

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



**REAKTİF RED 195 TEKSTİL BOYARMADDESİNİN SULU
ÇÖZELTİLERDEN ÇELİK ELEKTROT KULLANILARAK
ELEKTROKOAGÜLASYON İLE GİDERİMİ**

FADİME SONGÜL ÖZÇELİK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ahmet GÜNEY** (Tez Danışmanı)
 Dr. Öğr. Üyesi Zürrîye GÜNDÜZ (Eş Danışman)
 Dr. Öğr. Üyesi Elif ÖZMETİN
 Doç. Dr. Pınar BEYLİ
 Dr. Öğr. Üyesi Hüdaverdi ARSLAN

BALIKESİR, 01 - 2020

KABUL VE ONAY SAYFASI

Fadime Songül ÖZÇELİK tarafından hazırlanan “REAKTİF RED 195 TEKSTİL BOYARMADDESİNİN SULU ÇÖZELTİLERDEN ÇELİK ELEKTROT KULLANILARAK ELEKTROKOAGÜLASYON İLE GİDERİMİ” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 17 Ocak 2020 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman

Prof. Dr. Ahmet GÜNAY
Balıkesir Üniversitesi

Eş Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Züriye GÜNDÜZ
Balıkesir Üniversitesi

Üye

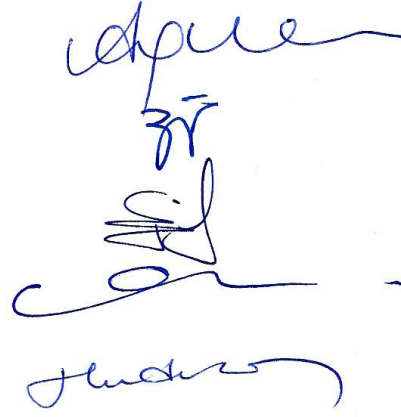
Dr. Öğr. Üyesi Elif ÖZMETİN
Balıkesir Üniversitesi

Üye

Doç. Dr. Pınar BEYLİ
Balıkesir Üniversitesi

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Hüdaverdi ARSLAN
Mersin Üniversitesi



Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “REAKTİF RED 195 TEKSTİL BOYARMADDESİNİN SULU ÇÖZELTİLERDEN ÇELİK ELEKTROT KULLANILARAK ELEKTROKOAGÜLASYON İLE GİDERİMİ” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Fadime Songül ÖZÇELİK



ÖZET

REAKTİF RED 195 TEKSTİL BOYARMADDESİNİN SULU ÇÖZELTİLERDEN ÇELİK ELEKTROT KULLANILARAK ELEKTROKOAGÜLASYON İLE GİDERİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
FADİME SONGÜL ÖZÇELİK
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. AHMET GÜNAY)
(EŞ DANIŞMAN: DR. ÖĞRETİM ÜYESİ ZÜRRİYE GÜNDÜZ)
BALIKESİR, OCAK - 2020

Bu tez çalışmasında çelik elektrotların kullanıldığı elektrokoagülasyon ve elektrokoagülasyon/adsorpsiyon hibrit prosesi ile Reaktif Red 195 (RR195) boyarmaddesinin sulu çözeltilerden giderimi incelenmiştir. İlk bölümde elektrokoagülasyon prosesi için optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu kapsamda başlangıç boyarmadde derişimi (50,100 ve 250 mg/L), pH (3, 5.5, 7 ve 8.5) ve akım yoğunluğundan (10, 20 ve 30 mA/cm²) oluşan işletme parametrelerinin renk giderimine etkisi incelenmiştir. Geleneksel elektrokoagülasyon prosesinde optimum işletme parametrelerinde (başlangıç boyarmadde derişimi 50 mg/L, akım yoğunluğu 20 mA/cm², reaksiyon süresi 5 dakika ve boyanın doğal pH değeri olan pH 5.5) renk giderim verimi %99,04 elde edilmiştir. İkinci bölümde elektrokoagülasyon/adsorpsiyon deneysel çalışmaları yapılmış ve adsorbent olarak kaolinit, sepiyolit, üleksit ve kolemanit kullanılmıştır. Her bir adsorbent için başlangıç boyarmadde derişimi (50, 100 ve 250 mg/L), pH (3, 5.5, 7 ve 8.5) ve kolemanit ile dozaj (1 g/L, 2g/L ve 4 g/L) çalışmaları yapılmıştır. Optimum başlangıç boyarmadde derişimi 50 mg/L, doğal pH (pH=5.5) ve adsorbent dozajı 1 g/L olarak belirlenmiştir. 3 dakika muamele sonunda pH 5.5'te elektrokoagülasyon ile %97.66 verim elde edilirken elektrokoagülasyon/adsorpsiyon prosesinde kaolinit, sepiyolit, üleksit ve kolemanit için sırası ile %99.25, %98.83, %98.61 ve % 98.3 verim elde edilmiştir. RR195 boyarmaddesinin gideriminde çelik elektrodun kullanıldığı geleneksel elektrokoagülasyon yönteminin oldukça etkili olduğu; elektrokoagülasyon/adsorpsiyon hibrit prosesi için ise pH'ın önemli bir parametre olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Buna ilaveten, işletme maliyeti açısından değerlendirildiğinde elektrokoagülasyon prosesinin tek başına yeterli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

ANAHTAR KELİMELELER: Elektrokoagülasyon, elektrokoagülasyon/adsorpsiyon, çelik elektrot, renk giderimi, doğal adsorbent, tekstil endüstrisi

ABSTRACT

REMOVAL OF REACTIVE RED 195 TEXTILE DYE BY ELECTROCOAGULATION USING STEEL ELECTRODE FROM WATER SOLUTIONS

MSC THESIS

FADIME SONGÜL ÖZÇELİK

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

ENVIRONMENTAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. AHMET GÜNAY)

(CO-SUPERVISOR: ASSIST PROF. DR. ZÜRRİYE GÜNDÜZ)

BALIKESİR, JANUARY - 2020

The removal of Reactive Red 195 (RR195) dyestuff from aqueous solutions by electrocoagulation and electrocoagulation/adsorption hybrid process using steel electrodes were investigated in this thesis. Optimization studies were performed for electrocoagulation process in the first part. Within this context, the effects of operating parameters consisting of initial dye concentration (50,100 ve 250 mg/L), pH (3, 5.5, 7 ve 8.5) and current density (10, 20 ve 30 mA/cm²) on decolorization were examined. Decolorization efficiency was obtained 99.04% at the optimum operating parameters (50 mg/L of initial dye concentration, 20 mA/cm² of current density, 5.5 of natural pH of the dye) for the conventional electrocoagulation process. In the second part, electrocoagulation/adsorption experimental studies were performed and kaolinite, sepiolite, ulexite and colemanite were used as adsorbents. Initial concentration of dye (50,100 and 250 mg / L), pH (3, 5.5, 7 and 8.5) for each adsorbent and dosing with colemanite (1 g/L, 2g/L and 4 g/L) were studied. The optimum initial concentration of dye was 50 mg/L, natural pH of dye (5.5 of pH) and 1 g/L of adsorbent dosage was determined. While 97.66% yield was obtained at 5.5 of pH after 3 minutes of treatment by electrocoagulation, for kaolinite, kaolinite, sepiolite, ulexite and colemanite, yields of 99.25%, 98.83%, 98.61% and 98.3% were obtained employing electrocoagulation/adsorption process, respectively. It was concluded that electrocoagulation method using steel electrode is quite effective in removing RR195 dye, and pH is an important parameter for electrocoagulation/adsorption process, on the other hand the electrocoagulation process alone is adequate in terms of operating costs.

KEYWORDS: Electrocoagulation, electrocoagulation/adsorption, steel electrode, decolorization, natural adsorbent, textile industry.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
TABLO LİSTESİ.....	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ	x
1. GİRİŞ	1
1.1 Tekstil Endüstrisi	2
1.1.1 Boyarmaddelerin Sınıflandırılması	5
1.1.1.1 Kimyasal Yapılarına Göre Sınıflandırma.....	5
1.1.1.2 Boyama Özelliklerine Göre Sınıflandırma.....	7
1.1.1.3 Çözünürlük Özelliklerine Göre Sınıflandırma	9
1.2 Boyarmaddelerin Giderilmesinde Kullanılan Yöntemler	10
1.2.1 Fiziksel Yöntemler	10
1.2.1.1 Membran Filtrasyonu	10
1.2.1.2 İyon Değişimi	11
1.2.1.3 Adsorpsiyon.....	11
1.2.2 Biyolojik Yöntemler	12
1.2.2.1 Anaerobik Yöntem	12
1.2.2.2 Aerobik Yöntem	13
1.2.3 Kimyasal Yöntemler	14
1.2.3.1 Kimyasal Floklaştırma ve Çöktürme.....	14
1.2.3.2 Oksidasyon	14
1.2.3.3 Ozonifikasyon.....	15
1.3 Elektrokimyasal Arıtım Yöntemleri	15
1.3.1 Elektroforez.....	16
1.3.2 Elektrodializ	16
1.3.3 Elektroflotasyon	16
1.3.4 Elektrokoksidasyon	17
1.3.5 Elektrokoagülasyon.....	18
1.3.5.1 Elektrokoagülasyon Prosesinin Avantaj ve Dezavantajları.....	20
1.4 Elektrokoagülasyona Etki Eden Parametreler	21
1.4.1 Elektrot Cinsi	21
1.4.2 Akım Yoğunluğu.....	22
1.4.3 Sıcaklık.....	22
1.4.4 Elektrotlar Arası Mesafe	23
1.4.5 pH.....	23
1.4.6 Elektrolit Türü.....	24
1.4.7 Arıtım Süresi	24
1.5 Bazı Adsorbentler	25
1.5.1 Kaolinit.....	26
1.5.2 Sepiyolit	27
1.5.3 Üleksit.	28

1.5.4 Kolemanit.....	29
1.6 Literatür Taraması.....	29
2. MATERYAL VE METOD.....	35
2.1 Materyal	35
2.2 Deneysel Değişkenler	39
2.3 Analiz	40
3. BULGULAR.....	42
3.1 Elektrokoagülasyon Prosesi	42
3.1.1 RR 195'in Giderimine Başlangıç Boyarmadde Derişiminin Etkisi	42
3.1.2 RR 195'in Giderimine Akım Yoğunluğunun Etkisi	45
3.1.3 R R 195'in Giderimine Başlangıç pH'ının Etkisi	47
3.2 Elektrokoagülasyon/Adsorpsiyon Hibrit Prosesi	53
3.2.1 RR195 Giderimine Adsorbentlerin Etkisi	53
3.2.2 Mineral Dozajının Etkisi	53
3.2.3 Başlangıç Derişiminin Etkisi.....	54
3.2.4 Başlangıç pH'ının Etkisi	57
3.3 KOİ Analizi.....	60
3.4 FT-IR Değerlendirmesi	61
3.5 SEM Analizi.....	67
3.6 Birim Enerji İhtiyacı	71
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	73
5. KAYNAKLAR	76
EKLER	90
EK A: Elektrokoagülasyon Prosesi Deneysel Çalışma Verileri.....	90
EK B: Elektrokoagülasyon/Adsorpsiyon Prosesi Deneysel Çalışma Verileri	93
ÖZGEÇMİŞ	102

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Kil minerali kristal yapısı (Chimeddorj, 2007).....	26
Şekil 1.2: Kaolinitin kristal yapısı (Grim, 1962).	27
Şekil 1.3: Sepiyolitın yapısı (Galan, 1996).	27
Şekil 1.4: Üleksit minerali (MTA, 2019).	29
Şekil 1.5: Kolemanit minerali (MTA, 2019).....	29
Şekil 2.1: Reaktif Red 195'in kimyasal yapısı (Zhang, Yuana, & Liu, 2015).....	35
Şekil 2.2: Deney sisteminin şematik gösterimi (Gündüz & Atabey, 2019).	36
Şekil 2.3: Deneysel çalışma boyunca elektrokoagülasyon hücresine ait görüntüler	39
Şekil 2.4: Çalışmada kullanılan lineer kalibrasyon grafiği.	41
Şekil 3.1: Çözelti iletkenliğinin zamanla değişimi (C_0 : 50 mg/L J: 20 mA/cm ²).	44
Şekil 3.2: Farklı başlangıç boyarmadde konsantrasyonları için zamana karşı renk giderim verimi (pH: 5.5, J: 20 mA/cm ²).	44
Şekil 3.3: Farklı akım yoğunlukları için zamana karşı renk giderim verimi (pH: 5.5, C_0 :50mg/L).	46
Şekil 3.4: Ağırlıklı türler bölgesi diyagramı (Garcia-Segura, Eiband, Melo, & Martínez-Huitle, 2017).	48
Şekil 3.5: Farklı pH değerleri için zamana karşı renk giderim veriminin değişimi (C_0 : 50 mg/L, J: 20 mA/cm ²).	52
Şekil 3.6: RR195 için zamanla pH'ın değişimi (C_0 :50 mg/L, J: 20 mA/cm ² , pH: 5.5).	52
Şekil 3.7: 3 dakikalık elektrokoagülasyon uygulaması sonunda pH'a karşı renk giderim veriminin değişimi (C_0 :50 mg/L, J: 20 mA/cm ²).	52
Şekil 3.8: Farklı kolemanit adsorbenti dozlarında zamanla renk giderim veriminin değişimi (C_0 : 50 mg/L, J: 20 mA/cm ²).	53
Şekil 3.9: RR195'in farklı başlangıç derişimlerinde sepiyolit için zamanla renk giderim veriminin değişimi (J: 20 mA/cm ² , pH: 5.5, Adsorbent dozajı: 1g/L).	55
Şekil 3.10: RR195'in farklı başlangıç derişimlerinde kaolinit için zamanla renk giderim veriminin değişimi (J: 20 mA/cm ² , pH: 5.5, Adsorbent dozajı: 1g/L).	55
Şekil 3.11: RR195'in farklı başlangıç derişimlerinde üleksit için zamanla renk giderim veriminin değişimi (J: 20 mA/cm ² , pH: 5.5, Adsorbent dozajı: 1g/L).	56
Şekil 3.12: RR 195'in farklı başlangıç derişimlerinde kolemanit için zamanla renk giderim veriminin değişimi (J: 20 mA/cm ² , pH: 5.5, Adsorbent dozajı: 1g/L).	56
Şekil 3.13: Kaolinit için farklı pH değerlerinde zamanla renk giderim veriminin değişimi (C_0 : 50 mg/L, J: 20 mA/cm ² , Adsorbent dozajı: 1g/L).	57
Şekil 3.14: Sepiyolit için farklı pH değerlerinde zamanla renk giderim veriminin değişimi (C_0 : 50 mg/L, J: 20 mA/cm ² , Adsorbent dozajı: 1g/L).	58
Şekil 3.15: Üleksit için farklı pH değerlerinde zamanla renk giderim veriminin değişimi (C_0 : 50 mg/L, J: 20 mA/cm ² , Adsorbent dozajı: 1g/L).	58
Şekil 3.16: Kolemanit için farklı pH değerlerinde zamanla renk giderim veriminin değimi (C_0 : 50 mg/L, J: 20 mA/cm ² , Adsorbent dozajı: 1g/L).	59
Şekil 3.17: Tüm adsorbentler için 3 dakikalık uygulama sonunda farklı pH değerlerinde renk giderim veriminin değişimi (C_0 : 50 mg/L, J: 20 mA/cm ² , Adsorbent dozajı: 1g/L).	59
Şekil 3.18: KOİ giderim veriminin zamanla değişimi (C_0 : 50 mg/L, J: 20 mA/cm ² , pH ₀ : 5.5).	60
Şekil 3.19: Kaolinit mineralinin IR spektrumu.	61
Şekil 3.20: Sepiyolit mineralinin IR spektrumu.	62
Şekil 3.21: Üleksit mineralinin IR spektrumu.	62

Şekil 3.22: Kolemanit mineralinin IR spektrumu.	63
Şekil 3.23: RR 195 için IR spektrumu.	63
Şekil 3.24: RR 195 adsorplanmış kolemanit'in IR spektrumu.	63
Şekil 3.25: EC prosesi sonucu oluşan alt fazın IR spektrumu.	64
Şekil 3.26: EC prosesi sonucu oluşan üst fazın IR spektrumu.	64
Şekil 3.27: Boyarmadde, adsorbentler ve proses sonunda oluşan bazı ürünlere ait IR spektrumları.	65
Şekil 3.28: Kaolinit için SEM görüntüsü.	68
Şekil 3.29: Sepiyolit için SEM görüntüsü.	68
Şekil 3.30: Üleksit için SEM görüntüsü.	68
Şekil 3.31: Kolemanit için SEM görüntüsü.	69
Şekil 3.32: RR195 adsoplanmış kolemanit için SEM görüntüsü.	69
Şekil 3.33: Elektokoagülasyon/adsorpsiyon alt faz için SEM görüntüsü.	70
Şekil 3.34: Elektokoagülasyon/adsorpsiyon üst faz için SEM görüntüsü.	70
Şekil 3.36: Farklı başlangıç RR 195 derişimlerinde birim enerji ihtiyacının zamanla değişimi.	72
Şekil 3.37: Farklı akımlar için birim enerji ihtiyacının zamanla değişimi.	72
Şekil 3.38: $t=3$ dk için birim enerji ihtiyacının farklı başlangıç pH değerleri ile değişimi.	72

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1: Farklı tekstil işlemleri esnasında oluşan atıksu işlem basamakları ve atıksuların bileşim değerleri.	3
Tablo 1.2: Literatür Taraması.	33
Tablo A.1: Elektrokoagülasyon prosesi deneysel çalışma verileri (C_0 : 50 mg/L, j: 20 mA/cm ² , pH ₀ : 5,5).	88
Tablo A.2: Elektrokoagülasyon prosesi deneysel çalışma verileri (C_0 : 100 mg/L, j: 20 mA/cm ² , pH ₀ : 5,5)..	88
Tablo A.3: Elektrokoagülasyon prosesi deneysel çalışma verileri (C_0 : 250 mg/L, j: 20 mA/cm ² , pH ₀ : 5,5).	88
Tablo A.4: Elektrokoagülasyon prosesi deneysel çalışma verileri (C_0 : 50 mg/L, j: 10 mA/cm ² , pH ₀ : 5,5)..	89
Tablo A.5: Elektrokoagülasyon prosesi deneysel çalışma verileri (C_0 : 50 mg/L, j: 30 mA/cm ² , pH ₀ : 5,5).	89
Tablo A.6: Elektrokoagülasyon prosesi deneysel çalışma verileri (C_0 : 50 mg/L, j: 20 mA/cm ² , pH ₀ : 3)..	89
Tablo A.7: Elektrokoagülasyon prosesi deneysel çalışma verileri (C_0 : 50 mg/L, j: 20 mA/cm ² , pH ₀ : 7).	90
Tablo A.8: Elektrokoagülasyon prosesi deneysel çalışma verileri (C_0 : 50 mg/L, j: 20 mA/cm ² , pH ₀ : 8,5).	90
Tablo B.1: Elektrokoagülasyon/Adsorpsiyon prosesi deneysel çalışma verileri (C_0 : 50 mg/L, M: 1gr/L Kaolinit, j: 20 mA/cm ² , pH ₀ : 5,5).....	91
Tablo B.2: Elektrokoagülasyon/Adsorpsiyon prosesi deneysel çalışma verileri (C_0 : 100 mg/L, M: 1gr/L Kaolinit, j: 20 mA/cm ² , pH ₀ : 5,5).....	91
Tablo B.3: Elektrokoagülasyon/Adsorpsiyon prosesi deneysel çalışma verileri (C_0 : 250 mg/L, M: 1gr/L Kaolinit, j: 20 mA/cm ² , pH ₀ : 5,5).	91
Tablo B.4: Elektrokoagülasyon/Adsorpsiyon prosesi deneysel çalışma verileri (C_0 : 50 mg/L, M: 1gr/L Sepiyolit, j: 20 mA/cm ² , pH ₀ : 5,5)..	92
Tablo B.5: Elektrokoagülasyon/Adsorpsiyon prosesi deneysel çalışma verileri (C_0 : 50 mg/L, M: 1gr/L Sepiyolit, j: 20 mA/cm ² , pH ₀ : 5,5).	92
Tablo B.6: Elektrokoagülasyon/Adsorpsiyon prosesi deneysel çalışma verileri (C_0 : 50 mg/L, M: 1gr/L Sepiyolit, j: 20 mA/cm ² , pH ₀ : 5,5)..	92
Tablo B.7: Elektrokoagülasyon/Adsorpsiyon prosesi deneysel çalışma verileri (C_0 : 50 mg/L, M: 1gr/L Üleksit, j: 20 mA/cm ² , pH ₀ : 5,5).	93
Tablo B.8: Elektrokoagülasyon/Adsorpsiyon prosesi deneysel çalışma verileri (C_0 : 100 mg/L, 1gr/L Üleksit, j: 20 mA/cm ² , pH ₀ : 5,5).	93
Tablo B.9: Elektrokoagülasyon/Adsorpsiyon prosesi deneysel çalışma verileri (C_0 : 250 mg/L, 1gr/L Üleksit, j: 20 mA/cm ² , pH ₀ : 5,5).	93
Tablo B.10: Elektrokoagülasyon/Adsorpsiyon prosesi deneysel çalışma verileri (C_0 : 100 mg/L, 1gr/L Koleanit, j: 20 mA/cm ² , pH ₀ : 5,5).....	94
Tablo B.11: Elektrokoagülasyon/Adsorpsiyon prosesi deneysel çalışma verileri (C_0 : 250 mg/L, 1gr/L Koleanit, j: 20 mA/cm ² , pH ₀ : 5,5).....	94
Tablo B.12: Elektrokoagülasyon/Adsorpsiyon prosesi deneysel çalışma verileri (C_0 : 50 mg/L, 1gr/L Koleanit, j: 20 mA/cm ² , pH ₀ : 5,5).....	94
Tablo B.13: Elektrokoagülasyon/Adsorpsiyon prosesi deneysel çalışma verileri (C_0 : 50 mg/L, 2gr/L Koleanit, j: 20 mA/cm ² , pH ₀ : 5,5).....	95

Tablo B.14: Elektrokoagülasyon/Adsorpsiyon prosesi deneysel çalışma verileri (C_0 : 50 mg/L, 4gr/L Kolemanit, j: 20 mA/cm ² , pH ₀ : 5,5).....	95
Tablo B.15: Elektrokoagülasyon/Adsorpsiyon prosesi deneysel çalışma verileri (C_0 : 50 mg/L, M: 1gr/L Kaolinit,j: 20 mA/cm ² , pH ₀ : 3).....	95
Tablo B.16: Elektrokoagülasyon/Adsorpsiyon prosesi deneysel çalışma verileri (C_0 : 50 mg/L, M: 1gr/L Kaolinit, j: 20 mA/cm ² , pH ₀ : 7).....	96
Tablo B.17: Elektrokoagülasyon/Adsorpsiyon prosesi deneysel çalışma verileri (C_0 : 50 mg/L, M: 1gr/L Kaolinit,j: 20 mA/cm ² , pH ₀ : 8,5).....	96
Tablo B.18: Elektrokoagülasyon/Adsorpsiyon prosesi deneysel çalışma verileri (C_0 : 50 mg/L, M: 1gr/L Sepiyolit, j: 20 mA/cm ² , pH ₀ : 3)..	96
Tablo B.19: Elektrokoagülasyon/Adsorpsiyon prosesi deneysel çalışma verileri (C_0 : 50 mg/L, M: 1gr/L Sepiyolit, j: 20 mA/cm ² , pH ₀ : 7).	97
Tablo B.20: Elektrokoagülasyon/Adsorpsiyon prosesi deneysel çalışma verileri (C_0 : 50 mg/L, M: 1gr/L Sepiyolit, j: 20 mA/cm ² , pH ₀ : 8,5).	97
Tablo B.21: Elektrokoagülasyon/Adsorpsiyon prosesi deneysel çalışma verileri (C_0 : 50 mg/L, M: 1gr/L Üleksit, j: 20 mA/cm ² , pH ₀ : 3).	97
Tablo B.22: Elektrokoagülasyon/Adsorpsiyon prosesi deneysel çalışma verileri (C_0 : 50 mg/L, M: 1gr/L Üleksit, j: 20 mA/cm ² , pH ₀ : 7)..	98
Tablo B.23: Elektrokoagülasyon/Adsorpsiyon prosesi deneysel çalışma verileri (C_0 : 50 mg/L, M: 1gr/L Üleksit, j: 20 mA/cm ² , pH ₀ : 8,5).	98
Tablo B.24: Elektrokoagülasyon/Adsorpsiyon prosesi deneysel çalışma verileri (C_0 : 50 mg/L, 1gr/L Kolemanit,j: 20 mA/cm ² , pH ₀ : 3).....	98
Tablo B.25: Elektrokoagülasyon/Adsorpsiyon prosesi deneysel çalışma verileri (C_0 : 50 mg/L, 1gr/L Kolemanit,j: 20 mA/cm ² , pH ₀ : 7).....	99
Tablo B.26: Elektrokoagülasyon/Adsorpsiyon prosesi deneysel çalışma verileri (C_0 : 50 mg/L, 1gr/L Kolemanit, j: 20 mA/cm ² , pH ₀ : 8,5).....	99

SEMBOL LİSTESİ

Å	: Angstrom
Al	: Alüminyum
BOİ	: Biyolojik Oksijen İhtiyacı
Co	: Kobalt
Cu	: Bakır
Cr	: Krom
EC	: Elektrokoagülasyon
Fe	: Demir
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
N	: Azot
Sn	: Kalay
RR195	: Reaktif Red 195



ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimime başlamamda büyük katkısı olan ve tez çalışmam boyunca benden bilgi ve desteğini esirgemeyen, hayatıma her anlamda ışık tutan, üzerimde büyük emeği olan saygıdeğer hocam Dr. Öğr. Üyesi Züriye GÜNDÜZ'e teşekkür ederim. Çalışmalarına devam edebilmem için gerekli desteği sağlayan saygıdeğer Prof. Dr. Ahmet GÜNAY hocama teşekkürü borç biliyor ve şükranlarımı sunuyorum. Çalışmalarım esnasında benden yardım, bilgi, destek ve güler yüzlerini esirgemeyen Arş. Gör. Elif ÇALGAN ve Yeliz SÜZEN hocalarıma çok teşekkür ediyorum. Ayrıca çalışmam boyunca benden bilgilerini esirgemeyen ve değerli vaktini ayıran sayın Doç. Dr. Pınar BEYLİ hocama teşekkür etmekten mutluluk duyarım. Çalışmalarım boyunca her daim yan yana olduğumuz kıymetli arkadaşım Cansu ÖZMEZ'e desteklerinde dolayı çok teşekkür ediyorum.

Beni bugünlere getiren, üzerimdeki emeği sonsuz olan kadın annem Kerziban GÜLÜŞ'e ve bu süreçte hep yanımda olan ve her türlü desteği sağlayan yol arkadaşım Samet ÖZÇELİK'e sonsuz teşekkür ediyorum.

Balıkesir, 2020

Fadime Songül ÖZÇELİK

1. GİRİŞ

Günümüzde dünya nüfusunun hızla artışı, bilinçsiz kaynak tüketimi ve endüstriyel faaliyetlerin çoğalması ile birlikte çevre üzerinde yoğun bir baskı oluşmuştur. Bu baskı 21. yüzyılda çevre kirliliğinin canlı yaşamını tehdit eden önemli bir sorun olduğuna dikkatleri çekmiştir. Maruz kaldığımız çevre problemleri arasında su kaynaklarının kirlenmesi büyük önem arz etmektedir (BM, 2006).

Tekstil malzemelerinin daimi olarak renklendirilmesi boyama olarak adlandırılırken, malzemeyi renklendirmeye yarayan maddelere boyarmadde denir. Boyama işlemi için kullanılan boyarmaddeler bitkilerden, hayvanlardan ve topraktan elde edilebilir. İlk sentetik boyarmadde 1856 yılında Perkin'in Movein'i sentezlemesiyle ortaya çıkmıştır. Bu olayla birlikte sentetik boyarmaddelerin üretimi başlayıp hızla artışa geçmiştir ve doğal boyarmaddelerin kullanımı hızla düşmüştür. Günümüzde sentetik boyarmaddelerin kullanımının yoğun olması ile birlikte halı, yazma, kilim gibi el zanaatlarında doğal boyarmaddelerin uygulanması devam etmektedir (BM, 2006).

Endüstriyel faaliyetler sırasında oluşan atıksular, alıcı ortama verilmeden önce yönetmelikte belirtilen deşarj standartlarını sağlayacak şekilde arıtılmalıdır. Tekstil endüstrisinden kaynaklanan atıksularda çok düşük konsantrasyonda boyarmadde bulunması durumunda dahi alıcı ortama deşarjı gerçekleşirse estetik ve sağlık açısından istenmeyen durumlar meydana gelir. Renk, güneş ışığını absorbe edip alıcı ortamda fotosentez olayının gerçekleşmesini engelleyerek ortamdaki çözünmüş oksijen miktarının azalmasına sebep olur (Eyvaz, Kırilaroğlu, Aktaş, & Yüksel, 2009). Bu durum alıcı ortamdaki canlıların yok olmasına ve canlı türlerinin değişimine neden olmakla birlikte suyun yeniden kullanımını da kısıtlı hale getirmektedir. Bunların yanı sıra sucul organizmalarda birikim oluşur ve toksik, kanserojenik ürünlerin meydana gelmesi riskini de artırır (Özden, 2016).

Tekstil endüstrisi atıksuları genel olarak bileşim ve miktar açısından oldukça kararsız bir yapıya sahiptir. Her geçen gün yenilenen işletme parametreleri ve uygulanan teknolojilerdeki farklılıklar, oluşan atıksuların içeriğine yansımaktadır. Tekstil atıksuları genellikle, kuvvetli renk, yüksek KOİ, düşük biyolojik ayrıştırılabilirlik ve yüksek pH değerlerine sahiptir (Koby M. , Can, Demirbaş, & Bayramoğlu, 2006) . Endüstride

değişen teknolojiler ile birlikte uygulanan her işlem, oluşan atıksuların standart bir arıtma metodu ile arıtılmasını imkânsız hale getirmektedir. Tekstil endüstrisi atıksularının arıtılmasında kullanılan yöntemlerin bazıları adsorpsiyon, biyolojik arıtım, membran filtrasyon, elektrokoagülasyon, kimyasal koagülasyon, iyon değişimi, kimyasal oksidasyon ve kimyasal çöktürmedir .

Boyarmaddelerin elektrokimyasal yöntemler ile giderimi oldukça başarılı olmaktadır. Etkin bir elektrokimyasal arıtma prosesi olarak elektrokoagülasyon çamur oluşumunun az miktarda olması, biyolojik olarak parçalanamayan ve gözle görünemeyen organik maddelerin çözünmesi veya atıksuyun biyolojik arıtıma uygun koşullara getirilmesi, koagülant dozunun kolay bir şekilde kontrol edilebilmesi, hidroksit barındıran çökelekler veya floklarla birlikte ağır metal tuzlarının uzaklaştırılabilmesi, devamlı pH kontrolüne ihtiyaç duyulmaması, yüksek verim değerlerinin elde edilebilmesi gibi avantajlara sahiptir (Khemis, Leclerc, Tanguy, Valentin, & Lapicque, 2006) . Bu sebeple elektrokoagülasyon prosesinin geleneksel atıksu arıtma yöntemlerine alternatif bir proses olabileceği düşünülmektedir.

Bu çalışmanın amacı, güncel arıtım yöntemlerinden biri olan elektrokimyasal arıtımın önde gelen uygulamalarından elektrokoagülasyon prosesini bazı doğal adsorbentlerin (kolemanit, sepiyolit, kaolinit, üleksit) ilavesiyle destekleyerek ile paslanmaz çelik elektrot varlığında tekstil atıksularında bulunan Reaktif Red 195 boyarmaddesini gidermek ve bu doğrultuda elektrokoagülasyonla ilgili çeşitli işletme şartlarına (Konsantrasyon, Akım, pH, Adsorbent türü, Adsorbent dozajı) bağlı olarak en uygun renk giderim parametrelerini tespit etmektir.

1.1 Tekstil Endüstrisi

Tekstil endüstrisi doğal veya yapay elyaflar kullanarak kumaş ve başka tekstil ürünlerini imal eden bir endüstri koludur. Ancak kimyasal elyafların üretimi, hazır giyim ve çırçırılama işlemi tekstil endüstrisi kategorisinin dışında yer almaktadır. Tekstil endüstrisindeki temel işlem gerçekleşir:

- 1- Doğal ve fabrikasyon ipliklerin hazır hale getirilmesi, ipliklerin dokuma, örme veya başka yöntemlerle kumaş, triko, halı gibi tekstil ürünleri haline getirilmesi,
- 2- İplik ve kumaşlara baskı, boyama ve apre gibi terbiye işlemlerinin uygulanmasıdır (Tünay, Kabdaşlı, Orhon, & Eremektar, 1996).

Tekstil endüstrisi, üretim esnasında hammadde ve kimyasalların, değişik süreçlerden geçmesi ve bu süreçler sırasında kullanılan yöntemlerin çeşitliliği ile değişik su kullanım ölçülerine bağlı olarak kararsız yapıya sahip bir endüstri dalıdır (Germirli, Tünay, & Orhon, 1989). Bu kararsız yapı tekstil endüstrisi atıksularının standart bir arıtma metodu ile arıtılmasını zorlaştırmaktadır. Tekstil endüstrisi prosesleri sonucu açığa çıkan atıksuyun karakteri, çalışma sistemindeki olası değişimler ve bu değişimlerin atıksuyun arıtılabilirliği üzerine etkileri göz önünde alınır ise hem ekonomik açıdan uygun, hem de çevrenin korunması amacıyla yeterli miktarda arıtım sağlayacak güvenli ve esnek bir arıtma prosesi seçilmelidir (Eremektar, Germirli, Babuna, Çeki, & Tünay, 1997).

Tekstil endüstrisi atıksularında genel olarak pH, kimyasal oksijen ihtiyacı, renk, biyolojik oksijen ihtiyacı ve tuzluluk gibi parametreler yüksek değerlere sahiptir. Farklı tekstil işlemleri esnasında oluşan atıksu işlem basamakları ve atıksuların bileşim değerleri Tablo 1.1’de verilmiştir (Bisschops & Spanjers, 2003).

Tablo 1.1: Farklı tekstil işlemleri esnasında oluşan atıksu işlem basamakları ve atıksuların bileşim değerleri.

Parametre	Elyaf Türü	Haşıl Sökme	Yıkama	Ağartma	Boyama	Baskı
KOI (mg/L)	Yün Pamuk Sentetik	- 950-20000 -	5000-90000 8000 -	- 288-13500 -	7920 1115-4585 620	- - 1515
BOİ ₅ (mg/L)	Yün Pamuk Sentetik	- - -	2270-60000 100-2900 500-2800	400 90-1700 -	400-2000 970-1460 530	- - -
Renk (ADMI)	Yün Pamuk Sentetik	- 64-1900 -	2000 694 -	- 153 -	2225 1450-4750 1750	- - -
Toplam Katı (mg/L)	Yün Pamuk Sentetik	- - -	28900-49300 - -	910 2300-14400 -	- - -	- - 150-250
Toplam Askıda Katı (mg/L)	Yün Pamuk Sentetik	- 18-800 -	1000-26200 184-17400 600-3300	900 130-25000 -	- 120-190 140	- - -
Toplam Çözünmüş Katı (mg/L)	Pamuk	530-6900	-	4760-19500	-	-
Çözünmüş Organik Karbon (mg/L)	Yün Pamuk	- 250-2750	5800 -	- 320	- -	- -
Toplam	Yün	70	-	40	-	-

Kjeldahl Azotu (mg/L)	Pamuk Sentetik	-	-	-	-	164
		-	604	-	-	-

Tablo 1.1 (devamı).

Amonyum Azotu (mg/L)	Pamuk Sentetik	9-19	-	8-19	-	-
		-	-	-	-	129
Toplam Fosfor (mg/L)	Pamuk Sentetik	4-10	-	6-60	-	-
		-	-	-	-	21
Fosfat (mg/L)	Yün	-	89	-	-	-
Sülfür (mg/L)	Yün Pamuk	-	0-2	-	-	-
		-	-	-	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 Pamuk Sentetik	- 8.8-9.2	7.6-10.4 7.2-13 8-10	6 6.5-13.5	4.6-8 9.2-10.1 11.7	- - -
Su tüketimi (L.kg ⁻¹ elyaf)	Yün Pamuk Sentetik	- - -	4-77.5 2.5-43 17-67	- 30-50 -	40-150 38-143 38-143	280-520 - -

Türkiye'nin imalat sanayi üretim değeri toplamının %8,8'ini ve imalat sanayinde oluşan katma değerın %9,9'unu tekstil sektörü sağlamaktadır. Tekstil sektörü bugünkü seviyesine ABD ve AB ülkelerine yapılan ihracat ağırlıklı üretimle gelmiştir. 1996 yılında AB ile yapılan Gümrük Birliği Anlaşması sebebiyle, bu tarihten itibaren AB ülkeleri ile kota olmadan ihracat yapma olanağı elde edilmiştir. Türkiye, 2015 yılı dünya tekstil ihracatından aldığı %3,5'lik pay ile ülkeler arası sıralamada 7'nci olup tekstil en çok dış ticaret fazlası veren sektördür. Tekstil ve hazır giyim sektörü birlikte değerlendirildiğinde Türkiye GSYH'nın %10'unundan çoğunu sağlamaktadır (Uyanık & Çelikel, 2019).

Türkiye yüksek oranda tekstil ürünleri ihraç etmesine karşın üretimde kullanılan makineler ve kimyasal maddeler açısından büyük oranda dışa bağımlıdır. Üretim odaklı yaklaşımlar ve Ar-Ge çalışmaları konusunda geç kalınması ve bu alandaki çalışmaların yetersiz olması, bahsi geçen dışa bağımlılığın en büyük nedeni olmuştur (Uyanık & Çelikel, 2019).

Boyarmadde; kumaş, elyaf, pamuk, yün gibi maddelere kendiliğinden veya uygun tepkime malzemeleri yardımıyla çekim oluşturan, uygulandıkları malzemelere renk veren kimyasal maddelerdir. Bir kimyasal maddenin boyar madde olarak değerlendirilebilmesi için;

- Çift bağlara sahip olması
- Elektromanyetik spektrum görünür bölgesinde absorplama/yansıtma özelliği göstermesi
- En az bir adet kromofor gruba sahip olması ($R.NO_2$, $N_2 O$, $-N=N-$, $C=O$, $-C=O-$, $-C=S-$)
- Elektronlarda rezonans sergilemesi
- Oksokrom gruplarını bulundurması ($-NH_2$, $-NHR-NR_2$, $-OH$, $-OCH_3$, $-SO_3 H$, $-COOH$) gerekmektedir (Yakartepe, 1997) (Ferda, 2006).

1.1.1 Boyarmaddelerin Sınıflandırılması

Tekstil endüstrisinde kullanılan boyarmaddeler kimyasal yapılarına, boyama özelliklerine ve çözünürlük özelliklerine göre üç temel sınıfa ayrılabilirler (Başer & İnanıcı, 1990).

1.1.1.1 Kimyasal Yapılarına Göre Sınıflandırma

Azo Boyarmaddeler

Azo boyarmaddeler organik yapıli boyarmaddelerin en önemli grubunu oluşturur ve bunların sayısı oldukça fazladır. Küpe ve kükürt boyarmaddeleri hariç, boyama metodlarının tümünde kullanılan boyarmaddelerin yapısında azo grubu bulunur. Bunlar bünyelerinde bulunan ve kromofor grup olarak bilinen azo grubu ile ($-N=N-$) karakterize edilir. Guruptaki azot atomları, karbon atomlarına sp^2 hibritleşmesi ile bağlanır. Azo grubuna bağlı olan karbon atomlarından biri çok halkalı veya aromatik, diğerrinin ise enolleşebilen düz zincire bağlı bir grup olması mümkündür. Bu nedenle molekül en az bir aril grubunu içerir. Azo boyarmaddeleri genelde $ArN=N-R$ şeklinde formüleştirebilir. Burada, R heteroaril, enolleşebilen bir alkil grubu yada aril'dir (Pilatin, 2004).

Azo boyarmaddelerden alifatik grup içerenlerin renk şiddetleri düşük ancak renk tonları geniş bir aralığa sahiptir. Doğal boyarmaddelerin hiçbirinde azo grubu bulunmaz. Bu sınıfta bulunan boyarmaddelerin tümü yapay olarak elde edilmektedir (Başer & İnanıcı, 1990).

