektrotlar kullanarak tekstil atıksuyun arıtımını incelemiştir. pH<6 asidik ortamda alüminyum elektrotlarda KOİ ve bulanıklık gideriminin demir elektrotlara göre daha yüksek olduğu, nötral ve alkali ortamda demirin kullanılmasını önermiştir.

Çalışmalarımızda kullanmış olduğumuz kot kumaşı üretim tesisi atıksuyunun elektrokimyasal prosesler ile arıtımında alkali ortamda demir elektrotların alüminyum elektrotlara göre KOİ ve renk gideriminde daha etkin olduğu gözlenmiş olup bu sonuçlar Kobya vd., (2003) yapmış olduğu sonuçlarla benzerlik göstermektedir.

Kabdaşlı vd., (2009), sentetik reaktif boyarmadde içeren atıksuyun artımını elektrokoagülasyon yöntemi ile alüminyum ve paslanmaz çelik elektrotlar kullanarak incelemiştir. Araştırmacılar paslanmaz çelik elektrot kullanarak arıtım verimini 60 dakika sonunda %99, Alüminyum elektrotlarda ise 90 dakika sonun da %86 olarak elde etmişler renk ve KOİ giderim verimlerinin elektrot materyaline bağlı olarak değişiklik gösterdiğini belirtmişlerdir. Özyonar ve Karagözoğlu (2011), içme sularında koagülasyon ve elektrokoagülasyon yöntemi ile bulanıklık giderimini incelemiştir. Monopolar paralel bağlantı şekli elektrokoagülasyon prosesinde elektrot türü, pH, akım yoğunluğu arıtım süresi işletim parametrelerinin arıtıma etkisini araştırmışlardır. Elektrokoagülasyon prosesinde alüminyum elektrotlarda %99, demir elektrotlarda ise %96 arıtım verimi elde etmişlerdir.

Manisankar vd., (2004), alkol üretim endüstrisi atıksularının elektrokimyasal arıtım prosesi ile artımı için anot malzemesi için anodize olmuş (1 M H₂SO₄ çözeltisinde 1 saat ve 1 A/m² yoğunluğunda tutulması ve dışarı alınıp saf su ile temizlenmesi) grafit ve katot için grafit malzemesi kullanıldığını giderim verimlerinin KOİ için %85,2 renk için %98 ile olduğunu ve elde edilen giderim verimlerinin sadece grafit kullanılan deneylerdeki sonuçlara göre daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Yapmış olduğumuz deneylerde grafit materyalinin anot olarak diğer elektrot materyallerinde katot materyali olarak kullandığımız elektrokimyasal arıtım prosesinde kot kumaşı üretim tesisi atıksuyunda renk ve KOİ’de en düşük giderim verimleri elde edilmiş olup, çalışmamıza konu olan atıksuyun arıtımda etkin rol oynamadığı görülmüştür.

Farklı elektrot materyalleri (demir, alüminyum, grafit ve paslanmaz çelik) ile yapmış olduğumuz arıtım çalışmalarına ait parametreler Çizelgeler 4.1-4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Demir-demir, demir-alüminyum, demir-grafit, demir-çelik çalışmalarına ait arıtım parametreleri.

Sabit parametreler:				
Giriş pH'ı 8,27, 4080 μ S/cm iletkenlik değerinde, 1 A Akım şiddetinde, Elektrot Boyutları 10x7 cm ² , Ekin Alan 38,5 A/cm ² , 15 dakika Reaksiyon Süresi, Elektrotlar arası mesafe 1 cm, Reaktör Hacmi 500 mL, Giriş Renk değeri 1172,75 pt-Co, Giriş KOİ değeri 714,75 mg/L, Giriş Bulanıklık değeri 14,67 NTU				
Parametreler	Elektrotlar (Anot-Katot)			
	Fe-Fe	Fe-Al	Fe-Grafit	Fe-Çelik
pH(s)	9,91	9,98	9,71	9,83
Son Bulanıklık, (NTU)	30,000	11,740	9,640	13,860
Renk Giderim Verimi, (%)	96,09	96,47	96,10	96,76
KOİ Giderim Verimi, (%)	59,58	62,69	59,89	61,76
Voltaj, (V)	9,3	9,3	9,3	9,7
Son İletkenlik, (μ S/cm)	4180	4170	4000	4050
Köpük Kalınlığı, (mm)	8	5	22	12
Akım Verimliliği, (%)	1,1477	1,1013	1,1747	1,3351
Anotta Kütle Kaybı, (g)	0,297	0,285	0,304	0,304
Katotta Kütle Kaybı, (g)	0,021	0,005	-0,091	-0,002
Enerji Tüketimi, (kWh/m ³)	4,7	4,7	4,7	4,9
Elektrot Maliyet, (\$)	0,20612	0,19779	0,21098	0,21098
Enerji Maliyeti, (\$)	0,538	0,538	0,538	0,561
Toplam İşletme Maliyeti, (\$)	0,744	0,736	0,749	0,772

Çizelge 4.1 incelendiğinde anot materyali olarak demir kullanılarak gerçekleştirilen deneyler sonucu renk giderim verimleri %90 üzerinde ve KOİ giderim verimlerinde %55'in üzerinde gerçekleştiği, kot kumaşı üretim tesisi atıksuyun arıtımında demir elektrotun anotta etkin rol oynadığı görülmektedir. Demir ve grafit elektrotlar kullanıldığında arıtım sonucu reaktör de 22 mm, demir ve çelik elektrot çiftinden ise 12 mm köpük kalınlığı oluşmuştur. Demir-demir, demir-alüminyum elektrot çifti ile yapılan çalışmalarda ise sırasıyla 8 ve 5 mm köpük kalınlıkları

oluşmuş ancak giderim verimlerinde diğer elektrot materyali ile yapılan çalışmalardan daha düşük değerler elde edilmiştir.

Çizelge 4.2. Alüminyum-demir, alüminyum-alüminyum, alüminyum-grafit, alüminyum-çelik çalışmalarına ait arıtım parametreleri.

Sabit parametreler: Giriş pH'ı 8,27, 4080µS/cm iletkenlik değerinde, 1 A Akım şiddetinde, Elektrot Boyutları 10x7 cm², Ekin Alan 38,5 A/cm², 15 dakika Reaksiyon Süresi, Elektrotlar arası mesafe 1 cm, Reaktör Hacmi 500 mL, Giriş Renk değeri 1172,75 pt-Co, Giriş KOİ değeri 714,75 mg/L, Giriş Bulanıklık değeri 14,67 NTU				
Parametreler	Elektrotlar (Anot-Katot)			
	Al-Fe	Al-Al	Al-Grafit	Al-Çelik
pH, (s)	9,41	9,45	9,17	9,45
Son Bulanıklık, (NTU)	68,150	59,260	67,185	89,870
Renk Giderim Verimi, (%)	24,02	11,57	6,02	88,39
KOİ Giderim Verimi, (%)	44,19	40,93	50,18	50,18
Voltaj, (V)	10,2	10,0	9,7	9,6
Son İletkenlik, (µs/cm)	4040	4050	4070	4020
Köpük Kalınlığı, (mm)	13	6	12	9
Akım Verimliliği, (%)	0,1192	3,2782	3,7907	-
Anotta Kütle Kaybı, (g)	0,112	0,01	0,275	0,318
Katotta Kütle Kaybı, (g)	0,045	-5,008	-0,002	0,041
Enerji Tüketimi, (kWh/m ³)	5,1	5,0	4,9	4,8
Elektrot Maliyet, (\$)	0,62281	0,05561	1,52922	1,76833
Enerji Maliyeti, (\$)	0,59	0,579	0,561	0,555
Toplam İşletme Maliyeti, (\$)	1,213	0,634	2,09	2,324

Çizelge 4.2 incelendiğinde alüminyum elektrotun anotta kullanıldığı deneyler sonucunda demir, alüminyum ve grafitin katot olarak kullanıldığı durumlarda renk giderim verimleri %25'in altında gerçekleşmiştir. Alüminyum-paslanmaz çelik

elektrot çiftinde ise renk giderim verimi %88,39 olarak gerçekleşmiştir. KOİ giderim verimleri ise elektrot çiftlerin hepsinde %40 üzerinde olduğu görülmüştür. Köpük kalınlıkları ise Al-Fe, Al-Al, Al-Çelik ve Al-Grafit elektrotlarda sırasıyla 13, 6, 12 ,9 mm olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.3. Grafit-demir, grafit-alüminyum, grafit-grafit, grafit-çelik çalışmalarına ait arıtım parametreleri.

Sabit parametreler: Giriş pH'ı 8,27, 4080μS/cm iletkenlik değerinde, 1 A Akım şiddetinde, Elektrot Boyutları 10x7 cm², Ekin Alan 38,5 A/cm², 15 dakika Reaksiyon Süresi, Elektrotlar arası mesafe 1 cm, Reaktör Hacmi 500 mL, Giriş Renk değeri 1172,75 pt-Co, Giriş KOİ değeri 714,75 mg/L, Giriş Bulanıklık değeri 14,67 NTU				
Parametreler	Elektrotlar (Anot-Katot)			
	Grafit-Fe	Grafit-Al	Grafit-Grafit	Grafit-Çelik
pH(s)	8,24	8,29	8,22	8,42
Son Bulanıklık, (NTU)	12,91	10,32	9,61	8,30
Renk Giderim Verimi, (%)	44,01	24,07	27,02	23,02
KOİ Giderim Verimi, (%)	1,364	16,831	6,439	6,439
Voltaj, (V)	10,0	12,1	12,9	11,7
Son İletkenlik, (μ S/cm)	4020	3970	3990	4040
Köpük Kalınlığı, (mm)	7	5	5	6
Akım Yoğunluğu, (A/cm ²)	38,5	38,5	38,5	38,5
Anotta Kütle Kaybı, (g)	0,045	0,007	0,022	0,024
Katotta Kütle Kaybı, (g)	0,031	0,008	0,001	0,001
Enerji Tüketimi, (kWh/m ³)	5,0	6,1	6,5	5,9
Elektrot Maliyet, (\$)	15,229	2,369	7,445	8,122
Enerji Maliyeti, (\$)	0,579	0,700	0,746	0,677
Toplam İşletme Maliyeti, (\$)	15,807	3,069	8,192	8,799

Çizelge 4.3 incelendiğinde grafit materyalinin anotta diğer elektrot materyallerin katotda kullanıldığı durumlarda renk giderim verimleri %20'nin üzerinde, KOİ' de

ise oldukça düşük giderim verimleri elde edilmiştir. Kot kumaşı üretim tesisi atıksuyun arıtımda grafit materyali anotta kullanılması durumunda istenilen giderim verimlerini sağlamadığı gözlenmiştir.

Çizelge 4.4. Çelik-demir, çelik-alüminyum, çelik-grafit, çelik-çelik çalışmalarına ait arıtım parametreleri.

Sabit parametreler: Giriş pH'ı 8,27, 4080µS/cm iletkenlik değerinde, 1 A Akım şiddetinde, Elektrot Boyutları 10x7 cm ² , Ekin Alan 38,5 A/cm ² , 15 dakika Reaksiyon Süresi, Elektrotlar arası mesafe 1 cm, Reaktör Hacmi 500 mL, Giriş Renk değeri 1172,75 pt-Co, Giriş KOİ değeri 714,75 mg/L, Giriş Bulanıklık değeri 14,67 NTU				
Parametreler	Elektrotlar (Anot-Katot)			
	Çelik-Fe	Çelik-Al	Çelik-Grafit	Çelik-Çelik
pH(s)	8,87	8,91	8,68	8,95
Son Bulanıklık, (NTU)	23,23	20,09	22,68	14,93
Renk Giderim Verimi, (%)	29,55	2,55	68,74	7,21
KOİ Giderim Verimi, (%)	39,63	35,57	37,05	40,13
Akım, (A)	1	1	1	1
Voltaaj, (V)	11,2	11,5	12,0	11,8
Son İletkenlik, (µs/cm)	3910	3980	4000	4030
Köpük Kalınlığı, (mm)	10	7	12	8
Akım Yoğunluğu, (A/cm ²)	38,5	38,5	38,5	38,5
Anotta Kütle Kaybı, (g)	0,001	0,002	0,001	0,001
Katotta Kütle Kaybı, (g)	0,027	0,003	0,015	0
Enerji Tüketimi, (kWh/m ³)	56,0	5,8	6,0	5,9
Elektrot Maliyet, (\$)	0,00496	0,00922	0,00496	0,00496
Enerji Maliyeti, (\$)	0,648	0,665	0,694	0,683
Toplam İşletme Maliyeti, (\$)	0,653	0,675	0,699	0,688

Çizelge 4.4 incelendiğinde paslanmaz çelik anotta, demir, alüminyum, grafit ve paslanmaz çelik katotta kullanıldığı durumda renk giderim verimleri sırasıyla %29,55, %2,55, %68,71 ve %7,21 olarak, KOİ giderim verimleri ise sırasıyla

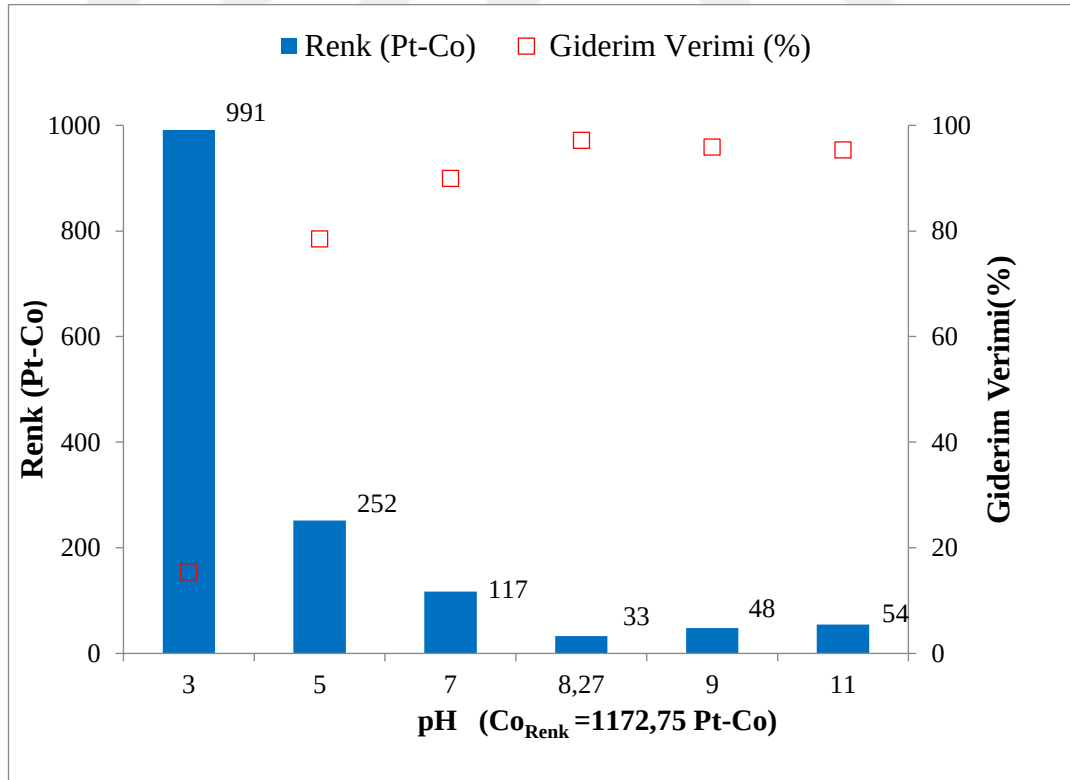
%39,63, %35,57, %37,05, %40,13 olarak gerçekleşmiştir. Arıtım sonucunda köpük kalınlıkları ise 10, 7, 12, 8 mm olarak ölçülmüştür.

Çizelgeler 4.1-4.4 beraber incelendiğinde renk giderim veriminin %98,387 ve KOİ giderim veriminin %61,76 olan anot elektrotu demir ve katot elektrotu olarak çelik materyali en uygun elektrotlar olarak belirlenmiştir.

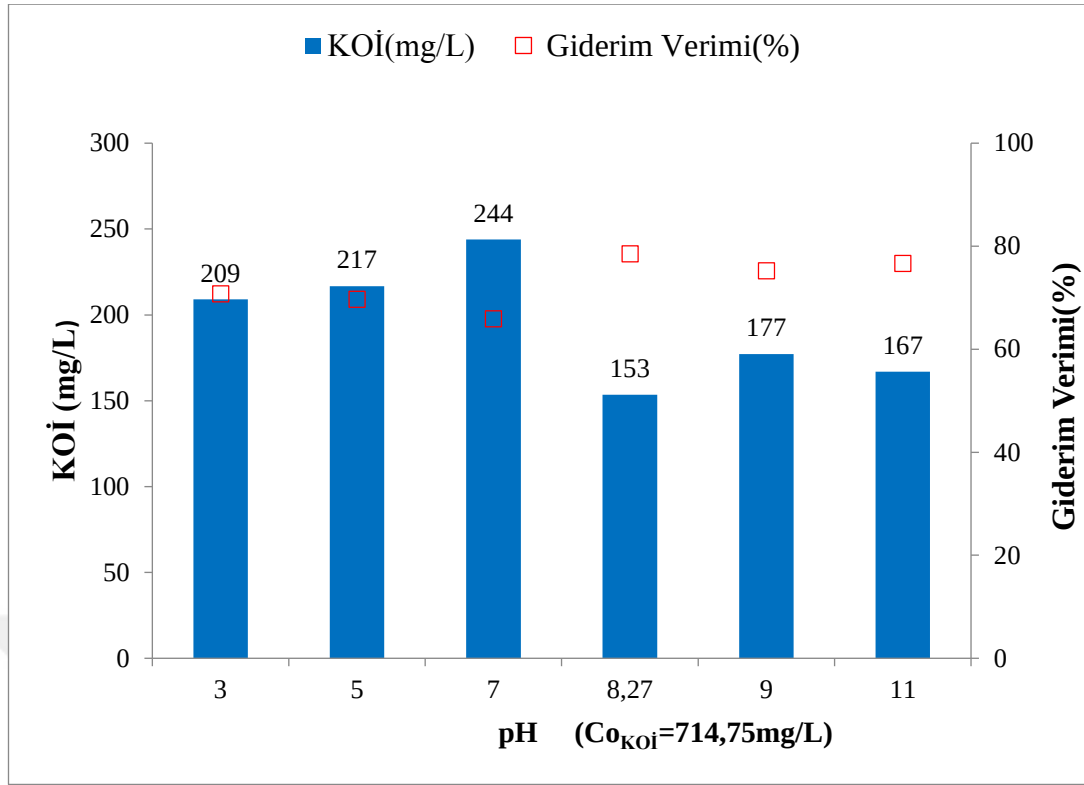
4.2 pH'ın Etkisi

Renk ve KOİ gideriminde demir ve paslanmaz çelik materyalleri optimum elektrotlar olarak belirlendikten sonra 1 amper akım değerinde, 15 dakika arıtım süresinde pH'ın elektrokimyasal arıtım prosesine etkisinin belirlenmesi amacıyla sırasıyla pH 3, 5, 7, 8,27 (ham atıksu pH'ı), 9, 11'e ayarlanarak kesikli olarak deneyler yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda düşük pH'ı ayarlamak için 0,1 Normal HCl, yüksek pH değerlerini ayarlamak için 0,1 Normal NaOH çözeltisi kullanılmıştır.