Nitro ve Nitrozo Boyarmaddeler

Bu sınıf boyarmaddeler kimyasal yapılarında nitro ya da nitrozo grubu ile beraber elektron verici grup barındırırlar. Nitro veya nitrozo grubu ile elektron verici grup birbirlerine göre ortada yer alırlar. Nitrozo boyarmaddelerinde, fenol veya naftoller HNO_2 ile tepkimeye girse nitrozolanır. Nitrozo bileşiklerinin başka boyarmaddelerin sentezinde de kullanımı mevcuttur. Tek başına bulunması halinde hiçbir boyarmadde özelliği taşımaz (Başer & İnanıcı, 1990) (Pilatin, 2004).

Polimetin Boyarmaddeler

Polimetin boyarmaddeleri renkli bileşikler arasında büyük bir grup meydana getirirler. Yapısındaki q yüküne göre polimetin boyarmaddeleri sınıflandırılabilir. Şayet q pozitif ise katyonik, q negatif ise anyonik, q yüksüz ise nötral polimetin boyarmaddeleri olarak sınıflandırılabilir (Başer & İnanıcı, 1990) (Pilatin, 2004).

Kükürt Boyarmaddeler

Kükürt, sodyum sülfür, fenoller veya sodyum polisülfürün aromatik aminler ile tepkimeye girmesiyle oluşan, suda çözünmeyen, büyük molekül yapılı ve renkli organik bileşikler kükürt boyarmaddeleri olarak adlandırılırlar. Kısaca Bm-S-S-Bm olarak ifade edilebilirler. Bu sınıf boyarmaddeler, bazik ortamda Na_2S ile kaynatılırsa, disülfür grupları (...-S-S...), merkaptto guruplarına (...-S- Na^+) dönüşerek suda çözünen leuko bileşikleri meydana getirir (Tanzer, 2004).

Karbonil Boyarmaddeler

Molekül yapısında komşu çift bağlar ile bu bağlara komşu halde en az iki karbonil grubu içeren bileşikler karbonil boyarmaddeleri olarak adlandırılır.

Bu bileşiklerdeki karbonil grupları, molekülde kısa zincirli bir çift/tek bağ komşuluğu ve tekrarı bulunsa bile, uzun dalga boylu absorpsiyonlar oluşturabilirler. Örneğin; antrakina 1-, 1,4- ve 1,5- konumlarında elektron verici grupların iştirakıyla görünür alanda absorpsiyon yapan bileşikler elde edilir. Yeşil renkli bir azo boyarmaddesinin yapısı çok kompleks olmasına rağmen, 1,4- difenilamino antrakina gibi basit yapıya sahip bir karbonil boyarmaddesi bu rengi verecek bir absorpsiyona sahiptir (Başer & İnanıcı, 1990) (Seydioğlu, 2009).

Arilmetin Boyarmaddeler

Arilmetin boyarmaddelerinin genel formülleri Ar-X=Ar şeklinde ifade edilebilir. Bu formülde X, $-\text{CH=}$ ya da $-\text{N=}$ olabilir. X'in $-\text{CH=}$ olduğu durumlarda bu bileşiklere diarilkarbonyum, $-\text{C (Ar) =}$ şeklindekilere ise triarilkarbonyum bileşikler olarak isimlendirilir. Bu grup $-\text{N=}$ ise, aza türevidir. Bütün arilmetin boyarmaddelerinde ve bunların aza benzerlerinde X'le gösterilen bu grup absorpsiyon düzeneğinin temel parçasıdır. Bu sınıf boyarmaddelerin sayısız tepkimeleri bu grubun elektrofilik özelliğinden kaynaklanır (Başer & İnanıcı, 1990) (Pilatin, 2004).

Aza Annulen Boyarmaddeler

Kapalı bir sistemin aromatik yapıya sahip olup olmadığı moleküler yörünge teorisinde Huckel kuralına göre $(4n+2) \pi$ elektronlarının sayısı ile tayin edilir. $n = 1, 2, 3, \dots$ gibi bir tamsayı ise 6, 10, 14, 18, 22 elektronlu sistemler aromatik olabilir. Ancak aromatikliğin

oluşabilmesi için bu sayıdaki elektronların bulunduğu sistemin elektronlarının bir düzlemde bulunması ve delokalize olması şarttır. Ard arda C=C ve C-C bağlarından oluşan bir tek halka [n] annulen olarak isimlendirilebilir.

Bu boyarmadde grubu, 18 π elektronlu ve komşu halde çift bağları bulunan halkalı bir renklendirici yapıya sahiptir. Annulen sınıfı boyarmaddelerin en önemlileri olarak, kanın ve yaprağı yeşil bitkilerin boyarmaddeleri ile ftolasiyanin boyarmaddeleri sayılabilir (Başer & İnancı, 1990) (Pilatin, 2004).

1.1.1.2 Boyama Özelliklerine Göre Sınıflandırma

Bazik Boyarmaddeler

Katyonik grubu renkli kısımda taşıyan bunun yanı sıra organik bazların hidroklorürleri şeklinde bulunan boyarmaddelerdir. Yapılarından dolayı bazik oldukları için anyonik grup barındıran liflerle bağlanırlar. Boyarmadde katyonu, elyafın anyonik gruplarıyla tuz oluşturur ve aralarındaki bağ iyoniktir (Tanzer, 2004).

Direkt boyarmaddeler

Bu sınıfta yer alan boyar maddeler genellikle sülfonik, bazen de karboksilik asitlerin sodyum tuzları şeklindedir. Yapı açısından direkt ve asit boyarmaddeler arasında kesin bir sınır yoktur. Boyama şekli bakımından farklı hale gelirler. Direkt boyarmaddeler mordanlama yapılmadan boyarmadde çözeltisinden selüloz ya da yüne direkt çekilirler. Hiçbir kimyasal bağ oluşturmada elyafın iç misellerinde depolanırlar. Renkli kısımda bazik grup barındıran direkt boyarmaddeler, sulu çözeltide zwitter iyon halinde bulunurlar. Yaş haslıkları sınırlıdır (Seydioğlu, 2009).

Asit Boyarmaddeler

Asit boyarmaddeler de direk boyarmaddeler gibi sülfonik asitlerin veya çok nadir olarak karboksilli asitlerin sodyum tuzları şeklinde bulunurlar. Boyarmaddenin anyonu renkli bileşendir. Asit boyarmaddeler protein elyafın boyanmasında kullanılan mühim bir boyarmadde grubudur. Kimyasal yapı açısından direkt boyarmaddelere benzeyen boyarmaddelerin çoğu selülozu da iyi derecede boyar. Poliamid elyaf da kimyasal yapı açısından proteinlerle benzer özelliğe sahip olduğundan asit boyarmaddelere karşı ilgisi fazladır. Asit boyarmaddeler, yün-yaprak, iplik, şerit ve kumaş olmak üzere üretimin her aşamasında kullanılabilir. Boyanacak malzeme değiştiğinde boyama yöntemleri de farklılık gösterir (Bozdoğan, 1984) (Pilatin, 2004).

Mordan Boyarmaddeler

Mordan sözcüğü, boyarmaddeyi elyafa sabitleyen madde veya bileşim anlamını taşır. Doğal ve sentetik boyarmaddelerin çoğu bu sınıfta yer alır. Bunlar asidik ya da bazik fonksiyonel gruplar bulundurmakla birlikte bitkisel ve hayvansal elyaf ile kararsız bileşikler meydana getirirler. Bu sebeple hem boyarmaddeye hem de elyafa karşı aynı kimyasal ilgiye sahip bir madde, önce elyafa yerleştirilir. Daha sonra elyaf ile boyarmadde suda çözünmeyen bir bileşik vermek üzere reaksiyona gindirilir. Böylece boyarmaddenin elyaf üzerine yerleşmesi sağlanır. Mordan maddesi olarak suda çözünmeyen hidroksitler oluşturan Al, Sn, Fe, Cr tuzları kullanılır (Başer & İnanıcı, 1990) (Seydioğlu, 2009).

Reaktif Boyarmaddeler

Reaktif boyarmaddeler uygun şartlar sağlandığında lif ile kimyasal etkileşime giren, kovalent bağ oluşturabilen tek boyarmadde sınıfıdır. Küçük ve basit molekül yapılarına sahip boyarmaddelerdir. Küçük tanecikli olmaları life hızlı bir biçimde temas etmelerini sağlar. Oldukça parlak renklere sahip reaktif boyar maddeler basit yapılarının neticesi olarak spektrumlarında çok dar ve şiddetli pikler gösterirler. En çok mavi, kırmızı, portakal ve sarı gibi renklerin elde edilmesinde kullanılırlar (Tanzer, 2004).

Küpe Boyarmaddeleri

Bu boyarmaddeler suda çözünmezler, ancak alkali sodyum ditiyonitte çözünür ve devamında yeniden boyaya oksitlenebilen bileşiklere indirgenirler. İndirgenmiş ve çözünür özellik kazanmış bu bileşikler genellikle beyaz ve renksiz oldukları için "leuko" bileşikleri olarak isimlendirilirler. Bu koşullarda hayvansal ve bitkisel lifleri kolayca boyarlar İndigo ve indantren mavisi gibi küpe boyaları, daha çok pamuk boyamacılığında kullanılırlar (Erdik, Obalı, & Yüksekışık, 1998).

İnkişaf Boyarmaddeleri

Azo boyarmadde grubunda yer alan bu boyarmaddeler suda çözünen Naftolat ve Diazonyum tuzunun lif üzerinde birleşmesiyle oluşur. Bu bileşenlerin her biri yalnız başlarına suda çözünürlerken lif üzerinde birleştiklerinde suda çözünmez hale gelmektedirler. Bu sebeple suya karşı dayanıklılıkları yüksektir (Uysal, 2011).

Metal-kompleks Boyarmaddeler

Bu boyarmaddeler metal iyonları ile belirli gruplar bulunduran bazı azo boyar maddelerinin kompleks meydana getirmesiyle oluşur. Kompleksin meydana gelmesinde azo gurubu rol oynar. Co, Cr, Cu ve N iyonları metal katyonu olarak kullanılır. Krom kompleksleri, çoğunlukla yün ve poliamid boyama işleminde kullanılırlar (Tanzer, 2004).

Dispersiyon Boyarmaddeleri

Dispersiyon boyarmaddeleri amino ve hidroksil grupları bulundurur ve düşük molekül ağırlığına sahiptir. Polyester elyaf, yüksek kristalize ve belirgin suyu sevmeme özelliğinden dolayı büyük moleküllü boyarmaddeler elyaf içerisine kolay temas edemezler. Elyaf kimyasal olarak etkin grup içermediğinden boyarmadde anyon ve katyonlarını da bağlayamaz. Polyesterin boyanmasında en çok kullanılan boyarmaddeler dispers boyarmaddelerdir. Dispers boyarmaddelerin dengede iken elyafa karşı afinitesi oldukça yüksektir. Ancak elyaf içinde yayılması oldukça yavaştır. Bu durumda dengeye varmak için gerekli olan süre çok uzun olduğundan yapılacak olan boyama kullanışlı değildir. Normal basınç koşullarında çalışan ve en fazla 100 °C'a kadar ısınan cihazlarda polyesterin yalnızca difüzyon hızı yüksek olan küçük moleküllü dispers boyarmaddelerle açık ve orta şiddetteki renklere boyanması sağlanabilmektedir. Orta renk şiddetinde boyama gerektiğinde, çoğunlukla % 2-5 arasında dispers boyarmaddeler kullanılır. Dispers boyarmaddelerin bazıları termofiks şartlar altında dayanıklı değildir. Süblimleşme eğilimleri fazladır. Bu durum naylona bitişik malzemenin boyanmasına sebebiyet vermektedir (Aytaç, 2011).

Pigment boyarmaddeleri

Boyarmaddelerin özel bir grubu olan bu boyarmaddelerin tekstil elyafa ve diğer substratlara karşı çekim gücü bulunmamaktadır. Uygulamada pigmentler süspansiyonlar halinde kuruyan yağ ve reçineler içinde olur (Başer & İnanıcı, 1990) (Uysal, 2011).

1.1.1.3 Çözünürlük Özelliklerine Göre Sınıflandırma

Boyar maddeler suda çözünen ve suda çözünmeyen olarak iki grupta incelenebilir. Suda çözünen boyarmaddelerde, boyarmadde molekülü en az bir adet tuz oluşturabilen gruba sahiptir. Boyarmaddenin sentezi esnasında kullanılan başlangıç maddeleri suda çözündürücü grup bulundurmuyorsa, bu grubu boyarmadde molekülüne daha sonradan ilave etme yoluyla da istenilen çözünürlük elde edilebilir. Fakat boyarmadde sentezi sırasında seçilen metot başlangıç maddelerinin iyonik grup içermesidir. Tuz içeren grubun yapısına göre suda çözünebilen boyarmaddeler anyonik, katyonik ve zwitter suda çözünen boyarmaddeler olarak üç sınıfa ayrılır. Suda Çözünmeyen boyar maddeler ise, genellikle tekstilde ve farklı alanlarda kullanılır. Suda çözünmeyen boyarmaddeleri farklı sınıflara ayırmak mümkündür (Koçyiğit, 2008) (Ergün, 2013).

Substratta Çözünen Boyarmaddeler

Daha çok sentetik elyaf üzerine, suda çok ince süspansiyonlar halinde dağıtılarak, tatbik edilen dispersiyon boyarmaddelerdir.

Organik Çözücülerde Çözünen Boyarmaddeler

Her çeşit organik çözücünde çözünebilirler. Sprey ya da lak durumunda uygulanabilen bu boyarmaddeler aynı zamanda solvent boyarmaddeleri olarak da adlandırılır. Vaks, matbaa mürekkebi ve petrol türevlerinin renklendirilmesi işleminde bu boyarmaddeler kullanılır.

Geçici Çözünürlüğü Olan Boyarmaddeler

Farklı indirgenme maddeleri ile suda çözünebilir duruma getirilirler. Suda çözünebilir hale geldikten sonra elyafa uygulanabilirler. Devamında elyaf içinde iken yeniden yükseltgenerek suda çözünmez duruma getirilirler. Kükürt ve küpe boyarmaddelerinde bu yöntemlere göre uygulama yapılır.

Polikondensasyon Boyarmaddeler

Son dönemlerde kullanımı artan boyarmaddelerdir ve elyaf üzerine uygulanması esnasında veya uygulandıktan sonra birbirleriyle ya da farklı moleküllerle kondense olarak daha büyük moleküller oluşturan boyarmaddelerdir.

Elyaf İçinde Oluşturulan Boyarmaddeler

Kimyasal bir tepkime ile iki ayrı bileşenden elyaf içinde oluşturulan boyarmaddelerdir. Bu boyarmaddeler suda çözünmeyen pigmentlerdir. Ftalosiyeninler ve azoik boyarmaddeler bu sınıfta yer alır (Ergün, 2013).

1.2 Boyarmaddelerin Giderilmesinde Kullanılan Yöntemler

Tekstil endüstri, üretim yönünden çok çeşitli olan ve kirletici yük miktarı yüksek olan endüstrilerin başında gelmektedir. Bu durumu üretim sırasında kullanılan boyar maddeler ve aşırı su tüketimi oluşturmaktadır. Üretim aşamaları sonunda açığa çıkan atıksuların arıtılmasında farklı yöntemler bulunmaktadır (Özyurt, 2018).

Boyarmaddelerin giderilmesinde kullanılan yöntemler üç ana başlıktan oluşur. Bunlar fiziksel arıtma yöntemleri, biyolojik arıtma yöntemleri ve kimyasal arıtma yöntemleridir.

1.2.1 Fiziksel Yöntemler

1.2.1.1 Membran Filtrasyonu

Membran filtrasyonu ile boyanın sürekli olarak arıtılması, konsantre hale getirilmesi ve daha mühimi atıksudan uzaklaştırılması sağlanmaktadır. Diğer yöntemlere göre üstünlüğü sistemin beklenmedik bir kimyasal çevreye, sıcaklığa ve mikrobiyal faaliyetlere karşı dayanıklı olmasıdır. Ters osmoz membranlarında çoğu iyonik türler için %90'nın üzerinde verim ve yüksek kalitede permeat eldesi mümkündür. Böylece boya banyosu çıkış sularının ve yardımcı kimyasalların tek bir basamakta giderimi sağlanır. Fakat yüksek ozmotik basınç farklılığı ters osmozun uygulanabilirliğini kısıtlamaktadır. Nanofiltrasyon

membranları negatif yüzeysel yükleri sebebiyle iyon seçicidirler. Yani çok valanslı anyonlar tek valanslı anyonlara oranla daha sıkı tutulurlar. Membranların bu özelliği sayesinde boyalı atıksularda bulunan bazı yardımcı kimyasal maddeler membrandan geçebilmektedir (Kocaer & Alkan, 2002). Membran filtrasyonu ile yapılan çalışmalarda çıkış suyunda düşük konsantrasyonda boyar madde bulunduran tekstil endüstrilerinde suyun tesise geri kazandırılmasının mümkün olduğu görülmüştür (Rozzi, Antonelli, & Arcari, 1999). Fakat membran filtrasyonu, suyun yeniden kullanımı için önemli bir parametre olan çözünmüş katı madde miktarını düşürmez. Membran teknolojileri, ayırmadan sonra kalan konsantre atığın bertaraf gerekliliği, maliyetinin yüksek olması, membranın tıkanma ihtimali ve yenilenme ihtiyacı gibi dezavantajlara da sahiptir (Robinson, McMullan, Marchant, & Nigam, 2001).

1.2.1.2 İyon Değişimi

Boya içeren atıksuların arıtımında iyon değiştiricilerin kullanımı çok yaygın olmayan bir yöntemdir. Bu durumun temel sebebi, iyon değiştiriciler ile yapılan arıtımda yüksek verim elde edilebilecek boya gruplarının sınırlı olduğu görüşüdür. Yöntemde, atıksu, mevcut değişim odacıkları doygunluk sınırına ulaşana kadar iyon değiştirici reçineler üzerinden geçer. Böylelikle, boyarmadde bulunduran atıksulardaki hem katyonik hem de anyonik boyaların arıtımı sağlanabilmektedir. İyon değişiminin avantajları, rejenerasyonla adsorban kaybının olmaması, çözücünün kullanıldıktan sonra iyileştirilebilmesi ve çözünebilir boyaların etkili bir biçimde arıtılabilmesidir. En büyük dezavantaj ise maliyetinin yüksek olmasıdır. Bu durum organik çözücülerin pahalı olmasından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte iyon değişimi dispers boyalar için etkili bir yöntem değildir (Robinson, McMullan, Marchant, & Nigam, 2001).

1.2.1.3 Adsorpsiyon

Adsorpsiyon teknikleri konvansiyonel metotlar için fazla kararlı olan kirleticilerin arıtımında elde edilen yüksek verimden dolayı son yıllarda ilgi odağı olmuştur. Adsorpsiyon ekonomik yönden uygun bir yöntem olmakla birlikte yüksek kalitede ürün oluşumu da sağlar. Adsorpsiyon prosesi, boya/sorbent etkileşimi, adsorbanın yüzey alanı, tanecik büyüklüğü, pH, sıcaklık ve temas süresi gibi farklı bir çok fiziko-kimyasal etmen tarafından etkilenir.

Adsorbsiyonla renk gideriminde en çok aktif karbon kullanılmaktadır. Aktif karbonla renk giderimi katyonik, mordant ve asit boyalar için iyi derecede iken, dispers, direkt, vat, pigment ve reaktif boyalar için daha düşük verimlerde renk giderimi söz konusudur. Yöntemin performansı kullanılacak karbonun çeşidine ve atıksuyun karakteristiğine bağlıdır. Rejenerasyon ve tekrar kullanım performansta azalmaya sebep olur ancak bu dezavantaj yüksek miktarda aktif karbon kullanılmasıyla önlenebilir. Fakat aktif karbon pahalı bir malzeme olduğundan bu durumda farklı bir dezavantaj ortaya çıkar.

Adsorban olarak kullanılabilen başka bir materyal bataklık kömürüdür. Bataklık kömürü, boya bulunan atıksulardaki polar organik bileşikler ve geçiş metallerini tutabilmektedir.

Adsorban olarak bataklık kömürü bol bulunan İrlanda ve İngiltere gibi ülkelerde kullanılmaktadır. Bataklık kömürü aktif karbondan daha ucuzdur fakat aktif karbonun toz haldeki durumundan kaynaklanan geniş yüzey alanı daha yüksek bir adsorpsiyon performansını ifade eder. Ağaç kırıntıları, ponza, silika jeller, ceviz kabuğu, doğal killer, mısır koçanı gibi malzemeler de boya gideriminde adsorban olarak kullanılabilir. Bu malzemelerin ucuz ve kolay elde edilebilir oluşu boyar madde giderimindeki kullanımını ekonomik açıdan cazip hale getirmiştir (Robinson, McMullan, Marchant, & Nigam, 2001) (Kocaer & Alkan, 2002).

1.2.2 Biyolojik Yöntemler

1.2.2.1 Anaerobik Yöntem

Anaerobik arıtmada ilk aşamada asidojenik bakteriler karbonhidratlar, proteinler ve yağlar gibi organik maddeleri düşük moleküler ağırlıklı ara ürünlere dönüştürürler. Oluşan fermentasyon ürünlerini asetojenik bakteriler kullanır ve asetat, karbon dioksit ve moleküler hidrojen açığa çıkar. Son aşamada ise metanojenik bakteriler asetat ve karbondioksiti metana indirgerler. Metan ve karbondioksit içeren biyogaz, anaerobik parçalanma testlerinde parçalanma miktarını belirlemek için kullanılabilir. Boyar maddelerle yapılan anaerobik parçalanma çalışmalarında, özellikle aerobik ortamda parçalanamayan suda çözünabilir reaktif azo boyar maddeleri tercih edilmiştir. Çift bağlı azot halkasına bağlı bu boyaların aerobik proseslerle arıtımının sağlanamaması nedeniyle anaerobik arıtmanın ön arıtma olarak kullanılmasını gerektirmektedir. Anaerobik koşullarda renk gideriminin gerçekleşebilmesi için ilave karbon kaynağına ihtiyaç duyulur. İlave karbon metan ve karbondioksit dönüştürülmekte ve bu işlemle birlikte elektronlar açığa çıkmaktadır. Açığa çıkan elektronlar elektron taşıma zincirinden son elektron

alıcısına yani azo-reaktif boyaya taşınmakta ve boyayla tepkimeye girerek azo bağı indirgemektedir. Böylelikle anaerobik parçalanma sonucunda azo boyar maddelerdeki renkten sorumlu azo bağı kırılmakta ve renk giderilmektedir. Bu olay oksijen tarafından engellenmektedir. Bu sebeple boya atıklarını renksizleştirmek için ilk adım azo köprüsünün indirgenerek parçalandığı anaerobik şartlar altında arıtım olmalıdır (Robinson, McMullan, Marchant, & Nigam, 2001).

Boyar maddeler normalde sitotoksik, mutajenik veya kanserojenik değilken, anaerobik parçalanma sonucu açığa çıkan aminler bu özellikleri sergileyebilmektedir. Bu sebeple anaerobik sistemler aerobik arıtmadan önce yer alan bir ön arıtım prosesi olarak önerilmektedir. Bunun nedeni aromatik aminlerin, aromatik bileşiğin halkasının açılması ve hidroksilasyonla aerobik koşullarda mineralize olabilesidir. Böylece boyar madde içeren atıksuların ardışık anaerobik-aerobik proseslerle arıtılması sonucu ilk aşamada etkin bir renk giderimi sağlanmakta ve anaerobik ortamda dirençli olan aromatik aminler aerobik sistemde giderilebilmektedir (O'Neill, Hawkes, Hawkes, Esteves, & Wilcox, 2000).

1.2.2.2 Aerobik Yöntem

Tekstil endüstrisi atıksuları, pH değişiminden kolayca etkilenebilen geleneksel biyolojik arıtma sistemlerinde önemli zorluklara neden olmaktadır. Endüstriyel atıksuların arıtılmasında çok sık tercih edilen konvansiyonel aktif çamur sistemleri için tekstil endüstrisindeki birçok boya bileşiği biyolojik olarak çok zor parçalanmakta ya da hiç parçalanamamaktadır. Suda iyi çözünen bazik, direkt ve bazı azo boya maddelerinin bulunması halinde mikroorganizmalar bu tür bileşikler biyolojik olarak indirgeyemez ancak boyanın bir kısmını bünyelerinde tutarak atıksuyun rengini alırlar. Böylelikle renk giderimi sağlanmış olur. Azo boyar maddeler gibi sentetik boyaların aerobik şartlarda mikrobiyal parçalanmaya karşı direnç göstermesinin sebebi boya malzemelerinin, kimyasal ve ışık kaynaklı oksidatif etkiler sonucu renklerinin solmamasını sağlayacak şekilde oluşturulmalarıdır. Boyar maddelerin aerobik parçalanmasını zorlaştıran başka bir etken ise moleküler ağırlıklarının yüksekliği sebebiyle biyolojik hücre zarından geçişlerinin zor olmasıdır (Kocaer & Alkan, 2002). Bunun yanı sıra boyar maddelerin aerobik olarak parçalanabileceğine dair çalışmalar da mevcuttur (Coughlin, K, Tepper, & Bishop, 1997). Odunsu bitkilerde bulunan, yapısal polimer lignini parçalayabilen ve ksenobiyotik maddelerin parçalanması hedeflenen çalışmalarda yaygın olarak kullanılan beyaz çürükçül küf *Phanerochaete chrysosporium*'un, lignin peroksidaz, manganeze bağlı peroksidaz gibi

enzimleri kullanarak boyar maddeleri parçalayabildiği görülmüştür (Robinson, McMullan, Marchant, & Nigam, 2001). Ancak beyaz küflerin, ligninolitik enzimlerin asidik koşullarda aktif olması ve atıksularda bulunma ihtimali az olan tiamin ile veratril alkol maddelerine gereksinim duyması gibi dezavantajları vardır (Kapdan & Kargı, 2000) (Kocaer & Alkan, 2002).

1.2.3 Kimyasal Yöntemler

1.2.3.1 Kimyasal Floklaştırma ve Çöktürme

Bu proseste floklaşma ve çökelme işlemleri kimyasal madde ilavesi ile sağlanır. Atıksuya ilave edilen kimyasalların reaksiyonu sonucunda oluşan floklaşma ile çözünmüş maddeler ve kolloidler giderilir. En çok kullanılan kimyasallar arasında, $Al_2(SO_4)_3$, $FeCl_3$, $FeSO_4$ ve kireç bulunmaktadır. Kimyasal çöktürme deneylerinde uygun kimyasal dozlarıyla orta dereceden yüksek dereceye kadar renk giderimi sağlandığı ve kullanılan kimyasallar arasında alum daha etkili olduğu görülmüştür. Kimyasal çöktürme yönteminde işletme masrafları, ilk yatırım maliyetinden çok daha önemlidir. Özellikle floklaşma maddeleri ve oluşan çamurun bertaraf edilmesi, giderlerin önemli bir kısmını meydana getirmektedir (Kocaer & Alkan, 2002).

1.2.3.2 Oksidasyon

Bu yöntemde oksitleyici maddeler ile atık suların teması sağlanmaktadır. Çoğu zaman, iki şekilde uygulanmaktadır. Kimyasal oksidasyon ve potasyum permanganat, ozon, fenton ayırıcı, hidrojen peroksit ve klorin gibi maddelerin kullanıldığı UV ile oksidasyon şeklindedir. Özellikle çöktürme işleminden oluşan atık suların işlem görmesinde uygulanmaktadır. Bunlar renk giderim metotları arasında en çok kullanılan yöntemlerdir. Çünkü küçük miktarlarda etkili ve tepkimeye girme süreleri daha kısadır ve bunlar boyaların bir kısmını ya da tamamını parçalayabilirler. Bunun yanı sıra, tam bir boya oksidasyonu teorik olarak karmaşık yapıdaki molekülleri karbondioksit ve suya indirgeyebilir. Oksidasyon prosesinde pH ve katalistin de önemli faktörler olduğu göz ardı edilemez.

Klorin kuvvetli bir oksitleyici madde olup, uygulamada kalsiyum hipoklorit ve sodyum hipoklorit olarak da kullanılabilir. Suların işlenmesinde dezenfektan olarak yaygın kullanılmasının yanı sıra, tekstil endüstrisinde renk açıcı olarak kullanılmaktadır. Hidrojen peroksit ise çok açık mavi bir sıvı olup, seyreltilmiş suda renksiz ve sudan daha akışkandır.

Kuvvetli oksitleyici özelliği dolayısıyla kağıt sanayinde ağartıcı olarak kullanılmaktadır. 1994’de Dünya’da üretilen hidrojen peroksit miktarının yaklaşık yarısı kâğıt ve kâğıt hamurunda ağartıcı madde olarak kullanılmıştır. H_2O_2 aynı zamanda boyaların rengini gidermede kullanılan peroksidaz enzimi yapımında da yer almaktadır (Kocaer & Alkan, 2002).

1.2.3.3 Ozonofikasyon

Tekstil atık sularının arıtılmasında kullanılan yöntemlerden biri de ozondur. Ozonlama yöntemi ile suda çözünmeyen disperse boyalar dışında diğer bütün boyaların rengi giderilebilir. İşlem görmemiş tekstil atık suyunda ozonlama ile yüksek verimler elde edilememektedir. Bu sebeple son aşama olarak ya da kimyasal koagülasyon proses sonrası uygulanmasıyla daha çok verim elde edilir. Ozonlama sonucunda BOİ miktarı artış gösterirken KOİ miktarı çok azalır (Mercimek, 2007). Tesis çıkış sularının ozonlama yapıldıktan sonra tekrar kullanımı tesis için su tasarrufu ve kimyasal madde sağlamakta, bununla birlikte atıksu arıtma tesisinin yükü hafifletmektedir. İyi bir yükseltgen olan ozon, tekstil yaşı proseslerinden ortaya çıkan atıksularda bulunan yüzey aktif maddeler ve taşıyıcılar gibi farklı kirleticilerin giderilmesinde de kullanılır (Kocaer & Alkan, 2002).

1.3 Elektrokimyasal Arıtım Yöntemleri

Bu yöntemde atıksuların arıtılmasında elektrokimyasal reaksiyonlardan yararlanılmaktadır. Endüstriyel atıksuların arıtımında inert kirleticilere karşı son dönemlerde elektrokimyasal yöntemlerin kullanımı artış göstermektedir. Kimyasal madde ilavesi gerektirmemesi ve buna bağlı olarak da atık çamur miktarının az oluşu, kullanımının yaygınlaşmasında rol olan temel etken olabilir. Elektrokimyasal arıtım proseslerinin başta elektrokoagülasyon olmak üzere, elektroflotasyon, elektrooksidasyon, elektrodializ ve elektroforez gibi çeşitli uygulamaları bulunmaktadır (Won, Han, & Yun, 2008).

Atıksuların arıtılması için yaygın olarak kullanılan elektrokimyasal yöntemler; elektrokoagülasyon, elektroflotasyon ve elektrooksidasyondur. Bunların yanı sıra elektroforez ve elektrodializ gibi elektrokimyasal prosesler de mevcuttur. Bu prosesler birlikte ya da ayrı olarak gerçekleştirilmektedir. Atıksuda bulunan kirleticiler bu prosesler ile okside ve adsorbe edilerek ya da reaktör yüzeyinde birikerek arıtım sağlanmaktadır

(Saraç, 1995). Elektrokimyasal prosesleri birbirinden ayıran en önemli özellik kirleticilerin giderimini sağlayan elektrokimyasal prosesin uygulanma şekli ve yapısıdır.

1.3.1 Elektroforez

Elektroforez prosesi elektriksel alanda yüklü parçacıkların hareketine dayanmaktadır. Bu yöntem elektrik yüklü parçacıkların elektriksel bir alan içinde elektrik akımının tesiri ile taşıdıkları yükün ters yönüne taşınması esasına dayanmaktadır (Berik, 2002). Böylelikle yüklü moleküller farklı taşınma kapasiteleri ile sudan ayrılmaktadırlar. Taşınım sırasındaki önemli değişkenler elektriksel alanın gücü, partikülün net yükü ve elektroforetik ortamın yoğunluğudur (Tekin, 2018).

1.3.2 Elektrodiyaliz

Elektrodiyalizde iyonlar elektriksel itici kuvvetin desteğiyle çözeltilerden ve membranlardan taşınırlar. Elektrodiyaliz, tuzlu ve acı sudan içilebilir su eldesi, meyve sularının asitliğinin giderimi, pH kontrolü, ağır metal geri kazanımı gibi farklı işlemlerde kullanılmaktadır (Baker, 2004).

Günümüzde elektrodiyalizler, en genel kullanımı ile elektriksel alan ve iyon değiştirici membranlar aracılığıyla sisteme beslenen sulu elektrolit çözeltisinin, yüksek tuz oranlı su ve tuzu giderilmiş su olarak ayrılmasında kullanılan elektrolitik bir yöntem olarak nitelendirilebilir.

1.3.3 Elektroflotasyon

Elektroflotasyon, proses boyunca reaktör içerisinde üretilen hidrojen ve oksijen gaz kabarcıklarının çözeltilerden ayrılması istenen maddeleri su yüzeyine taşımaları sağlayan bir işlemdir. Elektroflotasyon ilk olarak cevherlerden kıymetli minerallerin ayrılması için 1904 yılında Elmore tarafından kullanılmıştır. Bir elektroflotasyon prosesinin başarısı, kirletici giderme verimi, kimyasal madde ve enerji ihtiyacı ile belirlenmektedir. Kirletici giderme verimi ve üretilen kabarcıkların boyutu arasında yüksek oranda bir ilişki bulunmaktadır.

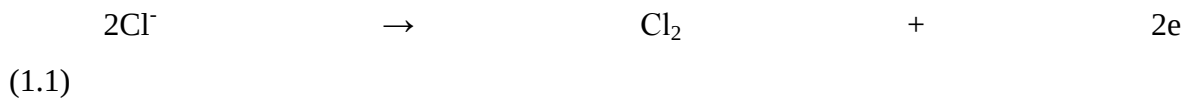
Elektroflotasyon boyutları küçük olmasına karşın dispersiyon kabiliyetine sahip gaz kabarcıklarına bağlı olarak ilerleyen bir prosestir. Burada gaz kabarcıkları prosesin esasını oluşturmaktadır. Elektrot cinsi ve yüzey alanıyla birlikte akım yoğunluğu ve reaktör tipi de önemli parametrelerdir. Genel olarak elektroflotasyon prosesinin işletme koşullarının

belirlenmesi akım, elektrot tipi, pH ve sıcaklık gibi parametreler değiştirilerek sistem için optimum şartlar sağlanarak yapılmaktadır. Elektroflotasyon yöntemi ile atıksulardan yağ ve emülsiyonlar gibi yoğunluğu düşük olan maddelerin yanı sıra askıda katı madde giderimi de sağlanabilmektedir. Özellikle bazı tesislerde probleme neden olan KOİ'nin bir kısmı bu yöntemle giderilebilmektedir. Elektroflotasyon yöntemi ile metal kaplama sanayi, tekstil endüstrisi, boya ve kimya sanayi atıksularının arıtımı gerçekleştirilmektedir (İlhan, Kurt, Apaydın, Arslankaya, & Gönüllü, 2007)

1.3.4 Elektrooksidasyon

Elektrooksidasyon yönteminde temel prensip Ti, Ru, Pt, paslanmaz çelik gibi çözünmeyen elektrotlar vasıtasıyla çıkan gazlar (O₂ ve H₂) ile istenilen oksidasyonun sağlanmasıdır. Bu işlem ile birçok madde oksidasyona uğratılabilirken biyolojik olarak zor parçalanabilen bileşikler biyolojik olarak kolay parçalanabilir organik bileşiklere veya CO₂ ve H₂O gibi son ürünlere dönüştürülmektedir.

Elektrooksidasyon prosesinde anot elektrot daha aktiftir. Bu nedenle prosese etki eden parametrelerin başında anodun katalitik aktivitesi gelir. Bunun yanında akım, sıcaklık, pH ve organik bileşiklerin ve diğer oksidantların difüzyon hızı da önemli parametrelerdir. Eğer anot yeterince yüksek bir potansiyele sahipse, eşitlik (1.1)'de görüldüğü gibi atıksuda bulunan klorür iyonları kloro dönüşebilir ya da organik bileşiklerin doğrudan oksidasyonu gibi ikincil tepkimeler de oluşabilir (İlhan, Kurt, Apaydın, Arslankaya, & Gönüllü, 2007).



Klor, güçlü oksidant yapısı sebebiyle bazı organik bileşikleri oksitleyebilir. Yapılan çalışmalarda atıksu karakterine bağlı olarak farklılık gösterse dahi elektrooksidasyon prosesinde ortalama % 90 oranında KOİ giderimi elde edilebilmektedir.

Elektrooksidasyon proseslerinde literatürde çoğunlukla Ti/Pt-Ir, Ti/RhOx-TiO₂, Ti/PdO-CO₃O₄, TiO₂/TiRuO₂, Ti/Pt, PbO₂/SnO₂, PbO₂/Ti, SnO₂, PbO₂, BDD vb. anot elektrotlar tercih edilmiştir (Andrade, ve diğerleri, 2007). Elektrooksidasyon etkin bir giderim sağlaması ve çamur oluşumunun çok az olması sebebiyle elektrokimyasal yöntemler arasında tercih edilen bir yöntem olarak yer almaktadır.

1.3.5 Elektrokoagülasyon

Elektrokimyasal prosesler arasında en yaygın olanı elektrokoagülasyondur. Bir elektrokimyasal proste elektrot cinsi önemli bir parametredir. Elektrokoagülasyon prosesinde alüminyum (Al^{+3}) ve demir (Fe^{+2} , Fe^{+3}) elektrotların kullanımı yaygındır. Kullanılan elektrotlar işletme esnasında suyla tepkimeye girerek $Al(OH)_3$, $Fe(OH)_2$ ve $Fe(OH)_3$ gibi metal hidroksitler oluşturmaktadır. Proste arıtma metal hidroksitlerin oluşumuyla başlar. Adsorpsiyon kapasitesi çok yüksek olan metal hidroksitlerin sudaki farklı kirleticileri adsorbe edip çökelti olarak sudan uzaklaştırma temeline dayanan bu arıtma yönteminin günümüzde birçok yerde kullanım alanı mevcuttur.

Elektrokoagülasyon prosesi birbirini takip eden 3 basamakta gerçekleşir:

- 1) Elektrolitik oksidasyonun etkisi ile çözünen elektrodun koagülantları meydana getirmesi,
- 2) Kirleticilerin, askıda partikül maddelerin stabil durumlarının bozulması ve emülsiyonların kırılması,
- 3) Flokların destabilize haldeki fazlarda toplanması,

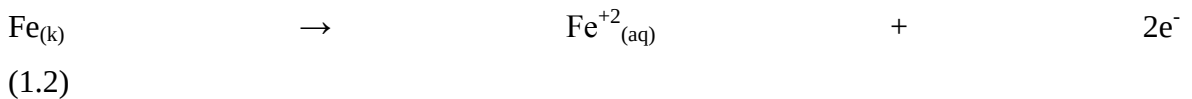
Kirleticilerin ve askıda partikül maddelerin stabilizasyonunun bozulması ve emülsiyonların kırılma mekanizmaları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

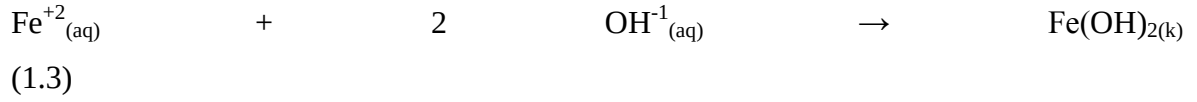
- Çözelti içerisinde geçen akımın etkisiyle kullanılan elektrodun çözünmesi sonucunda oluşan iyonlar etkileşir bu durum yüklü türlerin ve oluşan iyonların etrafındaki dağınık çift tabakanın sıkıştırılmasını sağlar.
- Elektrotların elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu çözünmesi ile meydana gelen zıt iyonların yardımıyla atıksu içerisinde bulunan iyonik türlerin yük nötralizasyonu sağlanır.