Yapmış olduğumuz deneyler sonucu pH'ın renk ve KOİ giderim verimleri üzerine etkisi grafiksel olarak Şekil 4.3 ve Şekil 4.4' de verilmiştir.



Şekil 4.3. Farklı pH'ların renk giderim verimine etkisi.



Şekil 4.4.Farklı pH'ların KOİ giderim verimine etkisi.

Şekil 4.3 incelendiğinde 15 dakika reaksiyon süresi ve 1 amper akım değerinde düşük pH değerlerinde renk giderim verimlerinin olduğu pH artırıldıkça renk giderim veriminde artış olduğu görülmektedir. pH 3 ve pH 5 arasında anotta çözünme fazla olduğundan suya pas rengini de vermiştir. pH 7 ile pH 11 arasında %90 üzerinde renk giderim verimi elde edilmiştir. En yüksek renk giderim verimi pH 8,27 de %97,18 olarak elde edilmiştir.

Şekil 4.4'e baktığımızda 15 dakika reaksiyon süresi ve 1 amper akım değerinde KOİ giderimi bütün pH değerlerinde %60 üzerinde olduğu görülmektedir. Atıksuyun kendi pH (8,27) değerinde %78,54 oranında KOİ giderim verimi elde edilmiştir.

Elektrokimyasal arıtma uygulamaları esnasında pH değişimleri incelendiğinde pH'nın arıtım süresine bağlı olarak arttığı görülmektedir. Dolayısıyla elektrokimyasal arıtma uygulamasının çelik elektrot ile gerçekleştirilmesi durumunda reaksiyon sonunda ölçülen pH'lar daima başlangıç pH'ından daha yüksek olarak bulunmuştur.

pH, elektrokimyasal arıtım prosesinin performansını etkileyen en önemli parametredir. Fe^{+2} kinetiğinin Fe^{+3} 'e dönüşmesi çözelti pH'ından etkilenmektedir.

Koagüle partiküllerin yüzey yükü de pH ile değişmektedir. Düşük pH'larda çözeltideki protonlar katotta H_2 'ye indirgenmekte ve hidroksit iyonları oluşmamaktadır. Düşük pH'larda $Fe(OH)_2^+$ ve $Fe(OH)^{+2}$ üretilmesi çöktürme mekanizmasında dezavantaj oluşturmaktadır (Şengil ve Özacar, 2009).

Çizelge 4.5'de farklı pH değerlerinin arıtım parametrelerine olan etkileri verilmiştir.

Çizelge 4.5. Farklı pH değerlerinde elde edilen arıtım parametreleri.

Sabit parametreler:						
Anot Demir elektrot Katot Çelik elektrot, Giriş pH'ı 8,27, 4080 $\mu S/cm$ iletkenlik değerinde, 1 A Akım şiddetinde, Elektrot Boyutları 10x7 cm^2 , Ekin Alan 38,5 A/cm^2 , 15 dakika Reaksiyon Süresi, Elektrotlar arası mesafe 1 cm, Reaktör Hacmi 500 mL, Giriş Renk değeri 1172,75 pt-Co, Giriş KOİ değeri 714,75 mg/L, Giriş Bulanıklık değeri 14,67 NTU						
Parametreler	Ph					
	3	5	7	8,27	9	11
pH(s)	7,1	7,54	8,22	10,19	10,47	11,28
Son Bulanıklık, (NTU)	60,23	111,28	26,36	24,81	28,11	38,84
Renk Giderim Verimi, (%)	15,46	78,54	90,00	97,18	95,92	95,36
KOİ Giderim Verimi, (%)	70,76	69,67	65,88	78,54	75,21	76,64
Voltaj, (V)	6,0	7,2	7,0	9,8	9,6	7,4
Son İletkenlik, ($\mu S/cm$)	5750	5840	4120	4080	4170	4820
Köpük Kalınlığı, (mm)	3	8	9	12	20	8
Akım Verimliliği, (%)	1,2172	1,1786	1,1438	0,8965	1,3680	1,1340
Anotta Kütle Kaybı, (g)	0,315	0,305	0,296	0,232	0,354	0,295
Katotta Kütle Kaybı, (g)	-0,003	0,001	0	0	0,001	-0,002
Enerji Tüketimi, (kWh/m^3)	3,0	3,6	3,5	4,9	4,8	3,7
Elektrot Maliyet, (\$ ³)	0,21861	0,21167	0,20542	0,16101	0,24568	0,20473
Enerji Maliyeti, (\$)	0,347	0,417	0,405	0,567	0,555	0,428
Toplam İşletme Maliyeti, (\$)	0,566	0,628	0,61	0,728	0,801	0,603

Çizelge 4.5 incelendiğinde başlangıç pH değerleri tüm arıtım çalışmaları sonucunda artış göstermiştir. Düşük pH değerinde anotta demir elektrottaki çözünmeden dolayı suyun bulanık değerlerinde artışlar meydana gelmiştir.

Arıtım sonucunda oluşan köpük kalınlığının pH'ın artmasıyla arttığı gözlenmiştir. pH 3'de %15,46 olan renk giderim verimi pH 5'de 78,54, pH 7 de %90 olarak

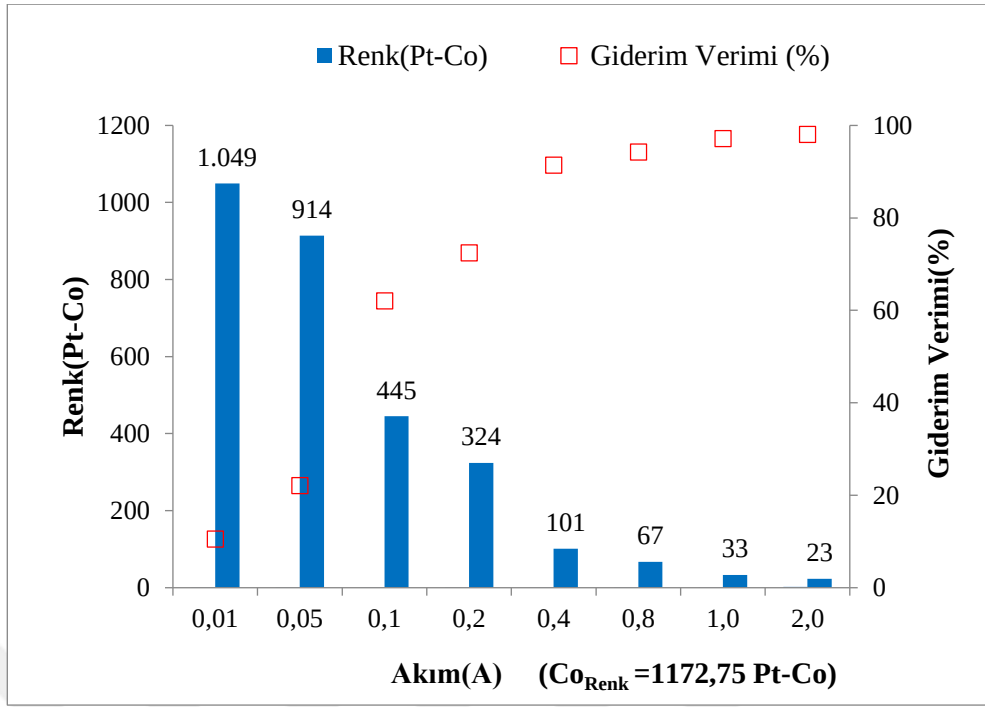
gerçekleşmiştir. Atıksuyun kendi pH değerinde %97,18 renk giderim verimi elde edilmiş, pH'ın 9 ve 11' çıkartılması durumlarında ise renk giderim veriminde kısmi düşüşler gözlenmiştir. Tüm pH değerlerinde %65'in üzerinde KOİ giderim verimi elde edilmiştir. Anotta kütle kayıplarının düşük pH değerlerinde daha fazla olduğu bunun elektrot kullanım süresini kısalttığı ve elektrot maliyetinde dolayısıyla işletme maliyetlerinde artışa neden olduğu görülmektedir. Çalışmalar sonucu elde edilen renk ve KOİ giderim verimleri birlikte değerlendirildiğinde %97,18 renk giderimi ve %78,54 KOİ giderimi ile herhangi bir kimyasal ilavesi söz konusu olmayan atıksuyun ham pH değeri 8,27 optimum pH olarak belirlenmiştir.

Kobya vd., (2003), Kabdaşlı vd. (2009), İnan vd., (2004), Kim vd., (2002) ve Bayramoğlu vd., (2004), yaptıkları çalışmalarda da asidik ortamda alüminyum elektrotlar ile nötr ve alkali durumlarda ise demir elektrotlar ile daha etkin giderim elde edileceği sonucuna varmışlardır.

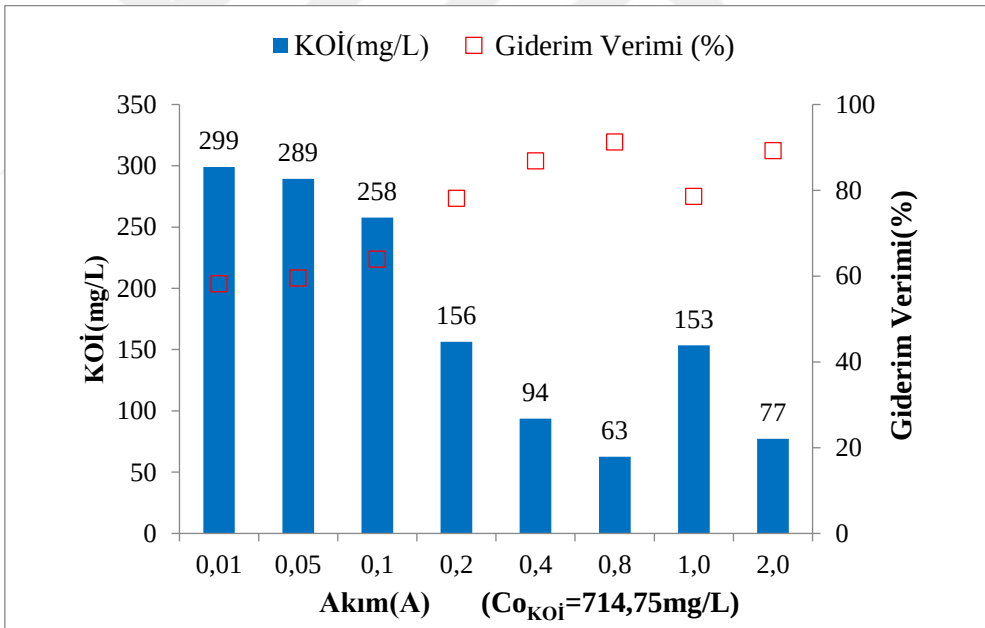
4.3 Akımın Etkisi

Elektrokimyasal arıtım prosesinde elektrolit içerisinde iyon hareketleri olduğundan uygulanan akım şiddeti, dolayısıyla da akım yoğunluğu büyük önem arz etmektedir. Bütün elektrokimyasal proseslerde, akım yoğunluğu reaktör içindeki reaksiyon hızını kontrol eden en önemli faktördür. Akım yoğunluğunun miktarının koagülant üretim hızını belirlediği, üretilen gaz kabarcığının hız ve büyüklüğünü ayarladığı ve bu nedenle flokların büyümesini etkilediği bilinmektedir (Mollah vd., 2004; Daneshvar vd., 2006).

Akım ve akım yoğunluğunun artması aynı zamanda hidrojen üretim hızının artmasına neden olmakta ve flok halindeki maddelerin yüzmesine olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte çok yüksek akım yoğunluğunda hücre gerilimi artmakta ve elektrik enerjisinin büyük bir kısmı suyun ısıtılmasına harcanmaktadır. Çok yüksek akım yoğunluğu değerleri mevcut akım verimini düşürmektedir (Şengil ve Özacar, 2009). Kot kumaşı üretim tesisi atıksuyu elektrokimyasal arıtımında akımın renk ve KOİ giderim verimi üzerine etkisi hamsu pH 8,27 değerinde, 15 dakika arıtım süresi ve oda sıcaklığında 0,01A, 0,05A, 0,1A, 0,2A, 0,4A, 0,8A, 1,0A ve 2,0A akım değerlerinde incelenmiştir. İncelemeler sonucu akım değerlerinin renk ve KOİ giderim verimleri üzerine etkisi Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.5. Farklı akım değerlerinin renk giderime etkisi.



Şekil 4.6. Farklı akım değerlerinin KOİ giderime etkisi.

Şekil 4.5 incelendiğinde düşük akım değerinde dolayısıyla birim elektrot üzerine düşen akım yoğunluğu düşük olduğundan renk giderim verimlerinin oldukça düşük olduğu artan akım değeriyle birlikte artış gösteren akım yoğunluğu ile renk giderim veriminde artış olduğu görülmektedir. 0,001 A akım değerinde %10 civarında olan renk giderim verimi 0,05 A akım uygulandığında %22, 0,1 A'de %62 olmuştur. Akımın artmasıyla 0,2 A'de %72, 0,4 A değerinde %95 renk giderim verimi

gözlenmiştir. Şekil 4.6 incelendiğinde ise KOİ giderim veriminin düşük akım şiddeti dolayısıyla kim yoğunluğunda düşük olduğu görülmektedir. Akım şiddeti artırıldıkça KOİ giderim veriminde de artış olduğu belli akım değerinden sonra ise KOİ giderim veriminde düşüş olduğu görülmektedir. 0,01 A akım değerinde %58 olan KOİ giderim verimi 0,1 A'de %63,93 değerine 0,4 A akımda %86,88 ve 0,8 A akım şiddetinde %91,25 olarak gerçekleşmiştir. Uygulanan akım artıkça ilk dakikalarda giderme veriminin hızlı bir şekilde arttığı, verimlerinde bu parametrelerdeki artışa oranla daha düşük değerlerde verim görülmektedir. Bu genel bir eğilimdir (İrdemez vd., 2006). Kot kumaşı üretim tesisi atıksuyunun 8,27 pH değerinde farklı akım şiddetindeki arıtım parametreleri Çizelge 4.6' de verilmiştir.

Çizelge 4.6. Farklı akım değerlerinde elde edilen arıtım parametreleri.

Sabit parametreler: Anot Demir elektrot Katot Çelik elektrot, Giriş pH'ı 8,27, 4080 $\mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenlik değerinde, Elektrot Boyutları 10x7 cm^2 , Ekin Alan 38,5 A/cm^2 , 15 dakika Reaksiyon Süresi, Elektrotlar arası mesafe 1 cm, Reaktör Hacmi 500 mL, Giriş Renk değeri 1172,75 pt-Co, Giriş KOİ değeri 714,75 mg/L , Giriş Bulanıklık değeri 14,67 NTU								
Parametreler	AKIM (Amper)							
	0,01	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1	2
pH(s)	7,88	7,94	8,11	8,36	8,91	9,29	10,19	10,04
Son Bulanıklık, (NTU)	13,20	12,27	23,37	40,10	22,67	28,60	24,81	19,67
Renk Giderim Verimi, (%)	10,54	22,05	62,04	72,40	95,03	94,25	97,18	98,02
KOİ Giderim Verimi, (%)	58,17	59,52	63,93	78,13	86,88	91,25	78,54	89,20
Voltaaj, (V)	0,6	1,6	2,2	3,3	4,6	8,8	9,8	17,9
Son İletkenlik, ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	4030	3990	3930	3980	4000	4080	4080	4030
Köpük Kalınlığı, (mm)	1	2	4	4	8	9	12	28
Akım Yoğunluğu, (A/cm^2)	3850	770	385	192,5	96,3	48,1	38,5	19,3
Akım Verimliliği, (%)	9,27	1,78	1,70	1,31	1,15	1,13	1,13	1,17
Anotta Kütle Kaybı, (g)	0,024	0,023	0,044	0,068	0,119	0,234	0,292	0,605
Katotta Kütle Kaybı, (g)	0	0	0,001	0	-0,004	-0,002	0	0,0038
Enerji Tüketimi, (kWh/m^3)	0,003	0,04	0,1	0,3	0,9	3,5	4,9	17,9
Faraday, (F/m^3)	0,2	0,9	1,9	3,7	7,5	14,9	18,7	37,3
Elektrot Maliyet, (\$)	0,0167	0,0160	0,0305	0,0472	0,0826	0,1624	0,2027	0,4199
Enerji Maliyeti, (\$)	0,0004	0,0046	0,0127	0,0382	0,1064	0,4073	0,5669	2,0710
Toplam İşletme Maliyeti, (\$)	0,017	0,0206	0,0433	0,0854	0,189	0,597	0,7696	2,4909

Çizelge 4.6 incelendiğinde renk ve KOİ giderim verimlerinde akım birlikte artış olduğu görülmektedir. 0,01 A akım şiddetinde sırasıyla %10,14 ve %58,17 olan renk ve KOİ giderim verimleri akımın artmasıyla 0,1 A akım değerinde %62,04 ve %63,93, 0,8 A akım değerinde ise %95,03 renk giderim verimi %91,25 KOİ giderim verimine ulaşmıştır. Uygulanan akım değeriyle birlikte arıtım sonrası oluşan köpük kalınlığı da artarak 2 amper değerinde 28 mm olarak gerçekleşmiştir. Oluşan köpük arıtım proseslerinde işletme problemlerine sebep olduğundan sistemin dezavantajı olarak görülmektedir.

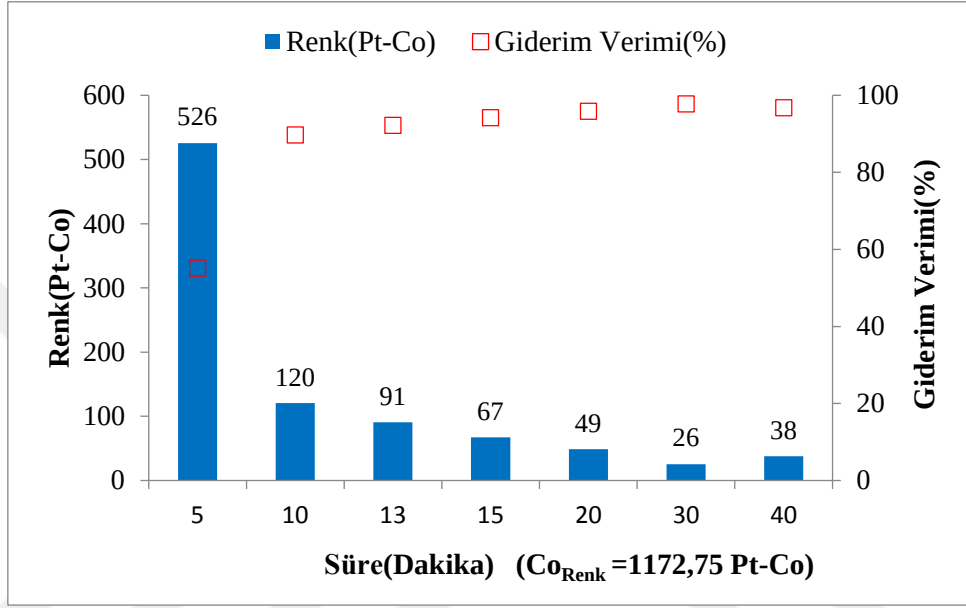
Akım ve akım yoğunluğundaki artış reaktöre uygulanan potansiyel farkda artışa sebep olmakta, dolayısıyla potansiyel farkın artması da ve arıtım enerji tüketiminde artışa neden olmaktadır. Bununla birlikte Faraday Yasası'na göre akımın dolayısıyla akım yoğunluğunun artması elektrot tüketimini de arttırmaktadır (Kumar vd., 2004; Yılmaz vd., 2008). Sonuç olarak Kumar vd., (2004) ve Yılmaz vd., (2009) çalışmalarında olduğu gibi akım ve akım yoğunluğu arttıkça hem enerji hem de elektrot maliyeti yani toplam maliyet artmış olmakla birlikte giderim veriminde bir noktadan sonra azalma kaydedilmiştir.