Elektrokoagülasyonda demir elektrotun elektrolitik oksidasyonunda demir hidroksitler oluşmaktadır. $Fe(OH)_n$ üretiminde $n=2$ ya da $n=3$ olmak üzere iki mekanizma oluşması beklenmektedir (Mollah, Schennach, Parga, & Cocke, 2001). Demir elektrotta oluşan reaksiyonlar eşitlik (1.2) – (1.12)'de belirtilmiştir.

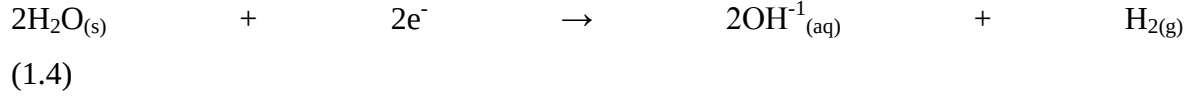
Mekanizma 1

Anot reaksiyonu:

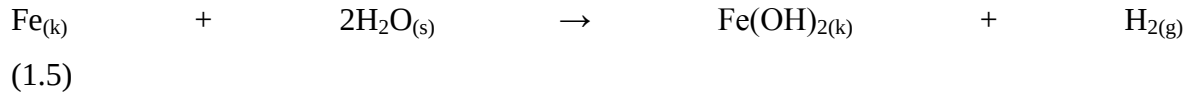




Katot reaksiyonu:

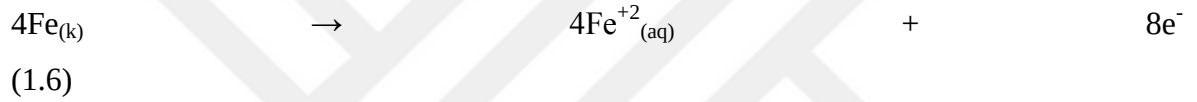


Toplam reaksiyon:



Mekanizma 2

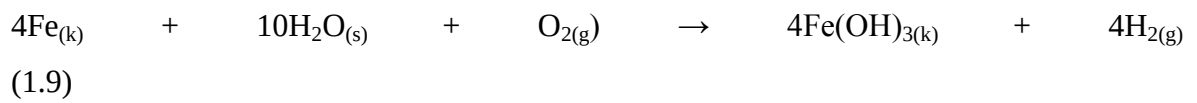
Anot reaksiyonu:



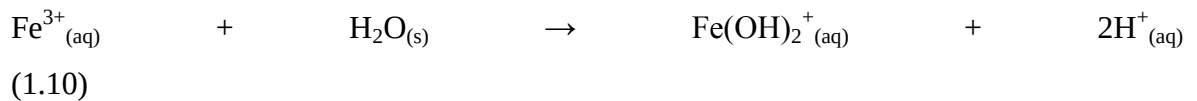
Katot reaksiyonu:

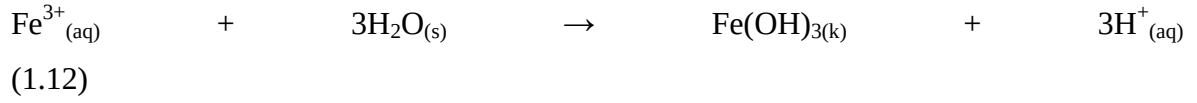
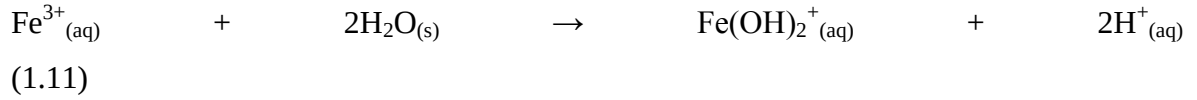


Toplam reaksiyon:



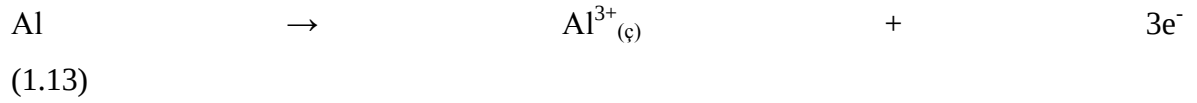
Redoks reaksiyonu sonucunda üretilen H_2 , çözülmüş organikleri ya da flotasyon ile askıda bulunan maddeleri ortamda uzaklaştırır. Fakat Fe^{+3} iyonları hidrasyona uğrayabilmekte ve çözeltinin pH değerine bağlı olarak Fe(OH)^{+2} , Fe(OH)_2^{+} ve Fe(OH)_3 gibi farklı türler asidik şartlar altında oluşabilmektedir. Bazik şartlar altında ise Fe(OH)_6^{-} ve Fe(OH)_4^{-} iyonlarının üretimi gerçekleşebilmektedir (Mollah, Schennach, Parga, & Cocke, 2001).



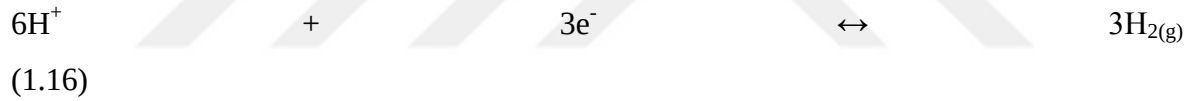


Alüminyum elektrot kullanıldığında oluşan reaksiyonlar denklem 1.13 - 1.16'da belirtilmiştir.

Anotta:



Katotta:



1.3.5.1 Elektrokoagülasyon Prosesinin Avantaj ve Dezavantajları

Elektrokoagülasyon prosesinin avantajları;

- Uygulaması kolay ve etkili bir prostestir, kimyasal madde ilavesine ihtiyaç duyulmadığından ikincil kirlilik problemi oluşturmaz, basit ekipman, az iş gücü ve küçük alanlarda kullanılabilir (Orkun & Kuleyin, 2007).
- Elektrokoagülasyon yöntemiyle atıksuların arıtılmasında renk ve koku yüksek bir verimle giderilebilir (Kaplan, 2007).
- Pıhtılaştırma için gerekli katyonları suyun tuzluluğunu arttırmadan sağlayabilir buda arıtmada önemli bir fayda sağlar (Moreno-Casillas, ve diğerleri, 2007);.
- Kimyasal floklara benzer özellikte flok oluşumu gözlenmekle birlikte oluşan floklar daha büyük boyuta sahiptir ve daha az bağlı su içerirler. Floklar asidik koşullara karşı dirençli ve kararlı haldedirler. Bu sayede filtrasyonla ayrılmaları daha hızlı olur (Mollah, Schennach, Parga, & Cocke, 2001).

- Koagülant olarak metal hidroksitler kullanıldığında, hidroksitin mineral yüzeyine adsorpsiyonu yumaklaştırıcının reaktörde üretilmesi halinde ön çökeltme işlemi yapılmış hidroksitlerinkinden çok daha büyüktür (Yıldırım, 2007).
- EC prosesinde yüksek giderim verimi eldesi, az miktarda atık çamur oluşması ve arıtılan suya gereksiz iyon vermemesidir (İlhan, Kurt, Apaydin, & Gönüllü, 2008).
- Diğer bazı yöntemler ile karşılaştırıldığında küçük kolloidlerin de giderimini sağlayabilir. Kolloidler oluşan elektiriksel alan ile harekete geçip pıhtılaşmaya uğrarlar (Alinsafı, ve diğerleri, 2005).
- Elektrokoagülasyon prosesi uygulandığında kimyasal arıtmaya göre arıtılmış suda daha az miktarda toplam çözünmüş katı madde bulunur. Arıtılmış suyun tekrar kullanımı düşünülürse düşük toplam katı madde içermesi, geri kazanım için daha düşük maliyet sağlar (Karadağ, 2009).
- Elektroliz boyunca gaz kabarcıkları kirleticileri taşıyarak daha küçük konsantrasyonları flotasyon şeklinde giderebilir (Jiang, Graham, André, Kelsall, & Brandon, 2002).
- Basit uygulanabilir olması, maliyetinin yüksek olmaması, güvenilir ve ekolojik oluşu da avantajları arasındadır (Trompette & Vergnes, 2009)

Elektrokoagülasyon prosesinin dezavantajları;

- Ülkemizde elektrik enerjisinin pahalı olması nedeniyle bu prosesin uygulanması yüksek maliyet sorununu ortaya çıkarır (Orkun & Kuleyin, 2007).
- Elektrokoagülasyon basitliği ile genel olarak kimyasal dozlama sistemlerinin yerine tercih edilse de proses esnasında oluşan gazlar olumsuz sonuçlar ortaya çıkarır (Holt, Barton, & Mitchell, 2005)
- E.C prosesinin çözünmeler dolayısıyla elektrotların değişim zorunluluğu, fazla elektrik tüketimi, anotun etkinliğinin zamanla değişimi ve bazı koşullarda çözünebilen jelimsi hidroksillerin oluşumu gibi dezavantajları da bulunmaktadır (Kumar & Goel, 2010).
- Katotta geçirimsiz bir oksit film tabakası oluşması, EC prosesinin veriminin azalmasına sebep olur.
- Arıtılacak atıksuyun yüksek iletkenliğe sahip olması gerekliliği de dezavantajlar arasındadır (Mollah, Schennach, Parga, & Cocke, 2001).

1.4 Elektrokoagülasyona Etki Eden Parametreler

1.4.1 Elektrot Cinsi

EC proseslerinde arıtma verimini etkileyen en önemli parametrelerden biri seçilen elektrotun tipidir. Çünkü kullanılacak elektrot elektrokimyasal arıtımın türünü etkilediği gibi giderim verimini de doğrudan etkiler. Giderim metotlarındaki farklılık gibi elektrokimyasal reaksiyonların farklılığı da kullanılan elektrotun türüne bağlıdır. Bunların yanı sıra aynı suya ayrı reaktörlerde farklı cins elektrot kullanılarak aynı yöntem elektrokimyasal arıtım uygulandığında hepsinde başka reaksiyonların gerçekleştiği ve farklı giderim verimlerinin elde edildiği gözlemlenir. Bu nedenle arıtım yapılacak atıksuların karakterizasyonuna bağlı olarak optimum çalışma şartlarında çalışmalar yapılarak en uygun elektrot seçilmelidir.

1.4.2 Akım Yoğunluğu

EC prosesinde yalnız çözünen elektrot miktarı değil aynı zamanda EC 'nin arıtma verimine etki edecek gaz kabarcıklarının oluşum hızı, flokların boyut ve büyüklüğü de akım yoğunluğuna bağlıdır. Akım yoğunluğunun artması gaz kabarcıklarının yoğunluğunu artırırken gaz kabarcıklarının boyutunu azaltmaktadır; bu durumda yukarı doğru daha büyük akış, kirletici gideriminin daha hızlı olması ve çamur flotasyonu gözlenmektedir. Faraday kanunu elektrokoagülasyon prosesinde anot elektrotların çözünmesiyle çözeltideki iyonların geçişi olarak ifade edilir (Mollah, ve diğerleri, 2004).

Faraday kanununa göre Al anot elektrot tüketim hızı, akım ve EC süresi arasında doğru orantı vardır. Bu eşitlikten akım yoğunluğu arttıkça çözünen anot miktarının da artacağı ve yüksek akım yoğunluklarında çok fazla anot metalinin çözüneceği ve netice olarak atıksudan giderilen kirletici miktarının artacağı anlaşılmaktadır. Nihayet optimum bir akım yoğunluğu eldesi sağlanacaktır. Belirlenen optimum akım yoğunluğundan sonra atıksudan kirleticilerin giderim verimi çok fazla değişmeyecektir. EC prosesinde EC reaktöründeki atıksuyun veya çözeltinin ısınması gibi olumsuz etkilerin ortaya çıkmasını önlemek ve aşırı O_2 oluşumu istenmeyen bir durum olduğundan limit değerinde bir akım yoğunluğu seçilmesi tavsiye edilir (Ergün, 2013).

1.4.3 Sıcaklık

Kimyasal reaksiyonların tamamında olduğu gibi elektrokimyasal reaksiyonlarda da sıcaklık ve reaksiyon hızı doğru orantılıdır yani sıcaklık arttıkça reaksiyon hızı da artar. Sıcaklığın artması ile iyonların hareketliliği artar, kütle transferi kolay hale gelir ve bu etkilere bağlı olarak elektrokoagülasyon prosesi kirletici giderim veriminde artış gözlenir. Song (Song, He, Qiu, Xu, & Chen, 2007) ile Chen (Chen, 2004) yaptıkları çalışmalarda

60°C üzerindeki sıcaklık değerlerinde arıtma veriminin azalmaya başladığını ifade etmişlerdir. 60°C üzerindeki sıcaklık değerlerinde kararsız flok oluşumu ya da çökelen flokların çözünme miktarında meydana gelen artış sebebiyle verimlilikte azalma görülmüştür. Bunların yanı sıra Chen (Chen, 2004) yaptığı çalışmada sıcaklık ve iletkenliğin doğru orantılı olduğunu yani sıcaklık arttıkça iletkenliğinde arttığını ve buna bağlı olarak enerji tüketiminin azalacağını ifade etmiştir.

1.4.4 Elektrotlar Arası Mesafe

Elektrotlar arası mesafenin, elektrokoagülasyon prosesinin arıtım verimine etkisi diğer parametreler ile mukayese edildiğinde ihmal edilebilecek seviyededir. Elektrotlar arası mesafenin arttırılması ile potansiyel farkın artması elektrik tüketimini de arttırır. Elektrotlar arası mesafenin çok az ya da çok fazla olması istenmez. Optimum mesafenin belirlenmesi ile elektrokoagülasyon prosesinin istenilen performansta çalışması sağlanır. Elektrotlar birbirine çok yakın olduğunda flok oluşumu ve oluşan flokların adsorplama özellikleri azalır. Çok uzak olduğunda ise potansiyel farkın artmasıyla birlikte elektrokoagülasyon prosesinden ekonomik bir çözüm olarak bahsedilemez (Aygün, 2012).

1.4.5 pH

Bir elektrokoagülasyon prosesinde reaksiyon süresi boyunca ortamın pH'ı değişir. Gerçekleşen bu değişim kullanılan elektrodun cinsine ve başlangıç pH'ına bağlıdır. Yapılan bazı çalışmalarda geniş pH aralığında istenilen verim elde edilmekte ve proseste başlangıç pH'ının düzenlenmesine gerek duyulmamaktadır (Koby M. , Can, Demirbaş, & Bayramoğlu, 2006). Bu durumun yanı sıra, bazı çalışmalar için optimum pH değerinin belirlenmesi ve istenilen giderimini sağlamak amacıyla başlangıç pH değerinin ayarlanması gerekir.

Alüminyum elektrodun kullanıldığı proseslerde başlangıçta $pH < 8$ ise çıkış suyunda pH başlangıç değerinden daha yüksek, $pH > 8$ ise çıkış pH'ı başlangıç pH'sından daha düşük değere ulaşır. Demir elektrot kullanıldığında ise çıkış pH değeri başlangıç pH değerinden her zaman daha yüksek değere ulaşmaktadır. Bu sonuçlardan elektrokoagülasyon prosesinin özellikle alkali ortamda belirli bir oranda tamponlama kapasitesine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Elde edilen bu sonuç, elektrokoagülasyon prosesinin avantajlarından biri olarak görülmüştür (Daneshvar, Ashassi-Sorkhabi, & Tizpar, 2003),(Koby, Can, & Bayramoglu, 2003).

1.4.6 Elektrolit Türü

Elektrokoagülasyonun verimini arttırmak ve atıksuyun iletkenliğini istenilen düzeye getirmek için sodyum nitrat, sodyum sülfat gibi inert tuzlar, NaCl, KBr gibi halojenli tuzlar ya da deiyonize edilmemiş sudan yararlanılmaktadır. İletkenlik ayarlaması için ilave edilen maddeler atıksuyun başlangıç pH'ında yaklaşık 0,3 birim değişime sebep olmaktadır (Chen, 2004), (Koby, Can, & Bayramoglu, 2003).

Potasyum klorürün elektrolit olarak kullanılması durumunda boya molekülleri hızlı bir biçimde parçalanabilmekte fakat temel olarak hipoklorit sebebiyle reaksiyonda yan ürün olarak klorlu organik bileşiklerin oluşma ihtimali ortaya çıkmaktadır. Bu bileşiklerin oluşması proseste istenmeyen bir durumdur; bunu engellemek için organik bileşiklerin tamamen mineralizasyonu sağlanmalıdır. Mineralizasyon için yeterli uzunlukta elektroliz süresi gerekmektedir. Sodyum nitrat, sodyum sülfat ve mangan sülfat gibi inert tuzların elektrokoagülasyon ile indigo boyaların oluşturduğu rengin giderilmesinde kullanımı düşük renk giderme verimi ve yüksek enerji tüketimi açısından tercih edilmemektedir (Fernandes, Morão, Magrinho, Lopes, & Gonçalves, 2004), (Cameselle, Pazos, & Sanromán, 2005).

Proseste elektrolit olarak NaCl kullanımı ile renk giderimi ve elektrik tüketimi açısından en iyi sonuçların elde edilmesini sağlar. Üstelik NaCl, tekstil endüstrisinde boyama işleminde kullanılması sebebiyle tekstil endüstrisi atıksularında zaten mevcut olan bir elektrolittir. Sodyum klorür genel olarak arıtılacak atıksuyun iletkenliğinin artırılması işlemi için kullanılır. Elektrik yükünü iyi iletme etkisinin yanında HCO_3^- , SO_4^{2-} gibi anyonların oluşturduğu olumsuz etkilerin de önemli miktarda azalmasını sağlar. Ayrıca elektrokimyasal olarak oluşturulan klor dezenfeksiyon işlemi de yapmaktadır (Chen, 2004), (Cameselle, Pazos, & Sanromán, 2005).

1.4.7 Arıtım Süresi

Arıtma süresi, tüm arıtma prosesleri için temel bir parametredir, arıtım süresi dikkatlice seçilmez ise istenilen verim elde edilemeyebilir. Bu nedenle arıtım süresini belirlemek için optimizasyon çalışmaları yapmak gerekir. Elektrokimyasal yöntemlerden biri olan elektrokoagülasyonda bekleme süresi yeterli değil ise sistem için gerekli miktarda

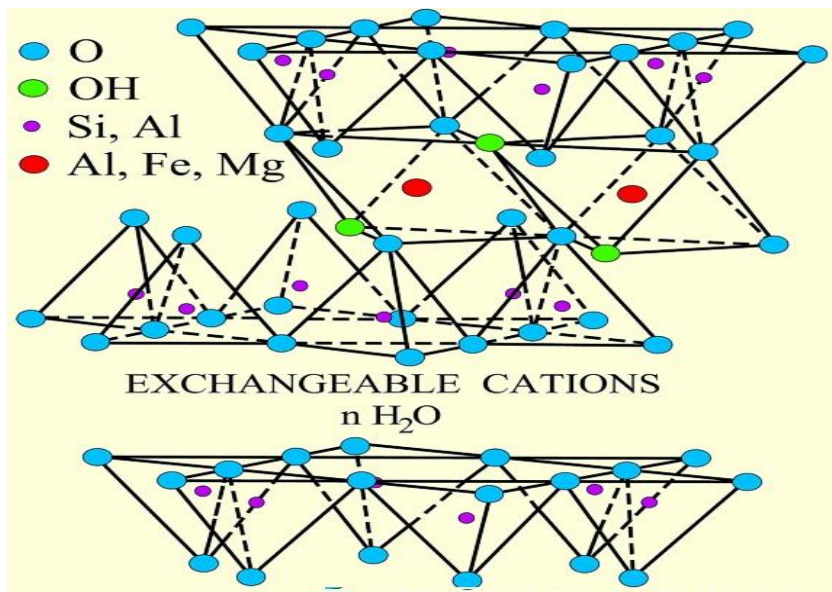
koagülant oluşumu sağlanamaz bu da verimi azaltabilir. Kirleticilerin giderimi esnasında doğrudan elektrotların ürettiği iyon konsantrasyonu önemli bir parametredir. Sistemde elektroliz süresi artarsa, iyonların konsantrasyonu ve iyonların hidroksit flokları da artış gösterir.

1.5 Bazı Adsorbentler

Kil, taşların ve maden kütlelerinin fiziksel etkilerle ileri düzeyde parçalanması sonucunda küçük boyutlu taneciklerin birikmesiyle oluşan çok ince taneli kayaç türüdür. Kilin ana malzemesi sulu alüminyum silikattır. Killer türlerine göre Mg ve Fe gibi başka elementleri de içerebilirler. İnce taneler 2-5 mikron boyutunda bulunduğundan gözle veya normal mikroskopla incelenmeleri pek mümkün olmamaktadır. Parçalanmaya maruz kalmış malzeme türüne ve birikim sırasındaki kimyasal koşullara bağlı olarak, farklı kil mineralleri oluşur. Kil mineralleri çeşitli gruplara ayrılarak incelenirler. Fakat içerdikleri elemanlar ve dokuları itibariyle birbirlerine çok benzer olmaları incelenmelerini zorlaştırır. Ayrılmaları için elektron mikroskopta X ışınlarıyla veya farklılaştırıcı sıcaklık yöntemleriyle incelenmeleri gerekmektedir (Balkan, 2006).

X-ışınları difraksiyonu (XRD) yöntemi ile kil minerallerinin iki yapı taşından oluştuğu görülmüştür. Bu yapı taşlarından ilki; merkezde silisyum atomu ve ona eşit uzaklıklarda bulunan oksijen atomlarından oluşan ve geometrik şekli düzgün dört yüzlü olan SiO_4^{-4} 'tür. Bu düzgün dört yüzlü Tetrahedron (T) olarak adlandırılmıştır (Demirbaş, 2006).

Kil minerallerinin ikinci yapı taşı ise düzgün sekiz yüzlü şekline sahiptir. Bu sebeple oktahedron olarak adlandırılmıştır. Merkezinde alüminyum iyonları köşelerde ise oksijen veya hidroksil iyonları bulunan bu oktahedron (O) $\text{AlO}_3(\text{OH})_3^{-6}$ şeklindeki kimyasal formül ile gösterilir. Kil mineralinin kristal yapısı Şekil 1.1'de gösterilmiştir (Chimeddorj, 2007).



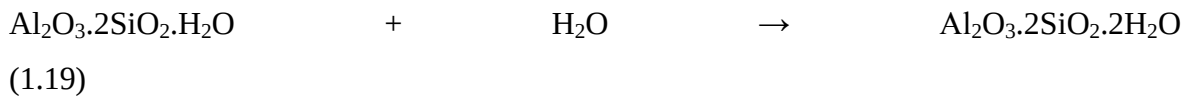
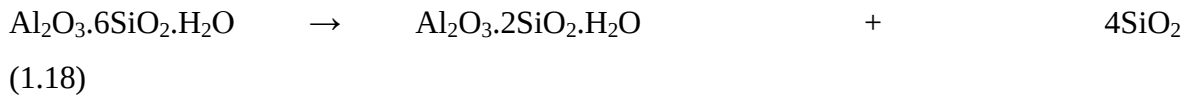
Şekil 1.1: Kil minerali kristal yapısı (Chimeddorj, 2007).

1.5.1 Kaolinit

Kaolinit iki farklı tabakası bulunan, formül ile (Al₂Si₂O₅(OH)₄) şeklinde ifade edilen dioktahedral aluminosilikat yapıya sahip bir kil mineralidir (Hurlbut, 1971) (Demirbaş, 2006). Tabakalardan biri kimyasal olarak parçalanması oldukça zor olan –Si-O-Si- bağlarını bulunduran tetrahedral siloksan tabakadır. Diğer tabaka ise oktahedral gibbsit (Al(OH)₃) tabakasıdır. Teoride her iki tabakada nötraldir. Kaolinit mineralinin oluşum aşamaları şöyle verilebilir (Yılmaz, 2004):

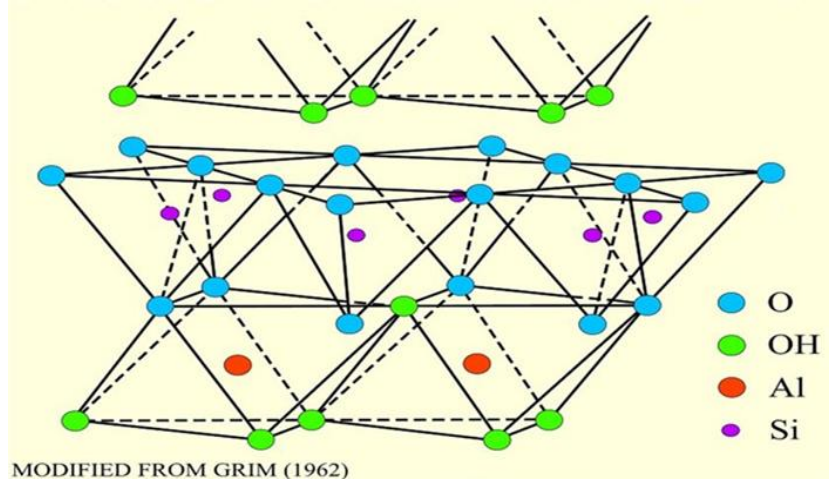


(Feldspat)



(Kaolinit)

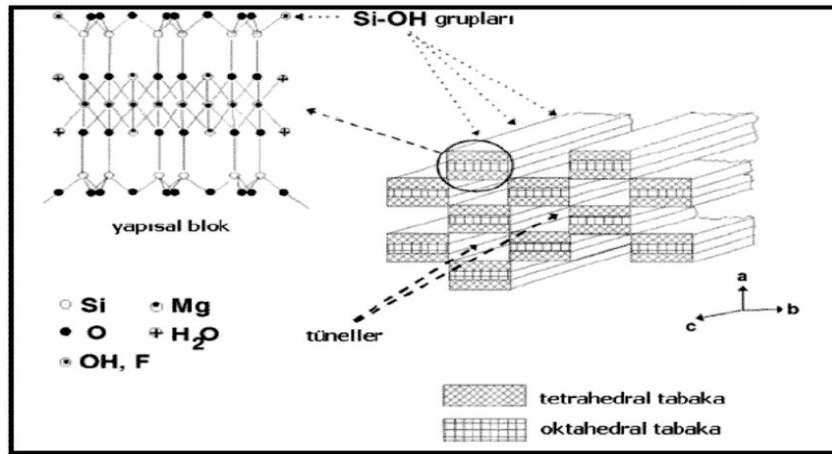
Kaolinit minerali, ısıtıldığında 200 °C'nin altında higroskopik suyunu, 500 – 600 °C'de ise kimyasal formüldeki bağlı suyunu bırakarak metakaoline dönüşür. Kaolinitin sertleşmesi 800 °C'de gerçekleştiğinden plastik özelliği az, ateşe dayanımı yüksektir. Yoğunluğu 2,2 – 2,6 g/cm³ olan primer oluşumlardır. Kaolinitin erime noktası 1850°C'dir (Uz, 2003)Yapısındaki yabancı madde oranı az olduğundan pişme rengi de doğal görünüşündeki gibi beyazdır. Şekil 1.2'de kaolinitin kristal yapısı gösterilmiştir.



Şekil 1.2: Kaolinitin kristal yapısı (Grim, 1962).

1.5.2 Sepiyolit

Sepiyolit fillosilikat grubu kil minerallerinden biridir. Bu mineralin kristal yapısı, 2:1 fillosilikat yapısına ait zincirlerin birbirine bağlanması ile oluşmaktadır. Her bir zincir, diğerine ters olarak sıralanır ve SiO_4 tetrahedronları ile Si-O-Si bağları ile tutturulur. Kısaca sepiyolit sulu magnezyum silikat bileşimli bir kil mineralidir. Nagy-Bradley'e göre kimyasal formülü $(\text{Si}_{12})(\text{Mg}_9)\text{O}_{30}(\text{OH}_6)(\text{OH}_2)4.6\text{H}_2\text{O}$ şeklindedir. Sedimanter oluşumlu, uzun lif demetleri şeklinde bulunan sepiyolit boyutu $0.2\ \mu\text{m}$ ile $25\ \mu\text{m}$ arasında değişir ve yoğunluğu $2\text{-}2.5\ \text{g/cm}^3$ arasındadır. Genişliği $100\text{-}300\ \text{\AA}$ ve kalınlığı $50\text{-}100\ \text{\AA}$ arasında değerlerde olabilmektedir. Ayrıca kuruma sıcaklığı $40\ ^\circ\text{C}$, erime sıcaklığı ise $1400\text{-}1500\ ^\circ\text{C}$ arasında değişir (Korkmaz, 2008). Sepiyolit mineralinin yapısı şekil 1.3'te verilmiştir.



Şekil 1.3: Sepiyolit yapısı (Galan, 1996).

Sepiyolit mineralinin dokusu, yüzey alanı, porozitesi, kristal morfolojisi ve kompozisyonu, bu mineralin teknolojik uygulamalarında ortaya çıkan fizikokimyasal özellikleri ile ilişkilendirilebilir. Sepiyolit yapısı, ısı işlemlere karşı dayanıksızdır. Isıtma sıcaklığı yükseldikçe zeolitik ve adsorbe su molekülleri azalmaktadır. Mineral ayrıca asitle muameleye karşı da hassas olup bu işlem sonucu kristal yapısı kısmen bozulmaya uğrayabilir. Ayrıca asit muameleleri, sepiyolit mineralinin yüzey özellikleri ve porozitesini etkiler. Böylece mineralin en yararlı özelliklerinden (absorptif, koloidal ve katalitik) bazılarını bu işlemlerle değiştirmek mümkün olabilmektedir (Devlet Planlama Teşkilatı, 2001).

1.5.3 Üleksit

Türkiye’de, farklı yapılarda bor minerali bulunmaktadır. Bu minerallerden biri olan üleksitin deneysel çalışmalarda kullanımı yaygındır. Üleksit mineralinin kimyasal formülü $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{CaO} \cdot 5\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$ şeklindedir. Aynı zamanda sodyum-kalsiyum borat hidrat minerali olarak da bilinmektedir. Yumuşak yapıya sahip olması, düşük özgül ağırlıklı olması ve soğuk suda çözünmeyip sıcak su içinde çözünebilir olması üleksitin ayırt edici özellikleri arasındadır. Üleksit minerali adını 19. yüzyıl Alman kimyageri G.L. Ulex’ten almıştır (Hamilton, Wooley, & Bishop, 1987). Üleksit, cam üretiminde ergime sıcaklığını azaltarak ısıl genleşme katsayısını ve ısıl şok halinde oluşan direnci yükseltir. Otomobillerde ve evlerde izolasyon amacıyla kullanılan malzemelerin üretiminde ve yapısında selüloz bulunan malzemelerde kullanılmaktadır. Ayrıca ısıya dayanıklılık gösteren kumaşlarda yanmayı geciktirir ve engeller (Eti Maden, 2019). Üleksit minerali Şekil 1.4’te verilmiştir (MTA, 2019).



Şekil 1.4: Üleksit minerali (MTA, 2019).

1.5.4 Kolemanit

Kimyasal bileşimi $\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ olan kolemanit üleksit mineralinin meteorik sular etkisiyle bozularak ayrışmasıyla oluşmuştur. Sertliği 4-4,5 arasında değişir ve özgül ağırlığı ise 2,42'dir. Kolemanit monoklinik sistemde kristallenen bir kalsiyum borat hidratıdır. Prizmatik kristaller veya masif agregatlar halinde bulunur ve camsı parlaklığa sahiptir. Sıcak klor asidinde eriyerek borik asit oluşumu sağlar. Türkiye'de en fazla bulunan bor mineralidir ve B_2O_3 içeriği %50,8'dir. Çözünürlüğü suda çok yavaştır ancak sıcak HCl içerisinde artar. Kolemanit ısıtıldığında suyunu kaybederek toz halini alır. Bu da kolemanitin, ısıtılıp elenmesi ile içindeki ısıdan etkilenmeyen yabancı maddelerden (özellikle killerden) temizlenmesine yardımcı olur (Karagöz, 2012). Kolemanit minerali şekil 1.5'te verilmiştir (MTA, 2019).



Şekil 1.5: Kolemanit minerali (MTA, 2019).

1.6 Literatür Taraması

Mountassir ve arkadaşları elektrokoagülasyon yöntemine destek olarak bentonit kili ilavesi ile reaktif violet 4 'ün giderilmesi üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Çalışma parametresi olarak akım yoğunluğu (8, 12, 47, 93 ve 140 A/m^2), kil minerali dozajı (0,1 - 0,8 g/L), pH (4 - 8) ve reaksiyon süresi (2 - 15 dakika) seçmişler ve elektrot olarak alüminyum kullanmışlardır. Çalışma sonunda bentonit kili ilavesi ile reaksiyon süresi 12 dakikadan 6 dakikaya düştüğünü tespit etmişler. Optimum koşullar olan 0,6 g/L bentonit ilavesi, 47

A/m² akım yoğunluğu, 7 pH değeri ve 6 dk reaksiyon süresi sonunda % 98,5 renk giderimi gerçekleşmiştir (Mountassir, Benyaich, Berçot, & Rezrazi, 2015).

Wei ve arkadaşları çelik ve demir elektrotların kullanıldığı elektrokoagülasyon yöntemi ile Acid Black 1, Reaktive Blue 4 ve Eosin Yellow boyarmaddelerinin giderilmesini araştırmışlardır. Başlangıç boyarmadde derişimi 100 mg/L, karıştırma hızı 740 rpm, 1 g/L NaCl elektroliti, 0,3 A akım ve 12 dk reaksiyon süresi olan çalışma koşullarında natürel pH değerlerinde AB1, RB4 ve EY için sırasıyla %84, %81 ve %39 renk giderim verimi elde etmişlerdir (Wei, ve diğerleri, 2012).

Mahmad ve arkadaşları çalışmalarını elektrokoagülasyon yönteminde alüminyum ve çelik elektrotlar kullanarak sızıntı suyundan toplam krom, renk ve bulanıklık giderimi üzerine yapmışlardır. Çalışma parametresi olarak voltaj (1,5, 2 ve 2,5) ve pH (3, 4, 5, 6 ve 7,73) belirlenmişlerdir. Alüminyum elektrotların kullanıldığı çalışma sonucunda toplam krom için optimum koşullar pH 3 ve voltaj 2,5 V koşulları altında % 72,65, bulanıklık için 2,5 V ve pH 5 koşullarında % 99,65, renk için ise 2,5 V ve pH 4 şartlarında %99,78 giderim sağlamışlardır. Çelik elektrotların kullanıldığı çalışma sonucunda toplan krom için 2,5V ve pH 7 koşullarında %88,35, bulanıklık 2,5V ve pH 4 koşullarında %99,41 ve renk için 2,5V ve pH 4 koşullarında %94,76 giderim tespit etmişlerdir (Mahmad, Rozainy, Abustan, & Baharun, 2016).

López ve arkadaşları yaptıkları çalışmada yeni bir elektrokoagülasyon reaktörü tasarlamışlardır. Bu reaktör ile Remazol Red RB 133 boyasının giderilmesi ve reaksiyonlar sırasında açığa çıkan gazın toplanması üzerine çalışmışlardır. Reaktörde anot olarak çelik yünü, katot olarak alüminyum kullanmışlardır. Remazol Red RB 133 gideriminde optimum koşullar olan başlangıç konsantrasyonu 100 mg/L ve 3,75 mA/cm² akım yoğunluğunda % 99,5 verim elde etmişlerdir. Aynı koşullarda gazın toplanması sağlanmıştır, açığa çıkan gazın teorik olarak 14.9 mL/dk olması gerekirken ölçülen değer 13,6 mL/dk olarak belirlenmiştir bu durum; %8'lik bir hatayı göstermektedir (López, ve diğerleri, 2017).

Kabdaşlı ve arkadaşları yaptıkları çalışmada elektrokoagülasyon yöntemi ile alüminyum ve paslanmaz çelik elektrotlar kullanarak sentetik reaktif boyarmadde içeren tekstil banyosu atıksuyunun arıtılmasını araştırmışlardır. Proseste elektrolit olarak Na₂CO₃ kullanımının renk ve KOİ giderim verimini azalttığı, NaCl kullanımının renk ve KOİ giderim verimini

artırdığı tespit edilmiştir. Elektrokoagülasyonla reaktif boyama banyosu atıksuyunundan renk ve KOİ giderimi için pH değerinin 11'in üzerinde olduğu durumda baskın mekanizmanın koagülasyon ve adsorpsiyon olduğunu belirtmişlerdir. Paslanmaz çelik elektrotların renk gideriminde daha etkin olduğunu belirlemişlerdir (Kabdaşlı, Arslan, Ölmez-Hancı, Arslan-Alaton, & Tünay, 2009).

Daneshvar ve arkadaşları, elektrokoagülasyon yönteminde elektrot olarak demir ve çelik kullanarak C.I. Basic Red 46 (BR46) ve CI Basic Blue 3 (BB3) içeren çözeltiden renk giderilmesini çalışmışlardır. Çalışma parametreleri elektroliz süresi 5 dk, pH aralığı 2-12, iletkenlik 2-20 mS/cm, akım yoğunluğu ve başlangıç derişimi 20-200 mg/L olarak belirlemişlerdir. Akım yoğunluğunun artırılması ile renk giderim veriminin arttığını tespit etmişlerdir ve optimum şartlar altında renk giderimi BB3 ve BR46 için sırasıyla % 75 ve % 99, elektrik enerjisi tüketimini BB3 ve BR46 ve için sırasıyla 7.57 kWh/kg boyarmadde ve 4.70 kWh/kg boyarmadde olarak hesaplamışlardır (Daneshvar, Oladegaragoze, & Djafarzadeh, 2006).

Secula ve arkadaşları çelik elektrotların kullanıldığı elektrokoagülasyon yöntemi ile Indigo Carmine boyarmaddesinin sulu çözeltilerden giderimi üzerine çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Sentetik atıksuyun arıtımında pH, başlangıç boyarmadde konsantrasyonu, reaksiyon süresi, akım yoğunluğu ve destek elektrolit derişimi parametrelerinin etkisini incelemişlerdir. Optimum şartları 54.57 A/m² akım yoğunluğu, 25 mg/L başlangıç boyarmadde derişimi, başlangıç pH değeri 8 ve 77 mM elektrolit derişimi olarak belirlemişlerdir ve %99 giderim verimi elde etmişlerdir. pH kontrolünün giderim verimine etkisi olmadığını ve akım yoğunluğu arttıkça renk giderim veriminin arttığını, ancak arıtım veriminin artmasının yanı sıra enerji tüketiminin de arttığını tespit etmişlerdir (Secula, Crețescu, & Petrescu, 2011).

Arslan-Alaton ve arkadaşları elektrokoagülasyon yöntemi ile Reaktif boyarmadde içeren sentetik boyama banyosu atıksuyunun arıtılmasını araştırmışlardır. Alüminyum ve paslanmaz çelik elektrotların kullanıldığı çalışmada iki elektrot malzemesi için de optimum işletim koşullarını pH 5, akım yoğunluğu 22 mA/cm² ve 300 mg/L başlangıç boyarmadde derişimi olarak belirlemişlerdir. Paslanmaz çelik elektrotların kullanıldığı çalışmada 60 dakikalık reaksiyon süresi sonunda %99 renk giderim verimi, Al elektrotların kullanıldığı çalışmada ise 90 dakikalık reaksiyon süresi sonunda %86 renk giderim verimi elde

etmişlerdir. Reaktif boyarmadde içeren boyama banyosu atıksularının elektrokoagülasyonla arıtımında KOİ ve renk giderim verimlerinin elektrolit tipine bağlı olduğunu, alüminyum ve paslanmaz çelik elektrotlar kullanarak gerçekleştirilen elektrokoagülasyon çalışmalarının ileri kimyasal oksidasyon yöntemlerine göre daha az elektrik enerjisi gerektirdiğini tespit etmişlerdir (Arslan-Alaton, Kabdaşlı, Vardar, & Tünay, 2009).

Zaied ve arkadaşları elektrokoagülasyon yöntemiyle kâğıt endüstrisi atıksuyunda bulunan siyah likörü arıtımı üzerinde çalışmışlardır. Çalışma koşulları olan 14 mA/cm² akım yoğunluğu, başlangıç pH değeri 7 ve 50 dakika elektroliz süresinde KOİ giderim verimi %98, polifenol giderim verimi %92 ve renk giderim verimi %99 olarak bulunmuştur (Zaied & Bellakhal, 2009).