Renk giderim verimi en yüksek 2,0 A akım şiddetinde gerçekleşmiş olmasına rağmen anottaki demir elektrotunda meydana gelen fazla kütle kaybının yol açtığı elektrot maliyeti, yüksek akım şiddetinden dolayısıyla akım yoğunluğundan kaynaklı enerji maliyetindeki artış ve KOİ giderim veriminde düşüş olması nedeniyle optimum akım şiddeti 0,8 Amper (Akım yoğunluğu 48,1 A/cm²) olarak belirlenmiştir.

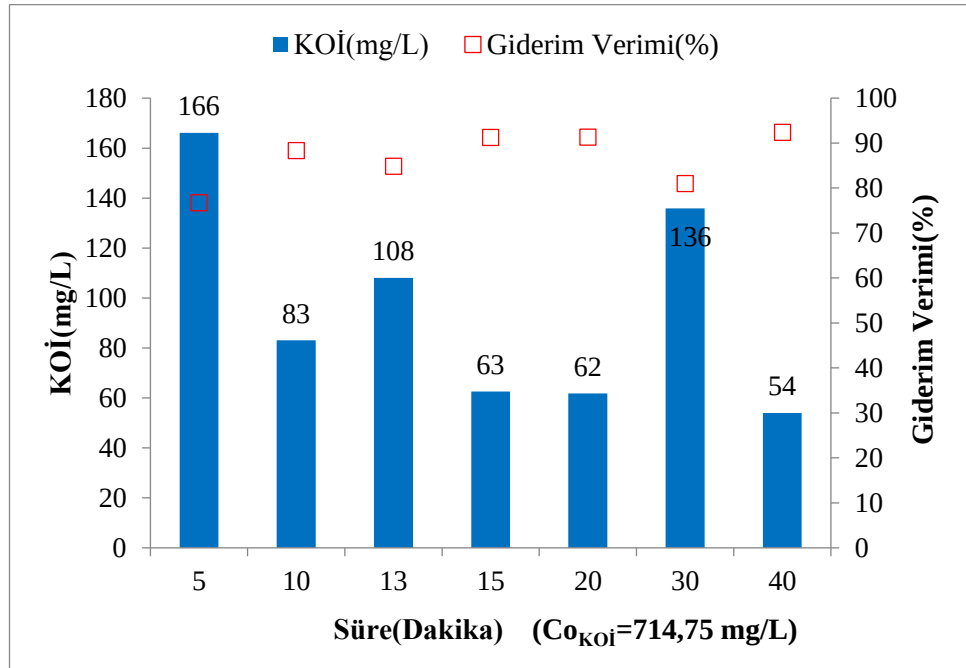
4.4 Sürenin Belirlenmesi

Elektrokimyasal arıtım süresince, katotik reaksiyonlar negatif elektrotta, anodik reaksiyonlar pozitif elektrotta meydana gelmektedir. Elektrokimyasal arıtım prosesinde koagülasyon anodik çözünmenin başlamasıyla meydana gelmektedir. Atıksu içerisindeki kirletici parametrelerin giderimin de kullanılan elektrotlar tarafından üretilen iyon konsantrasyonu oldukça önemlidir. Arıtım süresi artarsa, iyonların konsantrasyonu ve onların sebep olduğu hidroksit flokların oluşumu artar. Elektrokimyasal arıtım prosesinde yeterli miktarda ve uygun flokların oluşması arıtım süresine bağlı olarak gerçekleşmektedir (Özyonar ve Karagözoğlu, 2012).

Optimum sürenin belirlenmesi için kot kumaşı üretim tesisi atıksuyu 8,27 pH değerinde ve 0,8 Amper akım şiddetinde kesikli olarak 5, 10, 13, 15, 20, 30, 40'nci dakikalarda numuneler alınarak renk giderim verimi ve KOİ giderim verimleri incelenmiştir. Yapılan optimum süre belirleme çalışmalar sonucu elde edilen renk giderim verimi ve KOİ giderim verimi grafikleri Şekil 4.7 ve Şekil 4.8' de verilmiştir.



Şekil 4.7. Sürenin renk giderim verimine etkisi.



Şekil 4.8. Sürenin KOİ giderim verimine etkisi.

Şekil 4.7 incelendiğinde 5.dakikada %55,18 civarında olan renk giderim verimi 10.dakikadan sonra kot kumaşı üretim tesisi atıksuyunun sahip olduğu rengin %90'nın üzerinde giderildiği, sürenin artırılması ile giderim verimlerinde çok büyük artış olmadığı görülmektedir. 15.dakika da renk giderim verimi %94,25 olarak gerçekleşmiştir. Şekil 4.8'e bakıldığı zaman ise başlangıçta 5.dakika sonunda %76 civarında olan KOİ giderim veriminin zamanla artış göstermiştir. 10.dakika ve sonrasında %85'in üzerinde KOİ giderim verimi elde edildiği, 15.dakikada ise KOİ giderim veriminin %91,25 olduğu görülmektedir. 20.dakikadan sonra KOİ giderim veriminde düşme olduğu sonraki sürelerde tekrar artış görülmektedir. Sonuç olarak sürenin enerji maliyetine doğrudan etkisi göz önüne alındığında optimum süre olarak renk giderim veriminin %94,25 ve KOİ giderim veriminin ise %91,25 olduğu 15. dakika seçilmiştir. Yapılan süre çalışmaları sonucunda elde edilen arıtım parametreleri tablo olarak Çizelge 4.7'de ve farklı sürelerde elde edilen renk giderim verimlerine ait parametreler verilmiştir.

Çizelge 4.7. Farklı sürelerde elde edilen arıtım parametreleri.

Sabit parametreler: Anot Demir elektrot Katot Çelik elektrot, Giriş pH'ı 8,27, 4080 $\mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenlik değerinde, 0,8 A Akım şiddetinde, 48,1 A/cm^2 Akım yoğunluğunda, Elektrot Boyutları 10x7 cm^2 , Ekin Alan 38,5 A/cm^2 , Elektrotlar arası mesafe 1 cm, Reaktör Hacmi 500 mL, Giriş Renk değeri 1172,75 pt-Co, Giriş KOİ değeri 714,75 mg/L, Giriş Bulanıklık değeri 14,67 NTU							
Parametreler	SÜRE(Dakika)						
	5	10	13	15	20	30	40
pH(s)	8,83	9,14	9,27	9,29	9,68	9,75	10,05
Son Bulanıklık, (NTU)	26,23	37,24	27,62	28,60	22,56	22,10	27,89
Renk Giderim Verimi, (%)	55,18	89,73	92,27	94,25	95,85	98,91	98,39
KOİ Giderim Verimi, (%)	76,77	88,39	84,88	91,25	91,36	80,99	92,42
Voltaj, (V)	8,1	9,2	8,9	8,8	8,9	7,8	8,9
Son İletkenlik, ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	4030	4000	4090	4080	4080	4110	4160
Köpük Kalınlığı, (mm)	3	9	13	9	20	24	20
Akım Verimliliği, (%)	1,464	1,333	1,143	1,130	2,174	0,536	1,114
Anotta Kütle Kaybı, (g)	0,101	0,184	0,205	0,234	0,600	0,222	0,0615
Katotta Kütle Kaybı, (g)	0,006	0	0,001	-0,002	0,001	-0,003	0
Enerji Tüketimi, (kWh/m^3)	3,2	3,7	3,6	3,5	3,6	3,1	3,6
Faraday, (F/m^3)	5,0	9,9	12,9	14,9	19,9	29,8	39,8
Elektrot Maliyet, (\$)	0,071	0,128	0,142	0,162	0,416	0,154	0,427
Enerji Maliyeti, (\$)	0,375	0,426	0,412	0,407	0,412	0,361	0,412
Toplam İşletme Maliyeti, (\$)	0,445	0,553	0,554	0,570	0,828	0,515	0,839

Çizelge 4.7’de görüldüğü gibi süre ile arıtım sonucu oluşan köpük kalınlığında artmaktadır. Bu işletmeler için olumsuz durumlar oluşturacağından önlem alınması gerekmektedir. 5 dakika arıtım süresi sonun da 3 mm olarak ölçülen köpük kalınlığı 10 dakika arıtım sonunda 9 mm, 15 dakika arıtım sonun da 9 mm ve 30 dakika arıtım sonrası ise 24 mm olarak ölçülmüştür. Süredeki artış anottaki kütle kaybı ve elektrik tüketimindeki artışa bağlı olarak toplam işletme maliyetini artırmaktadır.

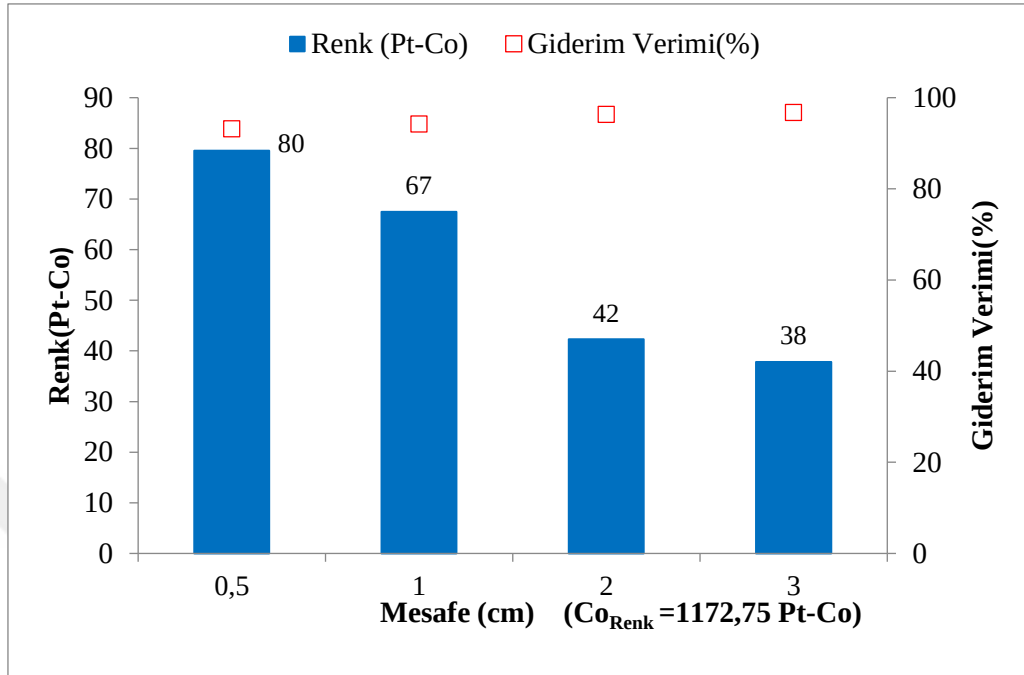
Elektrokimyasal artım da süre ilgili yapılan çalışmalarda Kobya vd., (2003), elektrokoagülasyon prosesi alüminyum elektrotlarda yüksek giderim verimi için 15 dakikanın, demir elektrotlar için ise bu süreden %50 daha fazla süre gerektiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar akım yoğunluğu ve süre etkisinin birbirine benzer olduğunu, bu iki değişken işletim parametresinin tek bir değişken ile ifade edilebileceğini, bu tek değişkeninde yük yükleme kavramı (F/m^3) ile açıklandığını ve proses optimizasyon çalışmalarını büyük ölçüde kolaylaştıracağını ifade etmişlerdir. Aslan-Alaton vd. (2009), Daneshvar vd., (2004), İnan vd., (2004), Daneshvar vd., (2006), Vardar (2006) ve Aygün (2012), yaptıkları çalışmalarda kullandıkları elektrot tiplerine bağlı olarak 2-60 dakika arasında optimum arıtım sürelerini elde etmişlerdir.

4.5 Elektrotlar Arası Mesafe Etkisi

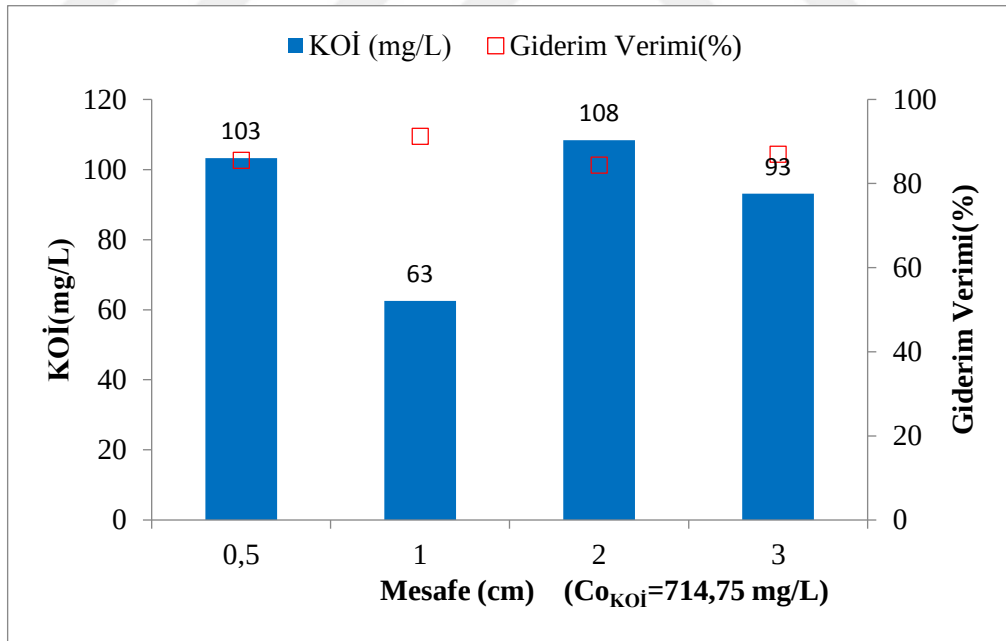
Elektrotlar arası mesafenin, elektrokimyasal prosesinin arıtım verimi üzerine etkisi diğer arıtım parametreleri ile karşılaştırıldığında daha az düzeydedir. Elektrotlar arası mesafe arttırıldığında potansiyel fark ve buna bağlı olarak elektrik tüketimi artmaktadır. Buda enerji maliyetlerinin artışına sebep olacaktır. Bununla birlikte elektrotlar arası mesafenin ne çok az ne de çok fazla olması istenmektedir. Uygun mesafenin sağlanması ile elektrokimyasal arıtım prosesi istenen performansta çalıştırılır. Elektrotlar arası mesafenin çok yakın olduğunda flok oluşumu ve oluşan flokların adsorplama yetenekleri az olacaktır. Elektrotlar arası mesafenin çok uzak olması durumunda ise potansiyel farktaki artışa bağlı olarak elektrokimyasal prosesi ekonomik bir çözüm olmaktan çıkacaktır (Aygün, 2012).

Yapılan deneysel çalışmalarda 8,27 pH’da, 0,8 Amper akım şiddetinde ve 15 dakika arıtım süresinde elektrotlar arası mesafe 0,5 cm, 1 cm, 2 cm ve 3 cm olarak

ayarlanarak renk ve KOİ giderim verimleri incelenmiş olup grafikleri Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.9. Elektrotlar arası mesafenin renk giderim verimine etkisi.



Şekil 4.10. Elektrotlar arası mesafenin KOİ giderim verimine etkisi.

Şekil 4.9 incelendiğinde 8,27 pH'da 1 amper akım şiddetinde ve 15 dakika arıtım sürecinde renk giderim verimleri elektrotlar arası mesafe çalışmalarının tümünde %90 üzerinde gerçekleşmiştir. Bu da elektrotlar arası mesafenin diğer arıtım

parametrelerine göre ihmal edilebilecek düzeyde olduğunu göstermektedir. Elektrotlar arası mesafe 1 cm olarak belirlendiğinde renk giderim verimi %94,25 olarak gerçekleşmiştir. Şekil 4.10 incelendiğinde ise 8,27 pH'da, 0,8 Amper akım şiddetinde ve 15 dakika arıtım sürecinde KOİ giderim verimleri yapılan bütün elektrotlar arası mesafe çalışmalarında %85 üzerinde gerçekleştirmiştir. Elektrotlar arası mesafe 1 cm olarak belirlendiğinde KOİ giderim verimi %91,25 olarak gerçekleşmiştir. Elektrotlar arası mesafe açıldıkça potansiyel farkın arttığı bunun da maliyeti artırmasında dolayı 8,27 pH'da, 0,8 Amper akım şiddetinde ve 15 dakika arıtım sürecinde optimum elektrotlar arası mesafe 1 cm olarak belirlenmiştir. Yapılan süre çalışmaları sonucunda elde edilen arıtım parametreleri tablo olarak Çizelge 4.8'de ve farklı sürelerde elde edilen renk giderim verimlerine ait parametreler verilmiştir.

Çizelge 4.8. Elektrotlar arası mesafe çalışmasında elde edilen arıtım parametreleri.

Sabit parametreler: Anot Demir elektrot Katot Çelik elektrot, Giriş pH'ı 8,27, 4080 $\mu\text{S/cm}$ iletkenlik değerinde, 0,8 A Akım şiddetinde, 48,1 A/cm^2 akım yoğunluğunda, 15 dakika reaksiyon süresi, Elektrot Boyutları 10x7 cm^2 , Ekin Alan 38,5 A/cm^2 , Reaktör Hacmi 500 mL, Giriş Renk değeri 1172,75 pt-Co, Giriş KOİ değeri 714,75 mg/L, Giriş Bulanıklık değeri 14,67 NTU				
Parametreler	MESAFE (cm)			
	0,5	1	2	3
pH(s)	9,2	9,29	9,31	9,27
Son Bulanıklık, (NTU)	20,00	28,60	25,61	26,88
Renk Giderim Verimi, (%)	93,22	94,25	96,40	96,78
KOİ Giderim Verimi, (%)	85,55	91,25	84,84	86,97
Voltaj, (V)	4,5	8,8	14,1	16,3
Son İletkenlik, ($\mu\text{S/cm}$)	4030	4080	4120	4260
Köpük Kalınlığı, (mm)	14	9	17	14
Akım Verimliliği, (%)	1,17378	1,3031	1,8344	1,15446
Anotta Kütle Kaybı, (g)	0,243	0,234	0,245	0,239
Katotta Kütle Kaybı, (g)	0	0	0,002	0
Enerji Tüketimi, (kWh/m^3)	1,8	3,5	5,6	6,5
Elektrot Maliyet, (\$)	0,16864	0,16240	0,17003	0,16587
Enerji Maliyeti, (\$)	0,208	0,407	0,653	0,754
Toplam İşletme Maliyeti, (\$)	0,377	0,570	0,823	0,92

Çizelge 4.8 incelendiğinde elektrotlar arası mesafe açıldıkça elektrotlara uygulanan güç dolayısıyla enerji tüketiminde artmaktadır buda enerji maliyetlerini ve toplam işletme maliyetlerinde artışa neden olmaktadır. Köpük kalınlıkları elektrotlar arası mesafe 0,5 cm, 1 cm, 2 cm ve 3 cm’de sırasıyla 14 mm, 9 mm, 17 mm ve 14 mm olarak ölçülmüştür.