Durango-Usuga ve arkadaşları elektrokoagülasyon yöntemi ile alüminyum ve demir elektrotlar kullanarak Crystal Violet boyarmaddesinin giderimini çalışmışlardır. Çalışma parametresi olarak akım yoğunluğu, destek elektrolit derişiminin etkisi, pH değeri ve boyarmadde derişimi çalışmışlardır. Demir elektrotların kullanılarak yapılan deneysel çalışma sonuçları alüminyum elektrotlar ile yapılan deneysel çalışma sonuçlarına göre daha iyi renk giderim verimi ile sonuçlanmıştır. Buna karşılık çalışılan parametrelerin etkileşimlerinin birbirlerine benzer olduğu tespit edilmiştir. Optimum çalışma şartları altında yapılan deneysel çalışmada Crystal Violet boyarmaddesinin %100 renk giderimi ve %100 kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) giderimi gerçekleşmiştir (Durango-Usuga, ve diğerleri, 2010).

Kobyay ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada elektrokoagülasyon ile farklı elektrot kombinasyonları kullanılarak içme sularından arsenik giderimi araştırılmıştır. En iyi arsenik gideriminin MP-S bağlı elektrotlarla elde edildiği deneysel çalışmada akım yoğunluğu 2,5 A/m² demir elektrotlar ile reaksiyon süresi 2,5 dakikalık reaksiyon süresi ile arsenik giderim verimi %94,1, alüminyum elektrotlar ile 4 dakikada arsenik giderim verimi %93,5 olarak bulunmuştur (Kobyay, Ulu, Gebologlu, Demirbas, & Öncel, 2011).

Merzouk ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada dispers boyarmaddeleri içeren tekstil atıksuyunun elektrokoagülasyonla arıtımı araştırılmıştır. Çalışmada elektrokoagülasyon yöntemi ile geleneksel koagülasyon yöntemi kıyaslanmış, çalışma parametresi olarak

elektrolit, pH ve boyarmadde derişimi kullanılmıştır. Elektrolit olarak Al_2SO_4 ve FeCl_3 kullanılmış, geleneksel metotla renk giderimi için FeCl_3 'ün daha etkin olduğu belirlenmiştir. pH etkisi için 6 ila 9 aralığında çalışılmış, boyarmadde derişimi 40-235 mg/L iken elektrolit olarak Al_2SO_4 kullanıldığında elektrokoagölasyon prosesi ile geleneksel koagölasyon yöntemine göre daha iyi renk giderimi elde edilmiştir (Merzouk, Gourich, Madanic, Vial, & Sekkie, 2011).

Akyol boya imalatı sonucu oluşan atıksuların elektrokoagölasyon prosesiyle arıtımı üzerine çalışmalar yapmıştır. Çalışma parametresi olarak reaksiyon süresi, elektrot tipi, akım yoğunluğu ve başlangıç pH değerini seçmiştir. Optimum koşullar olan 35 A/m^2 akım yoğunluğu, 15 dakika reaksiyon süresi ve 6,95 başlangıç pH değerlerinde KOİ ve TOK giderim verimleri sırasıyla Fe elektrotta %93 ve %88, Al elektrotta %94 ve %89 olarak belirlenmiştir. İşletme giderlerini Fe elektrotta $0,187 \text{ €/m}^3$ Al elektrotta ise $0,129 \text{ €/m}^3$ olarak tespit etmiştir (Akyol, 2012).

Nandi ve Patel yaptıkları çalışmada demir elektrotların kullanıldığı elektrokoagölasyon prosesi ile sulu özeltilerden Brilliant Green boyarmaddesinin giderimini araştırmışlardır. Çalışma parametreleri olarak elektrotlar arası mesafe, akım yoğunluğu, çözelti pH'ı, başlangıç boyarmadde derişimi ve elektrolit derişimi seçilmiştir. Başlangıç boyarmadde derişimi 100 mg/L ve $41,7 \text{ A/m}^2$ akım yoğunluğunda renk gideriminde %99,5 verim ve KOİ gideriminde %75,6 verim elde etmişlerdir. Akım yoğunluğunun artması ve elektrotlar arası mesafenin azalması ile birlikte boyarmadde giderim veriminde artış gözlemlenmiştir (Nandi & Patel, 2017).

Mahmoud ve arkadaşları elektrokoagölasyon yöntemiyle Methylene Blue giderilmesini araştırmışlardır. Elektrot olarak demirin kullanıldığı yöntemde boyarmadde derişimi, elektrolit derişimi ve elektromanyetik alanın boyarmadde giderim verimine etkisi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Optimum koşullar olan 8 mA/cm^2 akım yoğunluğu, 50 mg/L boyarmadde derişimi ve 0,002 m elektrotlar arası mesafede gerçekleştirilen deneysel çalışmada 20 dakika sonunda renk giderim veriminde %80'e ulaşmışlardır. Elektromanyetik alan uygulaması hem çözeltinin kütle transfer etkisine hem de demir iyonlarının hareketine göre elektroliz süresini azaltmıştır (Mahmoud, Farah, & Farrag, 2013).

Tablo 1.2: Literatür Taraması

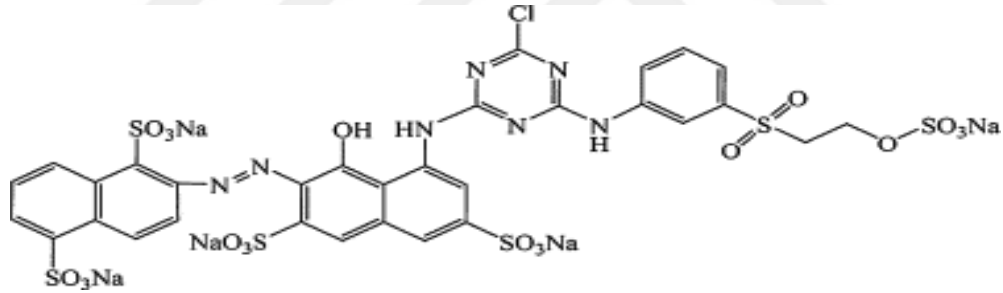
Boya	Elektrot Cinsi	Derişim	pH	Akım	Zaman	Destek Materyal	Renk Giderim Verimi	Kaynak
Remazol Red RB 133	Çelik yünü-Al	100 mg/L	4.4	3.75 mA/cm ²	4 dk		%99.5	Lopez et al.
A. Black 1 R. Blue 4 E. Yellow	Çelik-Fe	100 mg/L	Natürel pH	0.3 A	12 dk		%84 %81 %39	Wei et al.
Indigo Carmine	Çelik	25 mg/L	8	54.57 A/m ²			%99	Secula et al
Reaktif boyarmadde içeren sentetik boyama banyosu	P. Çelik Al	300 mg/L	5	22 mA/cm ²	60 dk 90 dk		%99 %86	Arslan-Alaton et al.
Siyah Likör	Fe		7	14 mA/cm ²	50 dk		%99	Zaied et al.
Brilliant Green	Fe	100 mg/L		41,7 A/m ²			%99.5	Nandi ve Patel
Methylene Blue	Fe	50 mg/L		8 mA/cm ²	20 dk		%80	Mahmoud et al.
Reaktif violet 4	Al		7	47 A/m ²	6 dk	0,6 g/L bentonit	% 98,5	Montasair et al.
Reaktif Red 195	Paslanmaz Çelik	50 mg/L	Natürel pH	20 mA/cm ²	5 dk	1 g/L kolemanit	%99.6	Bu çalışma

2. MATERİYAL VE METOD

Yapılan çalışma boyunca çelik elektrotlar kullanılarak sentetik boya çözeltilerinden elektrokoagülasyon prosesi ile Reaktif Red 195 tekstil boyarmaddesinin giderimi amaçlanmıştır. Çalışmanın devamında ise elektrokoagülasyon prosesi ile birlikte bazı kil minerallerinin elektrokimyasal hücreye ilavesi ile adsorpsiyon mekanizmasının renk giderim verimine katkısı araştırılmıştır. Literatür Çalışması bölümünde de belirtildiği gibi sözü edilen boyarmaddenin çelik elektrot varlığında giderimi ile ilgili bir çalışma bulunmamaktadır. Bu sebeple, yapılan bu çalışmada Reaktif Red 195 boyarmaddesinin sulu ortamdan gideriminde uygulanabilecek optimum çalışma şartları belirlemek üzere deneyler yapılmıştır.

2.1 Materyal

Yapılan çalışmalarda kullanılan Reaktif Red 195 boyarmaddesi Manisa Organize Sanayi Bölgesindeki bir boyahaneden tedarik edilmiştir. Reaktif Red 195'in molekül ağırlığı 1168.28 g/mol, dalga boyu 540 nm, kimyasal formülü $C_{31}H_{19}ClN_7Na_5O_{19}S_6$ dır ve

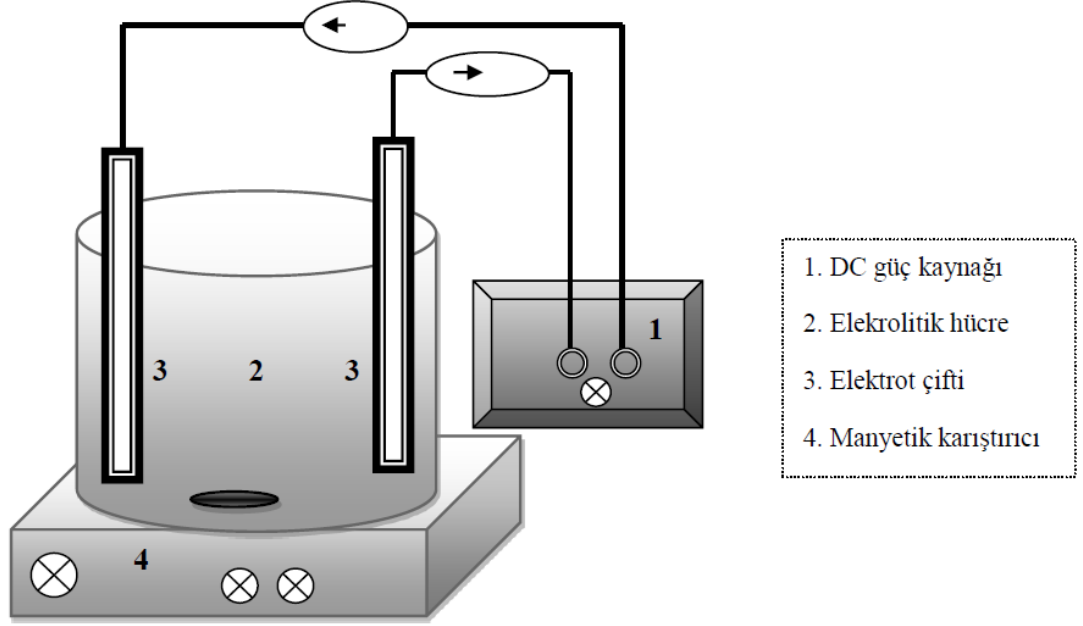


kimyasal yapısı şekil 2.1' de verilmiştir.

Şekil 2.1: Reaktif Red 195'in kimyasal yapısı (Zhang, Yuana, & Liu, 2015).

Elektrokoagülasyon deneylerinde 0.5 L etkin hacimli çalışılan ve toplam 0.8 L hacminde olan bir cam beher elektrokoagülatör olarak kullanılmıştır. Çalışma kapsamında elektrot olarak kullanılan ve eşdeğer özellikli paslanmaz çelik plakalar AISI 304 standardında temin edilmiş ve bir adet anot ve bir adet katot monopolar paralel bir şekilde sisteme

bağlanmıştır. Çelik elektrotların her birinin yüzey alanı 120 cm² olmakla birlikte, bu elektrotların çalışma çözeltisi içerisinde kalan ve elektrokoagülasyon prosesinde rol alan elektroaktif alanı yaklaşık 50 cm² olarak hesaplanmıştır. Elektrotların arasında oluşturulan uzaklık 5.5 cm'dir. Elektrotlar, SUNLINE SL-3010D marka elektrik akımı kontrolü yapılabilen, doğru akım güç kaynağına bağlanmıştır. Çalışmanın yapıldığı deney sisteminin şematik gösterimi Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2: Deney sisteminin şematik gösterimi (Gündüz & Atabey, 2019).

Elektrokimyasal arıtım proseslerinde çözeltinin elektriksel iletkenliği önemli bir işletme parametresidir. Boya çözeltilerinde çözünme moleküler düzeydedir ve elektiriksel iletkenlik yoktur. Bu yüzden iletkenliği sağlamak üzere çözeltiliye ilave edilen elektrolitin cinsi ve derişimi, iletkenliği önemli ölçüde etkiler. Elektrokoagülasyon prosesinde, yüksek iletkenlik ve çözünürlük sağlayan, düşük maliyetli ve çözeltilde oluşan aktif klorün kuvvetli oksitleme özellikleri nedeniyle elektrolit olarak çoğunlukla NaCl kullanılmaktadır (Kim, Park, Shin, & S., 2002). Literatürde, Somayajula ve ark. elektrokimyasal arıtımla Reaktif Red 195 boyarmaddesinin giderilmesinde farklı destek elektrolitlerinin etkisini incelemiş ve en iyi renk giderme verimini NaCl elektrolitinin kullanılması ile elde etmişlerdir (Somayajula, Asaithambi, Modepalli, & Matheswaran, 2012). Elde edilen bu sonuca dayanarak boyarmadde çözeltilerinde elektrokoagülasyon prosesinin uygulanabilmesi için

gerekli olan elektriksel iletkenliği sağlamak amacı ile 2 g/L derişimli %99.9 saflıkta Merck kalitesindeki NaCl elektroliti kullanılmıştır.

Elektrolit olarak NaCl kullanılması durumunda (Konuk, 2014);



Deneysel çalışmalar atmosfer basıncında ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda başlangıç pH'ının renk giderim verimine etkisini incelemek için pH ayarlamasında HCl ve NaOH çözeltileri kullanılmıştır. Elektrokimyasal olarak boya gideriminin yapıldığı çalışma çözeltisi proses süresince Yellowline MST Basic manyetik karıştırıcı ile 400 rpm'de karıştırılmıştır. Deneylerde kullanılan RR195 çözeltileri her deney öncesi ultra saf su kullanılarak hazırlanmıştır. Hesaplamalar yapılarak hazırlanan 1000 mg/L stok çözeltiden deneylerde kullanılmak üzere çalışma çözeltileri hazırlanmış ve renk giderim verimine başlangıç derişiminin etkisi incelenmiştir.

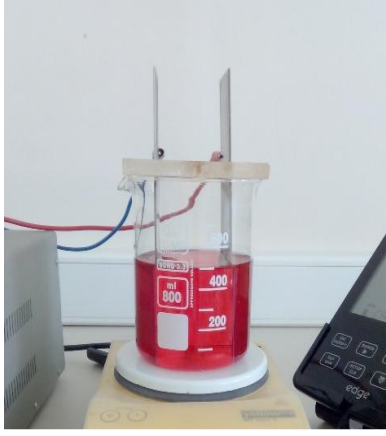
Elektrokoagülasyon prosesine ilave edilen adsorbentlerin (kaolinit, sepiyolit, üleksit ve kolemanit) renk giderim verimine etkisinin incelenmesinde ise elektrokoagülasyonun gerçekleştirileceğı reaktöre belirlenen dozda her deney için ayrı adsorbent ilave edilerek karıştırma işlemi gerçekleştirilmiş ve ardından elektrokoagülasyon deneyleri başlatılmıştır. Bu kapsamda kullanılan killer Sigma-Aldrich kalitesinde temin edilmiştir.

Deneyin gerçekleştirildiğı reaktörden belirlenen zaman aralıklarında alınan numuneler HERMLE Z 206 A santrifüj cihazı ile santrifüjleme işleminin ardından, boyarmadde konsantrasyonunu belirlemek üzere DR-LANGE CADAS 30S spektrofotometre cihazı ile absorbans ölçümleri yapılmıştır. Absorbans ölçümleri Reaktif Red 195 boyarmaddesi için maksimum dalga boyu olan 540 nm'de gerçekleştirilmiş ve hemen ardından numunelerin pH ve iletkenlikleri HANNA Edge multiparametre ile ölçülmüştür.

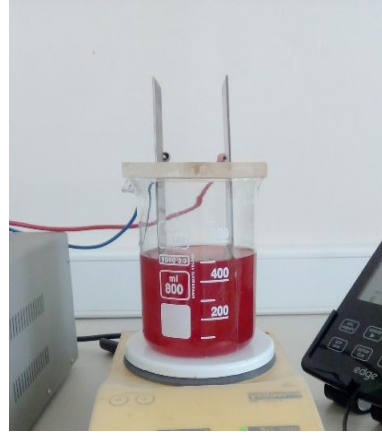
Yapılan her deney sonunda elektrotlar ve elektrokimyasal hücre, bir sonraki çalışmada oluşabilecek pasivasyonu engellemek amacıyla 0.1 M derişimdeki HCl çözeltisi ile temizlenip ardından ultra saf sudan geçirilmiştir. Pasivasyon elektrokimyasal proste kullanılan elektrotların yüzeyinde boyarmadde veya başka maddelerin birikimi neticesinde metal elektrodun iyonlaşmasının kısmi olarak engellenmesidir (Khandegar & Saroha, 2013).

Deneysel çalışmaya başlanmadan ve çalışmanın gerçekleştiği sırada bazı zaman aralıkları için görüntüler alınmıştır. Bu görüntüler şekil 2.3'te verilmiştir.

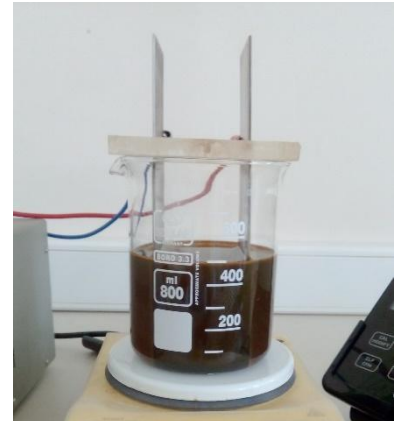




(a) Deneysel çalışma öncesi



(b) Deneysel çalışmanın başlamasından 1 dakika sonra



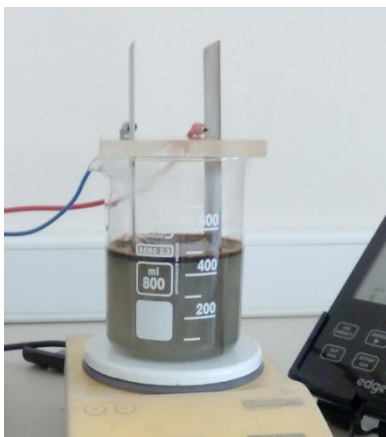
(c) Deneysel çalışmanın başlamasından 3 dakika sonra



(d) Deneysel çalışmanın başlamasından 5 dakika sonra

Şekil 2.3: Deneysel çalışma boyunca elektrokoagülasyon hücresine ait görüntüler

2.2 Deneysel Değişkenler



(e) Deneysel çalışmanın başlamasından 15 dakika sonra

Deneyler kapsamında başlangıç boya derişimi, başlangıç pH'sı, akım yoğunluğu, adsorbent, adsorbent dozajı ve arıtma

(f) Deneysel çalışmanın başlamasından 30 dakika sonra

süresinin etkisi araştırmıştır. Bu amaç doğrultusunda en uygun başlangıç derişimi için 50, 100, 250 mg/L' de, akım yoğunluğunu belirlemek için 10, 20, 30 mA/cm²'de, başlangıç pH'ının etkisini belirlemek için de 3, 5.5, 7 ve 8.5 pH değerleriyle çalışmalar yapılmıştır. Aynı zamanda prosese kil minerallerinin etkisini belirlemek için kaolinit üleksit, sepiyolit ve kolemanit mineralleri ile deneysel çalışmalar yürütölmüştür. Kullanılan kil mineralinin dozajının etkisini incelemek amacıyla kolemanit mineralinden 0.5, 1 ve 2 g alınarak sisteme ilave edilmiş ve renk giderim verimi hesaplanmıştır. Arıtım süresinin etkisini incelemek amacıyla 1, 3, 5, 10, 15, 20, 25 ve 30. dakikalarda numuneler alınıp gerekli işlemler ve hesaplamalar yapılmıştır.

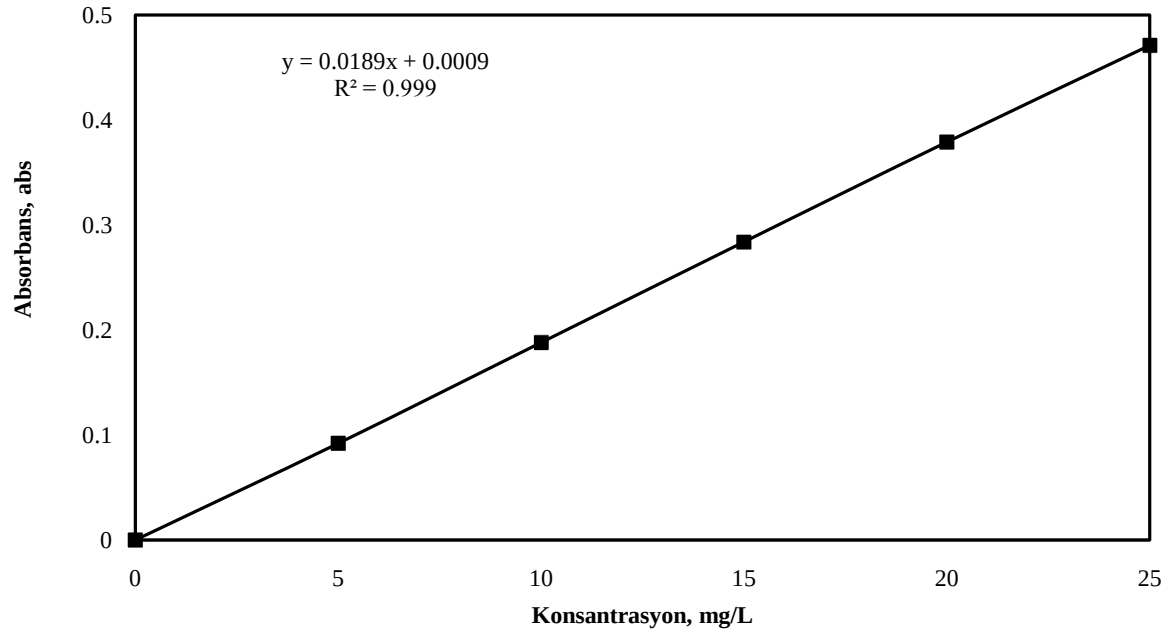
2.3 Analiz

Elektrokoagölasyon prosesi sonucunda ulaşılan renk giderim verimi hesaplamalarını yapmak için, öncelikle RR195 boyarmaddesinin spektrofotometrede dalgaboyu taraması yapılmış ve maksimum piki verdiği ve deney boyunca çalışılacak dalga boyu değeri $\lambda_{\max}=540$ nm olarak tespit edilmiştir.

Boyarmaddelerin derişim hesabı için Lambert-Beer Yasası ($A=\epsilon.b.C$) temelinde lineer kalibrasyon yöntemi kullanılarak, Şekil 2.3'te verilen kalibrasyon grafiğı ve doğru denklemi şeklinde oluşturulmuştur .

Deney süresi boyunca belirlenen zaman aralıklarında elektrokimyasal reaktörden alınan numunelerin absorbands değerleri spektrofotometrede okunmuş ardından yukarıda belirtilen kalibrasyon denklemi kullanılarak hücrede kalan boyarmaddenin konsantrasyonu hesaplanmıştır.

Yapı incelemesi yapmak amacıyla Perkin Elmer FT-IR spektrofotometresinden 650-4000 cm⁻¹ frekans aralığında absorpsiyon spektrumu alınmıştır. Yüzey görüntüleme yapmak için Zeiss EVO/LS10 taramalı elektron mikroskobunda görüntü alınmıştır. Yapı incelemesi ve yüzey görüntüleme yapılacak olan numuneler deney sonunda oluşan alt ve üst fazdan örnekler alınıp oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. Kurutma işleminden sonra numunelerin analizleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.4: Çalışmada kullanılan lineer kalibrasyon grafiği.

3. BULGULAR

Bu tez çalışmasında, tekstil endüstrisinde kullanılan Reaktif Red 195 boyarmaddesinin çelik elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyon prosesi ile giderimine odaklanılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde, bazı adsorbentler elektrokoagülatöre ilave edilmiş ve renk giderim verimindeki değişim belirlenmiştir. Proses, kesikli bir elektrokimyasal hücre içerisinde gerçekleştirilmiştir. Başlangıç boya konsantrasyonu, başlangıç pH'ı, akım yoğunluğu, adsorbent türü, adsorbent dozajı ve arıtma süresinin proses verimine etkisi incelenmiştir. Elde edilen bulgular renk giderim verimi yüzdesi bakımından değerlendirilmiştir.

3.1 Elektrokoagülasyon Prosesi

3.1.1 RR 195'in Giderimine Başlangıç Boyarmadde Derişiminin Etkisi

Tekstil endüstrisinde kullanılan boyarmaddelerin türü ve miktarının yanısıra tesiste uygulanan prosesler tekstil atıksularının farklı derişimlerde boyarmadde içeriğine sahip olmasına neden olmaktadır. Bu bağlamda atıksudaki boyarmadde derişimi elektrokoagülasyon prosesinin arıtma verimini etkiler. Bu etkiyi incelemek amacıyla RR 195 içeren boyarmadde çözeltisinin başlangıç pH'ı, natürel pH değeri olan 5,5'ta sabit tutularak çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda 50, 100 ve 250 mg/L konsantrasyonlarında boyarmadde çözeltileri hazırlanmış ve elektrokoagülasyon deneyleri başlatılmıştır. Çözelti karıştırma hızı 400 rpm değerinde sabit tutulmuştur. 30 dakikalık reaksiyon süresince 1, 3, 5, 10, 15, 20, 25 ve 30'uncu dakikalarda numuneler alınmış ve gerekli ölçüm ve hesaplamalar yapılmıştır. Elde edilen bulgular Ek A (1, 2 ve 3) ile Şekil 3.1 ve Şekil 3.2 oluşturulmuştur. Renk giderim verimi eşitlik (3.1) ile hesaplanmıştır.

$$\text{Renk Giderim Verimi (\%)} = \frac{(C_o - C_t)}{C_o} \times 100 \quad (3.1)$$

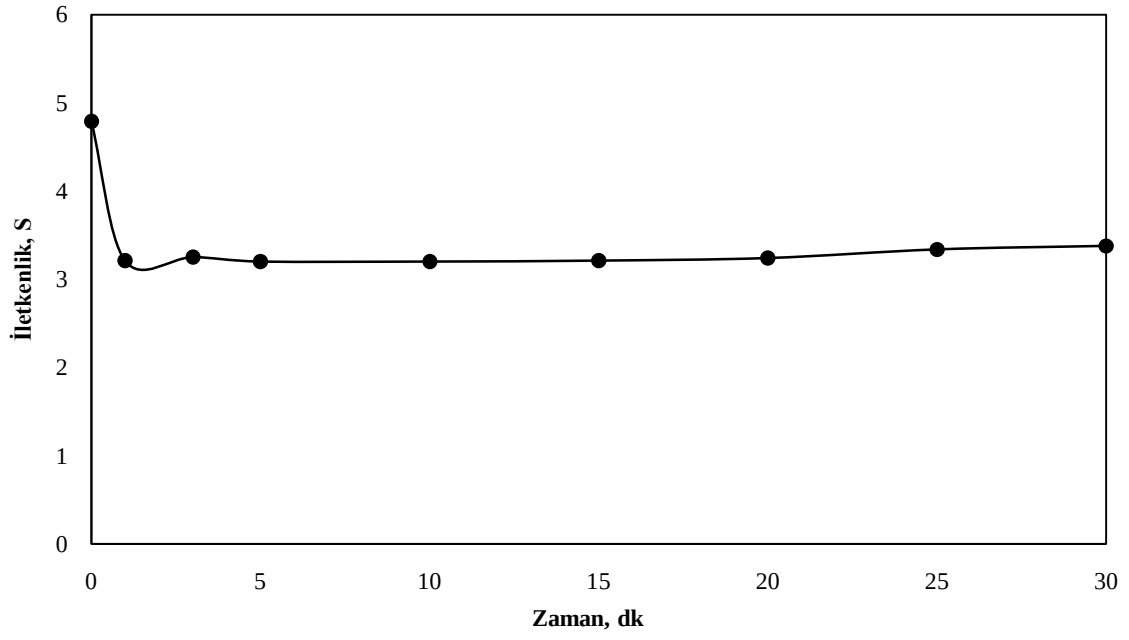
C_o : Başlangıç boyarmadde konsantrasyonu

C_t : t anındaki boyarmadde konsantrasyonu

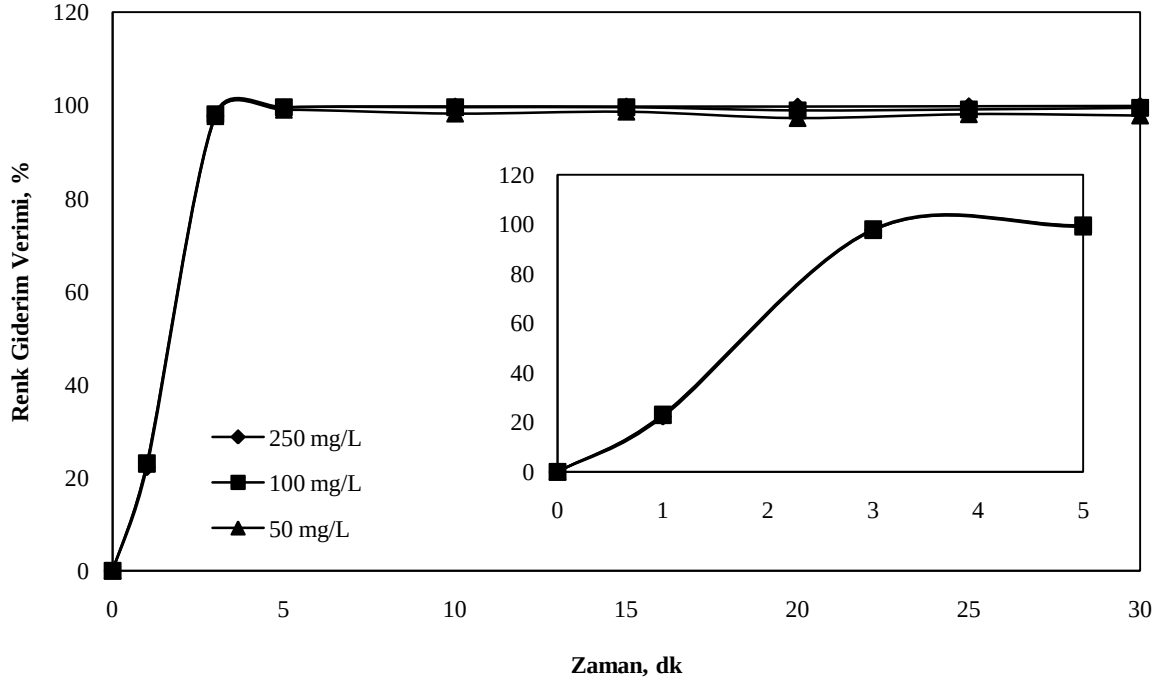
Elektrokimyasal arıtım prosesinde 3 dakika sonunda 250, 100 ve 50 ppm için renk giderim verimleri sırasıyla %29,6, %68 ve %97,7 olarak tespit edilmiştir. Elde edilen bulgulardan görüldüğü üzere, belirli bir süre için başlangıç boyarmadde derişimi azaldıkça renk giderim

verimi artmaktadır. Bu sonuca dayanarak en yüksek renk giderim veriminin elde edildiği değer olan 50 mg/L başlangıç boyarmadde derişimi olarak belirlenmiştir. Bunun yanısıra 50 mg/L başlangıç derişimine ait deneysel bulgularda 5 dakikalık uygulama sonrasında proses verimi % 99.0 olarak belirlenmiş fakat ardından çözeltide kalan boyarmadde derişiminde artış ve azalış şeklinde salınımlar olmuştur. Bunun muhtemel sebebi, aynı zamanda elektrokoagülasyon prosesinin dezavantajlarından biri olarak kabul edilen metal hidroksit floklarının herhangi bir sebepten dolayı çözünmesi olabilir. Diğer bir deyişle, zamanla arıtım sağlandıkça çözelti fazında kalan boyarmadde konsantrasyonu azalır ve ortamdaki elektrokimyasal reaksiyon dengesi Le Chatalier Prensibi gereğince geri yönde yani boyarmaddenin adsorplanmış olduğu floklardan bulk fazına geçişi yönünde yeniden sağlanır. Böylece çözelti ortamında boyarmadde derişiminin arttığı ve azaldığı salınımlar gözlemlenir. Bu ise elektrokimyasal boyarmadde giderim verimini azaltır ve artırır. Bu salınım 100 ppm ve 250 ppm başlangıç derişimli çalışmalarda rastlanılmadığından, düşük derişimli boyarmadde çözeltisi için prosesin zamanının çok uzun tutulmasına gerek olmadığı düşünülebilir. Deneyler sonunda elde edilen veriler incelendiğinde iletkenlik değerlerinde zamanla azalma olduğu görülmektedir. Elektrokimyasal proses süresince oluşan türler kirleticileri ortamdaki giderirken iletkenliği sağlayan çözünmüş katıları da ortamdaki uzaklaştırdığı için iletkenliğin azaldığı düşünülür. Ayrıca reaksiyon ortamının yoğunluğu ile iletkenliğin ters orantılı olarak değiştiği ifade edilmiştir (İlhan, 2006)

Elektrokoagülasyon ile kirleticilerin gideriminde proses boyunca gerçekleşen reaksiyon mekanizmaları pek çok araştırmacı tarafından çalışılmaktadır. Organik kirleticilerin yapılarına ve fonksiyonel gruplarına bağlı olarak organik kirleticilerin farklı yapısı bu reaksiyon mekanizmaları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Temel mekanizmalar kompleksleşme, yük nötralizasyonu, tuzaklama, adsorpsiyon ve/veya bunların bir kombinasyonudur. (Garcia-Segura, Eiband, Melo, & Martínez-Huitle, 2017) Her bir mekanizmanın ağırlıklı olarak gerçekleşmesi organik kirleticinin yapısına (yük, boyut, hidrofobiklik vb) koagülant türüne ve dozajına bağlıdır ancak pH ve diğer çözelti matriks etkileri de elektrokoagülasyon performansı üzerinde oldukça etkilidir. Bununla birlikte elektrokoagülasyon ile kirletici gideriminde genel mekanizma oldukça kompleks bir formda gerçekleşir. Çünkü giderim verimini zenginleştirecek şekilde aynı anda gerçekleşen pek çok yol izlenmektedir.



Şekil 3.1: Çözelti iletkenliğinin zamanla değişimi (C_0 : 50 mg/L J: 20 mA/cm²).



Şekil 3.2: Farklı başlangıç boyarmadde konsantrasyonları için zamana karşı renk giderim verimi (pH: 5.5, J: 20 mA/cm²).

3.1.2 RR 195'in Giderimine Akım Yoğunluğunun Etkisi

Deneysel çalışmalarda kullanılan elektrotların, elektrokimyasal muamelenin gerçekleştiği çözelti içerisindeki kısmını ifade eden birim elektroaktif alanı başına uygulanan akıma akım yoğunluğu denir. Akım yoğunluğu demir iyonlarının üretim hızını, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ floklarının büyüklüğünü ve ortamda oluşan hidrojen kabarcıklarının hızını ve boyutunu kontrol eden bir deneysel parametredir. Bu parametrenin optimizasyonu yapıldığında elektrokoagülasyon arıtım süresi ve enerji giderleri kontrol altında tutulur.

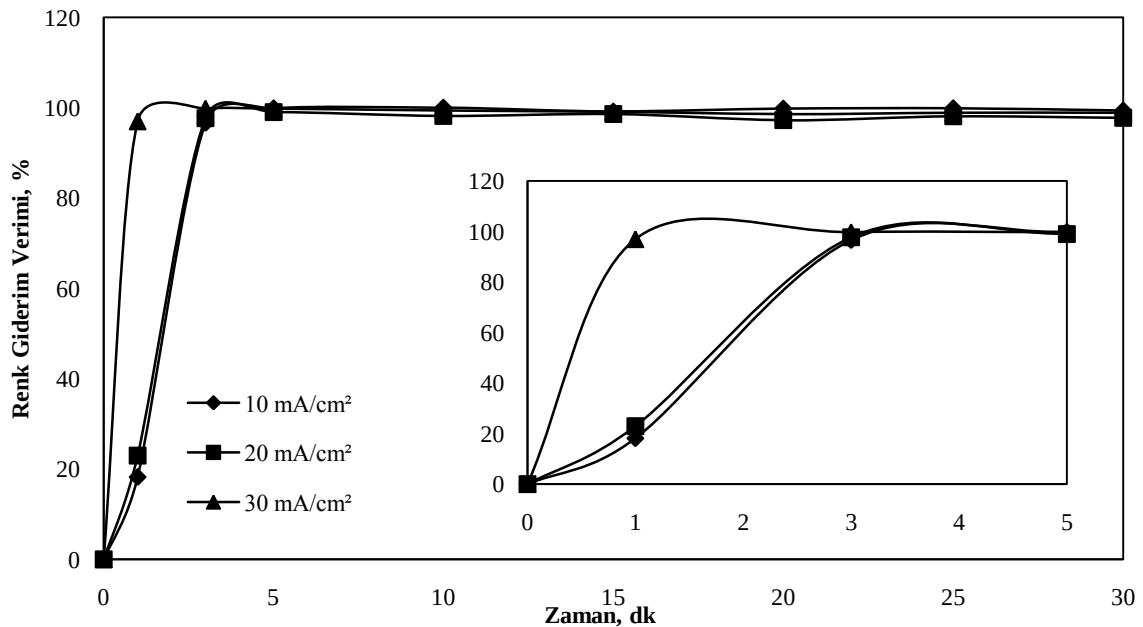
Prosesin akım yoğunluğu sisteme ilave edilecek koagülant miktarını, kabarcık oluşum hızını, kabarcıkların boyutunu ve flok oluşumunu etkileyen bir parametredir (Mollah, ve diğerleri, 2004), (Chen, 2004) (Daneshvar, Oladegaragoze, & Djafarzadeh, 2006)

Akım yoğunluğunun yüksek olması, çözünen elektrot miktarının artmasına yol açar. Bu durum, bulk ortamındaki metal hidroksit flokları oluşumunu arttırarak yüksek bir proses verimi elde edilmesi ile sonuçlanır. Ancak belli akım bir değerinden sonra, elektrotlar üzerinde pasivasyon gelişmesine çözeltinin ısınmasına sebep olur (Bensadok, Benammar, Lapicque, & Nezzal, 2008). Diğer bir deyişle akım artışına eşlik eden elektrik enerjisi artışı, çözeltinin ısıtılmasında harcadığından prosesin verimini önemli ölçüde etkilemez. Daha da önemlisi aşırı yüksek akım yoğunluğu, akımın etkinliğinde önemli bir azalma ile sonuçlanır. Bu bakımdan ısı üretimi gibi yan etkilerin azaltılması için akım yoğunluğunun belli bir değerde sınırlandırılması tavsiye edilmektedir (Mollah, ve diğerleri, 2004). Bununla birlikte akım yoğunluğunun seçimi pH, sıcaklık gibi diğer işletme parametreleri ile birlikte yapılmalıdır (Chen, 2004). Katottaki elektrodun pasivize olması elektrotlar arası iyon transfer verimini düşürür ve flok oluşumunu azaltır. Pasivasyon nedeniyle arıtım çözeltisinin sıcaklığının artması iyon transferini hızlandıran olumlu bir etken gibi görünse de, sudan ayrılması istenen dispers kolloidlerin çözünmesine yol açarak sudan uzaklaştırılmasını zorlaştırır (Kırlaroğlu, 2008).

Akım yoğunluğu arttıkça oksitlenmiş demirin miktarı ve kabarcık üretimi artar. Bunun bir sonucu olarak kolloidal partiküllerin, yağların ve diğer kirleticilerin giderimini sağlayan hidroksil polimerlerinin miktarı da artar (Şengil & Özacar, 2009).

Bu çalışmada akım yoğunluğunun etkisini belirlemek amacıyla başlangıç boyarmadde konsantrasyonu 50 mg/L olan çözelti ile pH ayarlaması yapılmadan natürel pH olan 5,5'ta çalışmalar yapılmıştır. 30 dakika olan reaksiyon süresince 1, 3, 5, 10, 15, 20, 25 ve 30'uncu dakikalarda numuneler alınmıştır ve bu süre boyunca karıştırma hızı 400 rpm değerinde sabit tutulmuştur. Bu koşullar altında 10 mA/cm², 20 mA/cm², 30 mA/cm² akım yoğunluklarında denemeler yapılmıştır. Elde edilen bulgular Ek A (1, 4 ve 5) ile Şekil 3.3 oluşturulmuştur.