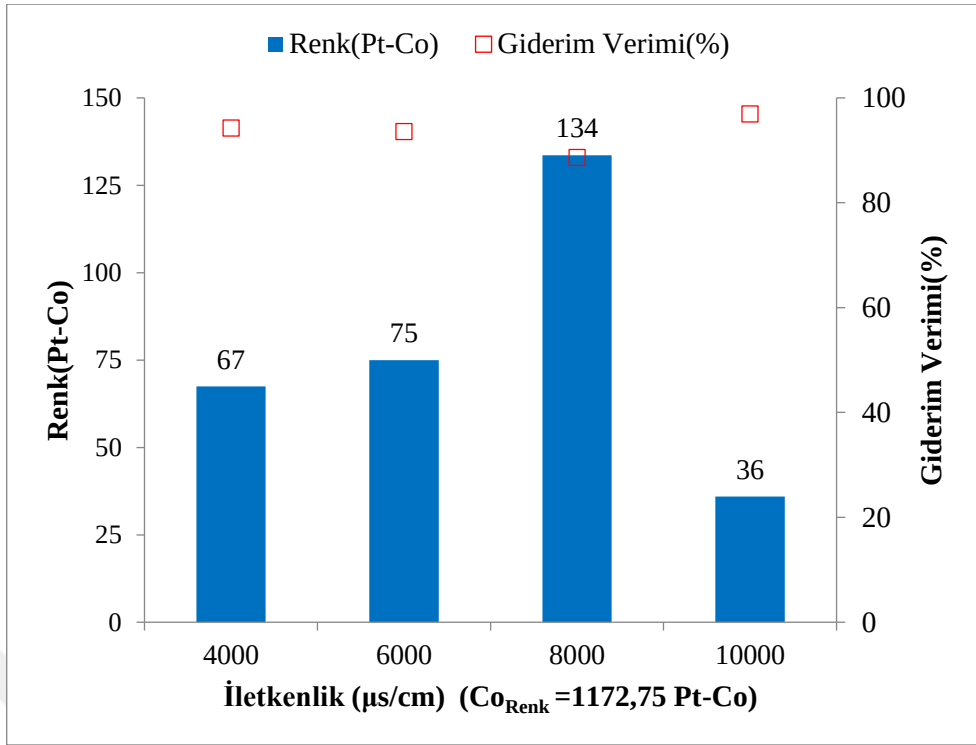
Şengil ve Özacar (2009), Daneshvar vd., (2004) ve Türk (2016), elektrotlar arası mesafenin belirlenmesi ile ilgili yaptıkları çalışmalarda farklı elektrot materyalleri ve farklı akım yoğunluklarında 6-20 mm arasında değişen optimum elektrotlar arası mesafeler belirlemişlerdir.

4.6 İletkenliğin Etkisi

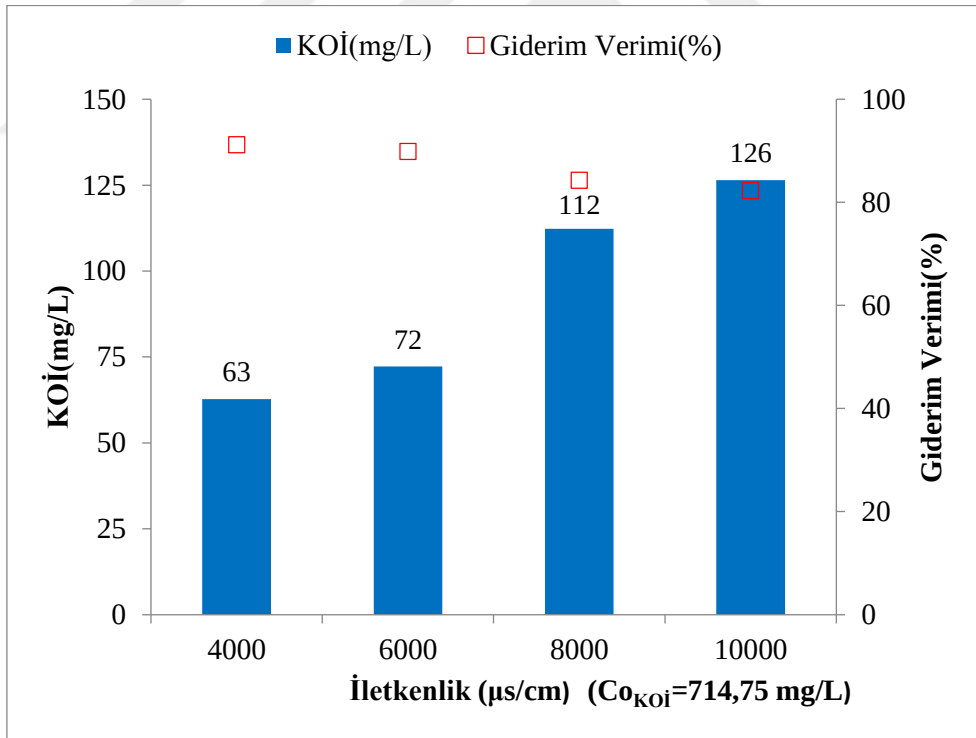
Elektrokimyasal prosesin işletilememesi nedeniyle tüm çalışmalarda hamsuyumuzun iletkenlik değeri oldukça yüksek (7550,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$) olması nedeniyle deneyler öncesinde atıksuyumuzu hacimsel olarak 1/1 oranında seyrelterek iletkenliği yaklaşık 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ seviyelerine düşürülmüştür. Karagözoğlu ve Malkoç (2017), çözelti iletkenliğinin yüksek olmasının elektrotlar arasındaki potansiyelin ve anodik oksidasyonun azalmasına dolayısıyla da renk giderim veriminde düşüşe neden olacağını belirtmişlerdir.

Çalışmanın bu kısmında anot demir elektrot, katot paslanmaz çelik elektrot olarak, pH 8.27’de, 0,8 Amper akım şiddetinde, 15 dakika ve elektrotlara arası mesafe 1 cm olacak şekilde NaCl kullanarak 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 6000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 8000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ve 10000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de atıksu arıtımı parametrelerini gözlemlenmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucu elde edilen renk giderim verimi ve KOİ giderim verimi grafikleri Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.11. İletkenliğin renk giderim verimine etkisi.



Şekil 4.12. İletkenliğin KOİ giderim verimine etkisi.

Şekil 4.11 incelendiğinde anot demir elektrot çelik katot elektrotlar için 8,27 pH'da, 0,8 amper şiddetinde, 15 dakika boyunca ve elektrotlar arası mesafe 1 cm olarak ayarlanıp iletkenliğin elektrokimyasal arıtım prosesi üzerine etkisi incelendiğinde

renk giderme veriminin tüm iletkenlik değerlerinde %85'in üzerinde olduğu görülmektedir. İletkenlik 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ' den 10000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 'e artarken elektrotlar arası potansiyel 8,8 V'dan 6,16 V'a azalmakla birlikte, iletkenliğe bağlı olarak renk giderme kapasitesi çok fazla değişmemiştir. 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ renk giderim verimi %94,25 olarak gerçekleşmiştir. Şekil 4.12 incelendiğinde ise demir ve çelik elektrotlarda, pH 8,27'de 0,8 Amper akım şiddetinde, 15 dakika boyunca ve elektrotlar arası 1 cm olarak ayarlandığında KOİ giderme veriminin %91,25 ile 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 'de en yüksek değerine ulaştığı ve bu iletkenlik değerinden sonra verimin kısmi bir düşüş gösterdiği görülmektedir. Sonuç olarak yapılan iletkenlik deneyleri sonucunda kot kumaşı üretim tesisi atıksuyun ham iletkenlik değeri olan yaklaşık 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en yüksek renk ve KOİ giderim verimlerinin birlikte gerçekleştiği görülmektedir. Yapılan süre çalışmaları sonucunda elde edilen arıtım parametreleri tablo olarak Çizelge 4.9'da ve farklı sürelerde elde edilen renk giderim verimlerine ait parametreler verilmiştir.

Çizelge 4.9. İletkenlik çalışmalarında elde edilen arıtım parametreleri.

Sabit parametreler: Anot Demir elektrot Katot Çelik elektrot, Giriş pH'ı 8,27, 0,8 A Akım şiddetinde, akım yoğunluğu 48,1 A/cm ² , 15 dakika reaksiyon süresi, Elektrot Boyutları 10x7 cm ² , Ekin Alan 38,5 A/cm ² , Elektrotlar arası mesafe 1 cm, Reaktör Hacmi 500 mL, Giriş Renk değeri 1172,75 pt-Co, Giriş KOİ değeri 714,75 mg/L, Giriş Bulanıklık değeri 14,67 NTU				
Parametreler	İLETKENLİK ($\mu\text{S}/\text{cm}$)			
	4000	6000	8000	10000
pH(s)	9,29	9,36	9,39	9,26
Son Bulanıklık, (NTU)	28,60	24,75	16,69	48,92
Renk Giderim Verimi, (%)	94,25	93,60	88,61	96,93
KOİ Giderim Verimi, (%)	91,25	89,89	84,29	82,31
Voltaj, (V)	8,8	6,1	5,2	5,1
Son İletkenlik, ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	4080	6140	8030	10000
Köpük Kalınlığı, (mm)	9	17	10	8
Akım Verimliliği, (%)	1,13031	1,18344	1,23658	1,21726
Anotta Kütle Kaybı, (g)	0,234	0,245	0,256	0,252
Katotta Kütle Kaybı, (g)	-0,002	0	0	0
Enerji Tüketimi, (kWh/m ³)	3,5	2,4	2,1	2,0
Elektrot Maliyet, (\$)	0,16240	0,17003	0,17766	0,17489
Enerji Maliyeti, (\$)	0,407	0,282	0,241	0,236
Toplam İşletme Maliyeti, (\$)	0,570	0,452	0,418	0,411

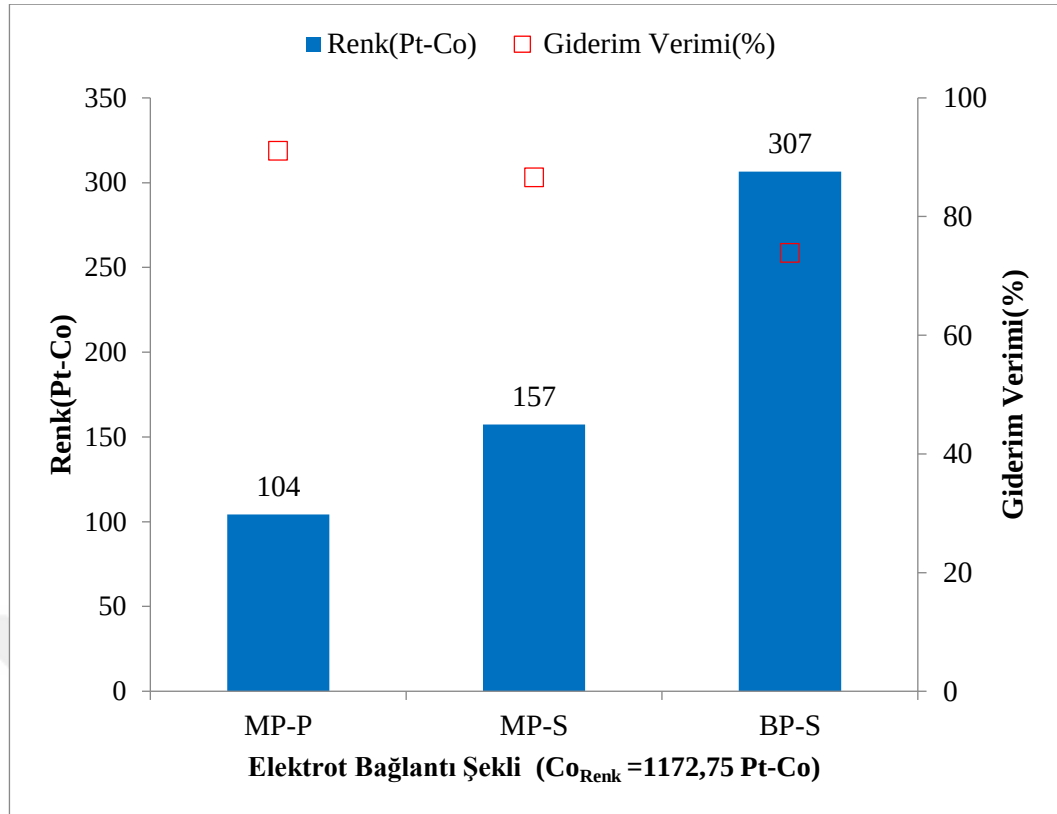
Çizelge 4.9 incelendiğinde 4000 $\mu\text{S/cm}$, 6000 $\mu\text{S/cm}$, 8000 $\mu\text{S/cm}$ ve 10000 $\mu\text{S/cm}$ de gerçekleşen köpük kalınlıkları sırasıyla 9 mm, 17 mm, 10 mm, 8 mm olarak ölçülmüştür. Anotta kütle kayıpları iletkenlikle beraber artış göstermiştir. 4000 $\mu\text{S/cm}$, 6000 $\mu\text{S/cm}$, 8000 $\mu\text{S/cm}$ ve 10000 $\mu\text{S/cm}$ de anotta kütle kayıpları sırasıyla 0,234 g, 0,245 g 0,256 g, 0,252 g olarak gerçekleşmiştir. Elektrotlardaki kütle kayıpları artışı elektrot maliyetlerini dolayısıyla toplam işletme maliyetlerinde artışa neden olmuştur. İletkenlikle beraber renk giderim veriminde artış olurken KOİ giderim verimi düşüş göstermiştir. Atıksuyun iletkenliğini yükseltmek amacıyla kullanılan NaCl kimyasalın artması ile toplam işletme maliyetinde de artış olacağından ve renk giderim verimi ve KOİ giderim veriminin sırasıyla %94,25 ve %91,25 olduğu atıksuyun ham iletkenlik değeri 4000 $\mu\text{S/cm}$ optimum olarak alınmıştır.

Koby vd., (2003), iletkenliği düşük atıksularda iletkenliğin artması ile enerji ve elektrot tüketiminin azaldığını ve yüksek iletkenliğin yüksek performans için arzu edilen bir özellik olduğunu belirtmişlerdir. Chen vd., (2000), Kim vd., (2002) ve Bayramoğlu vd., (2004), yaptıkları çalışmalarda en uygun atıksu iletkenlik değerini 1000-4000 $\mu\text{S/cm}$ arasında olduğunu belirtmişlerdir.

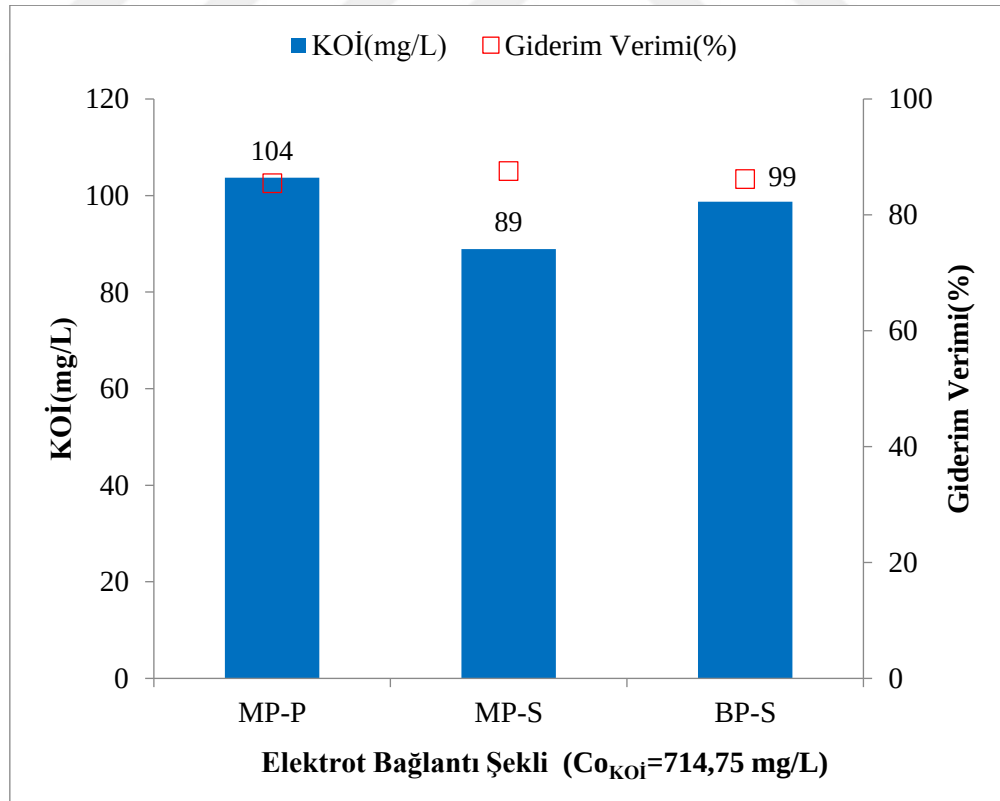
4.7 Elektrot Bağlantı Şeklinin Giderim Verimleri Üzerine Etkisi

Optimum şartlar sağlandıktan sonra elektrotların bağlanma şekillerine göre 3 farklı deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda elektrotlar ilk önce Paralel Bağlı Monopolar elektrotlar şeklinde daha sonra Seri Bağlı Monopolar elektrotlar şeklinde son olarak da Seri Bağlı Bipolar elektrotlar şeklinde bağlanarak elektrotların bağlantı şekline göre renk ve KOİ giderim verimleri üzerine incelemeler optimum şartlar olan pH 8,27, 0,8 Amper Akım şiddetinde, 15 dakika reaksiyon süresi boyunca, elektrotlar arası mesafe 1 cm değerlerinde ve 4000 $\mu\text{S/cm}$ iletkenlik değerinde gerçekleştirilmiştir.

8,27 pH, 0,8 Amper akım şiddeti, 15 dakika reaksiyon süresi boyunca, elektrotlar arası mesafe 1 cm ve iletkenliği 4000 $\mu\text{S/cm}$ olarak optimum şartlarda yapılan çalışmalar sonucu elde edilen renk ve KOİ giderim verimlerine ait grafikler Şekil 4.13’de ve Şekil 4.14’de Çalışmalar sonucunda elde edilen diğer arıtım parametreleri Çizelge 4.10’da verilmiştir.



Şekil 4.13. Elektrot bağlantı şeklinin renk giderim verimine etkisi.