Yapılan denemelerde 3 dakika sonunda renk giderim verimleri sırasıyla %96,6, %97,7 ve % 99,8 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen veriler çalışılan değerler aralığında, akım yoğunluğu ve renk giderim veriminin doğru orantılı olduğunu göstermektedir. Ancak proste kullanılan elektrik enerjisinin ve bununla bağlantılı olarak işletme maliyetinin makul bir düzeyde tutulabilmesi için optimum akım yoğunluğu, devam edilecek olan deneysel çalışmalar için 20 mA/cm² olarak belirlenmiştir. Elde edilen bulgular Rajkumar ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışma ile uyum içerisindedir. Rajkumar ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada renk giderme veriminin 18.05 mA/cm² akım yoğunluğuna kadar arttığını ve 18,05 mA/cm²'den yüksek olan değerlerde renk giderme verimindeki artışın fazla olmadığı tespit edilmiştir (Rajkumar, Song, & Kim, 2007).



Şekil 3.3: Farklı akım yoğunlukları için zamana karşı renk giderim verimi (pH: 5.5, C₀:50mg/L).

Elektrolit olarak NaCl kullanılması elektrokimyasal arıtım sırasında klor (Cl_2) ve hipoklorit (OCl^-) oluşumuna neden olmaktadır. Bu durumda ortama ilave edilen NaCl iletkenlik artışı sağlamasının yanı sıra oksidan oluşumuna da sebep olmaktadır. Oksidan oluşumu sonucunda elektrokimyasal arıtmada hem oksidasyon-redüksiyon hem de koagülasyon mekanizmaları aynı anda renk gideriminde etkili olmaktadır. Ancak bu uygulamada oksidasyon mekanizmasının etkili olabilmesi için çalışmaların pH 11'den küçük değerlerde yürütülmesi gerekmektedir. pH 11'in üzerinde olan değerlerde OCl_3^- ve OCl_4^- iyonlarının oluşumu sebebiyle oksidasyon gücünde önemli düşüşler meydana gelmektedir. Oksidasyon mekanizması üzerinde etkili olan başka bir parametre ise sıcaklık değeridir. Yüksek sıcaklıklarda redoks tepkimeleri esnasında oluşan klorun (Cl_2) çözünürlüğü az olacağından oluşturulan oksidanlar etkin olarak kullanılamamaktadır. Bu oluşum özellikle yüksek akım yoğunluklarında söz konusu olabilmektedir (Vardar, 2006). Yürütülen bu deneysel çalışmada ilerleyen sürelerde reaksiyon çözeltisinde belirgin bir sıcaklık artışı gözlenmiştir. Bu ise oluşan oksidanların bir kısmının etkin olarak kullanılmamasına ve 5 dakikadan sonra renk giderim veriminde azalmaya neden olmuştur.

3.1.3 R R 195'in Giderimine Başlangıç pH'ının Etkisi

Elektrokoagülasyon prosesi, anotta yükseltgenme ve katotta indirgenme reaksiyonlarıyla ilerleyen bir dizi elektrokimyasal reaksiyon mekanizması üzerinden kirleticilerin giderimini gerçekleştirir. Elektrik enerjisi yardımıyla sisteme akım verildiğinde kirleticilerin koagüle olur ve çözelti ortamında bulunan iyonlar elektroforik olarak göç eder. Diğer yandan elektrotlarda oluşan hidrojen ve oksijen gazları elektrokimyasal olarak flotasyona maruz kalır. Anot elektrik etkisi ile çözünmeye uğradığında katotta pasivasyon gerçekleşir. Prosesin etkinliğinin yüksek olması elektrotların yüzey alanının büyüklüğüne bağlıdır (Mollah, ve diğerleri, 2004).

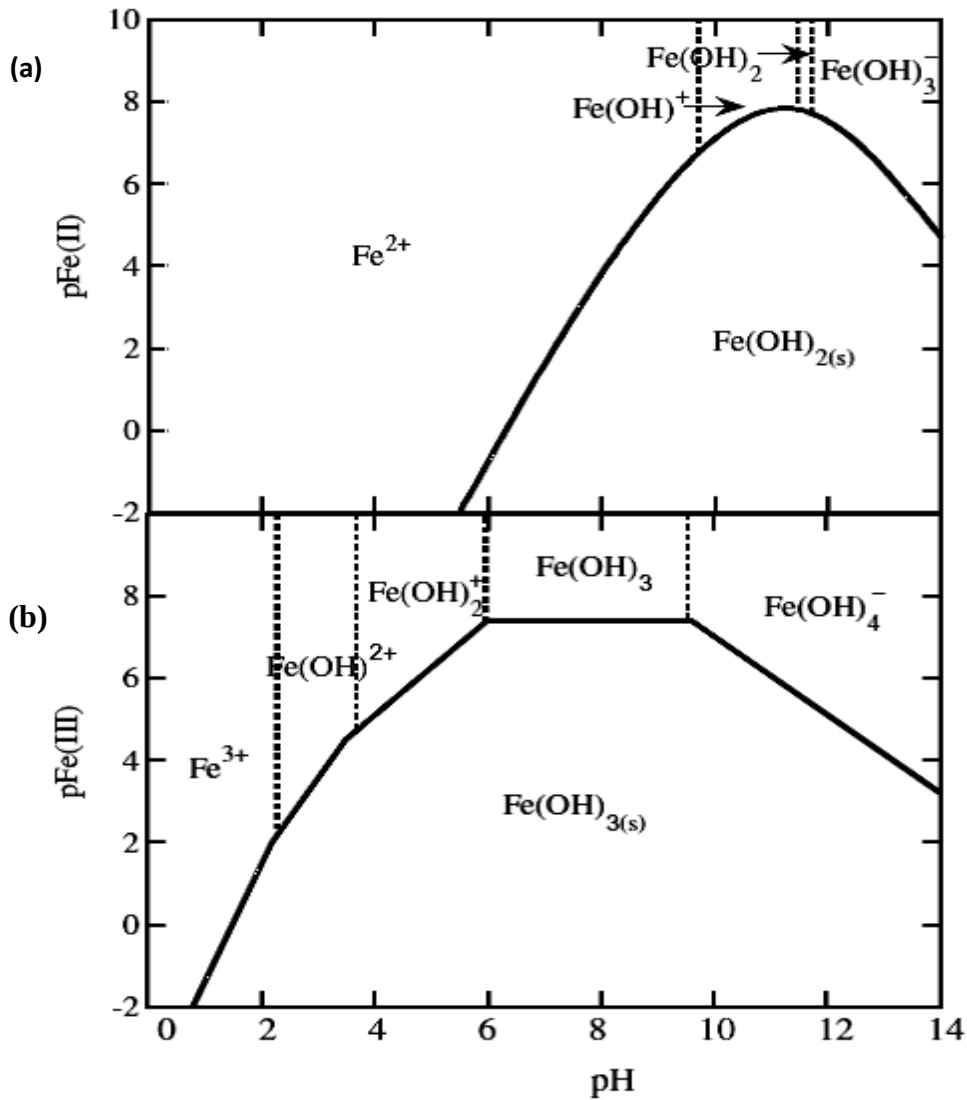
Elektrokoagülasyonda demir, çelik yada paslanmaz çelik anot olarak kullanıldığında demirin anotta oksidasyonu yoluyla arıtılacak olan atıksuda Fe^{+2} aşağıdaki gibi çözünür.



Bu arada katotta eşitlik 3.3’de verilen suyun indirgenme reaksiyonu neticesinde hidroksil iyonu ve H₂ gazı üretilir.



Eşitlik 3.2 ile hidroksil iyonunun üretimi, elektrolizde pH’ın yükselmesine sebep olur ve yükselen pH ise çözelti fazında farklı demir hidroksit komplekslerinin oluşumunu sağlar. Şekil 3.4’te koagülasyonun da bir kontrol parametresi olan pH’ın bir fonksiyonu olarak demir (II), demir (III) ve hidroksit komplekslerinin ağırlıklı türler bölgesi diyagramını göstermektedir (Holt, Barton, & Mitchell, 2005), (Verma, 2017).



Şekil 3.4: Ağırlıklı türler bölgesi diyagramı (Garcia-Segura, Eiband, Melo, & Martínez-Huitle, 2017).

Şekil 3.4 (a)'da anlaşılabacağı gibi $\text{pH} > 5,5$ olduğu zaman çözünmeyen $\text{Fe}(\text{OH})_2$ çöker ve $\text{pH} = 9,5$ değerine kadar Fe^{+2} iyonu ile dengede kalır. Ya da pH 9,5 ten 11,4 e kadar $\text{Fe}(\text{OH})^+$ ile ve 11,8'den 14'e kadar $\text{Fe}(\text{OH})_3^-$ dengede kalır. Çökmeyi kolaylaştıran bir tür olan çözünmez $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 'nin oluşumu aşağıdaki eşitlik ile yazılabilir.



3.2, 3.3 ve 3.4 eşitlikleri ile verilen reaksiyonların toplanması ile elde edilen net eşitlik şöyledir;



Her ne kadar Fe (II) türleri kaogüle yapıları üretse de, koagülasyon ve flokülasyon prosesini daha verimli yapan ve daha yüksek akım yoğunluğunda var olan türler Fe(III) türleridir (Garcia-Segura, Eiband, Melo, & Martínez-Huitle, 2017).

Demir (III)'ün ağırlıklı türler bölgesinin gösterildiği şekil 1 (b) $\text{pH} > 1,0$ olduğunda $\text{Fe}(\text{OH})_3$ koagüle olduğunu kanıtlamaktadır. Bu durumda ağırlıklı çökelmiş türler, pH 'ın bir fonksiyonu olarak farklı çözünebilir monomerik türler ile denge halindedir (Holt, Barton, & Mitchell, 2005). Böylece $\text{Fe}(\text{OH})_3$, pH 2,0'a kadar Fe^{+3} ile; pH 2,0'dan 3,8 e kadar $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$ ile; pH 3,8'den 6,2'ye kadar $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ ile ve pH 9,6'dan 14'e kadar $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ ile dengededir. pH 6,2 ile 9,6 aralığındaki değerlerde çözeltide bulunan tek türün $\text{Fe}(\text{OH})_3$ olduğu diyagramda açıkça görülmektedir. Bunun yanı sıra uygulanan akım yoğunluğu ve elektroliz süresine bağlı olarak pH 3,5 ile 7 aralığında ortamdaki kompleksler, $\text{Fe}_2(\text{OH})_2^{4+}$ ve $\text{Fe}_2(\text{OH})_4^{2+}$ komplekslerine polimerize olma eğilimi gösterir (Secula, ve diğerleri, 2013). Ancak tüm Fe (III) türleri arasında kirleticilerin gideriminden başlıca sorumlu ve tercih edilen koagülantın $\text{Fe}(\text{OH})_3$ olduğu düşünülmektedir (Garcia-Segura, Eiband, Melo, & Martínez-Huitle, 2017).

Elektrokoagülasyon prosesinde pH en önemli parametrelerden biridir (Mollah, ve diğerleri, 2004) (Daneshvar, Ashassi-Sorkhabi, & Tizpar, 2003). Bunun sebebi pH 'ın ortamda oluşan eletrolitik reaksiyonları direkt olarak etkilemesidir. Arıtımın gerçekleşmesi için

gerekli olan metal hidroksillerin oluşumunda pH birinci dereceden etkilidir (Moreno-Casillas, ve diğerleri, 2007).

Bu çalışmada pH'ın giderme verimine etkisini belirlemek amacıyla 50 mg/L başlangıç boya konsantrasyonu olan numuneden 30 dakikalık reaksiyon süresi boyunca 1, 3, 5, 10, 15, 20, 25 ve 30. dakikalarda numuneler alınmıştır ve reaksiyon boyunca 400 rpm hızla karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. 20 mA/cm² akım yoğunluğunda pH 3, pH 5,5, pH 7 ve pH 8,5 değerlerinde deneyler yürütülmüştür. Elde edilen bulgular Ek A (1, 6, 7 ve 8)'da verilmiştir ve bu bulgular ile Şekil 3.5, 3.6 ve 3.7 oluşturulmuştur.

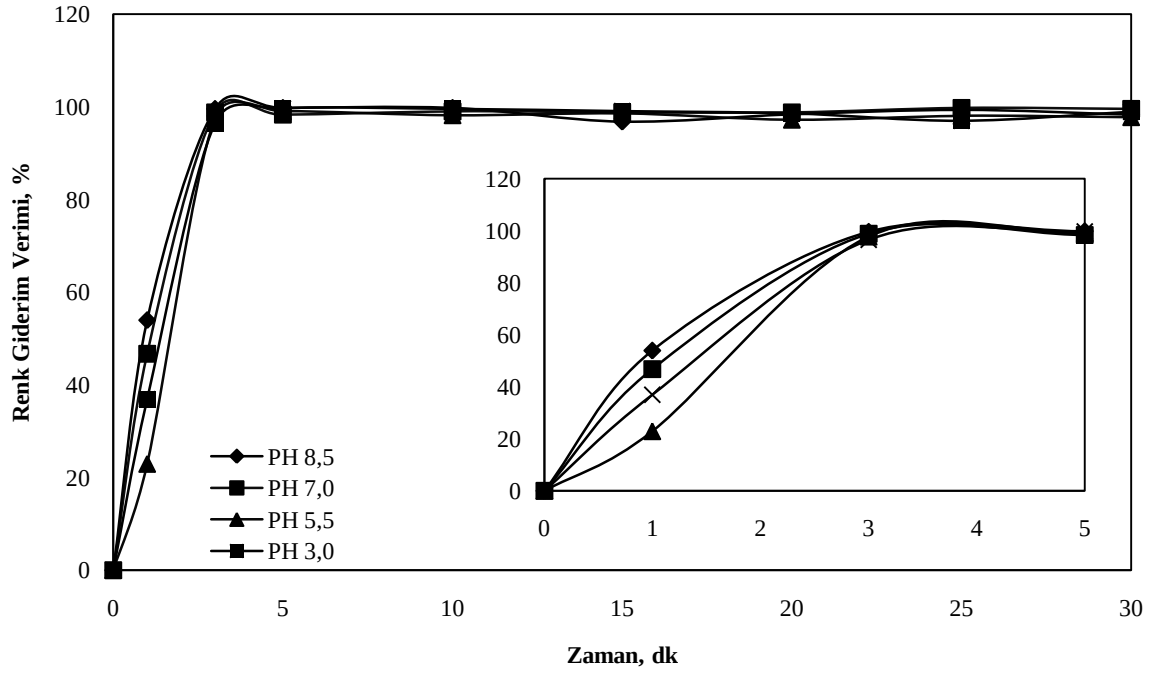
Yapılan deneysel çalışmada başlangıç pH değerinin değişmesi ile birlikte renk giderim verimi de değişmiştir. Çalışmaların yapıldığı aralıkta proses boyunca çözelti pH'ının kademeli olarak yükseldiği görülmektedir. Bu durum literatürde belirtilen bazı çalışmalarda da gözlemlenmiştir (Merzouk, ve diğerleri, 2009). Elektroliz gerçekleşirken anot ve katot reaksiyonlarının su içerisindeki reaksiyonları sonucu çözeltinin pH değerinde değişimler meydana gelmektedir. Katotta suyun indirgenmesi sonucunda hidrojen gazı oluşumu ve hidroksit birikmesi sebebiyle pH artar.

Demir katyonları yük nötralizasyonu yoluyla atıksudan boyayı ayırabilir ve demir hidroksit flokları tuzaklama veya süpürme koagülasyonu ile boyaları uzaklaştırabilir (Martínez-Huitle & Brillas, 2009), (Daneshvar, Ashassi-Sorkhabi, & Tizpar, 2003), (Wei, ve diğerleri, 2012). Boya giderimini sağlayan tüm bu elektrokoagülasyon reaksiyonları çözeltinin pH'sından yüksek oranda etkilenebilir. Ayrıca iletkenliği sağlamak üzere katılan Cl⁻ asidik ortamda Cl_{2(g)}' a, ve bazik ortamda ClO⁻ 'a oksitlenir. Üretilen bu aktif klorin demir hidroksit koagülantlarının üretimin arttırabilir ve doğrudan boyanın rengini giderebilir (Merzouk, ve diğerleri, 2009), (Emamjomeh & Sivakumar, 2009), (Golder, Hridaya, N., & Ray, 2005) . Bunun yanı sıra elektrokoagülasyon boyunca demir anot aşınır ve demir elektrot üzerinde demir oksitleri/hidroksit tabakası oluşur. Bu tabaka boyayı ve elektrostatik çekim ve fiziksel tuzaklama yoluyla oluşan tüm ara ürünleri giderebilir.

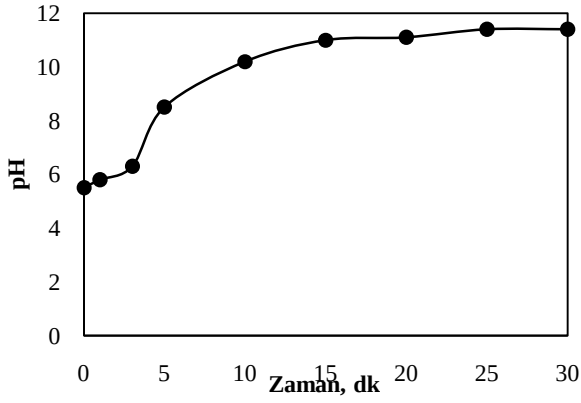
Başlangıç pH değerinin renk giderim verimine etkisini incelemek amacıyla pH 3, natürel pH (5,5), pH 7 ve pH 8,5 değerlerinde yürütülen çalışmalar sonucunda 3 dakikalık elektroliz süresi sonunda renk giderim verimleri sırasıyla %96,5, %97,7, %98,8 ve %99,6 olarak tespit edilmiştir. Elde edilen bulgulardan hareketle pH'nın artışı ile birlikte renk

giderim veriminin de arttığı da söylenebilir. Elektrokimyasal prosesten beklendiği gibi, tüm başlangıç pH'ının çalışıldığı deneylerde katotta sürekli olarak OH üretiminin bir sonucu olarak çözelti pH'ı artış göstermiştir. Bu artış pH 3'te yapılan deneyde 9,7'ye kadar devam ederken pH 5.5, 7, 8.5 deneylerinde sırası ile 11.1, 11.3 ve 11.2 ile sonuçlanmıştır.

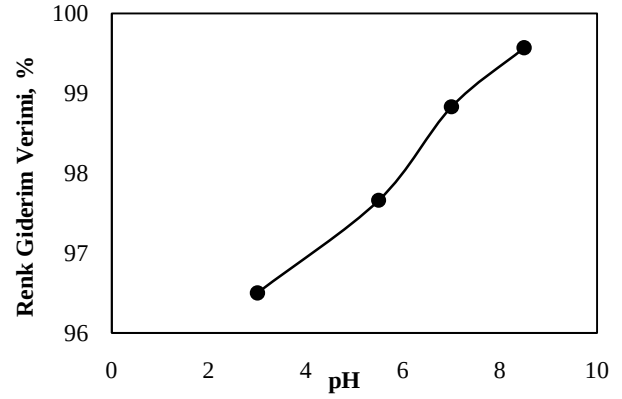




Şekil 3.5: Farklı pH değerleri için zamana karşı renk giderim veriminin değişimi (C_0 : 50 mg/L, J : 20 mA/cm²).



Şekil 3.6: RR195 için zamanla pH'nın değişimi (C_0 :50 mg/L, J : 20 mA/cm², pH: 5.5).



Şekil 3.7: 3 dakikalık elektrokoagülasyon uygulaması sonunda pH'a karşı renk giderim veriminin değişimi (C_0 :50 mg/L, J : 20 mA/cm²).

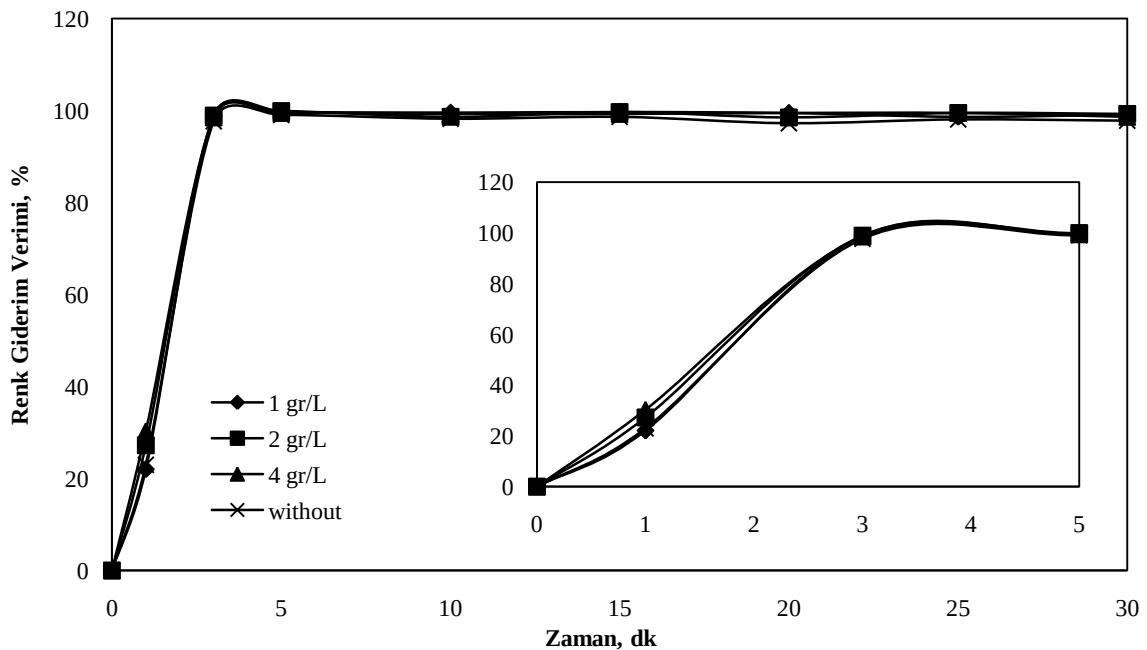
3.2 Elektrokoagülasyon/Adsorpsiyon Hibrit Prosesi

3.2.1 RR195 Giderimine Adsorbentlerin Etkisi

Geleneksel elektrokoagülasyon prosesinde katot elektrodu üzerinde geçirimsiz bir oksit film tabakası oluşur ve bu durum yöntemin etkinliğini düşürürken enerji tüketimini artırır (Avsar, Kurt, & Gonullu, 2007), (Grøterud & Smoczyński, 1986). Bu dezavantajı gidermenin ve yöntemin etkinliğini iyileştirmenin çeşitli yolları bulunmuştur. Bu yollardan bir tanesi elektrotların polaritesini değiştirmek (Secula, ve diğerleri, 2013), diğeri ise elektrokimyasal sisteme adsorbent karakterli bir materyal eklemektir (Carvalho, ve diğerleri, 2015). Çalışmanın bu bölümünde elektrokoagülasyonun adsorpsiyon ile eşleştirildiği hibrit yöntemin RR195 giderimindeki etkisinin incelenmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda elektrokoagülasyon prosesi ile eş zamanlı olarak kaolinit, üleksit, sepiyolit ve kolemanit mineralleri çözeltiye ilave edilerek boyarmadde giderimi gerçekleştirilmiştir. Farklı minerallerin renk giderim verimine etkisinin yanı sıra her bir mineral için boyarmadde derişimi ve pH'ın etkisi, ve kolemanit minerali dozajının etkisi incelenmiştir.

3.2.2 Mineral Dozajının Etkisi

Başlangıç boyarmadde derişimi 50 mg/L, akım yoğunluğu 20 mA/cm² ve başlangıç pH değeri 5.5'ta sabit tutularak kolemanit minerali için adsorbent dozajının etkisi 1, 2 ve 4 g/L değerleri için çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar Ek B (12,13 ve 14) ışığında şekil 3.8



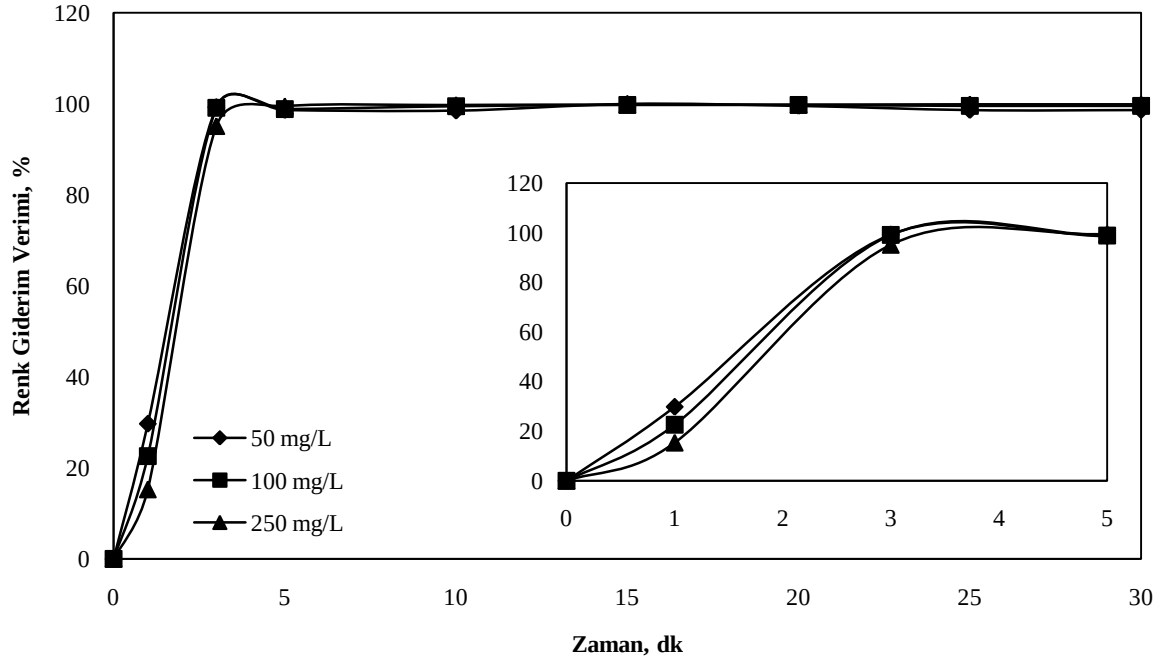
Şekil 3.8: Farklı kolemanit adsorbenti dozlarında zamanla renk giderim veriminin değişimi (C₀: 50 mg/L, J: 20 mA/cm²).

çizilmiştir.

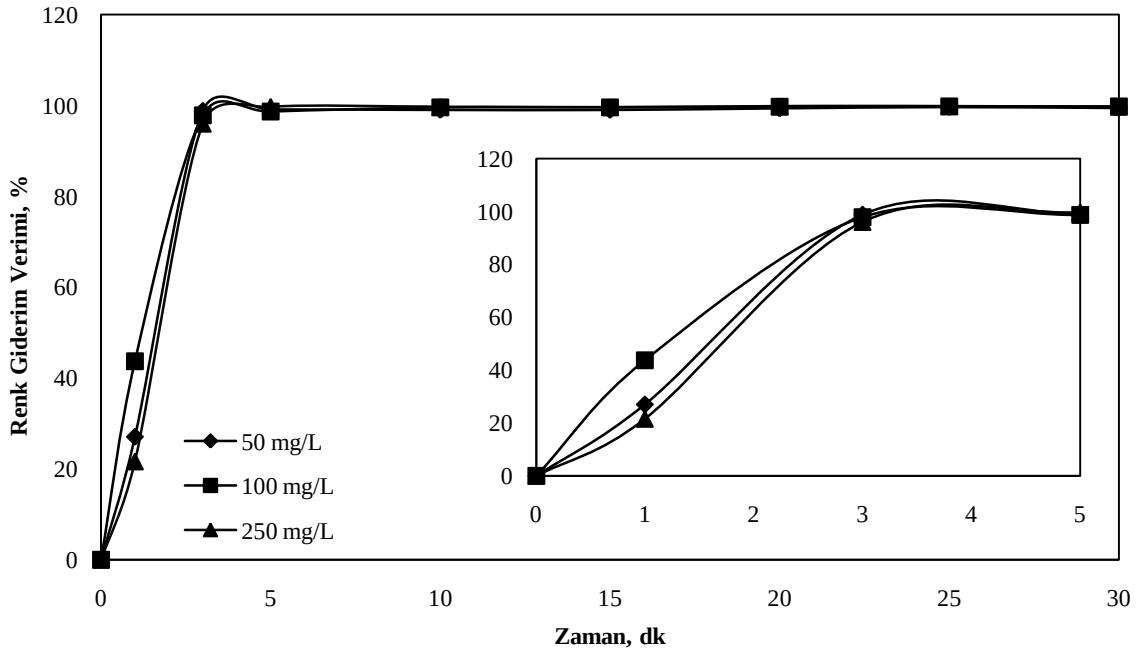
Şekil dikkatlice incelendiğinde adsorbent miktarının arttırılmasının verimi arttırmada belirgin bir etkide bulunmadığı görülmektedir. Bu bağlamda gereksiz adsorbent kullanımından kaçınmak için 1 g/L optimum dozaj olarak seçilmiştir (Özyurt, 2018).

3.2.3 Başlangıç Derişiminin Etkisi

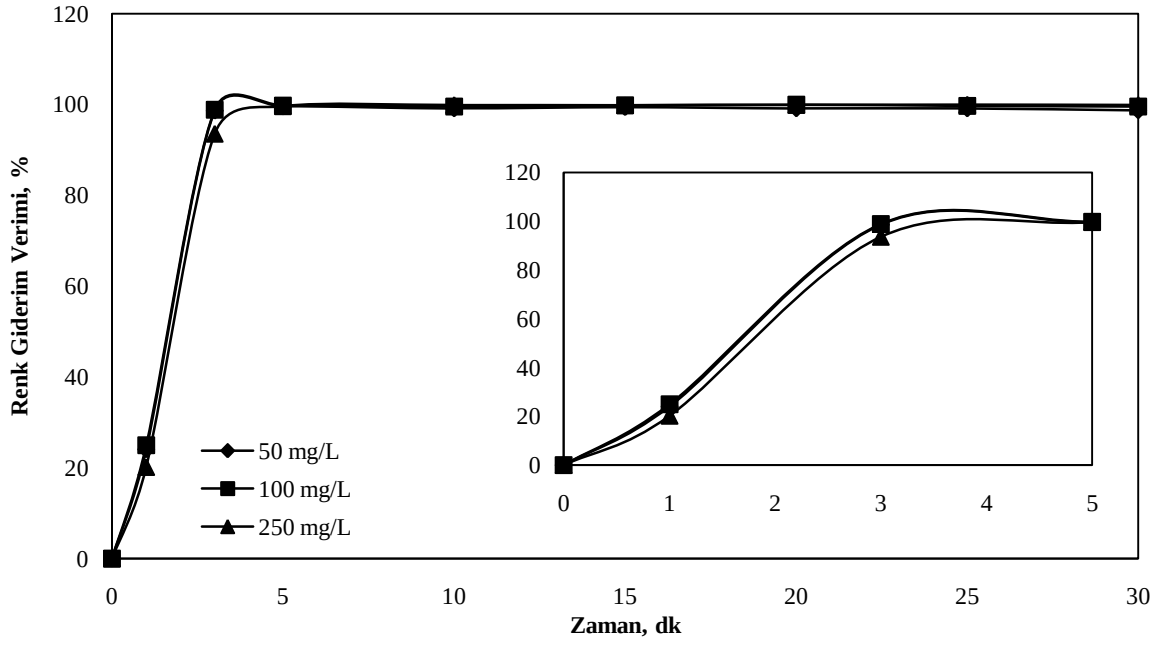
Şekil 3.9–3.12 sırasıyla kaolinit, sepiyolit, üleksit ve kolemanit adsorbentleri varlığında farklı başlangıç derişimleri için zamana karşılık renk giderim verimindeki değişimi göstermektedir. Başlangıç derişimi olarak 50, 100 ve 250 mg/L değerlerinde çalışılmıştır. Ek B (1, 2 ve 3) 'de verilen bulgular ile oluşturulan Şekil 3.9 incelendiğinde, kaolinit için 3. dakikada sırasıyla proses verimi %99.3, %99.1 ve %95.1 elde edilmiştir. Üçüncü dakikadan sonra her üç parametre için elde edilen bulgulara verimin yaklaşık aynı değeri yakaladığı ve proses sonuna kadar önemli değişikliklerin olmadığı görülmektedir. Sepiyolit için Şekil 3.10 ve Ek B(4, 5 ve 6)'de bulunan bulgulara göre, 3. dakikada 50 mg/L için %98.83; 100 mg/L için %97.83 ve 250 mg/L için %96.0 proses verimine ulaşılmıştır. 5 dakikalık uygulama sonunda sırasıyla %99.1, %98.67 ve %99.7 verimle renk giderimi gerçekleştirilmiş ve bundan sonra önemli bir değişiklik oluşmamıştır. Her üç parametre için bulgular lineer bir seyirde ilerlememiş ve bu yüzden başlangıç derişimi seçimi için önemli bir farklılık oluşmamıştır. Şekil 3.11 ve Ek B (7, 8 ve 9)'de bulguları verilen üleksit için 50 mg/L başlangıç derişimi için 3. dakikada %98.6; 100 mg/L için %98.83 ve 250 mg/L için %93.5 proses verimine ulaşılmıştır. 5 dakikalık uygulama sonunda sırasıyla %99.6, %99.78 ve %99.6 verimle renk giderimi sağlanmıştır. Görüldüğü gibi 3. dakikadan sonra başlangıç derişimi değişiminin proses verimine herhangi bir etkisi olmamıştır. Şekil 3.12'de verilen grafik ve Ek B (10, 11 ve 12)'de verilen bulgular kolemanit için başlangıç derişiminin değişimine karşılık proses verimindeki değişimi göstermektedir. 3. dakikada 50 mg/L için %98.8; 100 mg/L için %98.94 ve 250 mg/L için %97.6 proses verimine ulaşılmıştır. 5 dakikalık uygulama sonunda ise sırasıyla %99.6, %99.73 ve %99.7 verimle renk giderimi gerçekleştirilmiştir. Bundan sonraki değerlerde ise anlamlı değişiklikler görülmemiştir. Bu durumda elektrokoagülasyon/adsorpsiyon prosesinde boyarmadde başlangıç derişiminin 50 mg/L olarak seçilmesi yeterli görülmektedir.



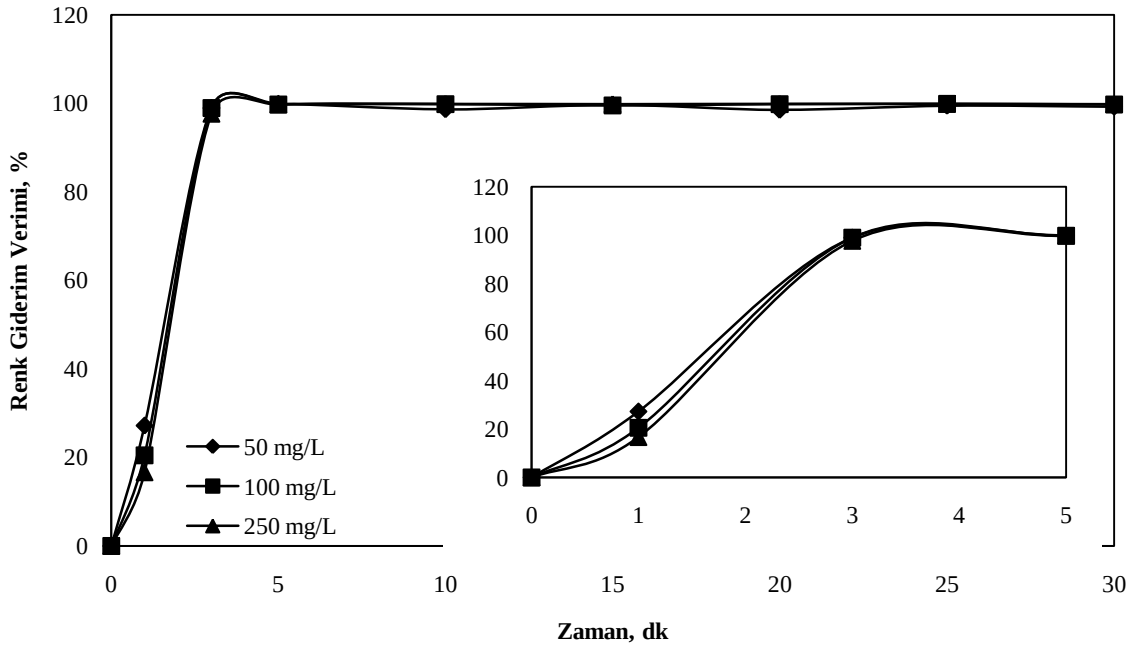
Şekil 3.10: RR195'in farklı başlangıç derişimlerinde kaolinit için zamanla renk giderim veriminin değışimi (J: 20 mA/cm², pH: 5.5, Adsorbent dozajı:1g/L).



Şekil 3.9: RR195'in farklı başlangıç derişimlerinde sepiyolit için zamanla renk giderim veriminin değışimi (J: 20 mA/cm², pH: 5.5, Adsorbent dozajı:1g/L).



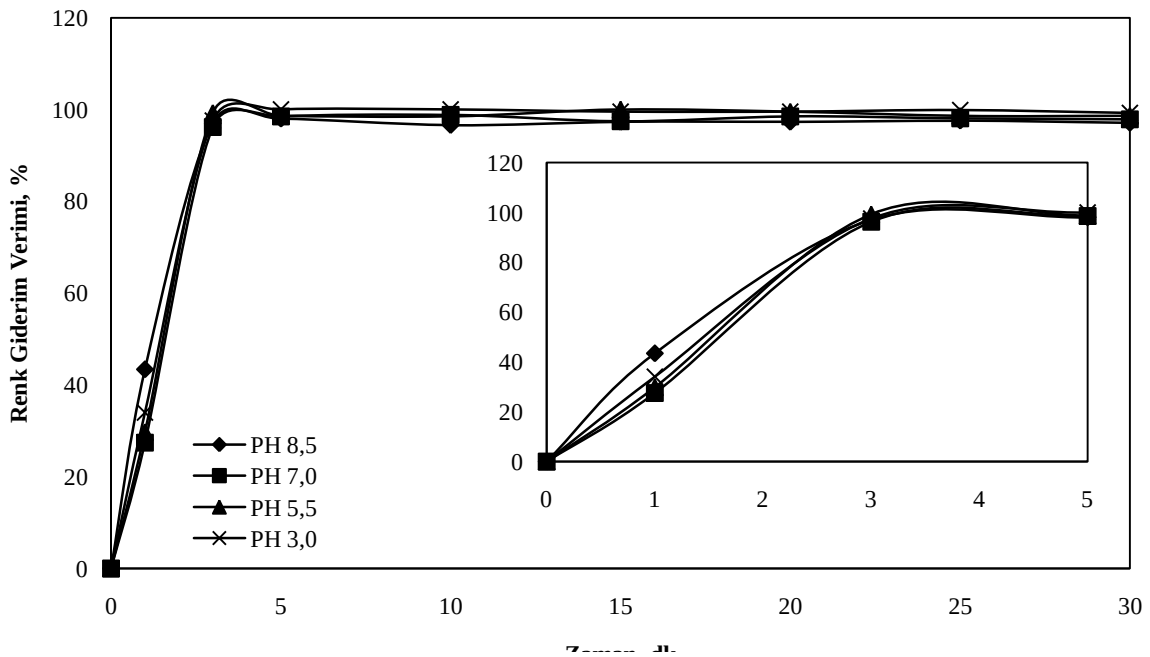
Şekil 3.11: RR195'in farklı başlangıç derişimlerinde üleksit için zamanla renk giderim veriminin değişimi (J : 20 mA/cm², pH: 5.5, Adsorbent dozajı: 1 g/L).



Şekil 3.12: RR 195'in farklı başlangıç derişimlerinde kolemanit için zamanla renk giderim veriminin değişimi (J : 20 mA/cm², pH: 5.5, Adsorbent dozajı: 1 g/L).