Şekil 4.14. Elektrot bağlantı şeklinin KOİ giderim verimine etkisi.

Şekil 4.13. incelendiğinde renk giderim verimlerinin MP-P, MP-S, BP-S elektrot bağlantı şekillerinin tümünde %70 üzerinde gerçekleştiği görülmektedir. Giderim verimleri sonucu başlangıç renk değeri 1172,75 Pt-Co olan atıksuyun MP-P, MP-S, BP-S elektrot bağlantı şekilleri ile arıtımı sonucu sırasıyla 104 Pt-Co, 157 Pt-Co, 307 Pt-Co sonuçları elde edilmiştir. Renk giderim verimi en yüksek %91,11 değeri ile Paralel bağlı Monopolar elektrot bağlantı şeklinde gerçekleşmiştir. Şekil 4.14 incelendiğinde ise KOİ giderim verimleri tüm elektrot bağlantı şekillerinde %85 ile %87 arasında değişiklik gösterdiği görülmektedir. Buda elektrot bağlantı şeklinin KOİ giderim veriminde diğer işletme parametrelerine kıyasla daha az etkili olduğunu göstermektedir. KOİ giderim verimleri sonucu başlangıç KOİ değeri 714,75 mg/L olan atıksuyun MP-P, MP-S, BP-S elektrot bağlantı şekilleri ile arıtımı sonucu sırasıyla 104 mg/L, 89 mg/L, 99 mg/L sonuçları elde edilmiştir.

Çizelge 4.10. Elektrotların bağlantı şekli çalışmalarında elde edilen arıtım parametreleri.

Sabit parametreler: Anot Demir elektrot Katot Çelik elektrot, Giriş pH'ı 8,27, 0,8 A Akım şiddetinde, 4080 $\mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenlik değerinde, 48,1 akım yoğunluğunda, 15 dakika reaksiyon süresi, Elektrot Boyutları 10x7 cm ² , Ekin Alan 38,5 A/cm ² , Elektrotlar arası mesafe 1 cm, Reaktör Hacmi 500 mL, Giriş Renk değeri 1172,75 pt-Co, Giriş KOİ değeri 714,75 mg/L, Giriş Bulanıklık değeri 14,67 NTU			
Parametreler	ELEKTROT BAĞLANTI ŞEKLİ		
	MP-P	MP-S	BP-S
pH, (s)	9,42	9,28	9,43
Son Bulanıklık, (NTU)	20,74	26,07	84,91
Renk Giderim Verimi, (%)	91,11	86,59	73,86
KOİ Giderim Verimi, (%)	85,49	87,56	86,18
Voltaj, (V)	4,9	4,6	18,3
Son İletkenlik, ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	4080	4070	4110
Köpük Kalınlığı, (mm)	10	14	11
Akım Verimliliği, (%)	1,30903	1,30903	2,00461
Anotta Kütle Kaybı, (g)	0,091	1,091	0,159
Katotta Kütle Kaybı, (g)	-0,002	-0,001	0,006
Enerji Tüketimi, (kWh/m ³)	2,0	1,8	7,3
Elektrot Maliyet, (\$)	0,18807	0,18807	0,28801
Enerji Maliyeti, (\$)	0,227	0,213	0,847
Toplam İşletme Maliyeti, (\$)	0,415	0,401	1,135

Çizelge 4.10’da görüldüğü gibi Seri bağlı Bipolar sisteme verilecek akımın iletilmesi için diğer elektrot bağlantı şekillerine göre daha fazla bir potansiyel fark uygulanmalıdır. Çünkü Seri bağlı Bipolar bağlantı şeklinde reaktörde elektrotlardaki direnç daha fazladır.

Uygulanan fazla akım daha fazla enerji tüketimine neden olmakta buda enerji maliyetlerinin yükselmesine sebep olmaktadır. Bununla birlikte tükenen elektrotlarda daha fazla kütle kaybı olacağından elektrot maliyetinde de artışlara sebep olduğu görülmektedir.

Maliyet artışları Seri bağlı Bipolar elektrot bağlantı şeklinin dezavantajı olarak görülmektedir. Tükenen elektrotlardaki kütle kaybı nedeniyle sudaki bulanıklık artmakta ve renk giderim veriminin de düştüğü görülmektedir. Köpük kalınlıkları MP-P, MP-S, BP-S elektrot bağlantı şekillerinde sırasıyla 10mm, 14mm, 11mm olarak ölçülmüştür.

Elektrot bağlantı şeklinin giderim verimi üzerine etkisini incelemek amacıyla Daneshvar vd., (2004) ve Kobya vd., (2007), yaptıkları çalışmalarda tek kutuplu seri bağlı (MP-S) sistemlerin atıksu arıtımında diğer bağlantı şekillerine göre daha verimli olduğunu belirtmişlerdir.

4.8 Regresyon Yöntemi ile Modelleme

Regresyon analizi, bir değişkenin bir veya daha fazla değişkenle arasındaki ilişkinin matematik bir fonksiyonla ifade edilmesidir (Keskindür ve Şahin, 2009). İki veya ikiden fazla sayıda değişken arasında doğrusal bir ilişki olduğu regresyon analizine doğrusal regresyon denilmektedir (Bayazıt ve Yeğenoğuz, 2011).

4.8.1 Doğrusal regresyon modelleme

Modelleme çalışmasında ilk olarak işletme parametreleri voltaj, süre, pH, iletkenlik, mesafe ve akımın, Pt-Co dalga boyu olan 456 Abs, KOİ ve bulanıklık parametreleri üzerine etkisi Doğrusal Regresyon yöntemi ile incelenmiş bu sonuçlar Çizelge 4.11, Çizelge 4.12, Çizelge 4.13’de verilmiştir.

Çizelge 4.11. Doğrusal regresyon model özeti.

Model Özeti										
Model	R	R ²	Ortak R ²	SD	İstatistik Değişkenleri					Durbin-Watson
					R ² değişimi	F faktörü	df1	df2	F Faktör Değişimi	
456 Abs	,698 ^a	0,488	0,341	0,207	0,488	3,332	6	21	0,018	1,608
KOİ	,737 ^a	0,543	0,413	54,827	0,543	4,161	6	21	0,007	1,020
Bulanıklık	,641 ^a	0,411	0,243	16,400	0,411	2,442	6	21	0,060	1,931
a. Belirleyici Sabitler: Voltaj, Süre, pH, İletkenlik, Mesafe, Akım										
b. Bağımlı Değişkenler: 456 Abs, KOİ, Bulanıklık										

Çizelge 4.11’de R² ve ortak R² değeri verilmektedir. Birden fazla değişken olduğu için ortak R² değerleri göz önüne alınmaktadır. Bulunan R² değerleri 456 Abs için 0,341, KOİ için 0,543 ve bulanıklık için ise 0,243’dir. Bunun anlamı bağımlı değişkendeki yüzde değişimin modele giren bağımsız değişkenler (voltaj, süre, pH, iletkenlik, mesafe, akım) tarafından yüzde kısmı açıklanmaktadır. Örneğin 456 Abs’daki renk değişiminin %34,1’lik kısmı voltaj, süre, pH, iletkenlik, mesafe, akım tarafından açıklanabilmektedir. Bu değerler %50’nin altında olduğundan oldukça düşük olduğu görülmektedir. Burada önemli bir istatistikte Durbin-Watson istatistiğidir. Regresyonun önemli varsayımlarından bir bağımsız ve bağımlı değişkenler arasında korelasyon olmamasıdır. Ayrıca hata terimleri arasında da korelasyon olmamasıdır. SPSS korelasyon problemleri için basit bir ölçüt geliştirmiştir. Durbin-Watson istatistiği hata terimleri arasında korelasyon olup, olmadığına bakmaktadır. Bu istatistik 0 ile 4 arasında yer alır. Eğer istatistik değeri 2 civarında ise, korelasyon olmadığı şeklinde yorumlanır. 0’a yakın değerler yüksek pozitif korelasyonu, 4’e yakın değerler yüksek negatif korelasyonu belirtir (URL-17). Bizim örneğimizde Durbin Watson istatistik değerleri 456 Abs 1,608, KOİ için 1,020 ve bulanıklık için ise 1,931 şeklinde bulunmuştur. Burada 456 Abs, KOİ ve bulanıklık bağımlı değişkenlerdeki Durbin-Watson değerleri 2 civarında olup korelasyon olmadığı söylenebilir.

Çizelge 4.12. Değişken ve bağımlı parametrelere ait ANOVA analizi.

ANOVA ^a						
Model		Kareler Toplamı	df	Ortama Kare	F	Significance
456 Abs	Regresyon	0,857	6	0,143	3,332	,018 ^b
	Kalan	0,900	21	0,043		
	Toplam	1,757	27			
KOİ	Regresyon	75056,113	6	12509,352	4,161	,007 ^b
	Kalan	63125,731	21	3005,987		
	Toplam	138181,844	27			
Bulanıklık	Regresyon	3941,916	6	656,986	2,442	,060 ^b
	Kalan	5648,801	21	268,991		
	Toplam	9590,717	27			
a. Bağımlı Değişken: 456 Abs, KOİ, Bulanıklık						
b. Belirleyici Sabitler: Voltaj, Süre, pH, İletkenlik, Mesafe, Akım						

Çizelge 4.12’de tüm modelin anlamlılığını gösteren F testi sonuçları gösterilmiştir. Burada Significance değeri önemlidir. Eğer F testi değeri anlamlı bulunduysa modelimiz tümüyle istatistiksel olarak anlamlıdır sonucuna ulaşırız. Significance değerinin 0,05 değerinden küçük olması istenmektedir (URL -17). Yukarıda Significance değerleri 456 Abs için 0,018, KOİ için 0,007 ve bulanıklık için 0,060 çıktığı görülmektedir. Bulanıklık parametresi dışındaki diğer parametre değerleri 0,05 değerinden küçük olduğundan anlamlı olduğu söylenebilmektedir.

Regresyon modelindeki bir diğer önemli kural ise bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında yüksek korelasyon olmamasıdır. VIF değeri bu sorunun varlığını saptamamıza yarar. VIF değeri 10 ve yukarısı söz konusu değişkenin diğer regresyon modeli değişkenleri ile yüksek korelasyona sahip olduğunu ve modelden çıkarılması gerektiğini bildirir (URL-16). Burada VIF değeri akım ve voltaj 10,00’den büyüktür. Yani bağımlı değişkenler ile yüksek korelasyona sahiptir ve modelden çıkartılması gerekmektedir. Mesafe, süre, pH ve iletkenlik VIF değerleri 10,00’den küçük olduğundan düşük korelasyona sahiptir.

Çizelge 4.13’de görüldüğü gibi 456 Abs, KOİ ve bulanıklık için model katsayı değerleri 0,386, 102.168 ve 30,563, t değerleri-3,020, 1,370 ve 2,720 olarak bulunmuştur. Model significance değerleri sırasıyla 0,07, 0,185 ve 0,013 olarak bulunmuştur. Her iki bağımsız değişkende KOİ ve bulanık’ta, akım ve voltaj VIF

değerleri 10,0'dan büyük olduğundan yüksek korelasyona sahiptir ve modellemeden çıkartılması gerekmektedir.

Çizelge 4.13. 456 Abs, KOİ, Bulanıklık model katsayılar ve VIF tablosu.

Katsayılar ^a								
Model		Standartlaşmamış Katsayılar		Standartlaşmış Katsayılar	t	Significance	Gizlilik İstatistikleri	
		B	Bağımsız hata	Beta			Tolerans	VIF
456 Abs	(Sabit)	-1,165	0,386		-3,020	0,007		
	Mesafe	0,501	0,214	0,847	2,336	0,029	0,185	5,394
	Süre	0,008	0,007	0,188	1,198	0,244	0,988	1,012
	pH	0,106	0,034	0,544	3,127	0,005	0,807	1,239
	İletkenlik	-6,747E-05	0,000	-0,367	-1,730	0,098	0,542	1,843
	Akım	0,923	0,352	1,376	2,621	0,016	0,089	11,295
	Voltaj	-0,079	0,041	-1,230	-1,944	0,065	0,061	16,392
KOİ	(Sabit)	139,992	102,168		1,370	0,185		
	Mesafe	169,799	56,795	1,024	2,990	0,007	0,185	5,394
	Süre	-1,586	1,780	-0,132	-0,891	0,383	0,988	1,012
	pH	10,086	8,937	0,185	1,129	0,272	0,807	1,239
	İletkenlik	-0,027	0,010	-0,530	-2,647	0,015	0,542	1,843
	Akım	250,011	93,279	1,329	2,680	0,014	0,089	11,295
	Voltaj	-40,081	10,757	-2,225	-3,726	0,001	0,061	16,392
Bulanıklık	(sabit)	83,142	30,563		2,720	0,013		
	Mesafe	-3,340	16,990	-0,076	-0,197	0,846	0,185	5,394
	Süre	-0,361	0,533	-0,114	-0,678	0,505	0,988	1,012
	pH	-7,728	2,673	-0,539	-2,891	0,009	0,807	1,239
	İletkenlik	0,003	0,003	0,233	1,023	0,318	0,542	1,843
	Akım	1,352	27,904	0,027	0,048	0,962	0,089	11,295
	Voltaj	0,550	3,218	0,116	0,171	0,866	0,061	16,392

Mesafe, süre, pH, iletkenlik VIF değerlerine bakıldığında ise bu değerlerin 10.0'dan küçük olduğu ve düşük korelasyon özelliğine sahip olduğu görülmektedir. Yapılan doğrusal regresyon modelleme sonuçları ile Ortak R^2 ve İstatiksel R^2 değişimi %50 ve altında olduğundan çalışma doğrusal olmayan regresyon modellemesi ile yapılmıştır.

4.8.2 Doğrusal olmayan regresyon modelleme

Kot kumaşı üretim tesisi atıksularının elektrokimyasal yöntemler ile renk gideriminde, elektrot tipi, pH, akım yoğunluğu, elektrotlar arası mesafe, zaman ve iletkenlik gibi işletme parametrelerinin optimizasyonu için doğrusal olmayan regresyon metodu kullanılmıştır. Bu metodun kullanılması ile farklı işletme parametrelerinin kot kumaşı üretim tesisi atıksularının elektrokimyasal üzerindeki etkisini görmek ve bu parametrelerinin bireysel ve sinerjetik olarak etkilerinin incelenmesi ve en yüksek verimi elde etmek için uygun işletme şartların belirlenmesidir. Bu amaçla laboratuvar ölçeğinde kurulan bir sistem ile kot kumaşı üretim tesisi atıksularının Elektrokimyasal arıtım prosesi ile arıtımının optimizasyonunun yapılması gerektiği, elde edilecek sonuçların sistemin uygulamasına yardımcı olacağı düşünülmüştür.

Elektrokimyasal arıtım prosesi ile kot kumaşı üretim tesisi atıksularının arıtımında atıksuyun pH değeri, akım yoğunluğu, voltaj, iletkenlik ve işletme süresi en önemli parametrelerdir. Diğer taraftan renk, KOİ ve türbidite (bulanıklık) gibi parametreler arıtım çıkışında artım standartlarında olması istenmektedir.

Bu çalışmada kot kumaşı üretim tesisi atıksularının elektrokimyasal arıtım prosesi ile arıtılmasının renk (456 nm), KOİ ve türbidite giderme verim eşitlikleri belirlenmiştir. Proses parametrelerinin çalışma aralıkları; akım için 0,01-2 A/cm², pH için 3-11 ve zaman için ise 5- 40 dakika, elektrotlar arası mesafe 0,5-3 cm ve iletkenlik için ise 4000 µs/cm-10000 µs/cm olarak belirlenmiştir. IBM SSPS Statistic Version 24, deneysel verilerin dizaynı ve elde edilen verilerin modellenmesi için kullanılmıştır. Korelasyon yüzdesi belirlenmiş ve bağımsız değişkenlerin kendi aralarında nasıl etkileşime girdiklerini ve bu etkileşimlerin bağımlı değişken üzerindeki etkilerini görmek için ANOVA analizi yapılmıştır. ANOVA sonuçları da model denklemleri ile birlikte tablolar halinde gösterilmiştir.

Bütün parametrelerin PCA Analizi (Temel Bileşen Analizi) yapılarak katsayıları belirlenmiştir. Bağımsız değişken değerlerine göre modelin vermiş olduğu değerler ile deneysel olarak elde edilen değerlerin korelasyonlarına bakılmıştır. Model doğrulama sonuçları bu çalışmanın bu bölümünde verilmiştir. Doğrusal olmayan regresyon modelinde kullanılan formül şu şekildedir (Barış vd., 2018).

$$R = x + \sum \beta_i \cdot X_i + \sum \beta_{ij} \cdot X_i X_j + \sum \beta_{ii} \cdot X_i^2 \quad (4.1)$$

Burada R Tahmin edilen cevap, x: dizayn merkez noktasında sabit cevap değeri, β_i Lineer katsayı, β_{ij} etkileşimli katsayı ve β_{ii} Kuadratik katsayıyı belirtmektedir.

Diğer değişkenler şu şekildedir;

X₁: Mesafe (cm), X₂: Süre (Dk), X₃: pH, X₄: İletkenlik (μs/cm), X₅: Akım (Amper), X₆: Voltaj (Volt)

(a: Mesafe Kat sayısı, b: Süre Kat sayısı, c: pH Kat sayısı, d: İletkenlik Kat sayısı, e: Akım Kat sayısı, f: Voltaj Kat sayısı, g, h, j, k, l, m katsayıları: kuadratik denklem katsayıları).

Katsayı ve değişkenler yerlerine yazıldıktan sonra elde edilen formül şu şekildedir;

$$\begin{aligned} R = & x + (a \cdot X_1) + (b \cdot X_2) + (c \cdot X_3) + (d \cdot X_4) + (e \cdot X_5) + (f \cdot X_6) + (aa \cdot X_1 \cdot X_2) + \\ & (ab \cdot X_1 \cdot X_3) + (ac \cdot X_1 \cdot X_4) + (ad \cdot X_1 \cdot X_5) + (ae \cdot X_1 \cdot X_6) + (ba \cdot X_2 \cdot X_3) + \\ & (bb \cdot X_2 \cdot X_4) + (bc \cdot X_2 \cdot X_5) + (bd \cdot X_2 \cdot X_6) + (ca \cdot X_3 \cdot X_4) + (cb \cdot X_3 \cdot X_5) + \\ & (cc \cdot X_3 \cdot X_6) + (da \cdot X_4 \cdot X_5) + (db \cdot X_4 \cdot X_6) + (ea \cdot X_5 \cdot X_6) + (g \cdot X_1^2) + (h \cdot X_2^2) + \\ & (j \cdot X_3^2) + (k \cdot X_4^2) + (l \cdot X_5^2) + (m \cdot X_6^2) \end{aligned}$$

Modelleme sonucu oluşturulan yukarıdaki denklemlerde parametre katsayıların pozitif işareti sinerjik etkiye işaret ederken parametre katsayıların negatif işareti ters sinerjetik etki ettiğini göstermektedir (Bajpai vd., 2012).

4.8.2.1 456 Abs

Doğrusal olmayan modelleme ile pH, akım, süre, mesafe ve iletkenlik parametrelerinin birbiriyle olan etkileşiminin 456 Abs'da nasıl değişikliklere sebep olduğunun belirlenmesi için uygulanan doğrusal olmayan regresyon modellemeye ait ANOVA analizi Çizelge 4.14'de parametrelerin katsayıları Çizelge 4.15'de ve korelasyon oranını ve modelleme sonuçlarını gösteren Çizelge 4.16'da verilmiştir.

Çizelge 4.14. 456 Abs ANOVA analizi.

ANOVA			
Kaynak	Kareler Toplamı	df	Kareler Ortalaması
Regresyon	1,919	29	0,066
Artık		-1	
Düzeltilmemiş Toplam	2,407	28	
Düzeltilmiş Toplam	1,757	27	
Bağımlı Değişken: 456 Abs			

Çizelge 4.15. 456 Abs parametre model katsayıları.

456 Abs Parametre ve Katsayıları							
Parametre	Kat Sayı	Parametre	Kat Sayı	Parametre	Kat Sayı	Parametre	Kat Sayı
x	0,865	aa	0,246	bc	-0,139	ea	-0,033
a	0,899	ab	1,071	bd	-0,049	g	0,356
b	-0,044	ac	-0,003	ca	-5399E-05	h	-0,001
c	0,865	ad	0,859	cb	0,648	j	0,027
d	-0,003	ae	-0,047	cc	0,011	k	3,788E-08
e	0,840	ba	-0,178	da	-0,001	l	0,471
f	0,186	bb	0,000	db	0,000	m	-0,001

Doğrusal olmayan modelleme sonucunda işletme parametrelerinde meydana gelen değişikliklerin renk 456 Abs üzerindeki etkisini gösteren formül şu şekilde gerçekleşmiştir.

$$\begin{aligned} 456 \text{ Abs} : & 0,865 + (0,889X_1) + (-0,044.X_2) + (0,865.X_3) + (-0,003.X_4) + \\ & (0,840.X_5) + (0,186.X_6) + (0,246.X_1.X_2 + (1,071.X_1.X_3) + (-0,003.X_1.X_4) + \\ & (0,859.X_1.X_5) + (-0,047.X_1.X_6) + (-0,178.X_2.X_3) + (0,000.X_2.X_4) + \\ & (-0,139.X_2.X_5) + (-0,049.X_2.X_6) + (-5,399E-05.X_3.X_4) + (0,648.X_3.X_5) + \\ & (0,011.X_3.X_6) + (-0,001.X_4.X_5) + (0,000.X_4.X_6) + (-0,033.X_5.X_6) + \\ & (0,356.X_1^2) + (-0,001.X_2^2) + (0,027.X_3^2) + ((3,788E-08).X_4^2) + (0,471.X_5^2) + \\ & (-0,001.X_6^2) \end{aligned}$$

Çizelge 4.16. 456 Abs modelleme sonuçları ve korelasyon.

Çalışılan Parametreler	Elektrotlar Arası Mesafe (cm)	Süre (Dk)	pH	İletkenlik ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Akım (A)	Voltaj (V)	456 Abs Deneysel Çalışma Sonuçları	456 Abs Modelleme Sonuçları
pH 3	1	15	3	5750	1	6,0	0,368	0,41
pH 5	1	15	5	5840	1	7,2	0,699	0,61
pH 7	1	15	7	4120	1	7,0	0,661	0,18
pH 8,27	1	15	8,27	4080	1	9,8	0,006	0,18
pH 9	1	15	9	4170	1	9,6	0,010	0,006
pH 11	1	15	11	4820	1	7,4	0,012	0,05
0,01 Amper	1	15	8,27	4030	0,01	0,06	0,348	0,39
0,05 Amper	1	15	8,27	3990	0,05	1,6	0,384	0,29
0,1 Amper	1	15	8,27	3930	0,1	2,2	0,511	0,39
0,2 Amper	1	15	8,27	3980	0,2	3,3	0,890	0,93
0,4 Amper	1	15	8,27	4000	0,4	4,6	0,013	0,06
0,8 Amper	1	15	8,27	4080	0,8	8,8	0,016	0,08
1 Amper	1	15	8,27	4080	1	9,8	0,006	0,09
2 Amper	1	15	8,27	4030	2	17,9	0,004	0,09
5 Dakika	1	5	8,27	4030	0,8	8,1	0,139	0,09
10 Dakika	1	10	8,27	4000	0,8	9,2	0,030	0,08
13 Dakika	1	13	8,27	4090	0,8	8,9	0,015	0,13
15 Dakika	1	15	8,27	4080	0,8	8,8	0,016	0,00
20 Dakika	1	30	8,27	4080	0,8	7,8	0,004	0,28
40 Dakika	1	40	8,27	4160	0,8	8,9	0,008	-0,11
0,5 cm	0,5	15	8,27	4030	0,8	4,5	0,019	-0,15
1 cm	1	15	8,27	4080	0,8	8,8	0,016	0,01
2 cm	2	15	8,27	4120	0,8	14,1	0,009	0,05
3 cm	3	15	8,27	4260	0,8	16,3	0,008	-0,01
4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	1	15	8,27	4000	0,8	8,8	0,016	-0,01
6000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	1	15	8,27	6000	0,8	6,1	0,018	0,15
8000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	1	15	8,27	8000	0,8	5,2	0,034	-0,05
10000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	1	15	8,27	10000	0,8	5,1	0,007	0,00
KORELASYON							80%	

Çizelge 4.16’da görüldüğü gibi deneysel sonuçların doğrusal olmayan regresyon modeli ile optimizasyonu korelasyon oranı %80 olarak gerçekleşmiştir.

4.8.2.2 Bulanıklık

Doğrusal olmayan modelleme ile pH, akım, süre, mesafe ve iletkenlik parametrelerinin birbiriyle olan etkileşiminin Bulanıklıkta nasıl değişikliklere sebep olduğunun belirlenmesi için uygulanan doğrusal olmayan regresyon modellemeye ait ANOVA analizi Çizelge 4.17’de parametrelerin katsayıları Çizelge 4.18’de ve korelasyon oranını ve modelleme sonuçları Çizelge 4.19’da verilmiştir.

Çizelge 4.17. Bulanıklık ANOVA analizi.

ANOVA			
Kaynak	Kareler Toplamı	df	Kareler Ortalaması
Regresyon	37008,477	29	1276,153
Artık		-1	
Düzeltilmemiş Toplam	37503,017	28	
Düzeltilmiş Toplam	9590,717	27	
Bağımlı Değişken: Bulanıklık			

Çizelge 4.18. Bulanıklık Abs parametre model katsayıları.

Bulanıklık Parametre ve Katsayıları							
Parametre	Kat Sayı	Parametre	Kat Sayı	Parametre	Kat Sayı	Parametre	Kat Sayı
x	0,679	aa	-1,980	bc	-7,685	ea	0,015
a	0,897	ab	4,498	bd	-0,115	g	-2,773
b	-3,813	ac	0,002	ca	-0,007	h	0,085
c	3,308	ad	-0,578	cb	-4,108	j	0,473
d	0,005	ae	-1,049	cc	-6,120	k	4,198E-06
e	-0,734	ba	4,412	da	0,037	l	4,032
f	-0,633	bb	-0,007	db	0,014	m	-0,160

Çizelge 4.19. Bulanıklık modelleme sonuçları ve korelasyon.

Çalışılan Parametreler	Elektrotlar Arası Mesafe (cm)	Süre (Dk)	pH	İletkenlik ($\mu\text{S/cm}$)	Akım (A)	Voltaj (V)	Bulanıklık (NTU) Deneysel Çalışma Sonuçları	Bulanıklık (NTU) Modelleme Sonuçları
pH 3	1	15	3	5750	1	6,0	60,23	61,88
pH 5	1	15	5	5840	1	7,2	111,28	108,59
pH 7	1	15	7	4120	1	7,0	26,36	23,85
pH 8,27	1	15	8,27	4080	1	9,8	24,81	29,73
pH 9	1	15	9	4170	1	9,6	28,11	25,54
pH 11	1	15	11	4820	1	7,4	38,84	38,27
0,01 Amper	1	15	8,27	4030	0,01	0,06	13,20	12,60
0,05 Amper	1	15	8,27	3990	0,05	1,6	12,27	20,80
0,1 Amper	1	15	8,27	3930	0,1	2,2	23,37	27,11
0,2 Amper	1	15	8,27	3980	0,2	3,3	40,10	24,01
0,4 Amper	1	15	8,27	4000	0,4	4,6	22,67	24,12
0,8 Amper	1	15	8,27	4080	0,8	8,8	28,60	28,19
1 Amper	1	15	8,27	4080	1	9,8	24,81	29,73
2 Amper	1	15	8,27	4030	2	17,9	19,67	18,75
5 Dakika	1	5	8,27	4030	0,8	8,1	46,23	47,70
10 Dakika	1	10	8,27	4000	0,8	9,2	37,24	33,54
13 Dakika	1	13	8,27	4090	0,8	8,9	27,62	32,47
15 Dakika	1	15	8,27	4080	0,8	8,8	28,60	28,19
20 Dakika	1	30	8,27	4080	0,8	7,8	22,10	22,73
40 Dakika	1	40	8,27	4160	0,8	8,9	27,89	27,72
0,5 cm	0,5	15	8,27	4030	0,8	4,5	20,00	20,13
1 cm	1	15	8,27	4080	0,8	8,8	28,60	28,31
2 cm	2	15	8,27	4120	0,8	14,1	25,61	25,27
3 cm	3	15	8,27	4260	0,8	16,3	26,88	27,03
4000 $\mu\text{S/cm}$	1	15	8,27	4000	0,8	8,8	28,60	25,65
6000 $\mu\text{S/cm}$	1	15	8,27	6000	0,8	6,1	24,75	28,69
8000 $\mu\text{S/cm}$	1	15	8,27	8000	0,8	5,2	16,69	13,80
10000 $\mu\text{S/cm}$	1	15	8,27	10000	0,8	5,1	48,92	49,94
KORELASYON							92%	

Doğrusal olmayan modelleme sonucunda işletme parametrelerinde meydana gelen değişikliklerin Bulanıklık üzerindeki etkisini gösteren formül şu şekilde gerçekleşmiştir.

$$\begin{aligned} \text{Bulanıklık} : & 0,679 + (0,897 \cdot X_1) + (-3,813 \cdot X_2) + (3,308 \cdot X_3) + (0,005 \cdot X_4) + \\ & (-0,734 \cdot X_5) + (-0,633 \cdot X_6) + (-1,980 \cdot X_1 \cdot X_2) + (4,498 \cdot X_1 \cdot X_3) + \\ & (0,002 \cdot X_1 \cdot X_4) + (-0,578 \cdot X_1 \cdot X_5) + (-1,049 \cdot X_1 \cdot X_6) + (4,412 \cdot X_2 \cdot X_3) + \\ & (-0,007 \cdot X_2 \cdot X_4) + (-7,685 \cdot X_2 \cdot X_5) + (-0,115 \cdot X_2 \cdot X_6) + (-0,007 \cdot X_3 \cdot X_4) + \\ & (-4,108 \cdot X_3 \cdot X_5) + (-6,120 \cdot X_3 \cdot X_6) + (0,037 \cdot X_4 \cdot X_5) + (0,014 \cdot X_4 \cdot X_6) + \\ & (-0,322 \cdot X_5 \cdot X_6) + (-2,773 \cdot X_1^2) + (0,085 \cdot X_2^2) + (0,473 \cdot X_3^2) + ((4,198E - \\ & 06) \cdot X_4^2) + (4,032 \cdot X_5^2) + (-0,160 \cdot X_6^2) \end{aligned}$$

Çizelge 4.19’da görüldüğü gibi deneysel sonuçların doğrusal olmayan regresyon modeli ile optimizasyonu korelasyon oranı %92 olarak gerçekleşmiştir.

4.8.2.3 KOİ

Doğrusal olmayan modelleme ile pH, akım, süre, mesafe ve iletkenlik parametrelerinin birbiriyle olan etkileşiminin KOİ’de nasıl değişikliklere sebep olduğunun belirlenmesi için uygulanan doğrusal olmayan regresyon modellemeye ait ANOVA analizi Çizelge 4.20’de parametrelerin katsayıları Çizelge 4.21’de ve korelasyon oranını ve modelleme sonuçları Çizelge 4.22’de verilmiştir.

Çizelge 4.20. KOİ ANOVA analizi.

ANOVA			
Kaynak	Kareler Toplamı	df	Kareler Ortalaması
Regresyon	661912,980	29	22824,586
Artık		-1	
Düzeltilmemiş Toplam	683372,997	28	
Düzeltilmiş Toplam	138181,844	27	
Bağımlı Değişken: KOİ			

Çizelge 4.21. KOİ parametre model katsayıları.

KOİ Parametre ve Katsayıları							
Parametre	Kat Sayı	Parametre	Kat Sayı	Parametre	Kat Sayı	Parametre	Kat Sayı
x	-3,269	aa	-21,411	bc	-75,429	ea	0,015
a	-0,521	ab	29,563	bd	-0,320	g	-42,734
b	-50,687	ac	0,237	ca	-0,057	h	0,229
c	9,490	ad	-9,495	cb	-40,371	j	-14,483
d	0,240	ae	-35,427	cc	1,25E+01	k	0,000
e	-11,526	ba	30,828	da	0,550	l	12,053
f	-54,023	bb	-0,032	db	-0,028	m	3,696

Doğrusal olmayan modelleme sonucunda işletme parametrelerinde meydana gelen değişikliklerin Bulanıklık üzerindeki etkisini gösteren formül şu şekilde gerçekleşmiştir.

$$\begin{aligned} KOİ : & -3,269 + (-0,521.X_1) + (-50,687.X_2) + (9,490.X_3) + (0,240.X_4) + \\ & (-11,526.X_5) + (-54,023.X_6) + (-21,411.X_1.X_2 + (29,563.X_1.X_3) + \\ & (0,237.X_1.X_4) + (-9,495.X_1.X_5) + (-35,247.X_1.X_6) + (30,828.X_2.X_3) + \\ & (-0,032.X_2.X_4) + (-75,429.X_2.X_5) + (-0,320.X_2.X_6) + (-0,057.X_3.X_4) + \\ & (-40,371.X_3.X_5) + (1,25E + 01.X_3.X_6) + (0,550.X_4.X_5) + (-0,028.X_4.X_6) + \\ & (0,015X_5.X_6) + (-42,734.X_1^2) + (0,229.X_2^2) + (-14,483.X_3^2) + ((0,000).X_4^2) + \\ & (12,053.X_5^2) + (3,696.X_6^2) \end{aligned}$$

Çizelge 4.22’de görüldüğü gibi deneysel sonuçların doğrusal olmayan regresyon modeli ile optimizasyonu korelasyon oranı %92 olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.22. KOİ modelleme sonuçları ve korelasyon.

Çalışılan Parametreler	Elektrotlar Arası Mesafe (cm)	Süre (Dk)	pH	İletkenlik ($\mu\text{S/cm}$)	Akım (A)	Voltaj (V)	KOİ (mg/L) Deneysel Çalışma Sonuçları	KOİ (mg/L) Modelleme Sonuçları
pH 3	1	15	3	5750	1	6,0	177,21	176,38
pH 5	1	15	5	5840	1	7,2	166,99	169,04
pH 7	1	15	7	4120	1	7,0	209,03	198,18
pH 8,27	1	15	8,27	4080	1	9,8	153,42	115,90
pH 9	1	15	9	4170	1	9,6	216,78	186,27
pH 11	1	15	11	4820	1	7,4	243,87	250,46
0,01 Amper	1	15	8,27	4030	0,01	0,06	299,00	325,70
0,05 Amper	1	15	8,27	3990	0,05	1,6	289,37	221,96
0,1 Amper	1	15	8,27	3930	0,1	2,2	257,81	225,40
0,2 Amper	1	15	8,27	3980	0,2	3,3	156,35	174,19
0,4 Amper	1	15	8,27	4000	0,4	4,6	93,81	180,97
0,8 Amper	1	15	8,27	4080	0,8	8,8	62,54	79,82
1 Amper	1	15	8,27	4080	1	9,8	153,42	115,90
2 Amper	1	15	8,27	4030	2	17,9	77,17	90,11
5 Dakika	1	5	8,27	4030	0,8	8,1	166,04	174,41
10 Dakika	1	10	8,27	4000	0,8	9,2	83,02	83,45
13 Dakika	1	13	8,27	4090	0,8	8,9	108,04	80,25
15 Dakika	1	15	8,27	4080	0,8	8,8	62,54	79,82
20 Dakika	1	30	8,27	4080	0,8	7,8	135,85	149,45
40 Dakika	1	40	8,27	4160	0,8	8,9	54,02	47,70
0,5 cm	0,5	15	8,27	4030	0,8	4,5	103,28	98,53
1 cm	1	15	8,27	4080	0,8	8,8	62,54	79,82
2 cm	2	15	8,27	4120	0,8	14,1	108,36	100,91
3 cm	3	15	8,27	4260	0,8	16,3	93,12	96,17
4000 $\mu\text{S/cm}$	1	15	8,27	4000	0,8	8,8	62,54	79,82
6000 $\mu\text{S/cm}$	1	15	8,27	6000	0,8	6,1	72,26	72,69
8000 $\mu\text{S/cm}$	1	15	8,27	8000	0,8	5,2	112,26	108,25
10000 $\mu\text{S/cm}$	1	15	8,27	10000	0,8	5,1	126,45	129,10
KORELASYON							92%	

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada kot kumaşı üretim tesisi atıksularının önemli kirletici parametrelerinden olan Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) ve rengin elektrokimyasal yöntemler kullanılarak giderim verimi araştırılmıştır.

Çalışmanın ilk aşamasında elektrokimyasal arıtım kapsamında 1 A/cm² akım değerinde 15 dakikalık arıtım süresinde demir, alüminyum, paslanmaz çelik ve grafit elektrotların her biri anot ve katotta kullanılarak 16 farklı kombinasyonda deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda KOİ ve renk giderim veriminde elektrot materyal cinsinin arıtım verimi üzerine etkisi incelenmiştir.

Demir materyali anot, demir, alüminyum, grafit, paslanmaz çelik materyalleri katot olarak kullanılıp gerçekleştirilen elektrokimyasal arıtım sonucunda KOİ giderim verimlerine bakıldığında arıtımın 15 dakikalık süresinde %50 üzerinde giderimin olduğu görülmektedir. KOİ giderim verimleri demir-demir elektrot çiftinde %59,58 demir-alüminyum elektrot çiftinde %62,69 demir-grafit çiftinde %59,89 ve demir-paslanmaz çelik elektrotlar kullanıldığında ise %61,76 olarak gerçekleşmiştir.

Renk giderim verimlerinin 15 dakikalık arıtım süresinde demir elektrotun anot; demir, alüminyum, grafit, paslanmaz çelik materyalleri katot olarak kullanıldığı durumların hepsinde %95 üzerinde olduğu görülmüştür. Arıtım verimleri demir-demir elektrotlarda %96,09 demir-alüminyum elektrotlarda %96,47 demir- grafit elektrotlarda %96,10 ve demir-paslanmaz çelik elektrotlarda ise %96,77 olarak gerçekleşmiştir.