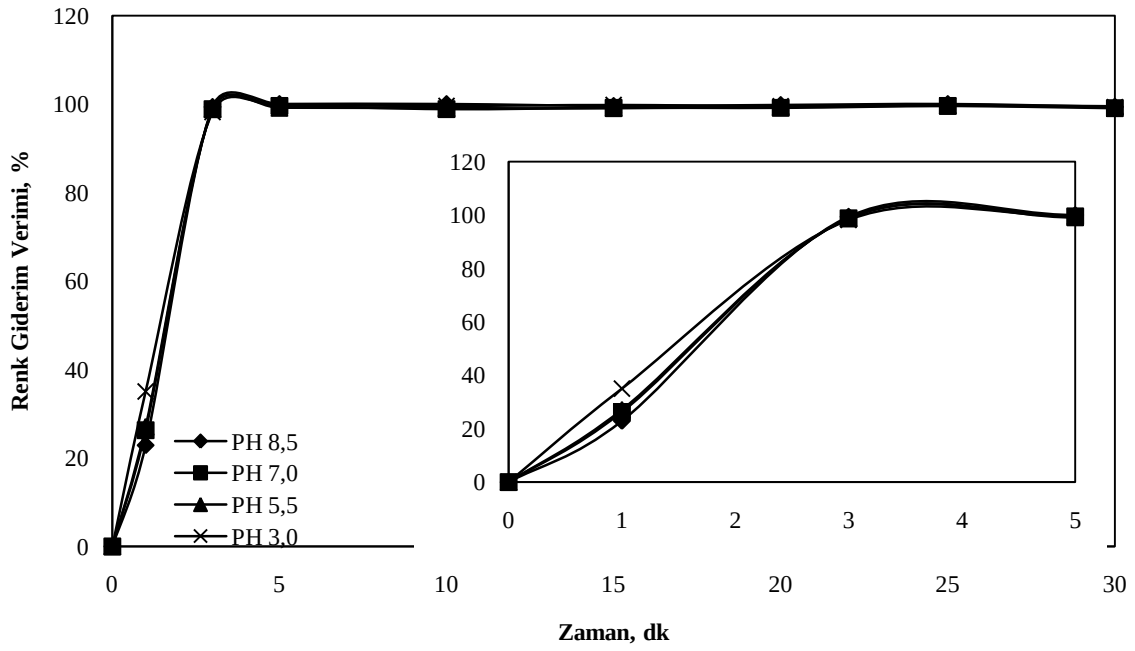
3.2.4 Başlangıç pH'nın Etkisi

Boya çözeltisinin başlangıç pH'nın boya giderim verimine etkisini incelemek amacıyla 3, 5.5, 7 ve 8.5 pH değerlerinde elektrokoagülasyon/adsorpsiyon testleri yapılmış ve Ek B (1, 4, 7, 12 ve 15-26) de verilen bulgular ışığında aşağıdaki grafikler çizilmiştir. Şekil 3.16'da verilen kaolinit, kolemanit, sepiyolit, üleksit ve herhangi bir adsorbent olmaksızın yapılan deneyler için başlangıç pH değerine karşılık % renk giderim verimi değişimini göstermektedir. Kaolinit adsorbenti için en iyi giderim doğal pH değeri olan pH 5.5'te elde edilmiştir. Kolemanit ve sepiyolit adsorbenti ile yapılan deneylerde pH arttırıldıkça proses veriminde artış görülmüştür. Yani kolemanit ve sepiyolit adsorbentleri kullanılarak yapılan adsorpsiyon/elektrokoagülasyon hibrit prosesi için optimum pH değeri bazik bölgede seçilebilir. Fakat daha önce belirtildiği gibi $\text{Fe}(\text{OH})_3$ floklarının oluşabileceği optimum pH aralığı 6,2 ile 9,6 arasında belirlenmelidir. Üleksit adsorbenti kullanıldığında pH 3 değerinde renk giderim verimi maksimum düzeyde olup pH arttıkça verimde belirgin bir azalma gözlenmiştir. Ayrıca tüm adsorbentler ve adsorbent olmadan yapılan deney kıyaslandığında asidik bölgedeki en yüksek verim üleksit ile elde edilmiştir. Bununla birlikte asidik bölgede adsorbent kullanımı renk giderim verimini artırıcı etkide bulunurken bazik bölgede negatif bir etkide bulunmuştur. Boyarmaddenin doğal pH değeri olan 5.5'ta tüm adsorbentlerde verimin %98'in üzerinde sağlandığı göz önünde bulundurulduğunda pH ayarlamasına gerek olmadığı söylenebilir. Böylelikle pH ayarlama işlemi için asit ve baz kullanımından tasarruf etmenin yanı sıra bu işlem için ek bir zaman

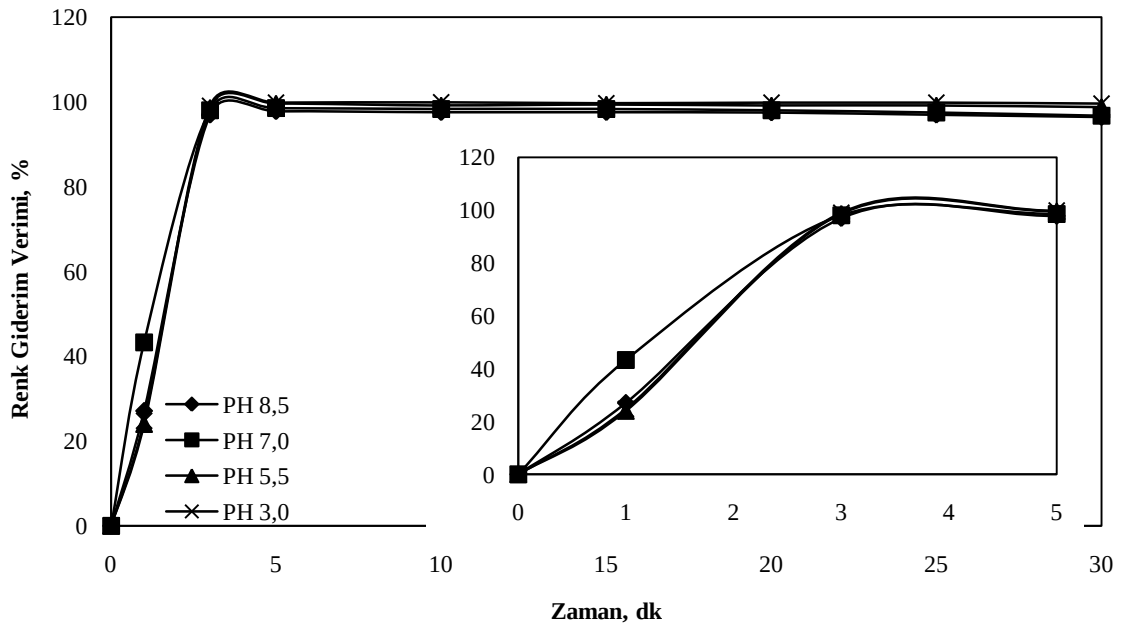


Şekil 3.13: Kaolinit için farklı pH değerlerinde zamanla renk giderim veriminin değişimi (C_0 : 50 mg/L, J : 20 mA/cm², Adsorbent dozajı: 1g/L).

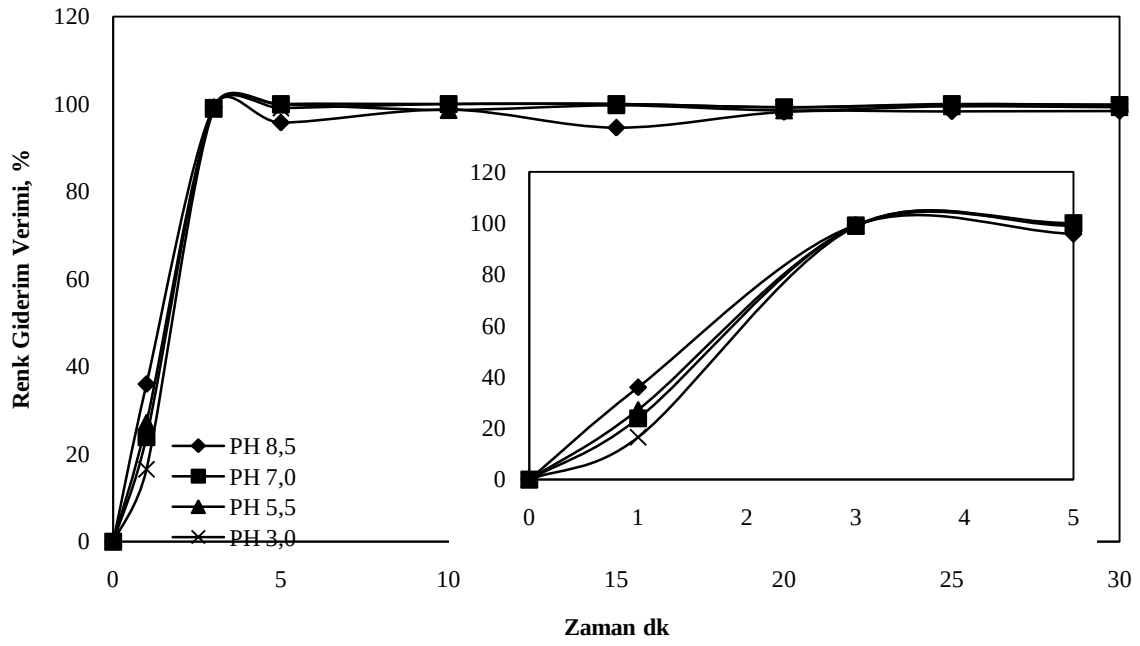
da harcanmayacaktır.



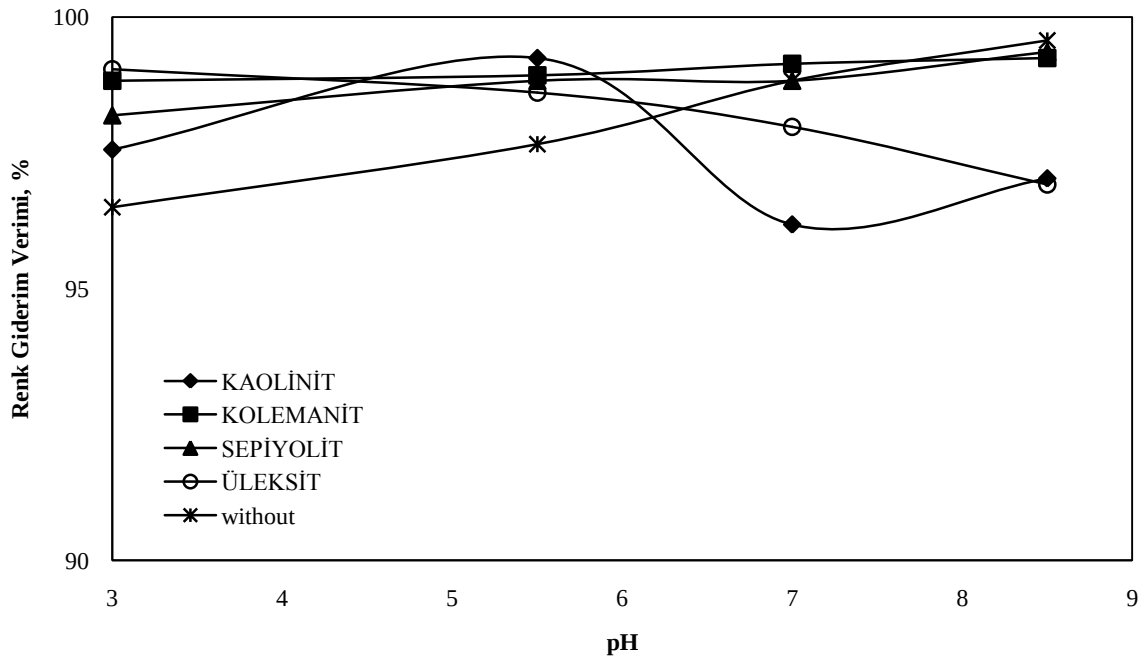
Şekil 3.14: Sepiyolit için farklı pH değerlerinde zamanla renk giderim veriminin değişimi (C_0 : 50 mg/L, J : 20 mA/cm², Adsorbent dozajı: 1g/L).



Şekil 3.15: Üleksit için farklı pH değerlerinde zamanla renk giderim veriminin değişimi (C_0 : 50 mg/L, J : 20 mA/cm², Adsorbent dozajı: 1g/L).



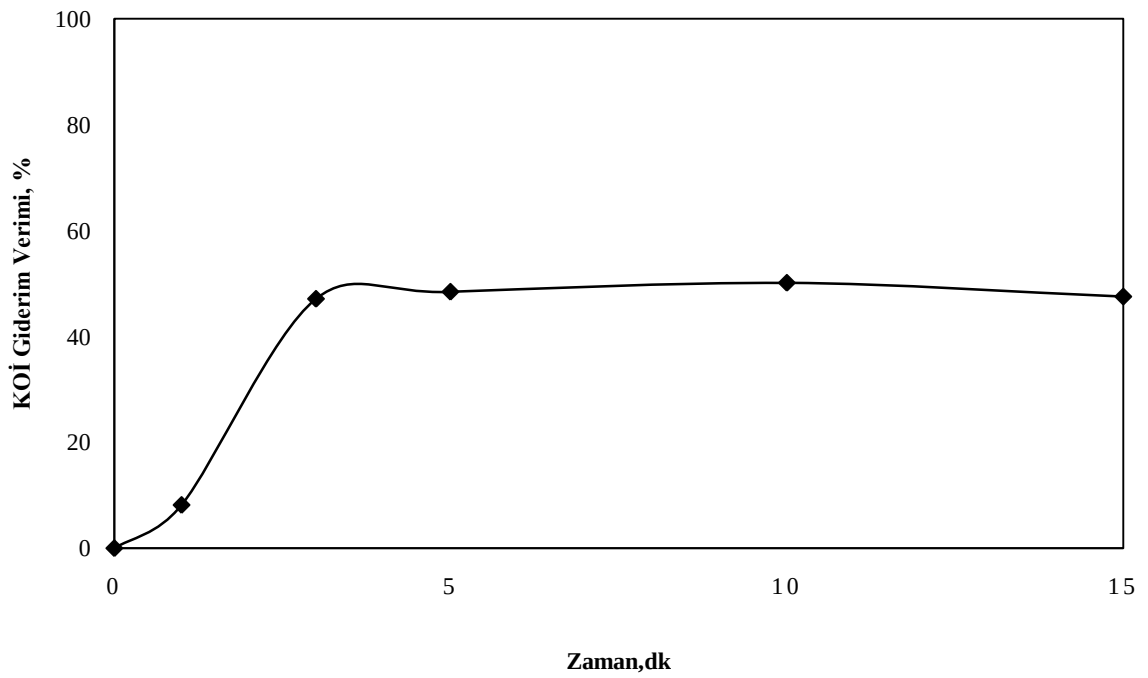
Şekil 3.16: Kolemanit için farklı pH değerlerinde zamanla renk giderim veriminin değişimi (C_0 : 50 mg/L, J : 20 mA/cm², Adsorbent dozajı: 1 g/L).



Şekil 3.17: Tüm adsorbentler için 3 dakikalık uygulama sonunda farklı pH değerlerinde renk giderim veriminin değişimi (C_0 : 50 mg/L, J : 20 mA/cm², Adsorbent dozajı: 1 g/L).

3.3 KOİ Analizi

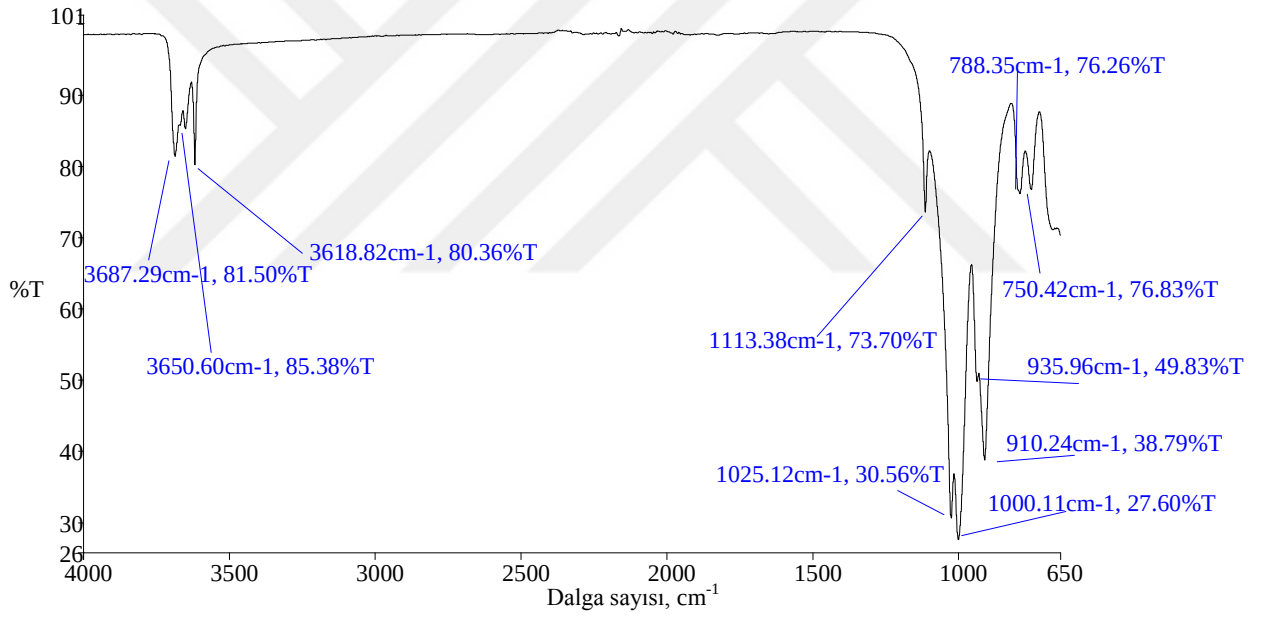
Şekil 3.18, 50 mg/L derişimli boyarmaddenin doğal pH'ında ve 20 mA/cm² sabit akım yoğunluğunda zamanla KOİ giderim veriminin değişimini göstermektedir. KOİ ölçümü optimum proses parametrelerinde gerçekleştirilmiştir. En yüksek KOİ giderim verimi %50.1 değeri ile 10. dakikada elde edilmiştir. Genel seyir itibariyle KOİ giderim veriminin zamanla arttığı fakat 5. dakikadan sonra değişmediği söylenebilir. Buna göre çelik elektrot kullanılarak uygulanan elektrokoagülasyon prosesi KOİ gideriminde alüminyum elektroda göre daha düşük verimle sonuçlanmıştır (Gündüz & Atabey, 2019).



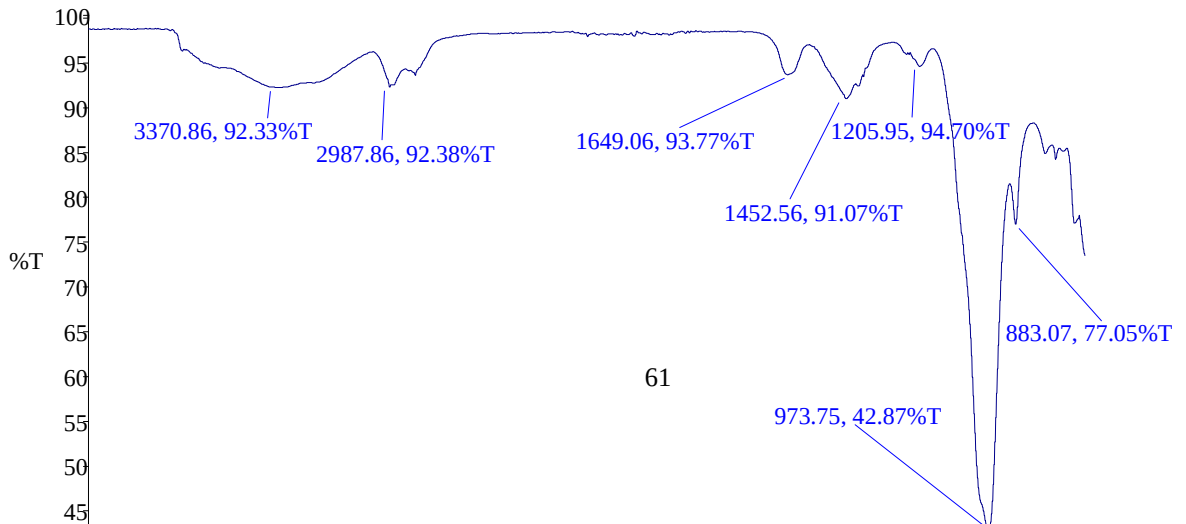
Şekil 3.18: KOİ giderim veriminin zamanla değişimi (C₀: 50 mg/L, J: 20 mA/cm², pH₀: 5.5).

3.4 FT-IR Değerlendirmesi

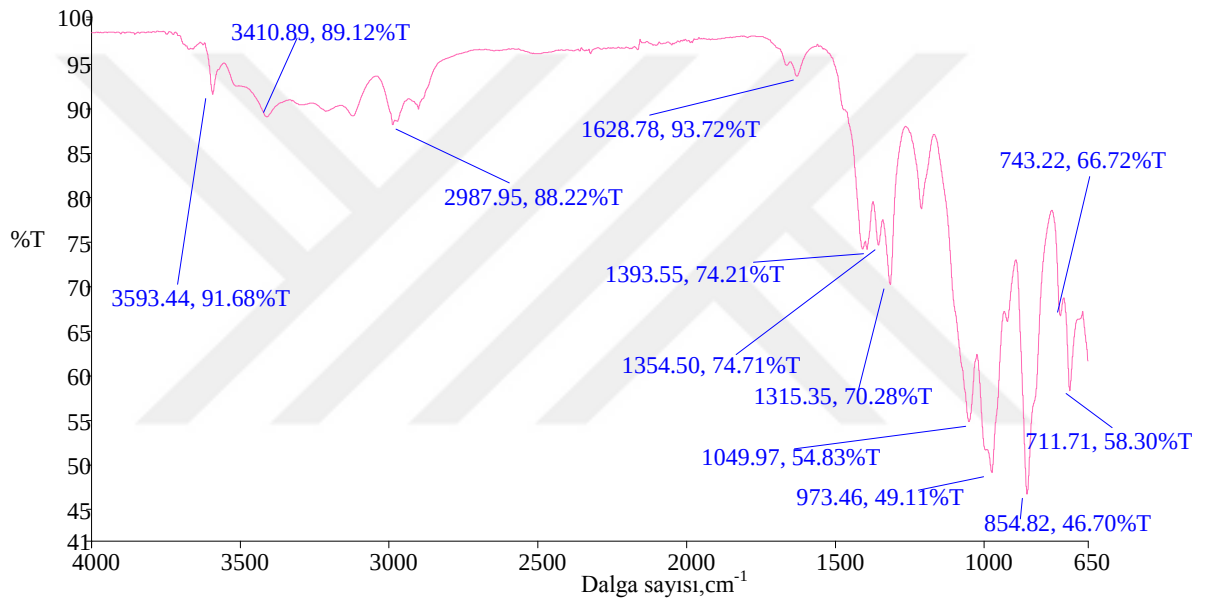
Çalışmada kullanılan boyarmadde, adsorbentler ve proses sonucunda elde edilen bazı ürünlere ait IR spektrumları şekil 3.19-3.27’de verilmiştir.



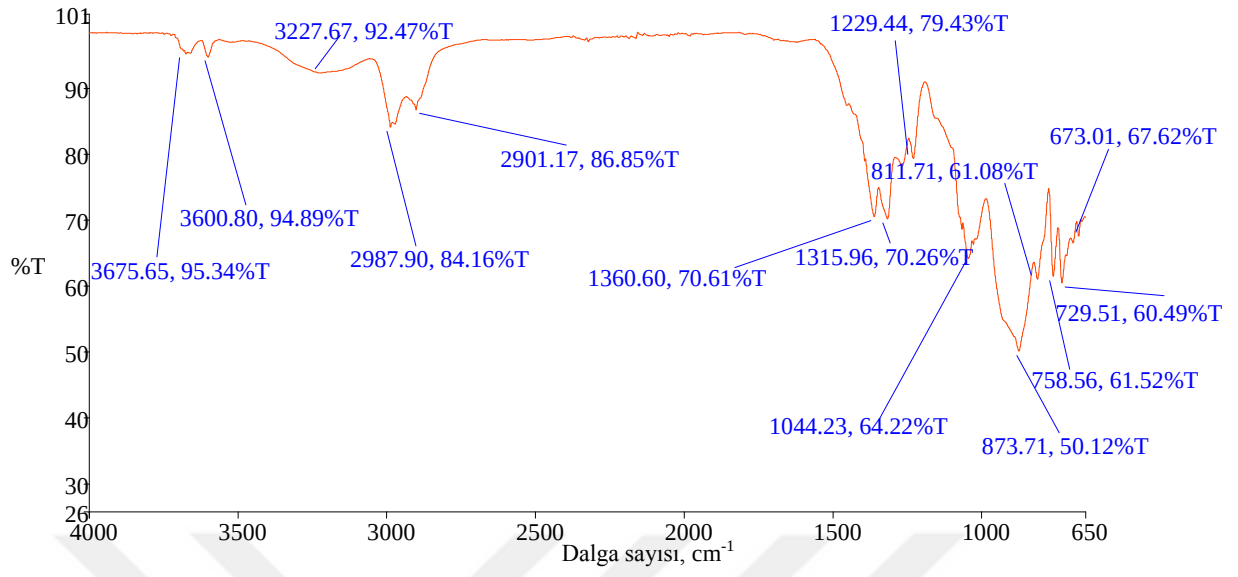
Şekil 3.19: Kaolinit mineralinin IR spektrumu.



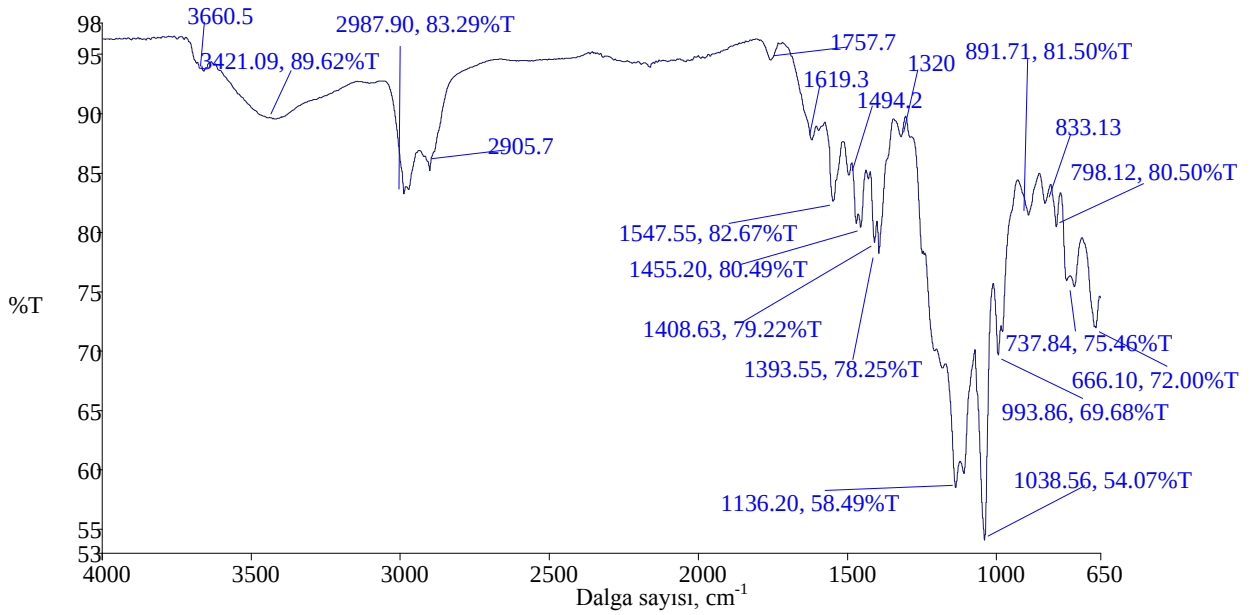
Şekil 3.20: Sepiyolit mineralinin IR spektrumu.



Şekil 3.21: Üleksit mineralinin IR spektrumu.

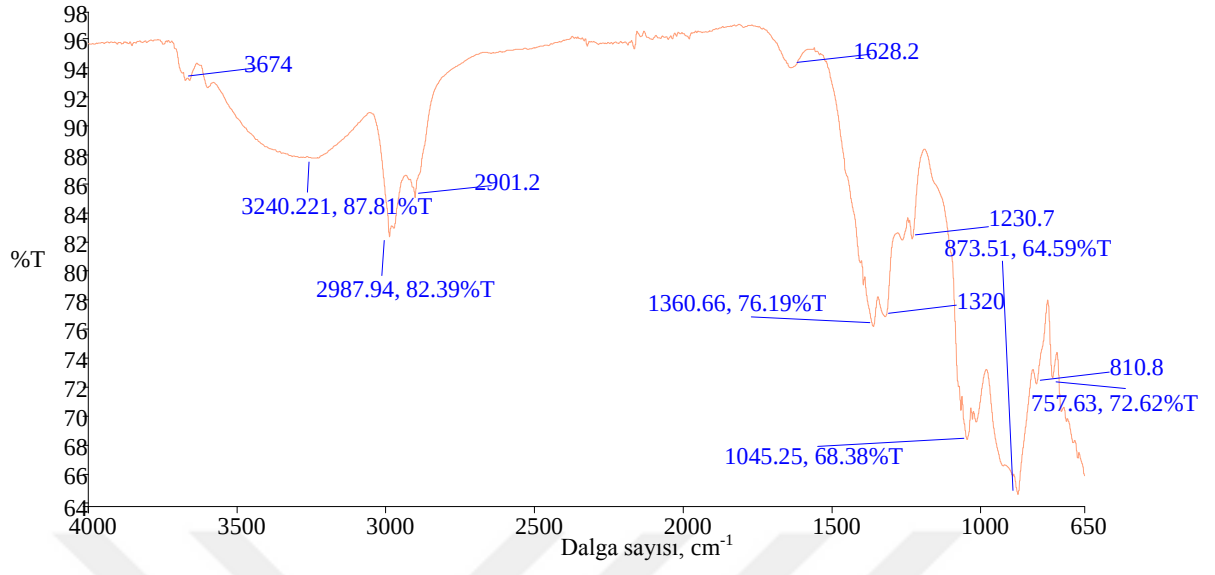


Şekil 3.22: Kolemanit mineralinin IR spektrumu.

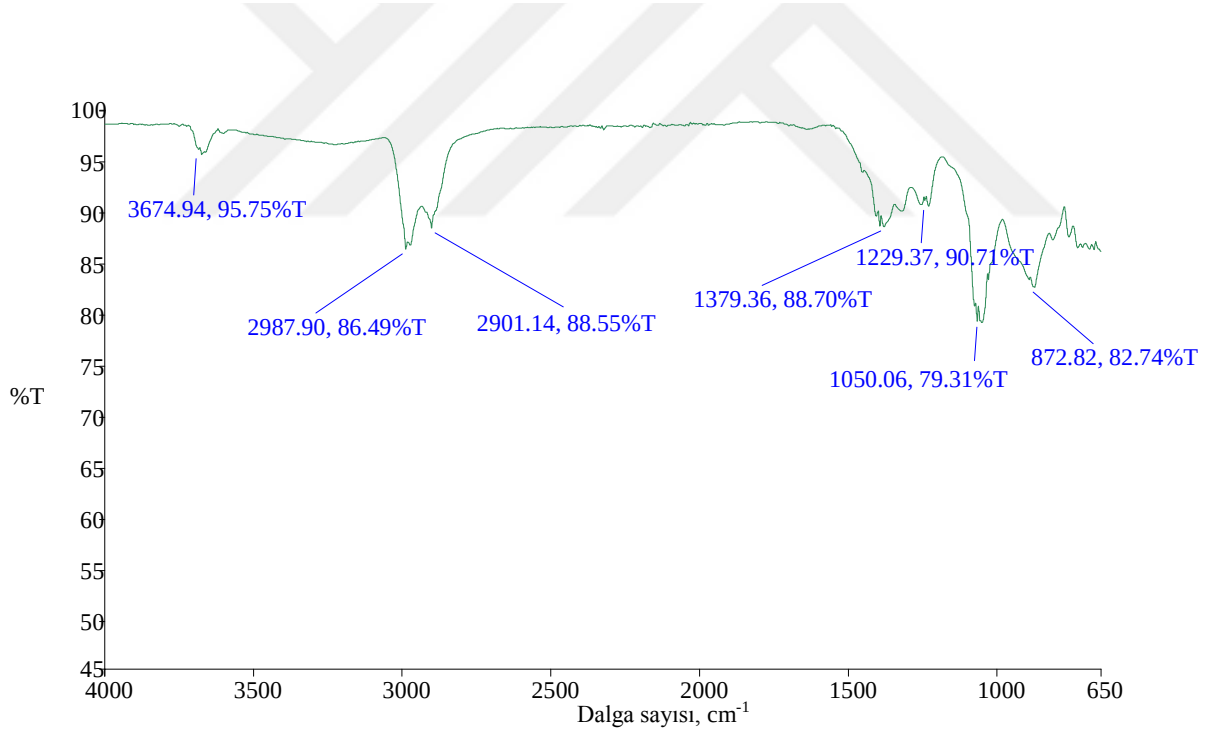


Şekil 3.23: RR 195 için IR spektrumu.

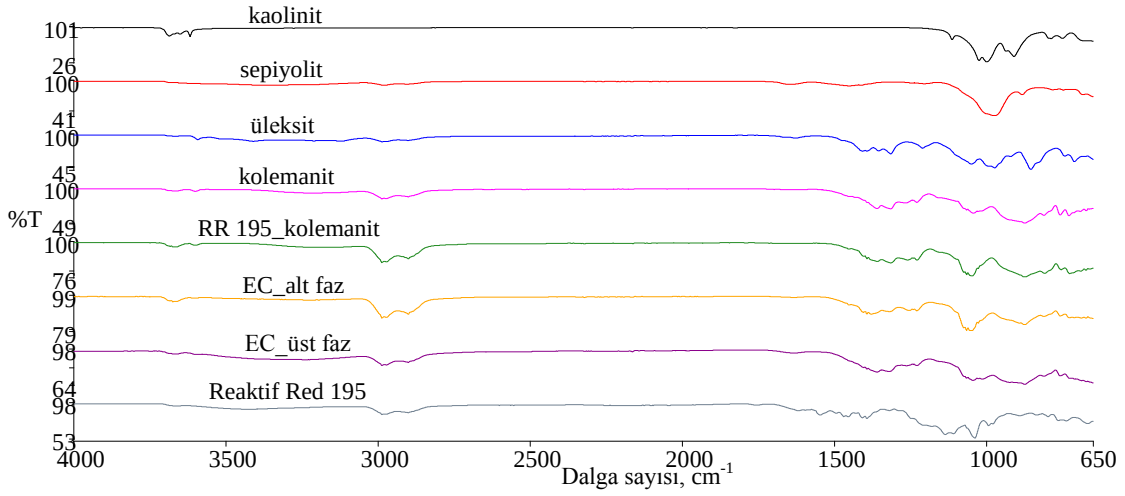




Şekil 3.25: EC prosesi sonucu oluşan alt fazın IR spektrumu.



Şekil 3.26: EC prosesi sonucu oluşan üst fazın IR spektrumu.



Şekil 3.27: Boyarmadde, adsorbentler ve proses sonunda oluşan bazı ürünlere ait IR spektrumları.

Kaolinit numunesinin Şekil 3.19’da verilen IR spektrumunda 3687 ve 3650 cm^{-1} ’de bulunan bantlar kaolinitin dış yüzeyinde yerleşmiş olan hidroksil gruplarının gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir. Al ve Si ile köprü oluşturan OH’dan dolayı 3618 cm^{-1} ’de odaklanmış olan bant iç kısımlardaki OH gerilme titreşimlerini, 910 cm^{-1} ’de yerleşmiş olan pik ise Al-Al-OH formundaki kil tabakasının eğilme titreşimlerini göstermektedir.

Kaolinit yapısının tetrahedral ve oktahedral tabakasını birbirine bağlayan tepedeki Si-O grubunun gerilme titreşimi 1111 cm^{-1} ’de ortaya çıkmaktadır. 1025 ve 1000 cm^{-1} ’deki bantlar sırasıyla Si-O fonksiyonel gruplarının dış ve düzlem gerilme titreşimine karşılık gelmektedir (Feriancová, Pajtašová, Pecušová, & Ondrušová, 2019).

Sepiyolit numunesinin Şekil 3.20’de verilen IR spektrumunda 973 ve 1205 cm^{-1} ’deki bantlar sırasıyla Si-O ve Si-O-Si bantlarına denk gelmektedir. Bu pikler sepiyolit karakteristik pikleridir (Akyüz, Akyüz, & Akalın, 2010).

Üleksit numunesinin Şekil 3.21’de IR spektrumunda görülen 3593 cm^{-1} ’deki bant OH gerilmesi, 1393 cm^{-1} ’deki bant üleksitte bulunan BO_3 yapısındaki B-O’nun asimetrik gerilmelerini, 1240 cm^{-1} ’de görülen bant ise OH’ın düzlem içindeki eğilme titreşimini ifade etmektedir. 1050 ve 854 cm^{-1} ’deki pikler BO_4 yapısındaki B-O’nun asimetrik gerilmesine karşılık gelmektedir (Leonardi, Zanuttini, Miróa, & Milta, 2017).

Kolemanit numunesinin Şekil 3.22’de IR spektrumunda görülen 1044 ve 873 cm^{-1} ’deki pikler kolemanit için karakteristik B-O titreşimlerini göstermektedir. 1360 ve 1315 cm^{-1} ’deki bantlar B-O asimetrik titreşimlerini göstermektedir. 758 cm^{-1} ’deki pikler B-O gerilme titreşimlerini ifade etmektedir (Budak & Gönen, 2014).

RR 195 boyarmaddesinin FTIR spektrumu şekil 3.23’te verilmektedir. Burada boyarmaddeye has karakteristik bantlar şu şekilde açıklanabilir (Pérez-Calderón, Santos, & Zaritzky, 2017):

- a) 3328-3660 cm^{-1} ’deki bantlar -NH, -OH ve aromatik yapıdaki =CH gerilmelerini;
- b) 2915 ve 2855 cm^{-1} ’deki bantlar alifatik -CH’a ait asimetrik gerilmeleri;
- c) 1619 cm^{-1} ’deki bant aromatik halkanın titreşimini;
- d) 1587 cm^{-1} ’deki bant C=N gerilmesini;
- e) 1547 cm^{-1} ’deki bant boyarmaddede bulunan -N=N- azo grubunun gerilmesini; (46)
- f) 1455 cm^{-1} ’deki bant -CH eğilme titreşimini;(Kitap)
- g) 1420 cm^{-1} ’deki bant simetrik -N-C=N- gerilmelerini;
- h) 1494 ve 1393 cm^{-1} ’deki bantlar -CN’nin titreşim gerilmelerini;
- ı) 1320 cm^{-1} ’deki bant SO₂’nin S=O grubunun titreşimlerini;
- j) 1180 cm^{-1} ’deki bant fenolik -C-OH grubunun titreşimlerini;
- k) 1038 cm^{-1} ’deki bant -C-OH ve/veya -CN gerilmesini;
- l) 669 cm^{-1} ’deki bant -S=O gerilmesini göstermektedir.
- m) 2987 ve 2905 cm^{-1} ’deki bant dış yüzey OH gerilmelerini göstermektedir.

Şekil 3.22, 3.23 ve 3.24’te verilen spektrumlar incelendiğinde kolemanit, RR 195 ve RR 195 adsorplanmış kolemanit spektrumları kolemanit ile boya arasında yeni bir kimyasal bağ oluştuğunu gösteren bant kayması görülmemektedir. Ancak boyarmaddede karakteristik olarak görülen 1619, 1547, 1455, 1408 ve 1393 cm^{-1} bantları boyarmadde adsoplanmış kolemanit spektrumunda görülmemektedir.