Optimum elektrot materyali seçiminde KOİ ve renk giderim verimleri birlikte değerlendirilmiştir. %61,76 KOİ (mg/L) giderim verimi ve %96,77 renk giderim verimi ile demir elektrot anot materyali, paslanmaz çelik de katot materyali olarak belirlenmiştir.

Optimum elektrot materyali demir-paslanmaz çelik belirlendikten sonra pH, akım yoğunluğu, süre, elektrotlar arası mesafe, iletkenlik, elektrot bağlantı şekli işletim parametreleri değiştirilerek elektrokimyasal arıtım verimi üzerine etkisi incelenmiştir.

Kot kumaşı üretim tesisi atıksuyu arıtım çalışmasında 1 A/cm² akım değerinde 15 dakika işletim süresinde pH 3, 5, 7, 8,27(ham), 9 ve 11 değerlerine ayarlanmış ve deneyler yapılmıştır. KOİ giderim verimleri pH 3-11 arasında %60'nın üzerinde olduğu, renk giderim verimlerinin pH 7-11 aralığında %90'nın üzerinde olduğu anlaşılmıştır.

Yapılan deneyler sonucu arıtım sonunda ölçülen pH değerinin ilk pH değerinden yüksek olduğu görülmüştür. Düşük pH'larda anot materyali demirde çözünme daha fazla olduğu, suya sarı pas rengi verdiği ve sudaki bulanıklık ve rengin arttığı anlaşılmıştır. Anottaki bu kütle kaybının düşük pH'lar ve pH 9-11 aralığında fazla olduğu bu durumunda elektrot kullanım ömrünü kısaltacağı ve maliyeti arttıracığı anlaşılmıştır. Atıksuyun kendi pH'ında KOİ giderim verimi %78,54 renk giderim verimi de %97,18 olarak belirlenmiştir. Elektrik tüketimi 4,9 kWh/m³ olarak bulunmuştur. Giderim verimlerine bakıldığında ve pH ayarlanması için herhangi bir kimyasal madde ilavesine de ihtiyaç duyulmayan atıksuyun kendi pH değeri 8,27 optimum olarak belirlenmiştir.

pH 8,27, elektrotlar arası mesafe 1 cm ve 15 dakika işletim süresinde 0,01, 0,05, 0,1, 0,2, 0,4, 0,8, 1 ve 2 amper akım değerinde giderim verimleri incelenmiştir. Akım yoğunluğu ile kirletici giderim verimleri arasında doğru orantı olduğu görülmüştür.

Yapılan çalışmada akım yoğunluğunun giderim veriminde önemli etkiye sahip olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin de akım yoğunluğundaki artış ile anot ve katotta iyon üretiminin artması ile birlikte reaktördeki flok oluşumunun da kaynakladığı düşünülmektedir. KOİ giderimi 0.01 A/cm² akım değerinde %58,17 0.1 A/cm² akım değerinde %62,04 olurken 1 A/cm² akım değerinde %78,54 olarak gerçekleşmiştir. Renk giderimi 0,01 A/cm² akım değerinde giderim verimi %10,54 olurken, 0.1 A/cm² akım değerinde %62,04, 1 A/cm² akım değerinde ise %97,18 olarak gerçekleşmiştir. Akım yoğunluğunun artmasının olumsuz etkilerinden biri elektrik tüketiminin artması ve dolayısıyla işletim maliyetlerinin artmasıdır. Bir diğer olumsuz yönü artan elektrik yükü ile reaktörde ısınmaya sebep olmasıdır. Yapılan deneyler sonucu 0,8 A/cm² akım değerinde en yüksek giderim verimleri KOİ için %91,25 ve renk için %94,25 olarak elde edilmiştir. Optimum akım değeri 0,8 A/cm² olarak belirlenmiştir.

pH 8.27, 0.8 A/cm² akım değerinde, elektrotlar arası mesafe 1 cm sabit tutularak, arıtım süresi 5, 10, 13, 15, 20, 30 ve 40 dakika olacak şekilde değiştirilerek, giderim verimleri üzerine arıtım süresinin etkisi incelenmiştir. İlk 5 dakikalık arıtım süresi sonucunda %76,77 KOİ giderim verimi, %55,18 renk giderim verimi elde edilmiştir. Artan süre ile 10 dakika sonunda %88,39 KOİ giderim verimi, %89,73 renk giderim verimi 15 dakikadan sonra %90'nın üzerinde KOİ ve renk giderim verimleri görülmüştür. Artan süre ile KOİ ve renk giderim verimlerinin artmasıyla birlikte elektrik maliyetleri de artmıştır. Yapılan deneylerde 15 dakika arıtım süresi sonunda %91,25 KOİ giderimi, %94,25 renk giderimi elde edilmiştir. İşletim maliyetleri de göz önüne alınarak %90'nın üzerinde giderim verimi gözlenen 15 dakika optimum süre olarak belirlenmiştir.

pH 8.27, 0.8 A/cm² akım değerinde, 15 dakikalık arıtım süresi sabit tutularak elektrotlar arası mesafe 0,1, 1, 2 ve 3 cm olarak değiştirilerek elektrotlar arasındaki mesafenin giderim verimine etkisi incelenmiştir. Literatürde olduğu gibi artan mesafe ile renk giderim veriminde iyileşme tespit edilmiş; bunun nedeninin de mesafe arttığında üretilen iyonların hareketlerinin yavaşlaması ve bir araya gelip flok oluşturma ihtimallerinin artması ve daha fazla boya molekülü absorplayabildikleri düşünülmektedir.

Yapılan elektrotlar arası mesafe deneylerinin hepsinde %80'nin üzerinde KOİ giderimi, %90'nın üzerinde renk giderim verimleri elde edilmiştir. KOİ giderim verimi elektrotlar arası mesafe 0,5 cm olduğunda %85,55 renk giderim verimi ise %93,22 iken mesafe 1 cm ye çıkartıldığında KOİ giderimi %91,25 renk giderimi %94,25 olmuş, mesafe 3 cm'ye çıkartıldığında ise KOİ giderimi %86,97 renk giderimi ise %96,78 olmuştur. Elektrotlar arasındaki mesafe arttıkça elektrotlara uygulanan voltaj da artmıştır. Bunun sonucunda elektrik maliyetleri dolayısıyla işletim maliyetlerinde de artış gözlenmiştir. Elektrotlar arası mesafe 0,5 cm iken elektrotlara uygulanan voltaj 4,5 V, enerji tüketimi 1,8 kWh/m³, enerji maliyeti 0,16864\$ iken elektrotlar arası mesafe 2 cm olduğunda elektrotlara uygulanan voltaj 14,1 V, enerji tüketimi 5,6 kWh/m³ ve enerji maliyeti de 0.17003\$ olmuştur. Artan elektrik ve işletme maliyetleri ve KOİ için %91,25, renk için de %94,25 arıtım verimleri göz önüne alınarak elektrotlar arası mesafe için 1 cm optimum değer olarak belirlenmiştir.

pH 8,27, 0,8 A/cm² akım değerinde, 15 dakikalık arıtım süresi ve elektrotlar arası mesafe 1 cm sabit tutularak, atıksuyun iletkenliği NaCl kullanarak 4080 µS/cm (ham), ≈ 4000 µS/cm, 6000 µS/cm, 8000 µS/cm ve 10000 µS/cm olacak şekilde ayarlanarak iletkenliğin KOİ ve renk giderim verimi üzerine etkisi incelenmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda iletkenliği artmasıyla KOİ ve renk giderim verimlerinde kısmi düşüşler görülmüştür. Artan iletkenlikle elektrotlara uygulanan güç de düşüşler olmuş bu da enerji maliyetlerini dolayısıyla işletim maliyetlerini düşürmüştür. İletkenlik 4000 µS/cm değerinde iken uygulanan güç 8,8 V, enerji maliyeti 0,407\$, iletkenlik 6000 µS/cm değerinde uygulanan güç 6,1 V, enerji maliyeti 0,282\$ iken, iletkenlik 10000 µS/cm yükseldiğinde ise 5,1 V, enerji maliyeti de 0.236\$ olarak belirlenmiştir. Deneyler sonucu 4000 µS/cm, 6000 µS/cm, 8000 µS/cm, 10000 µS/cm iletkenlik değerlerinde KOİ giderim verimleri sırasıyla %91,25, %89,89, %84,29 ve %82,31 olarak, renk giderim verimleri ise sırasıyla %94,25, %93,60, %88,61 ve %96,93 olarak ölçülmüştür. Giderim verimleri KOİ için %91,25 renk için de %94,25, maliyetler ve dışarıdan herhangi bir kimyasal eklenmesine ihtiyaç duyulmadığı şartlar dikkate alındığında atıksuyun kendi iletkenlik değeri 4000 µS/cm optimum olarak belirlenmiştir.

pH 8,27, 0,8 A/cm² akım değerinde, 15 dakikalık arıtım süresi ve elektrotlar arası mesafe 1 cm ve atıksuyun iletkenliği 4000 µS/cm sabit tutularak elektrotlar Paralel Bağlı Monopolar elektrotlar(MP-P),Seri Bağlı Monopolar elektrotlar(MP-S),Seri Bağlı Bipolar elektrotlar (BP-S) şeklinde bağlanarak, elektrot bağlantı şeklinin giderim verimi üzerine etkileri incelenmiştir. KOİ giderim verimleri bütün elektrot bağlantı şekillerinde %85 civarında olup, elektrot bağlantı şeklinin KOİ giderime de önemli etkisinin olmadığı söylenebilir. MP-P, MP-S ve BP-S bağlantı şeklinde KOİ giderim verimleri sırasıyla %85,49, %87,56 ve %86,18'dir. Renk giderim veriminde tek kutuplu elektrot bağlantılı sistemlerin çift kutuplu bağlantılı sistemlere göre daha verimli olduğu, tek kutuplu paralel bağlantılı sistemlerin de seri tek kutuplu bağlantılı sistemlere göre daha verimli olduğunu gözlenmiştir. Renk giderim verimleri MP-P, MP-S ve BP-S bağlantı şeklinde sırasıyla %91,11, %86,59 ve %73,86 olarak ölçülmüştür. Seri Bağlı Bipolar elektrot (BP-S) bağlantı şeklinde elektrotlara uygulanan güçte artış meydana geldiğinden elektrik maliyetleri dolayısıyla işletme maliyetinde artış olduğu gözlenmiştir. MP-P bağlantı şeklinde

uygulanan güç değeri 4,9 V iken, MP-S bağlantı şeklinde 4,1 V ve BP-S bağlantı şeklinde uygulan güç değeri artış göstererek 18,3 V olmuştur. Enerji tüketimleri ise sırasıyla 2,0 kWh/m³, 1,8 kWh/m³ ve 7,3 kWh/m³ olarak ölçülmüştür. Enerji maliyetleri MP-P bağlantı şeklinde 0,227\$, MP-S bağlantı şeklinde 0,213\$ ve BP-S bağlantı şeklinde 0,847\$ olarak hesaplanmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda kot kumaşı üretim tesisi atıksuyunun Demir ve Paslanmaz Çelik elektrotlar ile elektrokimyasal metotlarla arıtılmasında 8,27 pH, 0,8 A/cm² akım değeri, 15 dakikalık arıtım süresi, elektrotlar arası mesafenin 1 cm ve iletkenlik 4000 µS/cm ve Paralel Bağlı Monopolar Elektrotlar bağlantı şekli optimum olarak bulunmuştur.

Çalışmanın ikinci aşamasında işletme parametreleri pH, akım, voltaj, süre, elektrotlar arası mesafe ve iletkenliğin, Pt-Co absorbans değeri olan 456 nm, KOİ ve bulanıklık gideriminin de etkileşimlerinin ne düzeyde olduğunu, değişkenler arasındaki ilişkinin büyüklüğünü öğrenmek, deney sonuçlarını optimize etmek ve modelleme yapmak için IBM SPSS Statistic Version 24 programında Regresyon Modelleme yöntemi kullanılmıştır. Birden fazla değişken olduğundan çok değişkenli Regresyon yöntemi seçilmiştir.

Modelleme de ilk olarak işletim parametreleri bağımlı değişkenler kabul edilerek 456 Abs ve KOİ ve bulanıklık bağımsız değişkenleri arasında doğrusal bir ilişkinin olup olmadığına bakılmıştır. Ortak R² değerleri bütün bağımsız değişkenlerde %50 civarında çıkmıştır. Örneğin KOİ için R² 0,543= %54,3, ve bulanıklık için R² 0,411= %41,1. Modelleme sonucunda bağımlı değişkenler ile bağımsız değişkenler arasında yüksek oranda korelasyon çıktığından ve R² değerlerinin %50 civarında olmasından dolayı modellemenin deney sonuçlarını yeterli oranda temsil etmediği görülmektedir.

Modellemenin ikinci aşamasında işletim parametrelerinin pH, akım, voltaj, süre, elektrotlar arası mesafe ve iletkenlik ile bağımlı değişkenler ile Pt-Co absorbans 456 nm, KOİ ve bulanıklık gibi bağımsız değişkenler arasında doğrusal olmayan bir ilişkinin varlığı kabul edilmiştir. Doğrusal olmayan regresyon yöntemi ile çalışmada geliştirilen ikinci dereceden model yardımıyla, deneysel ve tahmini değerler arasında anlamlı bir ilişkinin var olduğu görülmüştür. Varyans analizi yüksek determinasyon

katsayılarına sahiptir. Böylece Doğrusal olmayan regresyon modeli ile deney sonuçları arasında yüksek oranda bir uyum elde edilmiştir. Bu değerler 456 Abs, KOİ ve bulanıklık için sırasıyla %80, %92 ve %92 şeklindedir.

Bu tez kapsamında elde edilen deneysel sonuçların değerlendirilmesi ile kot kumaşı üretim tesisi atıksuyunun arıtılmasında elektrokimyasal yöntemlerin başarılı sonuçlar vereceği görülmektedir. Çalışmada 15 dakikalık arıtım süresinde sonunda %91,25 KOİ giderimi, %94,25 renk giderimi verimine ulaşması yöntemin KOİ ve renk gideriminin de etkili olduğunu göstermektedir.

pH 8,27, 0,8 A/cm² akım değerinde, 15 dakika arıtım süresi, atıksu iletkenliği 4000µs/cm ve elektrotlar arası mesafe 1 cm olarak belirlenerek yapılan deneyler sonucu %91,25 KOİ giderimi ile çıkış KOİ değeri 63 mg/L değerine , %94,25 renk giderimi ile çıkış renk değeri 67 Pt-Co değerine düşürülmesiyle Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği Tablo 10:Tekstil Atıksuların Alıcı Ortama Deşarj Standartları başlığı altında yer alan Tablo 10.1:Sektör : Tekstil Sanayii (Açık elyaf,İplik Üretimi ve Terbiye) için belirlenmiş olan Kompozit numune 2 saatlik KOİ değeri 350 mg/L ve 280 Pt-Co Renk değeri, kompozit numune 24 saatlik KOİ değeri 240 mg/L ve 260 Pt-Co Renk değeri parametrelerinin altında değerler elde edilmiştir.

Çamur oluşumunun az olması, kimyasal koagülasyon ile karşılaştırıldığında kimyasal koagülant kullanımından kaynaklanan ikincil kirleticilerin oluşmaması, biyolojik arıtım prosesleri ile karşılaştırıldığında daha az alıkonma süresi ile istenilen verimler elde edildiğinden alan ihtiyacının da en aza indirilmesi prosesin avantajları olarak görülmektedir. Ayrıca "Çevre Kanunu'nun 29'uncu Maddesi Uyarınca Atıksu Arıtma Tesislerinin Teşvik Tedbirlerinden Faydalanmasında Uyulacak Usul ve Esaslara Dair Yönetmelik" te atıksuların arıtılması amacıyla arıtım tesislerinde kullanılan ve ödemesi yapılan bir önceki yıla ait elektrik enerjisi gideri geri ödenir denilmektedir. Bu da elektrokimyasal arıtımın temel maliyet unsurlarından olan enerji maliyetinin azalması ile toplam maliyeti azaltacak ve kot kumaşı üretim tesisi atıksularının elektrokimyasal metotlarla arıtımını cazip hale getirecektir. Yüksek iletkenliği sahip olan kot kumaşı üretim tesisi atıksuyunun elektrokimyasal prosesleri ile arıtımında karşılaşılan güçlüklerin önlenmesi amacıyla atıksuyun evsel ve diğer endüstri atıksuları ile karıştırılması ile arıtım veriminin daha da artacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Akbaş, H., 2014. Elektrokoagülasyon yöntemi ile renk gideriminin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Alver, A., 2012. Aksaray ili düzenli depolama sahası sızıntı suyu karakterizasyonu ve elektrokimyasal arıtılabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Aksaray.
- Avcu, F., 2010. Atıksulardaki fenolün elektrooksidasyon ile arıtılması için elektroaktif elektrot geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Kimya Anabilim Dalı, Adana.
- Aygün, A., 2012. Tekstil endüstrisi reaktif ve dispers boya banyo atıksularının elektrokoagülasyon prosesi ile arıtımı: yanıt yüzey yöntemi ile optimizasyon, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Aytaç, E., 2011. Elektrokoagülasyon yöntemi kullanılarak tekstil atıksularının arıtımı, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- APHA, American Public Health Association, 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater, 21st ed., APHA-AWWA-WEF, Washington, DC.USA.
- Arıcı, Y., 2000. Tekstil endüstrisinde reaktif boyarmaddelerden kaynaklanan rengin fenton prosesi ile giderilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Arslan-Alaton, İ., Kabdaşlı I., Vardar, B., ve Tunay O., 2009. Electrocoagulation of simulated reactive dyebath effluent with aluminum and stainless steel electrodes, Journal of Hazardous Materials, 164, 1586–1594.
- Bahadır, E.B., 2012. Tekstil endüstrisi arıtılmış atıksularında renk ve öncelikli kirleticilerin ozon teknolojisi ile gideriminin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 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.
- Bayar, S., Boncukçuoğlu, R., Fil, B., ve Yılmaz, A., 2012. Elektrokoagülasyon yöntemi kullanılarak direct red 23 boyarmaddesinin gideriminin incelenmesi, Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2, 21-28.