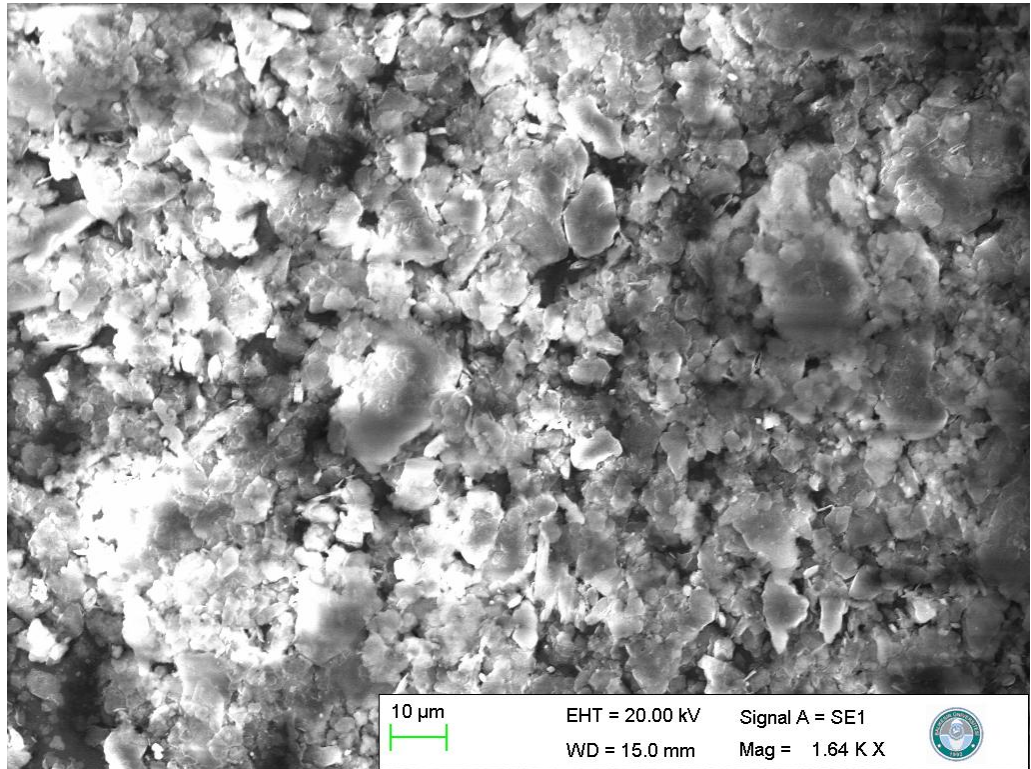
Kolemanitte 1044 ve 873 cm^{-1} de görülen karakteristik B-O titreşimine ait pikler boya adsorplanmış kolemanit spektrumunda sırasıyla 1048 ve 878 cm^{-1} değerlerine kaymıştır. Bu da adsorpsiyon prosesinin hidrojen bağları ile ve/veya elektrostatik etkileşimler sonucunda gerçekleştiğini göstermektedir.

Adsorbent olarak kolemanit ilevesinin de yapıldığı elektrokoagülasyon çalışmalarında reaktörün tabanında çökmüş olan hidroksit bileşikleri (alt faz) ve yüzeyden alınan

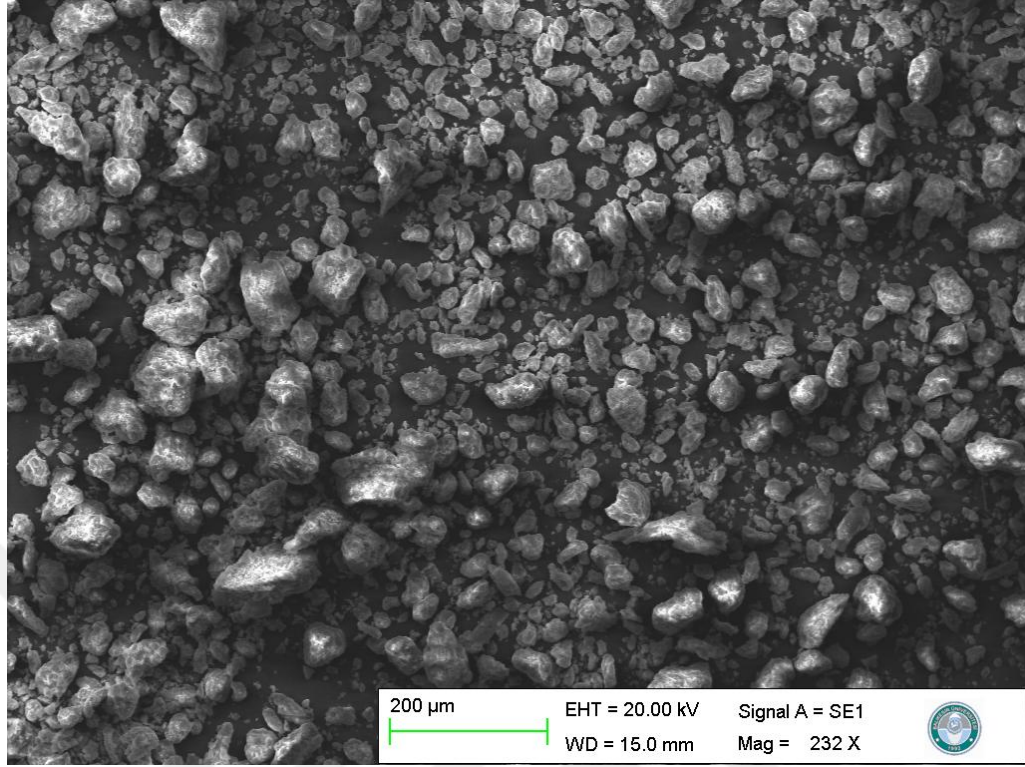
flotasyon ürünleri (üst faz) infrared analizine tabii tutulmuştur. Şekil 3.22, 3.23, 3.25 ve 3.26'da verilen boyarmadde, kolemanit, alt faz ve üst faz spektrumları incelendiğinde boyarmadde ve kolemanitte görülen bazı piklerin kaybolduğu, bazı piklerin şiddetinin azaldığı ve bazı piklerinde kayma gösterdiği anlaşılmıştır. 2600-3800 titreşim aralığındaki O-H gerilme bandının oluşumuna demir hidroksit'teki hem adsorblanan su ve hem de yapısal OH grupları katkıda bulunurken, 1628 bandının oluşumuna sadece H-O-H şeklinde adsorblanan su katkıda bulunmaktadır (Johnston, Wang, & Chem, 2002). RR195 için 3660 cm^{-1} 'de görülen yüzey ve yapısal OH titreşimini ifade eden pik her iki faz spektrumunda 3664 cm^{-1} 'e kaydığı görülmüştür. Kolemanitte 1044 cm^{-1} 'de görülen pik alt fazla 1050, üst fazda 1045 cm^{-1} 'de görülmüştür. Bu da kolemanitin hidroksit yoğunluklu faz içerisinde bulunduğunu göstermektedir.

3.5 SEM Analizi

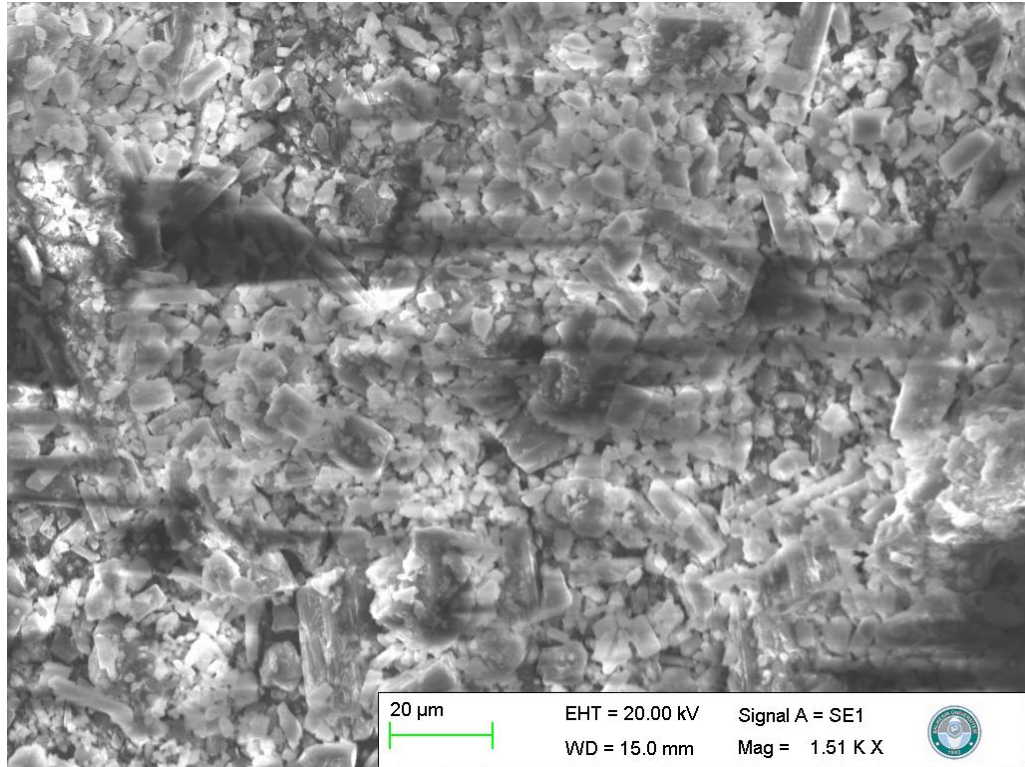
Çalışmada kullanılan RR195 boyarmaddesi, kolemanit, kaolinit, sepiyolit, üleksit, elektrokoagülasyon/adsorpsiyon hibrit prosesi sonucunda alt ve üst bölgede oluşan faz, boyarmadde adsorbe edilmiş kolemanit için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yüzey görüntüleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen görüntüler Şekil 3.28 - 3.35'te verilmiştir.



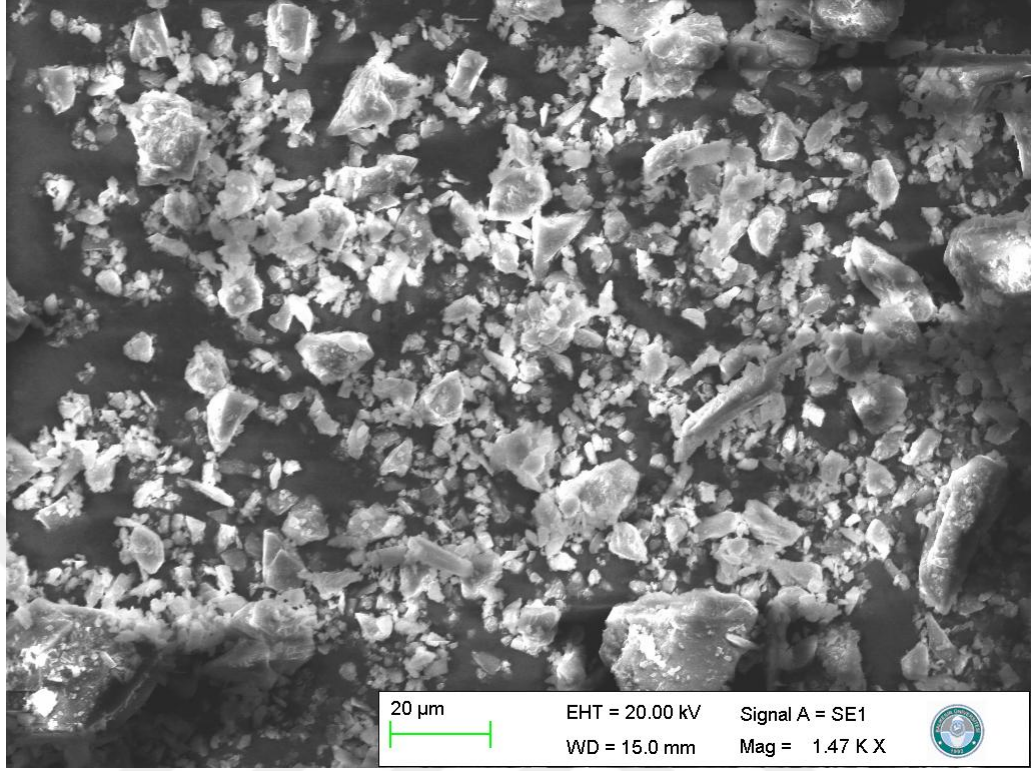
Şekil 3.28: Kaolinit için SEM görüntüsü.



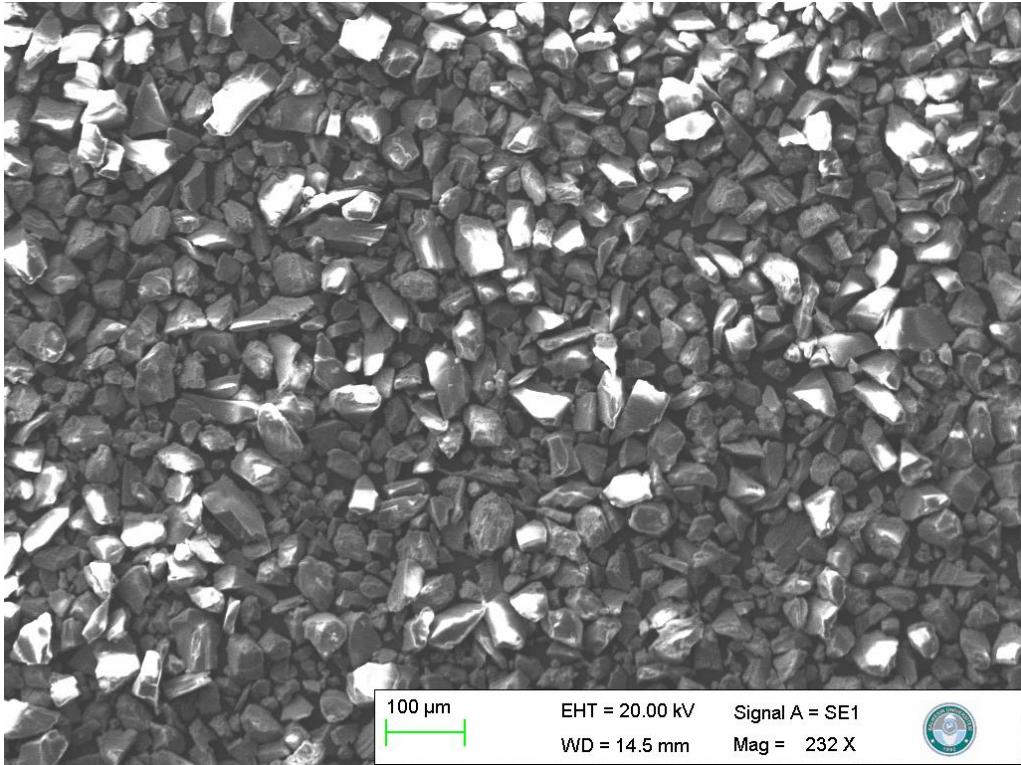
Şekil 3.29: Sepiyolit için SEM görüntüsü.



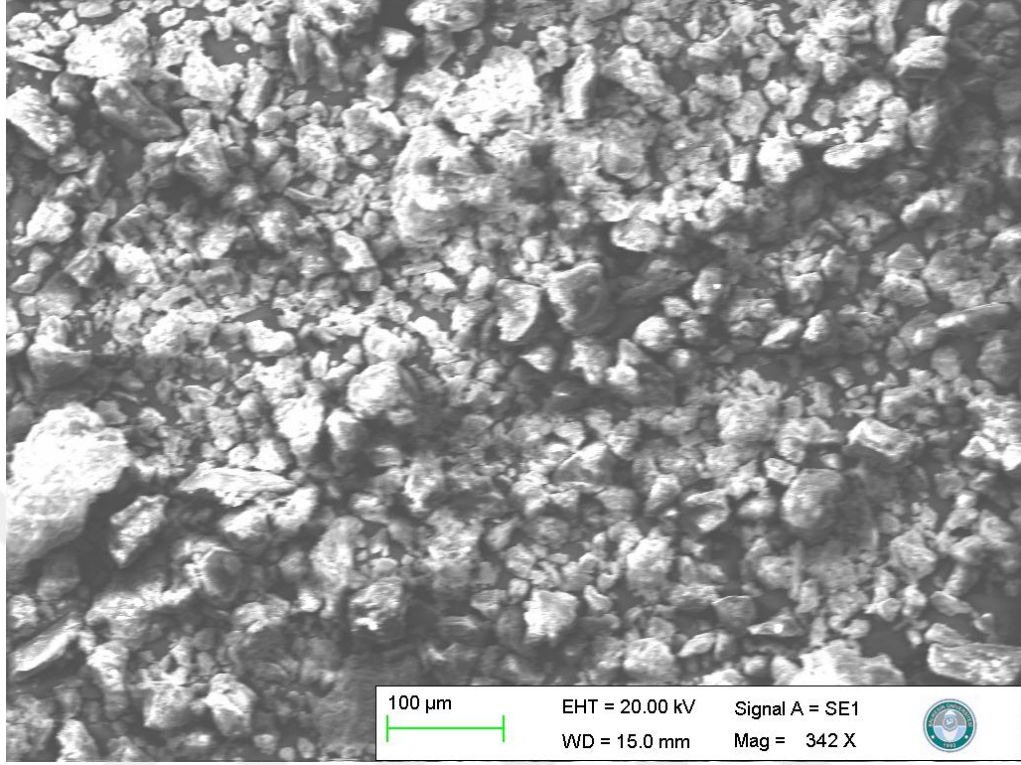
Şekil 3.30: Üleksit için SEM görüntüsü.



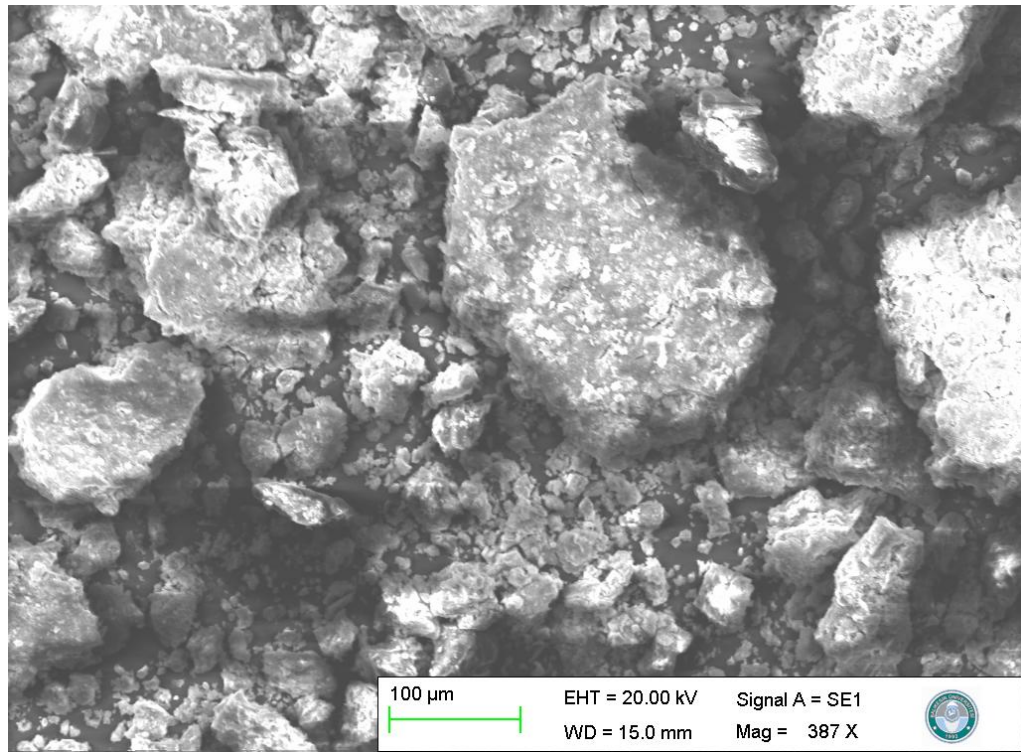
Şekil 3.31: Kolemanit için SEM görüntüsü.



Şekil 3.32: RR195 adsoplanmış kolemanit için SEM görüntüsü.



Şekil 3.33: Elektokoagülasyon/adsorpsiyon alt faz için SEM görüntüsü.



Şekil 3.34: Elektokoagülasyon/adsorpsiyon üst faz için SEM görüntüsü.

Taramalı elektron mikroskobu malzemelerin morfolojik yapılarını büyütmede ve onlar üzerine çalışmada oldukça etkili ve güçlü sonuçlar vermektedir. Elde edilen yüzey görüntüleri dikkatlice incelendiğinde elektrokoagülasyon prosesinden sonra alt ve üst faza ait görüntülerde flokların kümeler halinde ve amorf bir yapıda olduğu görülmektedir. Alt faz ve üst faz görüntüleri kıyaslandığında alt fazdaki flokların küçük boyutlarda üst fazdaki flokların ise alt faza göre daha büyük boyutlarda olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca alt fazda kolemanit taneciklerinin de olduğu anlaşılmaktadır. Kaolinit, sepiyolit, üleksit ve kolemanit için Şekil 3.28, 3.29, 3.30 ve 3.31’de verilen SEM görüntüleri mineralin yüzey yapısını açıkça göstermektedir. RR adsorplanmış kolemanite ait SEM görüntüsü Şekil 3.32’de görüldüğü gibi yapısal olarak kolemanitten farklı bir görüntü sergilemiştir. Bu durumda kolemanit üzerine boyarmadde adsorbe olduğunu söylemek mümkündür.

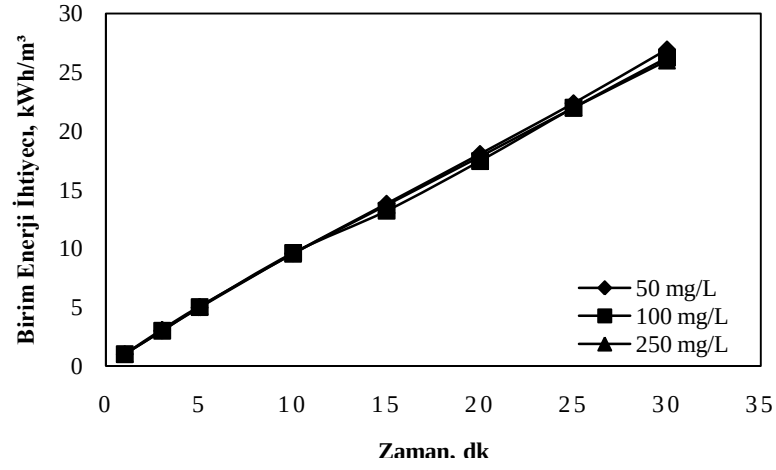
3.6 Birim Enerji İhtiyacı

Elektrokoagülasyon prosesi ile RR 195 gideriminde en önemli parametrelerden biri de enerji tüketim miktarıdır. Enerji tüketimi eşitlik 3.6 ile hesaplanmıştır.

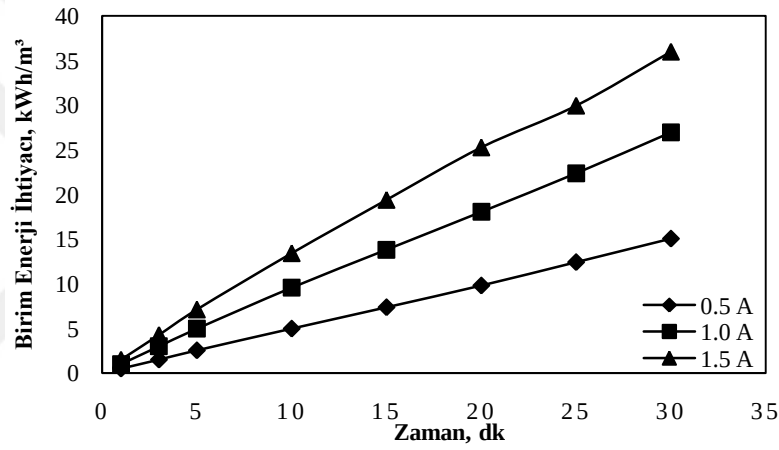
$$E \text{ (kWh/m}^3\text{)} = \frac{U \times I \times t}{V} \quad (3.6)$$

Burada E enerji tüketimini (kWh/m³), U voltajı (V), I akımı (A), t muamele süresini (sa) ve V hacmi (m³) ifade etmektedir (Hussin, Abnisa, Issabayeva, & Arouaa, 2017).

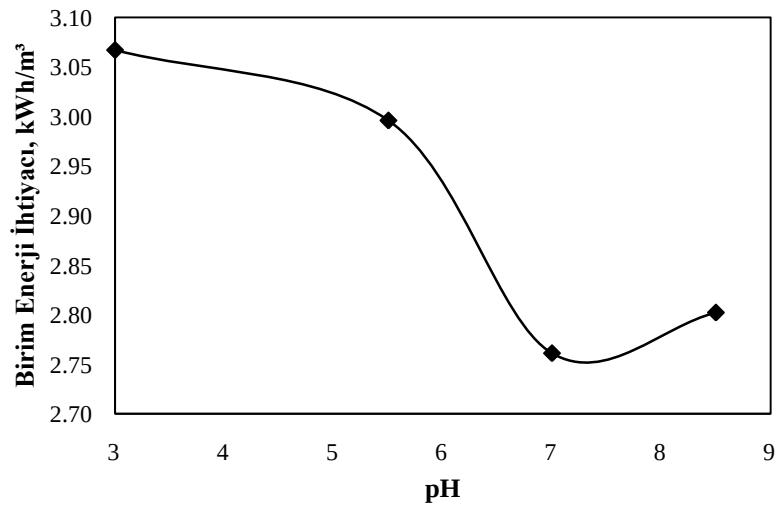
Elde edilen bulgular incelendiğinde RR 195 başlangıç derişiminin incelendiği şekil 3.36’da 50,100 ve 250 mg/L değerleri için enerji tüketiminin aynı olduğunu söylemek mümkündür. Bunun yanı sıra şekil 3.37’de akım yoğunluğu arttıkça enerji tüketiminde belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. Şekil 3.38’de ise asidik koşullarda enerji tüketiminin yüksek olduğu, buna nazaran bazik koşullarda enerji tüketiminin azaldığı görülmektedir.



Şekil 3.35: Farklı başlangıç RR 195 derişimlerinde birim enerji ihtiyacının zamanla değişimi.



Şekil 3.36: Farklı akımlar için birim enerji ihtiyacının zamanla değişimi.



Şekil 3.37: $t=3$ dk için birim enerji ihtiyacının farklı başlangıç pH değerleri ile değişimi.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında tekstil endüstrisinde kullanılan boyarmaddelerden Reaktif Red 195'in çelik elektrotların kullanıldığı elektrokoagülasyon yöntemi ile sulu çözeltilerden giderimine etki eden bazı faktörler incelenmiştir. Başlangıç boyarmadde derişimi, akım yoğunluğu, çözeltinin başlangıç pH'ı, kil minerali türü, kil minerali dozajının etkileri çelik elektrotlar varlığında belirlenmiştir. Kesikli sistemde gerçekleştirilen deneylerde sistemden alınan numunelerin iletkenlik, sıcaklık, akım yoğunluğu, voltaj, absorbans, konsantrasyon, reaksiyon süresi ve pH değerleri izlenmiştir.

Deneysel çalışmaların ikinci bölümünde çelik elektrotların kullanıldığı elektrokoagülasyon yöntemi ile sulu çözeltilerden RR195 boyarmaddesinin uzaklaştırılmasında, 30 dakikalık reaksiyon süresi boyunca kaolinit, sepiyolit, üleksit ve kolemanit adsorbentleri ilavesinin renk giderim verimine etkisi araştırılmıştır. Adsorbent ilavesi yapılmadan başlangıç konsantrasyonu 50 mg/L ve 20 mA/cm² akım yoğunluğunda natürel pH değerinde yapılan çalışmalarda 3 dakika sonunda renk giderim verimi % 97,7 olarak bulunmuştur. Aynı koşullarda kaolinit, sepiyolit üleksit ve kolemanit adsorbentlerinin ilavesi ile renk giderim verimi sırasıyla %99,3, %98,8, %98,6 ve % 98,9 olarak bulunmuştur. Adsorbentsiz ve adsorbent ilaveli elektrokoagülasyon verimleri kıyaslandığında, adsorbent ilavesinin verimi kısmen artırdığı görülmektedir. Buna ilaveten başlangıç pH değeri çalışmalarının sonucunda adsorbent olmaksızın en uygun başlangıç pH değerinin natürel pH olduğu belirlenmiştir. Kil minerallerinin farklı pH değerlerinde etkinliklerinin değiştiği; kaolinit ve üleksit mineralleri ile yapılan deneysel çalışmalarda en iyi renk gideriminin asidik koşullarda sağlandığı tespit edilmiştir. Sepiyolit ilavesi ile yapılan çalışmalar sonucunda en iyi renk gideriminin bazik koşullarda ve kolemanit mineralinin kullanıldığı çalışmalarda ise nötr ve asidik koşullarda iyi derecede renk gideriminin sağlandığı sonucuna varılmıştır.

Çelik elektrotların kullanıldığı geleneksel elektrokoagülasyon yöntemi ile RR 195 boyarmaddesinin tamamen uzaklaştırılması sağlanmıştır. Mineral ilavesi olmadan yapılan çalışmalarda en iyi renk giderim bazik koşullarda gerçekleşmiştir. Kil mineralleri ilavesinin renk giderimini olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir. Kil minerallerinin renk gideriminde etkinliği başlangıç pH değerine göre değişkenlik göstermektedir. Sonuç olarak

iřletme bazında dūřūnūldūđūnde arıtılması planlanan atıksuyun pH deđerine gōre adsorbent seřiminin yapılması gerektiđi gōrūlmūřtır.

Sonuç olarak elektrokoagūlasyon prosesine kil minerali ilavesinin renk giderim verimini olumlu etkilemesi, kullanılan minerallerin doğal, ucuz ve kolay temin edilebilir olması sebebiyle kil minerallerinin Reactive Red 195 iēeren atıksuların rengini gidermede elektrokoagūlasyonu destekleyerek etkin, kolay ve hızlı bir arıtımın gerēekleřmesi yōntemin uygulanabilir olmasını sağlamaktadır.

Bu test ēalıřmasında RR195'in bařlangıē boya deriřimi arttıēa renk giderim veriminde dūřme gōzlenmiřtir. Daha genel anlamda boya konsantrasyonundaki artıř verimi dūřūrūr. Yani boya konsantrasyonu artıyorsa, boyanın giderimi iēin gerekli koagūlant karakterli tūrlerin de konsantrasyonu artırılmalıdır.

Zamanın etkisi ēalıřma boyunca oluşturulan pek ēok grafikte değerlendirilebilir. Zaman ilerledikēe renk giderim veriminin belli bir değere kadar arttığı 5 dakikadan sonra verimde sabitlenme olduğu ve belirgin bir değerisim olmadığı gōzlenmiřtir. Zamanın işletme maliyeti ve hızını doğrudan etkileyen bir parametre olduğu gōz ōnūnde bulundurulursa optimum renk giderimi iēin belirtilen optimum ēalıřma koşullarında 5 dakikalık proses sūresinin yeterli olduğu belirtilmelidir.

Akım yođunluđunun renk giderim verimine etkileri incelendiđinde 3.dakikaya kadar lineer bir artıřın olduđu gōrūlmūřtır. Ancak akım yođunluđu artarken verimde gōrūlen artıřa tūketilen elektrik sarfiyatındaki artıř da eřlik etmektedir. 3.dakikadan sonra tūm akım deđerleri iēin verimde eřitlenmenin olması optimum verim deđerinin seēiminde yol gōsterici olmuřtur. Bu bađlamda 20 mA/cm² akım yođunluđu optimum deđer olarak tayin edilmiřtir.

Elektrokoagūlasyon prosesi sonucunda oluřan ēamur miktarının az olduđu bilinmektedir. Ancak az miktarda da olsa ēamur bertarafı sađlanmalıdır. Bu sebeple aēıđa ēıkan ēamurun yakılması veya dūzenli depolanması ile bertarafı sađlanabilir. Oluřan ēamurun iēeriđi belirlenerek farklı endūstrilerde hammadde olarak kullanımı da arařtırılabilir. Ayrıca elektrokoagūlasyon prosesinde oluřan flokların adsorpsiyon prosesinde adsorban olarak

kullanıldığı çalışmalar literatüre geçmiştir (Tünay, Metin, Kabdaşlı, & lmez-Hancı, 2010).

Basit ekipman ve kısa proses zamanı gereksinimi, az çamur oluşumu, ilave kimyasal kullanımı gerektirmeyen nitelikleriyle ne çıkan elektrokoagülasyon prosesi, Reaktif Red 195 boyarmaddesinin gideriminde elik elektrotların kullanımı neticesinde yüksek verim elde edilmesini sağlamıştır. Bu bakımdan tekstil endüstrisi atıksularının arıtımında başarılı bir işletme performansı ortaya koyması beklenmektedir. Aynı çalışmanın gerçek atıksu üzerinde farklı parametreler test edilerek optimize edilmesi önerilmektedir



5. KAYNAKLAR

- Akyol, A. (2012). Treatment of paint manufacturing wastewater by electrocoagulation. *Desalination*, 91-99, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.09.039>.
- Akyüz, S., Akyüz, T., & Akalın, E. (2010). Adsorption of isoniazid onto sepiolite–palygorskite group of clays: An IR study. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 1304-1307, <https://doi.org/10.1016/j.saa.2009.12.069>.
- Alinsafi, A., Khemis, M., Pons, M. N., Leclerc, J. P., Yaacoubi, A., Benhammou, A., & Nejmeddine, A. (2005). Electro-coagulation of reactive textile dyes and textile wastewater. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 44, 461-470, <https://doi.org/10.1016/j.cep.2004.06.010>.
- Andrade, S. L., Ruotolo, L., Rocha-Filhoa, R., Bocchi, N., Biaggio, S., Iniesta, J., & al., e. (2007). On the performance of Fe and Fe,F doped Ti–Pt/PbO₂ electrodes in the electrooxidation of the Blue Reactive 19 dye in simulated textile wastewater. *Chemosphere*, 2035-2043, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.10.028>.
- Arslan-Alaton, İ., Kabdaşlı, I., Vardar, B., & Tünay, O. (2009). Electrocoagulation of simulated reactive dyebath effluent with aluminum and stainless steel electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 1586-1594, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.09.004>.
- Avsar, Y., Kurt, U., & Gonullu, T. (2007). Comparison of classical chemical and electrochemical processes for treating rose processing wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 340-345, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.02.048>.
- Aygün, A. (2012). Tekstil endüstrisi reaktif ve dispers boya banyo atıksularının elektrokoagülasyon prosesi ile arıtımı: Yanıt yüzey yöntemi ile optimizasyon. Doktora tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 315861).
- Aytaç, E. (2011). Elektrokoagülasyon yöntemi kullanılarak tekstil atıksularının arıtımı. Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 283729).

- Baker, R. W. (2004). *Membrane technology and applications*. Second Edition, John Wiley Sons, Ltd., England.
- Balkan, R. (2006). Bentonit, kaolin ve sepiyolit in bazı organik molekülleri absorplamasının infrared incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 184087).
- Başer, İ., & İnancı, Y. (1990). *Boyarmadde Kimyası*. Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yayın 482 (2), 207.
- Bensadok, K., Benammar, S., Lapique, F., & Nezzal, G. (2008). Electrocoagulation of cutting oil emulsions using aluminium plate electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 423-430, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.06.121>.
- Berik, N. (2002). İşlenmiş ve işlenmemiş su ürünlerinin elektroforez yöntemi ile cinslerinin tanımı. Doktora Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 121193).
- Bisschops, I., & Spanjers, H. (2003). Literature review on textile wastewater characterisation. *Environmental Technology*, 24(11), 1399-1411, <https://doi.org/10.1080/09593330309385684>.
- BM. (2006). Human Development Report, United Nations Development Programme .
- Bozdoğan, A. (1984). Atık sulardaki tekstil boyarmaddeleri renginin devrettirilen koagülant (CaCO₃-MgCO₃) ile giderilmesi. Doktora Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 2199).
- Budak, A., & Gönen, M. (2014). Extraction of boric acid from colemanite mineral by supercritical carbon dioxide. *The Journal of Supercritical Fluids*, 183-189, <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2014.05.016>.
- Cameselle, C., Pazos, M., & Sanromán, M. A. (2005). Selection of an electrolyte to enhance the electrochemical decolourisation of indigo. Optimisation and scale-up. *Chemosphere*, 60, 1080-1086, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.01.018>.
- Carvalho, H. P., Huang, J., M., Z., Liu, G., Dong, L., & Liu, X. (2015). Improvement of Methylene Blue removal by electrocoagulation/banana peel adsorption coupling in a batch system. *Alexandria Engineering Journal*, 777-786, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.04.003>.

- Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 38, 11-41, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2003.10.006>.
- Chimeddorj, M. (2007). Farklı bentonitlerin nem alıcı (desikant) özelliklerinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 222377).
- Coughlin, M. F., K, K. B., Tepper, A., & Bishop, P. L. (1997). Characterization of aerobic azo dye-degrading bacteria and their activity in biofilms. *Water Science and Technology*, 215-220, [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00327-2](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00327-2).
- Daneshvar, N., Ashassi-Sorkhabi, H., & Tizpar, A. (2003). Decolorization of orange II by electrocoagulation method. *Separation and Purification Technology*, 31, 153-162, [https://doi.org/10.1016/S1383-5866\(02\)00178-8](https://doi.org/10.1016/S1383-5866(02)00178-8).
- Daneshvar, N., Oladegaragoze, A., & Djafarzadeh, N. (2006). Decolorization of basic dye solutions by electrocoagulation: An investigation of the effect of operational parameters. *Journal of Hazardous Materials*, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.08.033>.
- Demirbaş, Ö. (2006). Kil mineralleri yüzeyine bazı biyomoleküllerin immobilizasyonu ve elektrokinetik özellikleri. Doktora Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 177955).
- Devlet Planlama Teşkilatı. (2001). Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Raporu, Yayın No: 2627, Ankara.
- Durango-Usuga, P., Guzmán-Duque, F., Mosteo, R., V.Vazquez, M., Peñuela, G., & Torres-Palma, R. A. (2010). Experimental design approach applied to the elimination of crystal violet in water by electrocoagulation with Fe or Al electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 120-126, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.02.067>.
- Emamjomeh, M. M., & Sivakumar, M. (2009). Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes. *Journal of Environmental Management*, 1663-1679, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.12.011>.

- Erdik, E., Obalı, E., & Yüksekışık, N. (1998). *Denel Organik Kimya*. Ankara: Ankara Fen Fakültesi.
- Eremektar, G., Germirli, T., Babuna, F., Çeki, S., & Tünay, O. (1997). Tekstil Endüstrisi atıksularında inert KOİ - Örnek Uygulama. *Su Kirlenmesi Kontrolü Dergisi*, 7(2), 31-35, <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/202799>.
- Ergün, G. (2013). Bazı tekstil boyarmaddelerin sulu çözeltilerden elektrokoagülasyon ve ultrases yöntemlerini kullanarak giderimi. Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 341410).
- Eti Maden. (2019). <http://www.etimaden.gov.tr/> adresinden alındı
- Eyvaz, M., Kırilaroğlu, M., Aktaş, T. S., & Yüksel, E. (2009). The effects of alternating current electrocoagulation on dye removal from aqueous solutions. *Chemical Engineering Journal*, 153,16-22, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.05.028>.
- Ferda, G. (2006). Atıksulardaki tekstil boyarmaddeleri ve metal iyonlarının tekli ve ikili karışımlarının serbest ve tutuklanmış mikroorganizma sistemleri ile biyogideriminin kesikli ve sürekli Sistemlerde İncelenmesi. *Doktora Tezi*. Ankara: Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Feriancová, A., Pajtašová, M., Pecušová, B., & Ondrušová, D. (2019). The effect of modified Cu(II) kaolinite on interactions with rubberizing components. *Applied Clay Science*, 105313, <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105313>.
- Fernandes, A., Morão, A., Magrinho, M., Lopes, A., & Gonçalves, I. (2004). Electrochemical degradation of C. I. Acid Orange 7. *Dyes and Pigments*, 287-296, <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2003.11.008>.
- Galan, E. (1996). Properties and applications of palygorskite-sepiolite clays. *Clay minerals*, 32, 443-453, <https://doi.org/10.1180/claymin.1996.031.4.01>.
- Garcia-Segura, S., Eiband, M. M., Melo, J. V., & Martínez-Huitle, C. A. (2017). Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 267-299, <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.07.047>.