- Bayazıt, M., ve Yeğenoğuz, B., 2011. Mühendisler için istatistik, Lord Matbaası, İstanbul.
- Bayramoğlu, M., Koby, M., Can, O.T. ve Sözbir, M., 2004. Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater, Separation and Purification Technology, 37, 117–125.
- Berik, N., 2002. İşlenmiş ve işlenmemiş su ürünlerinin elektroforez yöntemi ile cinslerinin tanımı, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Su Ürünleri Avlama ve İşleme Teknolojisi Anabilim Dalı İşleme Teknolojisi Programı, İstanbul.
- Birgül, A., 2006, Tekstil endüstrisi atıksu arıtımında ileri oksidasyon proseslerinin kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Biroğul, N., 2012, Bir tekstil atıksuyunun koagülasyon – flokülasyon – membran filtrasyon süreçleri ile arıtılabilirliğinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Chen, X., Chen, G. ve Yue, L. P., 2000. Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation, Separation and Purification Technology, 19, 65–76.
- Chen, G., 2004. Electrochemical technologies in wastewater treatment, Separation and Purification Technology, 38, 11-41.
- Cündübey, F., S., 2018. Denim kumaş üretiminde su ve enerji kullanımının değerlendirilerek üç farklı denim kumaşının çevresel etkilerinin YDA ile karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Çelebi, M., 2013. Tekstil atıksularında boyaların biyobozunma ile giderilmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çelik, V., 2002. Nükleik asitlerin elektroforezi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyoloji Bölümü, Elâzığ.
- Çolak, Z., 2017. Adıyaman Kâhta yüzüncü yıl göleti'ne deşarj edilen ilçe atıksuyunun elektroflotasyon yöntemiyle arıtılabilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Adıyaman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adıyaman.
- Daneshvar, N., Sorkhabi, H. A., ve Kasiri, M. B., 2004. Decolorization of dye solution containing Acid Red 14 by electrocoagulation with a comparative investigation of different electrode connections, Journal of Hazardous Materials, B 112, 55-62.
- Daneshvar, N., Khataee, A.R. ve Djafarzadeh N., 2006. The use of artificial neural networks (ANN) for modeling of decolorization of textile dye solution

- containing C. I. Basic Yellow 28 by electrocoagulation process, Journal of Hazardous Materials, B137, 1788–1795.
- Delipinar, Ş., 2007. Maya endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyon ve kimyasal koagülasyon ile arıtımı, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, 3-81, Gebze.
- Dos Santos, A.B, Cervantes F.J ve Van Lier J.B.,2007. Review paper on current technologies for derenkisation of textile wastewaters perspectives for anaerobic biotechnology. Bioresearch Technology, 98, 2369-2385.
- Durmaz, U., 2018.Deri sanayi atıksularının elektrokoagülasyon ile arıtımı, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Niğde.
- EPA, (Environmental Technology Best Practice Programme), 1997. Water and chemical use in the textile dyeing and finishing industry, Washington.
- EPA, 1986. Quality criteria for water. US EPA, Washington, DC.
- Eren, H.A. ve Anış. P., 2006. Tekstil boyama atıksularının ozonlama ile renk giderimi, Uludağ Üniversitesi Mühendislik, Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 11, Sayı 1, Bursa.
- Ergün E., 2008. Elektrodializ yöntemiyle sulardan florür'ün giderilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.
- Fil, B., Boncukoğlu R., Yılmaz A. ve Bayar S., 2012. Antep fıstığı işleme atıksularının elektrooksidasyon yöntemiyle ön arıtım çalışmaları, Iğdır Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2, 29-36.
- Göç, S., 2018. Yağlı atıksuların üç boyutlu çelik tel elektrot kullanımı ile elektrokimyasal arıtımı, Yüksek Lisans Tezi, Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- Gürbüz, S., ve Akinalc, C., 2002. Tekstil endüstrisi atıksuların arıtılması, Bitirme Tezi, Sakarya Üniversitesi Çevre Mühendisliği, Sakarya.
- İlhan, F., Kurt U., Apaydın, Ö., Arslankaya, E., ve Gönüllü, T., 2007. Elektrokimyasal arıtım ve uygulamaları: katı atık sızıntı suyu çalışması. AB sürecinde Türkiye’de katı atık yönetimi ve çevre sorunları sempozyumu, 1-9, İstanbul.
- İnan, H., Dimoglo, A., Şimşek ve H., Karpuzcu, M., 2004. Olive oil mill wastewater treatment by means of elektro-coagulation, separation and purification technology, 36, 1, 23-31.

- İrdemez, Ş., Demircioğlu N. ve Yıldız Y.Ş., 2006. The effects of pH on phosphater removal from wastewater by electrocoagulation with ironplate electrodes, *Journal of Hazardous Materials*, 137, 2, 1231-1235.
- Kabdaşlı, I., Vardar, B., Arslan-Alaton, I. ve Tunay O., 2009. Effect of dyeauxiliaries on color and COD removal from simulated reactive dyebatheffluent by electrocoagulation, *Chemical Engineering Journal*, 148, 89-96.
- Karadağ, E.K., 2009. Elektrokoagülasyon yöntemi ile karışım halindeki tekstil boyar maddelerin renk giderimi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Kao C. M, Chou M. S, Fang W. L, Liu B. W ve Huang B. R., 2001. Regulating color textile wastewater by 3/31 wavelength admi methods in Taiwan. *Chemosphere*, 44, 1055- 1063.
- Karagözoğlu, B. ve Malkoç, R., 2017. Tekstil atıksularından Reactive Orange 16 boyasının elektrokoagülasyon prosesi kullanılarak gideriminin araştırılması, *Cumhuriyet Science Journal*, Bölüm 38-3, 544-556. Sivas.
- Keskintürk, T., Şahin., S., 2009. Doğrusal olmayan regresyon analizinde gerçek değer kodlamalı genetik algoritma, *İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi* 8, 15, 167-178.
- Kırlaroğlu, M., 2008. Tekstil Atıksularının farklı güç kaynakları kullanılarak elektrokimyasal arıtımında optimum şartların araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü, Gebze.
- Kim, T.H., Park, C., Shin, E.B. ve Kim, S., 2002. Decolorization of disperse and reactive dyes by continuous electrocoagulation proses, *Desalination*, 150, 165-175.
- Kobyay, M., Can, O. T. ve Bayramoğlu, M., 2003. Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes, *Journal Of Hazardous Materials*, 100, 163-178.
- Kobyay M., Bayramoğlu M., ve Eyvaz M., 2007. Techno-Economical evaluation of electrocoagulation for the textile wastewater using different electrode connections, *Journal of Hazardous Materials*, 148, 311-318.
- Kocaer, O., ve Alkan, U., 2002. Boyar madde içeren tekstil atıksularının arıtım alternatifleri, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 7, 1, 47-55, Bursa.
- Koç, E. ve Ayyıldız Ç., 2005. Denim kumaş üretim esasları, dünya ve Türkiye'deki ticaret durumu, Çukurova Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Adana.
- Koçak, C., 2011. Bacillus subtilis ile reaktif black 5 boyar maddesinin renk giderim kinetiğinin araştırılması, Çukurova Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Adana.

- Kumar, P.R., Chaudhari, S., Khilar, K.C. ve Mahajan, S.P., 2004. Removal of arsenic from water by electrocoagulation, *Chemosphere*, 55, 9, 1245-1252.
- Kunt, A., G., 2004. Denim kumaşlarda konfeksiyon sonrası yapılan işlemlerin kumaş mekaniği üzerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Lu, K., Zhang, X.L, Zhao, Y.L., ve Wu, Z.L., 2010. Removal of color from textile dyeing waste water by foam separation, *Journal of Hazardous Materials*, 182, 928-932.
- Malkoç, R., 2008. Reaktif tekstil boya çözeltilerinin elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Manisankar, P., Rani, C. ve Viswanathan, S., 2004. Effect of halides in the electrochemical treatment of distillery effluent, 57, 8, 961-6.
- Mendez-Sanchez, N. C., 2009. Biodecolorization of paper mills wastewater using anaerobic composting, Ph.D. Thesis, Auburn University, Alabama.
- Mollah M., Schennach R., Parga J. ve Cocke D., 2001. Electrocoagulation (EC) science and applications, *Journal of Hazardous Materials*, B84, 29-41.
- Mollah, M., Morkovsky, P., Gomes, J., Kesmez, M., Parga J., ve Cocke, D., 2004. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation, *Journal of Hazardous Materials*, B114, 199-210.
- O'Neill, C., Lopez, A., Esteves, S., Hawkes, F. R, Hawkes, D. L. ve Wicox, S., 2000. Azo- dye degradation in an anaerobic-aerobic treatment system operating on simulated textile effluent. 53, 2, 249-254.
- Özdemir, D., 2006. Denim mamullerin ağartılmasında kullanılan sodyum hipoklorit ve potasyum permanganat yöntemlerine alternatif yöntemlerin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Özden, M., 2016. Boyar maddelerin elektrokoagülasyon ile arıtılabilirliğinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli.
- Özyonar, F. ve Karagözoğlu, B., 2012. Elektrokoagülasyon prosesi ile tekstil sanayi atıksuyunun arıtımı, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28, 29-37.
- Özyurt, A., 2018. Tekstil endüstrisi atıksuyunun elektrokoagülasyon ve kimyasal koagülasyon yöntemleriyle arıtılabilirliğinin karşılaştırılması olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.

- Pekel, C.L., 2013. Tekstil atık sularının elektrokimyasal yöntemle arıtılması, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Rajkumar, D. ve Kim, J. G., 2006. Oxidation of various reactive dyes with in situ electro-generated active chlorine for textile dyeing industry wastewater treatment, *Journal of Hazardous Materials*, 136, 2, 203-212.
- Sabuncu, S., 2018. Procion yellow h-exl tekstil boyarmaddesinin sulu çözeltilerden demir elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyon ile giderilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.
- Sesler, Ş.K., 2014. İndigo yıkama & pamuklu kumaş boyama yapan bir tekstil endüstrisinin arıtılmış atıksuyun da renk giderimi için en uygun koagülasyon / flokülasyon teknolojisinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Tekirdağ.
- Solak, M., 2007. Elektrokoagülasyon prosesi ile mermer atık sularının arıtılması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Solak, M., ve Öztürk., A., 2018. Endüstriyel atıksu arıtımında kimyasal ve elektrokimyasal proseslerin etkinliğinin karşılaştırılması: Denim ürün üretim sektörü, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 7, 2, 20-35.
- Şahin, B., 2017. Kot kumaş üretimi & kalite, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Ortak Programı, Kahramanmaraş.
- Şahin, Y., 2006. Asit banyosu atıksularının kimyasal prosesler ile ön arıtılabilirliğinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Şengil, İ.A. ve Özacar, M., 2009. The decolorization of C.I. Reactive Black 5 in aqueous solution by electrocoagulation using sacrificial iron electrodes, *Journal of Hazardous Materials*, 161, 1369–1376.
- Temur, B., O., 2012. Sentetik tekstil atıksularının anaerobik-aerobik ardışık sistemde arıtımı, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- T.C. Resmî Gazete, Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği, (25687).31.12.2004,32.
- Tübitak, 2013. Boyar madde içeren atıksular için deşarj renk standardının belirlenmesi ve arıtım teknolojilerinin araştırılması, 109G083 no'lu Tübitak Kamag Projesi El Kitabı.
- Türk, B., 2016. Alüminyum- çinko metal işleme tesisi atıksuyunun elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtılabilirliğinin incelenmesi, 19 Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Endüstrisi, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Samsun.

- Türkoğlu G., 2007. Dispers boya banyo atıksularının elektrokoagülasyon ile arıtılabilirliğinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Uçar, M.Ç., 2008. Sentetik tekstil atıksuyundaki boyarmaddelerin uzaklaştırılmasında çeşitli fungus türlerinin karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- UIB, 2017. Uludağ İhracatçı Birlikleri, Türkiye kot kumaş sektörü-dış ticaret raporu, Bursa.
- Vardar, B., 2006. Tekstil endüstrisi reaktif boya banyolarının elektrokimyasal yöntemler ile arıtımı, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yang, C.L. ve McGarrah, J., 2005. Electrochemical coagulation for textile effluent decolorization, Journal of Hazardous Materials, B127, 40–47.
- Yamaç, D., 2016. Tekstil boyar maddesinin sulu çözeltilerinden elektrokimyasal yöntemler ile giderimi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Yaşar, Ö., D., 2018. Metal kaplama atıksuyundan elektrokoagülasyon flokları, klinoptilolit ve kaolin kullanarak nikel (II) iyonlarının giderimi, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Yavuz S. ve Doç. Dr. Balcı O., 2016. Denim kumaş üretimi ve küresel pazarı, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş.
- Yüce, M., 2007. Arıtımı yapılmamış atıksulardan izole edilen mikroorganizmalarla reaktif black b ve krom (VI) giderimi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Biyoteknoloji Enstitüsü, Ankara.
- Yılmaz, A.E., Boncukcuoğlu, R., Kocakerim, M. M., Yılmaz, M. T. ve Paluluoğlu, C., 2008. Boron removal from geothermal waters by electrocoagulation, Journal of Hazardous Materials, 153, 12, 146-151.
- Yılmaz, A.E., Boncukcuoğlu, R., Kocakerim, M.M., ve Kocadağıstan, E., 2009. An empirical model for kinetics of boron removal from boron containing wastewaters by the electrocoagulation method in a batch reactor. Desalination, 230, 1–3, 288-297.
- Zoroğlu, D. 2019. Hastane atıksularından elektrokoagülasyon yöntemi ile kimyasal oksijen ihtiyacı gideriminin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- URL-1 <<http://www.tekstildershanesi.com.tr/bilgi-deposu/hasillama-isleminin-amaci-ve-onemi>> Erişim Tarihi: 28.10.2018.

- URL-2 <http://www.wepa-db.net/policies/law/malaysia/eq_surface.htm>, Erişim Tarihi: 27.01.2019.
- URL-3 <<http://scclmines.com/env/ENVIRONMENTAL%20STANDARDS.pdf>>, Erişim Tarihi: 01.04.2019.
- URL-4 <<https://www.nea.gov.sg/our-services/pollution-control/water-quality/allowable-limits-for-trade-effluent-discharge-to-watercourse-or-controlled-watercourse>> Erişim Tarihi: 01.04.2019.
- URL-5 <<http://trakhees.ae/en/ehs/env/Documents/Guidelines/GN-016.pdf>> Erişim Tarihi: 01.04.2019.
- URL-6 <<http://www.dot.ca.gov/hq/construc/stormwater/field-guide-to-construction-site-dewatering.pdf>>, Erişim Tarihi: 01.04.2019.
- URL-7 <<http://www.ehso.com/ehshome/DrWater/drinkingwaterepastds.php>>, Erişim Tarihi: 01.04.2019.
- URL-8 <<https://www.novascotia.ca/nse/water/docs/WellWaterBooklet3.pdf>>, Erişim Tarihi: 01.04.2019.
- URL-9 <<https://tekstilsayfasi.blogspot.com/2013/01/kukurt-boyarmaddeler-seluloziklerin.html>>, Erişim Tarihi: 01.04.2019.
- URL-10 <<https://webdosya.csb.gov.tr/db/ippc/icerikbelge/icerikbelge1130.pdf>>, Erişim Tarihi:01.04.2019.
- URL-11 < <https://www.betacare.co.ke/images/she%20policies/Water%20Quality%20Regulations%20ken84962.pdf>>, Erişim Tarihi: 01.04.2019.
- URL-12 <<https://docplayer.biz.tr/45902756-Amac-bu-pratigin-amaci-ogrencilerin-elektroforez-yontemi-ve-kullanim-alanlari-hakkinda-bilgi-sahibi-olmalarini-saglamak.html>>, Erişim Tarihi: 11.04.2019.
- URL-13 < <http://www.enerjiatlasi.com/elektrik-fiyatlari/#sanayi>>, Erişim Tarihi: 26.02.2019.
- URL-14 < <https://metalavm.com>>, Erişim Tarihi:26.02.2019.
- URL-15 < https://turkish.alibaba.com/trade/search?fsb=y&IndexArea=product_en&CatId=&SearchText=grafit&viewtype=>, Erişim Tarihi:26.02.2019.
- URL-16 <<https://newonlinecourses.science.psu.edu/stat501/node/347/>>, Erişim Tarihi: 04.04.2019.
- URL-17 < http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/68595/37605/b%C3%B6l%C3%BCm_11_regresyon_analizi.docx >, Erişim Tarihi: 04.04.2019.

URL-18 < ftp://public.dhe.ibm.com/software/analytics/spss/documentation/statistics/24.0/en/client/Manuals/IBM_SPSS_Categories.pdf >, Erişim Tarihi: 25.03.2019.



EKLER

EK A. RES 436, RES 525, RES 620 Çizelgeler.



Çizelge A.1. Farklı pH değerlerinde elde edilen RES değerleri.

pH	Res Değerleri (436 nm)	Res Değerleri (525 nm)	Res Değerleri (620 nm)	Ortalama RES Değeri
Ham	57,2	40,2	54,4	50,6
3	47,6	34	45,2	42,3
5	12	9	11,8	10,9
7	6,2	4,2	5,4	5,3
8,27	1,2	0,1	0,4	0,6
9	1,5	0,1	0,6	0,7
11	1,7	0,6	0,9	1,1

Çizelge A.2. Farklı Akım değerlerinde elde edilen RES değerleri.

Akım (Amper)	RES Değerleri (436 nm)	RES Değerleri (525 nm)	RES Değerleri (620 nm)	Ortalama RES Değeri
Ham	57,2	40,2	54,4	50,6
0,01	51,2	36	48,4	45,2
0,05	41,8	30,3	39,9	37,3
0,1	21,2	14,5	20,2	18,6
0,2	15,4	11	15	13,8
0,4	1,9	0,4	0,6	1,0
0,8	2,3	0,4	0,6	1,1
1,0	1,2	0,1	0,4	0,6
2,0	0,8	0,1	0,1	0,3

Çizelge A.3. Farklı arıtım sürelerinde elde edilen RES değerleri.

Süre (Dakika)	RES Değerleri (436 nm)	RES Değerleri (525 nm)	RES Değerleri (620 nm)	Ortalama RES Değeri
Ham	57,2	40,2	54,4	50,6
5	25,4	17,5	24,7	22,5
10	6,2	4,2	5,7	5,4
13	2,2	0,7	0,4	1,1
15	1,6	0,4	0,6	0,9
20	1,5	0,4	0,3	0,7
30	0,4	0,1	0,1	0,2
40	1,1	0,4	0,4	0,6

Çizelge A.4. Farklı elektrotlar arası mesafelerde elde edilen RES değerleri.

Elektrotlar Arası Mesafe (cm)	RES Değerleri (436 nm)	RES Değerleri (525 nm)	RES Değerleri (620 nm)	Ortalama RES Değeri
Ham	59	52	59,4	56,8
0,5	2,7	0,5	0,4	1,2
1	2,3	0,4	0,6	1,1
2	1,3	0,1	0,5	0,6
3	1,3	0,1	0,1	0,5

Çizelge A.5. Farklı elektrotlar arası mesafelerde elde edilen RES değerleri.

İletkenlik ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	RES Değerleri (436 nm)	RES Değerleri (525 nm)	RES Değerleri (620 nm)	Ortalama RES Değeri
Ham	57,2	40,2	54,4	50,6
4000	2,3	0,4	0,6	1,1
6000	2,5	0,4	0,4	1,1
8000	4,4	0,9	4,0	3,1
10000	1,1	0,1	0,5	0,6

Çizelge A.6. Farklı elektrot bağlantı şekillerinde elde edilen RES değerleri.

Elektrot Bağlantı Şekli	RES Değerleri (436 nm)	RES Değerleri (525 nm)	RES Değerleri (620 nm)	Ortalama RES Değeri
Ham	57,2	40,2	54,4	50,6
MP-P	9,5	0,8	0,8	3,7
MP-S	5,3	1,5	1,2	2,7
BP-S	9,7	4,8	3,5	6,0

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Önder KAHRAMAN

Doğum Tarihi ve Yılı : 1978-Çankırı

Adres : Merkez/AKSARAY

E-posta adresi : okahraman1878@gmail.com

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Aksaray Üniversitesi, Çevre Müh. Bölümü 2012-2016

Yüksek Lisans : Aksaray Üniversitesi, Çevre Müh. Bölümü 2016-2019