- Germirli, F., Tünay, O., & Orhon, D. (1989, Eylül 25-27). An overview of the textile industry in Turkey- Pollution profiles and treatability characteristics. *International Symposium on waster management problems in AGRO- Industries*. İstanbul, Türkiye: 22(9), 265-274.
- Golder, A. K., Hridaya, N., N., S. A., & Ray, S. (2005). Electrocoagulation of methylene blue and eosin yellowish using mild steel electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 134-140, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.06.032>.
- Grim, R. E. (1962). *Clay mineralogy*. New York: McGrawHill.
- Grøterud, O., & Smoczynski, L. (1986). Phosphorus removal from water by means of electrolysis. *Water Research*, 667-669, [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(86\)90032-1](https://doi.org/10.1016/0043-1354(86)90032-1).
- Gündüz, Z., & Atabey, M. (2019). Effects of Operational Parameters on the Decolourisation of Reactive Red 195 Dye from Aqueous Solutions by Electrochemical Treatment. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTROCHEMICAL SCIENCE*, 5868-5885, DOI: 10.20964/2019.06.37.
- Hamilton, W. R., Wooley, A. R., & Bishop, A. C. (1987). *Minerals. Rocks and Fossils*, Country Life Books, 4th ed., p. 86.
- Holt, P. K., Barton, G. W., & Mitchell, C. A. (2005). The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. *Chemosphere*, 1-6, 355-367, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.10.023>.
- Hurlbut, C. S. (1971). *Dana's Manual of Mineralogy*. New York: 426, 18th ed.: John Wiley & Sons.
- Hussin, F., Abnisa, F., Issabayeva, G., & Arouaa, M. K. (2017). Removal of lead by solar-photovoltaic electrocoagulation using novel perforated zinc electrode. *Journal of Cleaner Production*, 206-216, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.096>.
- İlhan, F. (2006). *"Sızıntı sularının elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılması"*. Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 201552).

- İlhan, F., Kurt, U., Apaydin, Ö., & Gönüllü, M. T. (2008). "Treatment of leachate by electrocoagulation using aluminum and iron electrodes". *Journal of Hazardous Materials*, 154, 381-389, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.035>.
- İlhan, F., Kurt, U., Apaydin, Ö., Arslankaya, E., & 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.
- Jiang, J.-Q., Graham, N., André, C., Kelsall, G. H., & Brandon, N. (2002). Laboratory study of electro-coagulation–flotation for water treatment. *Water Research*, 36, 4064-4078, [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00118-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00118-5).
- Johnston, C. T., Wang, S., & Chem, S. L. (2002). Measuring the surface area of aluminum hydroxide adjuvant. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 1702-1706, <https://doi.org/10.1002/jps.10166>.
- Kabdaşlı, I., Arslan, T., Ölmez-Hancı, T., Arslan-Alaton, İ., & Tünay, O. (2009). Complexing agent and heavy metal removals from metal plating effluent by electrocoagulation with stainless steel electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 838-845, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.10.065>.
- Kapdan, İ. A., & Kargı, F. (2000). Atıksulardan Tekstil Boyar Maddesinin Coriolus Versicolor ile Dolgulu Kolon Reaktörde Giderimi. Endüstriyel Kirlenme Kontrolü Sempozyumu, İ.T.Ü., İstanbul, 1-7.
- Kaplan, F. (2007). Zeytin kara suyundaki toksik fenolik bileşiklerin, farklı karbon elektrotlar kullanılarak, elektro-fenton yöntemi ile parçalanmaları. Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 212494).
- Karadağ, E. K. (2009). Elektrokoagülasyon yöntemi ile karışım halindeki boyar maddelerin renk giderimi . Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 245222).
- Karagöz, Ö. (2012). Atık üleksit ile SO₂ tutulmasının optimizasyon ve kinetiğinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 322570).

- Khandegar, V., & Saroha, A. K. (2013). Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent – A review. *Journal of Environmental Management*, 128, 949-963, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.043>.
- Khemis, M., Leclerc, J.-P., Tanguy, G., Valentin, G., & Lapique, F. (2006). Treatment of industrial liquid wastes by electrocoagulation: Experimental investigations and an overall interpretation model. *Chemical Engineering Science*, 61, 3602-3609, <https://doi.org/10.1016/j.ces.2005.12.034>.
- Kim, T. H., Park, C., Shin, E. B., & S., K. (2002). Decolorization of disperse and reactive dyes by continuous electrocoagulation process. *Desalination*, 150, 165-175, [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00941-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00941-4).
- Kırlaroğlu, M. (2008). Tekstil atık sularının farklı güç kaynakları kullanılarak elektrokimyasal arıtımında optimum şartların araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 179253).
- Kobyas, M., Can, O. T., & Bayramoğlu, M. (2003). "Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes". *Journal of Hazardous Materials*, 163-178, [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(03\)00102-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(03)00102-X).
- Kobyas, M., Can, O. T., Demirbaş, E., & Bayramoğlu, M. (2006). Treatment of the textile wastewater by combined electrocoagulation. *Chemosphere*, 62, 181-187, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.05.022>.
- Kobyas, M., Ulu, F., Gebologlu, U., Demirbas, E., & Öncel, M. S. (2011). Treatment of potable water containing low concentration of arsenic with electrocoagulation: Different connection modes and Fe–Al electrodes. *Separation and Purification Technology*, 283-293, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2010.12.018>.
- Kocaer, F. O., & Alkan, U. (2002). Boyarmadde İçeren Tekstil Atıksularının Arıtım Alternatifleri. *Uludağ Mühendislik Mimarlık Fakültesi*, 51-52, <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/202895>.
- Koçyiğit, H. (2008). Tekstil Atıksularındaki Reaktif Boyaların (Reaktif Mavi 19, Reaktif Kırmızı 198) Ardışık Kesikli Reaktörlerle Arıtılabilirliğinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 269855).

- Konuk, K. (2014). Çelik Elektrotların Kullanıldığı Elektrokoagülasyon Yöntemi İle Florür Giderimi. Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No.363641).
- Korkmaz, E. (2008). Eskişehir yöresi sepiyoliti'nin zeta potansiyellerinin tayini. Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No.177393).
- Kumar, N. S., & Goel, S. (2010). Factors influencing arsenic and nitrate removal from drinking water in a continuous flow electrocoagulation (EC) process. *Journal of Hazardous Materials*, 173, 528–533, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.08.117>.
- Leonardi, S. A., Zanuttini, M. A., Miróa, E. E., & Milta, V. G. (2017). Catalytic paper made from ceramic fibres and natural ulexite. Application to diesel particulate removal. *Chemical Engineering Journal*, 394-403, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.02.013>.
- López, A., Valero, D., García-Cruz, L., Sáez, A., García-García, V., Expósito, E., & Montiel, V. (2017). Characterization of a new cartridge type electrocoagulation reactor (CTECR) using a three-dimensional steel wool anode. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 93-98, <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2016.10.036>.
- Mahmad, M. K., Rozainy, M. A., Abustan, İ., & Baharun, N. (2016). Electrocoagulation Process by Using Aluminium and Stainless Steel Electrodes to Treat Total Chromium, Colour and Turbidity. *Procedia Chemistry*, 681-686, <https://doi.org/10.1016/j.proche.2016.03.070>.
- Mahmoud, M. S., Farah, J. Y., & Farrag, T. E. (2013). Enhanced removal of Methylene Blue by electrocoagulation using iron electrodes. *Egyptian Journal of Petroleum*, 211-216, <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2012.09.013>.
- Martínez-Huitle, C. A., & Brillas, E. (2009). Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods: A general review. *Applied Catalysis B: Environmental*, 105-145, <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2008.09.017>.

- Mercimek, H. A. (2007). *Trametes versicolor*'ın Tekstil Boyalarının Gideriminde Kullanım Olanakları. Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 212571).
- Merzouk, B., Gourich, B., Madanic, K., Vial, C., & Sekkie, A. (2011). Removal of a disperse red dye from synthetic wastewater by chemical coagulation and continuous electrocoagulation. A comparative study. *Desalination*, 246-253, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.01.029>.
- Merzouk, B., Gourich, B., Sekki, A., Madani, K., Vial, C., & Barkaoui, M. (2009). "Studies on the decolorization of textile dye wastewater by continuous electrocoagulation process". *Chemical Engineering Journal*, 207-214, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.10.018>.
- Mollah, M. Y., Morkovsky, P., Gomes, J. A., Kesmez, M., Parga, J., & Cocke, D. L. (2004). "Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation". *Journal of Hazardous Materials*, 199-210, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.08.009>.
- Mollah, M. Y., Schennach, R., Parga, J. R., & Cocke, D. (2001). Electrocoagulation (EC) — science and applications. *Journal of Hazardous Materials*, 29-41, [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00176-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00176-5).
- Moreno-Casillas, H. A., Cocke, D. L., Gomes, J. A., Morkovsky, P., Parga, J. R., & Peterson, E. (2007). Electrocoagulation mechanism for COD removal. *Separation and Purification Technology*, 204-211, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.01.031>.
- Mountassir, Y., Benyaich, A., Berçot, P., & Rezrazi, M. (2015). Potential use of clay in electrocoagulation process of textile wastewater: Treatment performance and flocs characterization. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2900-2908, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.10.004>.
- MTA. (2019). <http://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/uleksit adresinden alındı>
- Nandi, B. K., & Patel, S. (2017). Effects of operational parameters on the removal of brilliant green dye from aqueous solutions by electrocoagulation. *Arabian Journal of Chemistry*, 2961-2968, <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.11.032>.

- O'Neill, C., Hawkes, F. R., Hawkes, D., Esteves, S., & Wilcox, S. (2000). Anaerobic–aerobic biotreatment of simulated textile effluent containing varied ratios of starch and azo dye. *Water Research*, 2355-2361, [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00395-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00395-4).
- Orkun, O. M., & Kuleyin, A. (2007). Elektrokoagülasyon Yöntemi Kullanılarak Kristal Viyole Boyar Maddesinin Gideriminin İncelenmesi. 7. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi Yaşam Çevre Teknolojisi, İzmir, 766 – 768.
- Özden, M. (2016). *Boyarmaddelerin elektrokoagülasyon ile arıtımının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 432883).
- Özyurt, A. (2018). Tekstil Endüstrisi Atıksuyunun Elektrokoagülasyon ve Kimyasal Koagülasyon Yöntemleriyle Arıtılabilirliğinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 507776).
- Pérez-Calderón, J., Santos, M. V., & Zaritzky, N. (2017). Reactive RED 195 dye removal using chitosan coacervated particles as bio-sorbent: Analysis of kinetics, equilibrium and adsorption mechanisms. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6749-6760, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.10.039>.
- Pilatin, S. (2004). Beyaz Çürükçül Funguslar ile Tekstil Boyarmaddelerinin Renginin Giderimi. Doktora Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 198714).
- Rajkumar, D., Song, B. J., & Kim, J. G. (2007). Electrochemical degradation of Reactive Blue 19 in chloride medium for the treatment of textile dyeing wastewater with identification of intermediate compounds. *Dyes and Pigments*, 1-7, <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2005.07.015>.
- Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R., & Nigam, P. (2001). Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresource Technology*, 77, 247-255, [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00080-8](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00080-8).

- Rozzi, A., Antonelli, M., & Arcari, M. (1999). Membrane treatment of secondary textile effluents for direct reuse. *Water Science and Technology*, 409-416, [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00524-7](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00524-7).
- Saraç, A. S. (1995). *Metal Kaplama ve Elektrokimyasal Teknolojiler*. Çağlayan Kitabevi.
- Secula, M. S., Crețescu, Î., & Petrescu, S. (2011). An experimental study of indigo carmine removal from aqueous solution by electrocoagulation. *Desalination*, 227-235, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.04.031>.
- Secula, M. S., Cretescu, I., Cagnon, B., Manea, L. R., Stan, C. S., & Breaban, L. B. (2013). "Fractional Factorial Design Study on the Performance of GAC-Enhanced Electrocoagulation Process Involved in Color Removal from Dye Solutions ". *Materials*, 6, 2723-2746, doi:10.3390/ma6072723.
- Seydioğlu, G. (2009). Bitkisel Atıkların Granül Aktif Karbon Üretiminde Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 256352).
- Somayajula, A., Asaithambi, P., Modepalli, S., & Matheswaran, M. (2012). Sono-electrochemical oxidation for decolorization of Reactive Red 195. *Ultrasonics Sonochemistry*, 208-211.
- Song, S., He, Z., Qiu, J., Xu, L., & Chen, J. (2007). Ozone assisted electrocoagulation for decolorization of C.I. Reactive Black 5 in aqueous solution: An investigation of the effect of operational parameters. *Separation and Purification Technology*, 238-245, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2006.12.013>.
- Şengil, A., & Özacar, M. (2009). CI Reactive Black 5'in sulu çözeltide sakrifik demir elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyonla çözülmesi. *Tehlikeli Maddeler Dergisi*, 1369-1356, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.04.100>.
- Tanzer, T. (2004). Katyonik Alkiltrimetilamonyum Bromür Sürfaktanlar ile C.I. Reaktif Orange 16 Etkileşimi. Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 183416).
- Tekin, İ. (2018). *Elektrokoagülasyon ile metilen mavisi gideriminin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 513868).

- Trompette, J. L., & Vergnes, H. (2009). On the crucial influence of some supporting electrolytes during electrocoagulation in the presence of aluminum electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 163, 1282-1288, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.07.148>.
- Tünay, O., Kabdaşlı, I., Orhon, D., & Eremektar, G. (1996). Color Removal From Textile Wastewater. *Water Science And Technology*, 34,9-16, [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(96\)00815-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(96)00815-3).
- Tünay, O., Metin, E., Kabdaşlı, I., & Ölmez-Hancı, T. (2010). Elektrokoagülasyon prosesi ile üretilen arıtma çamurlarının. *İtü dergisi*, 49-56, http://www.skatmk.itu.edu.tr/e-Dergi/Cilt20/Sayi1/O_Tunay.pdf.
- Uyanık, S., & Çelikel, D. C. (2019). Türk Tekstil Endüstrisi Genel Durumu. *Journal of Technical Sciences*, 32-41, <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/649677>.
- Uysal, C. (2011). Remazol Turkuaz Mavisi Boyarmaddesinin Sulu Çözeltilerden Elektrokoagülasyon Yöntemi İle Giderimi. Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 290183).
- Uz, B. (2003). *Mineraller*. İstanbul: Kristalografi–Mineraloji, III. Baskı, Birsen Yayınevi, 249-434.
- Vardar, B. (2006). Tekstil endüstrisi reaktif boya banyolarının elektrokimyasal yöntemler ile arıtımı. Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 223587).
- Verma, A. K. (2017). Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation employing Fe-Al composite electrode. *Journal of Water Process Engineering*, 168-172, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.11.001>.
- Wei, M.-C., Wang, K.-S., Huang, C.-L., Chiang, C.-W., Chang, T.-J., Lee, S.-S., & Chang, S.-H. (2012). Improvement of textile dye removal by electrocoagulation with low-cost steel wool cathode reactor. *Chemical Engineering Journal*, 37-44, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.03.086>.
- Won, S. W., Han, M. H., & Yun, Y.-S. (2008). Different binding mechanisms in biosorption of reactive dyes according to their reactivity. *Water Research*, 4847-4855, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.09.003>.

- Yakartepe, M. (1997). *Genel Tekstil Terbiyesi*. Tekstil Konfeksiyon Araştırma Merkezi Yayınları, 520-600.
- Yıldırım, Ö. (2007). Kağıt endüstrisi atıksularının elektro-fenton yöntemiyle arıtılabilirliğinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 202985).
- Yılmaz, Z. (2004). Hidrotermal yöntemlerle kaolin'in dekompozisyonu. Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 149881).
- Zaied, M., & Bellakhal, N. (2009). Electrocoagulation treatment of black liquor from paper industry. *Journal of Hazardous Materials*, 995-1000, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.07.115>.
- Zhang, R., Yuana, D.-X., & Liu, B.-M. (2015). Kinetics and products of ozonation of C.I. Reactive Red 195 in a semi-batch reactor. *Chinese Chemical Letters*, 93-96, <https://doi.org/10.1016/j.cclet.2014.10.024>.



EKLER

EKLER

EK A: Elektrokoagülasyon Prosesi Deneysel Çalışma Verileri

Tablo A. 1: C_0 : 50 mg/L, j : 20 mA/cm², pH₀: 5,5

t (dk)	pH	T (°C)	S (mS/cm)	V (volt)	J (mA/cm ²)	A (abs)	C (mg/L)	Verim (%)
0	5,5	20,5	4,79	30,7	20	-	50	-
1	6,8	20,8	3,21	30,2	20	0,729	38,52	23,0
3	7,4	22,1	3,25	29,2	20	0,023	1,17	97,7
5	8,4	23,7	3,20	28,5	20	0,010	0,48	99,0
10	10,7	26,4	3,20	26,8	20	0,018	0,90	98,2
15	11,1	29,7	3,21	25,2	20	0,014	0,69	98,6
20	11,3	31,4	3,24	24,1	20	0,027	1,38	97,2
25	11,4	33,3	3,34	23,3	20	0,019	0,96	98,1
30	11,5	35,2	3,38	22,8	20	0,022	1,12	97,8

Tablo A. 2: C_0 : 100 mg/L, j : 20 mA/cm², pH₀: 5,5

t (dk)	pH	T (°C)	S (mS/cm)	V (volt)	J (mA/cm ²)	A (abs)	C (mg/L)	Verim (%)
0	5,5	21,4	4,75	30,7	20	-	100	-
1	5,8	23,2	3,17	30,7	20	1,454	76,88	23,1
3	6,3	24,9	3,25	29,4	20	0,038	1,96	98,0
5	8,5	26,5	3,29	28,8	20	0,009	0,43	99,6
10	10,2	30,1	3,29	27,0	20	0,009	0,43	99,6
15	11,0	33,1	3,39	24,1	20	0,009	0,43	99,6
20	11,1	36,2	3,39	23,3	20	0,022	1,12	98,9
25	11,4	38,1	3,38	22,9	20	0,018	0,90	99,1
30	11,4	40,6	3,39	22,2	20	0,011	0,53	99,5

Tablo A. 3: C_0 :250 mg/L, j : 20 mA/cm², pH₀: 5,5

t (dk)	pH	T (°C)	S (mS/cm)	V (volt)	J (mA/cm ²)	A (abs)	C (mg/L)	Verim (%)
0	5,5	20,5	4,83	30,6	20	-	250	-
1	7,1	21,4	3,24	30,6	20	3,676	194,45	22,2
3	10,1	22,7	3,25	30,6	20	0,113	5,93	97,6
5	10,1	24,4	3,24	29,7	20	0,033	1,27	99,5
10	11,3	27,0	3,29	26,8	20	0,013	0,64	99,7
15	11,4	30,4	3,45	25,0	20	0,014	0,69	99,7
20	11,5	32,9	3,46	23,8	20	0,014	0,69	99,7
25	11,7	35,5	3,52	22,9	20	0,010	0,48	99,8
30	11,7	37,1	3,60	22,0	20	0,007	0,32	99,9

Tablo A. 4: C₀: 50 mg/L, j: 10 mA/cm², pH₀: 5,5

t (dk)	pH	T (°C)	S (mS/cm)	V (volt)	J (mA/cm ²)	A (abs)	C (mg/L)	Verim (%)
0	5,5	21,3	3,90	24,6	10	-	50	-
1	9,5	22,3	2,62	24,2	10	0,584	30,85	38,3
3	9,9	22,9	2,68	24,0	10	0,157	8,26	84,5
5	10,3	23,8	2,74	23,9	10	0,026	1,33	97,3
10	10,6	25,4	2,77	23,3	10	0,003	0,11	99,8
15	10,7	26,9	2,73	22,7	10	0,011	0,53	98,9
20	10,7	28,1	2,75	22,2	10	0,003	0,11	99,8
25	10,8	29,6	2,74	21,8	10	0,009	0,43	99,1
30	10,9	30,6	2,73	21,6	10	0,026	2,33	97,3

Tablo A. 5: C₀: 50 mg/L, j: 30 mA/cm², pH₀: 5,5

t (dk)	pH	T (°C)	S (mS/cm)	V (volt)	J (mA/cm ²)	A (abs)	C (mg/L)	Verim (%)
0	5,5	22,0	5,77	27,5	30	-	50	-
1	10,4	26,7	4,05	27,2	30	0,367	19,37	61,3
3	10,6	28,4	3,98	26,6	30	0,009	0,43	99,1
5	10,8	30,0	4,02	25,9	30	0,009	0,43	99,1
10	10,9	32,7	4,02	23,8	30	0,011	0,53	98,9
15	11,1	35,4	4,16	22,4	30	0,010	0,48	99,0
20	11,2	37,5	4,09	21,3	30	0,022	1,12	97,8
25	11,2	39,5	4,21	20,6	30	0,039	2,02	96,0
30	11,2	41,5	4,18	20,1	30	0,011	0,53	98,9

Tablo A. 6: C₀: 50 mg/L, J:20 mA/cm², pH₀: 3,0

t (dk)	pH	T (°C)	S (mS/cm)	V (volt)	J (mA/cm ²)	A (abs)	C (mg/L)	Verim (%)
0	3	23,3	4,59	30,5	20	-	50	-
1	4,0	23,8	2,81	30,4	20	0,597	31,54	36,9
3	5,5	25,2	2,78	30,0	20	0,034	1,75	96,5
5	5,8	26,6	2,81	29,5	20	0,004	0,16	99,7
10	5,6	29,2	2,78	27,8	20	0,005	0,22	99,6
15	5,9	32,2	2,68	26,6	20	0,019	0,96	99,1
20	6,3	33,8	2,68	25,6	20	0,014	0,69	98,6
25	6,7	36,0	2,72	24,7	20	0,029	1,49	97,0
30	9,7	39,0	2671	24,1	20	0,011	0,53	98,9

Tablo A. 7: C₀: 50 mg/L, j: 20 mA/cm², pH₀: 7,0

t (dk)	pH	T (°C)	S (mS/cm)	V (volt)	J (mA/cm ²)	A (abs)	C (mg/L)	Verim (%)
0	7	22,5	4,63	28,4	20	-	50	-
1	6,3	23,4	3,24	27,6	20	0,504	26,62	48,8
3	6,7	25,1	3,17	27,0	20	0,012	0,59	98,8
5	10,0	25,9	3,17	26,4	20	0,017	0,85	98,3
10	10,5	28,6	3,20	24,7	20	0,010	0,48	99,0
15	10,9	30,3	3,30	23,6	20	0,012	0,59	98,8
20	11,1	32,4	3,36	22,5	20	0,012	0,59	98,8
25	11,2	34,2	3,31	21,7	20	0,003	0,11	99,8
30	11,3	35,8	3,38	21,4	20	0,005	0,22	99,6

Tablo A. 8: C₀: 50 mg/L, j: 20 mA/cm², pH₀: 8,5

t (dk)	pH	T (°C)	S (mS/cm)	V (volt)	J (mA/cm ²)	A (abs)	C (mg/L)	Verim (%)
0	8,5	20,8	4,56	28,5	20	-	50	-
1	8,6	21,2	3,13	27,7	20	0,436	23,02	54,0
3	7,0	22,6	3,17	27,4	20	0,005	0,22	99,6
5	7,5	23,9	3,17	26,6	20	0,003	0,11	99,8
10	10,6	25,9	3,20	24,8	20	0,003	0,11	99,8
15	10,9	28,7	3,22	23,6	20	0,031	1,59	96,8
20	11,0	30,7	3,31	22,5	20	0,016	0,80	98,4
25	11,1	32,8	3,23	21,7	20	0,007	0,32	99,4
30	11,2	34,8	3,35	21,2	20	0,017	0,85	98,3

EK B: Elektrokoagülasyon/Adsorpsiyon Prosesi Deneysel Çalışma Verileri**Tablo B. 1:** C_0 : 50 mg/L, M: 1gr/L Kaolinit, j: 20 mA/cm², pH₀: 5,5

t (dk)	pH	T (°C)	S (mS/cm)	V (volt)	J (mA/cm ²)	M (gr/L)	A (abs)	C (mg/L)	Verim (%)
0	5,5	23,3	4,76	30,7	20	1		50	0
1	6,4	23,9	3,25	29,9	20	1	0,665	35,14	29,7
3	6,3	25,3	3,25	29,1	20	1	0,008	0,38	99,3
5	6,4	26,6	3,20	28,3	20	1	0,014	0,69	98,6
10	9,9	28,5	3,32	26,3	20	1	0,015	0,75	98,5
15	10,6	31,2	3,19	24,7	20	1	0,000	0,00	100
20	10,8	34,1	3,23	23,6	20	1	0,005	0,22	99,6
25	11,0	35,2	3,24	22,9	20	1	0,014	0,69	98,6
30	11,1	37,1	3,29	22,3	20	1	0,014	0,69	98,6

t (dk)	pH	T (°C)	S (mS/cm)	V (volt)	J (mA/cm ²)	M (gr/L)	A (abs)	C (mg/L)	Verim (%)
0	5,5	22,0	4,65	30,8	20	1	-	100	-
1	5,6	23,5	3,15	30,8	20	1	2,928	77,41	22,59
3	6,2	25,1	3,19	30,8	20	1	0,018	0,90	99,1
5	9,5	26,7	3,23	28,9	20	1	0,022	1,12	98,88
10	10,3	30,1	3,26	26,5	20	1	0,011	0,53	99,47
15	10,8	32,4	3,22	24,9	20	1	0,006	0,27	99,73
20	10,9	35,0	3,28	23,7	20	1	0,006	0,27	99,73
25	11,0	36,0	3,29	22,9	20	1	0,009	0,43	99,57
30	11,1	39,0	3,30	22,4	20	1	0,009	0,43	99,57

Tablo B. 2: C_0 : 100 mg/L, M: 1gr/L Kaolinit, j: 20 mA/cm², pH₀: 5,5**Tablo B. 3:** C_0 : 250 mg/L, M: 1gr/L Kaolinit, j: 20 mA/cm², pH₀: 5,5

t (dk)	pH	T (°C)	S (mS/cm)	V (volt)	J (mA/cm ²)	M (gr/L)	A (abs)	C (mg/L)	Verim (%)
0	5,5	21,5	4,73	30,8	20	1	-	250	-
1	6,8	23,1	3,26	30,2	20	1	4,004	211,8	15,3
3	6,8	24,6	3,28	29,2	20	1	0,232	12,23	95,1
5	9,8	26,5	3,31	28,4	20	1	0,024	1,22	99,5
10	10,9	29,0	3,32	26,2	20	1	0,012	0,59	99,8
15	11,3	32,3	3,38	24,5	20	1	0,009	0,43	99,8
20	11,3	35,3	3,44	23,1	20	1	0,009	0,43	99,8

25	11,5	36,9	3,52	223	20	1	0,005	0,22	99,9
30	11,6	40,0	3,50	21,7	20	1	0,004	0,16	99,9

Tablo B. 4: C₀: 50 mg/L, M: 1gr/L Sepiyolit, j: 20 mA/cm², pH₀: 5,5

t (dk)	pH	T (°C)	S (mS/cm)	V (volt)	J (mA/cm ²)	M (gr/L)	A (abs)	C (mg/L)	Verim (%)
0	5,5	23,3	4,77	27,7	20	1		50	0
1	7,0	24,1	3,24	26,8	20	1	0,690	36,46	27,1
3	6,9	25,9	3,24	26,7	20	1	0,012	0,59	98,83
5	7,1	27,3	3,20	26,7	20	1	0,009	0,43	99,1
10	9,1	28,9	3,20	25,0	20	1	0,010	0,48	99,0
15	10,6	31,5	3,20	23,9	20	1	0,010	0,48	99,0
20	10,8	34,0	3,20	23,1	20	1	0,007	0,32	99,4
25	10,9	35,9	3,24	22,5	20	1	0,004	0,16	99,7
30	11,0	36,9	3,32	22,0	20	1	0,006	0,27	99,5

Tablo B. 5: C₀: 100 mg/L, M: 1gr/L Sepiyolit, j: 20 mA/cm², pH₀: 5,5

t (dk)	pH	T (°C)	S(mS/cm)	V(volt)	j(mA/cm ²)	M(gr/L)	A(abs)	C(mg/L)	%Verim
0	5,5	21,6	4,70	30,8	20	1	-	100	-
1	4,0	23,2	3,24	30,8	20	1	1,064	56,25	43,75
3	5,5	24,7	3,22	30,8	20	1	0,042	2,17	97,83
5	5,8	26,1	3,24	28,6	20	1	0,026	1,33	98,67
10	5,8	29,1	3,24	26,5	20	1	0,009	0,43	99,57
15	5,9	32,4	3,24	25,0	20	1	0,008	0,38	99,62
20	10,8	35,2	3,20	23,9	20	1	0,006	0,27	99,73
25	11,0	37,2	3,20	23,1	20	1	0,005	0,22	99,78
30	11,1	39,1	3,30	22,5	20	1	0,005	0,22	99,78

Tablo B. 6: C₀: 250 mg/L, M: 1gr/L Sepiyolit, j: 20 mA/cm², pH₀: 5,5

t (dk)	pH	T (°C)	S (mS/cm)	V (volt)	J (mA/cm ²)	M (gr/L)	A (abs)	C (mg/L)	Verim (%)
0	5,5	21,5	4,78	30,0	20	1	-	250	-
1	7,3	22,8	3,30	28,8	20	1	3,704	195,93	21,6
3	9,0	24,4	3,30	27,9	20	1	0,188	9,90	96,0
5	9,6	26,2	3,24	27,3	20	1	0,014	0,69	99,7
10	10,7	26,4	3,32	25,4	20	1	0,017	0,85	99,7
15	11,0	32,0	3,32	24,1	20	1	0,013	0,64	99,7
20	11,4	34,8	3,50	22,7	20	1	0,005	0,22	99,9

25	11,6	37,9	3,52	21,8	20	1	0,005	0,22	99,9
30	11,8	40,3	3,62	21,0	20	1	0,014	0,69	99,7

Tablo B. 7: C₀: 50 mg/L, M: 1gr/L Üleksit, j: 20 mA/cm², pH₀: 5,5

t (dk)	pH	T (°C)	S (mS/cm)	V (volt)	J (mA/cm ²)	M (gr/L)	A (abs)	C (mg/L)	Verim (%)
0	5,5	19,6	4,89	30,6	20	1		50	0
1	9,5	20,3	3,31	30,6	20	1	0,719	37,99	24,0
3	9,5	21,8	3,34	30,6	20	1	0,014	0,69	98,6
5	9,7	23,2	3,27	29,7	20	1	0,005	0,22	99,6
10	10,0	25,7	3,29	27,2	20	1	0,009	0,43	99,1
15	10,4	28,6	3,30	25,3	20	1	0,007	0,32	99,4
20	10,8	31,6	3,37	23,9	20	1	0,009	0,43	99,1
25	11,1	33,2	3,43	22,8	20	1	0,009	0,43	99,1
30	11,2	35,6	3,57	22,0	20	1	0,013	0,64	98,7

Tablo B. 8: C₀: 100 mg/L, M: 1gr/L Üleksit, j: 20 mA/cm², pH₀: 5,5

t (dk)	pH	T (°C)	S (mS/cm)	V (volt)	J (mA/cm ²)	M (gr/L)	A (abs)	C (mg/L)	Verim (%)
0	5,5	21,8	4,67	30,8	20	1	-	100	-
1	9,5	23,1	3,22	30,7	20	1	1,42	75,08	24,92
3	9,5	24,6	3,24	29,8	20	1	0,023	1,17	98,83
5	9,7	26,1	3,28	28,9	20	1	0,005	0,22	99,78
10	10,2	29,3	3,28	26,6	20	1	0,010	0,48	99,52
15	10,5	32,7	3,26	24,6	20	1	0,004	0,16	99,84
20	10,7	34,5	3,38	23,4	20	1	0,002	0,058	99,94
25	10,8	37,3	3,40	22,5	20	1	0,007	0,32	99,68
30	10,9	39,6	3,42	21,9	20	1	0,010	0,48	99,52

Tablo B. 9: C₀: 250 mg/L, M: 1gr/L Üleksit, j: 20 mA/cm², pH₀: 5,5

t (dk)	pH	T (°C)	S (mS/cm)	V (volt)	J (mA/cm ²)	M (gr/L)	A (abs)	C (mg/L)	Verim (%)
0	5,5	21,1	4,82	30,9	20	1	-	250	-
1	6,9	22,2	3,30	30,9	20	1	3,772	199,53	20,2
3	7,8	24,1	3,30	30,9	20	1	0,307	16,2	93,5
5	9,8	25,5	3,33	28,3	20	1	0,020	1,01	99,6
10	10,1	28,3	3,34	26,1	20	1	0,007	0,32	99,9
15	10,4	31,6	3,50	24,4	20	1	0,008	0,37	99,9

20	10,7	33,7	3,55	23,2	20	1	0,005	0,22	99,9
25	11,0	36,6	3,56	22,3	20	1	0,002	0,058	99,9
30	11,1	38,8	3,60	21,6	20	1	0,005	0,22	99,9

Tablo B. 10: C_0 : 100 mg/L, M: 1gr/L Kolemanit, j: 20 mA/cm², pH₀: 5,5

t (dk)	pH	T (°C)	S (mS/cm)	V (volt)	J (mA/cm ²)	M (gr/L)	A (abs)	C (mg/L)	Verim (%)
0	5,5	21,2	4,67	30,8	20	1	-	100	-
1	9,4	22,3	3,24	30,8	20	1	1,504	79,53	20,47
3	9,5	23,8	3,26	30,8	20	1	0,021	1,063	98,94
5	9,8	25,5	3,22	28,2	20	1	0,006	0,27	99,73
10	10,3	29,1	3,23	26,7	20	1	0,005	0,22	99,78
15	10,9	31,5	3,25	24,9	20	1	0,010	0,48	99,52
20	11,2	33,8	3,33	23,8	20	1	0,005	0,22	99,78
25	11,4	36,5	3,39	22,8	20	1	0,003	0,11	99,89
30	11,4	38,2	3,43	22,0	20	1	0,006	0,27	99,73

Tablo B. 11: C_0 : 250 mg/L, M: 1gr/L Kolemanit, j: 20 mA/cm², pH₀: 5,5

t (dk)	pH	T (°C)	S (mS/cm)	V (volt)	J (mA/cm ²)	M (gr/L)	A (abs)	C (mg/L)	Verim (%)
0	5,5	21,0	4,68	30,0	20	1	-	250	0
1	9,3	22,3	3,28	29,2	20	1	3,94	208,42	16,6
3	9,7	24,2	3,33	28,3	20	1	0,113	5,93	97,6
5	10,0	25,8	3,34	27,4	20	1	0,015	0,75	99,7
10	10,8	29,5	3,41	25,4	20	1	0,007	0,32	99,9
15	11,2	31,6	3,41	23,8	20	1	0,009	0,43	99,8
20	11,4	34,5	3,46	22,5	20	1	0,006	0,27	99,9
25	11,6	36,7	3,55	21,6	20	1	0,008	0,37	99,9
30	11,7	38,7	3,56	20,9	20	1	0,009	0,43	99,8

Tablo B. 12: C_0 : 50 mg/L, M: 1 gr/L Kolemanit, j: 20 mA/cm², Başlangıç pH₀: 5,5

t (dk)	pH	T (°C)	S (mS/cm)	V (volt)	J (mA/cm ²)	M (gr/L)	A (abs)	C (mg/L)	Verim (%)
0	5,5	20,4	4,77	30,7	20	1		50	0
1	9,5	21,1	3,24	30,7	20	1	0,738	39,0	22,0
3	9,4	22,6	3,24	30,7	20	1	0,012	0,59	98,8
5	9,8	23,9	3,21	28,4	20	1	0,005	0,22	99,6
10	10,4	26,3	3,21	26,0	20	1	0,005	0,22	99,6

15	10,8	28,8	3,29	24,5	20	1	0,004	0,16	99,7
20	10,9	31,2	3,27	23,4	20	1	0,006	0,27	99,5
25	10,8	33,2	3,27	22,7	20	1	0,014	0,69	98,6
30	10,8	35,3	3,35	22,2	20	1	0,009	0,43	99,1

Tablo B. 13: C₀: 50 mg/L, M: 2 gr/L Kolemanit, j: 20 mA/cm², Başlangıç pH₀: 5,5

t (dk)	pH	T (°C)	S (mS/cm)	V (volt)	J (mA/cm ²)	M (gr/L)	A (abs)	C (mg/L)	Verim (%)
0	5,5	22,7	4,80	29,4	20	2		50	0
1	9,3	22,9	3,28	28,6	20	2	0,689	36,41	27,2
3	9,4	24,6	3,28	27,8	20	2	0,011	0,53	98,9
5	9,6	25,7	3,24	27,3	20	2	0,002	0,058	99,9
10	10,0	28,2	3,21	25,4	20	2	0,014	0,69	98,6
15	10,6	30,9	3,27	23,9	20	2	0,004	0,16	99,7
20	11,1	32,8	3,38	22,6	20	2	0,015	0,75	98,5
25	11,2	34,1	3,36	21,8	20	2	0,006	0,27	99,5
30	11,4	35,6	3,48	20,9	20	2	0,008	0,38	99,3

Tablo B. 14 C₀: 50 mg/L, M: 4 gr/L Kolemanit, j: 20 mA/cm², pH₀: 5,5

t (dk)	pH	T (°C)	S (mS/cm)	V (volt)	J (mA/cm ²)	M (gr/L)	A (abs)	C (mg/L)	Verim (%)
0	5,5	19,2	4,82	30,7	20	4		50	0
1	9,6	19,6	3,20	30,7	20	4	0,660	34,87	30,1
3	9,7	21,3	3,33	28,5	20	4	0,015	0,75	98,5
5	9,9	22,6	3,27	27,8	20	4	0,006	0,27	99,5
10	10,4	25,3	3,27	26,3	20	4	0,008	0,38	99,3
15	10,7	28,4	3,31	24,6	20	4	0,008	0,38	99,3
20	11,1	30,3	3,32	23,4	20	4	0,006	0,27	99,5
25	11,1	32,4	3,36	22,5	20	4	0,006	0,27	99,5
30	11,2	34,5	3,44	21,9	20	4	0,014	0,69	98,6

Tablo B. 15: C₀: 50 mg/L, M: 1gr/L Kaolinit, j: 20 mA/cm², pH₀: 3,0

t (dk)	pH	T (°C)	S (mS/cm)	V (volt)	J (mA/cm ²)	M (gr/L)	A (abs)	C (mg/L)	Verim (%)
0	3,0	20,1	5,34	29,6	20	1		50	0
1	4,1	20,7	3,30	29,4	20	1	0,625	33,02	34,0
3	5,8	22,2	3,27	29,9	20	1	0,024	1,22	97,6
5	5,9	23,5	3,22	28,7	20	1	0,000	0,00	100

10	6,0	26,2	3,22	26,9	20	1	0,000	0,00	100
15	6,4	28,1	3,19	25,5	20	1	0,005	0,22	99,6
20	6,7	30,2	3,23	23,9	20	1	0,005	0,22	99,6
25	11,1	32,4	3,29	22,8	20	1	0,002	0,06	99,9
30	11,3	34,5	3,39	22,0	20	1	0,008	0,38	99,3

Tablo B. 16: C₀: 50 mg/L, M: 1gr/L Kaolinit, j: 20 mA/cm², pH₀: 7,0

t (dk)	pH	T (°C)	S (mS/cm)	V (volt)	J (mA/cm ²)	M (gr/L)	A (abs)	C (mg/L)	Verim (%)
0	7,0	22,5	4,75	29,7	20	1		50	0
1	6,8	22,5	3,19	28,6	20	1	0,687	36,3	27,4
3	6,5	24,1	3,24	27,3	20	1	0,037	1,91	96,2
5	6,9	25,3	3,18	26,7	20	1	0,015	0,75	98,5
10	10,4	27,6	3,20	24,8	20	1	0,012	0,59	98,8
15	10,6	30,1	3,26	23,7	20	1	0,025	1,27	97,5
20	10,9	32,7	3,22	22,7	20	1	0,015	0,75	98,5
25	11,1	34,3	3,26	21,7	20	1	0,019	0,96	98,1
30	11,1	35,2	3,37	21,2	20	1	0,021	1,06	97,9

Tablo B. 17: C₀: 50 mg/L, M: 1gr/L Kaolinit, j: 20 mA/cm², pH₀: 8,5

t (dk)	pH	T (°C)	S (mS/cm)	V (volt)	J (mA/cm ²)	M (gr/L)	A (abs)	C (mg/L)	Verim (%)
0	8,5	21,0	4,59	30,7	20	1		50	0
1	5,8	21,6	3,24	30,2	20	1	0,536	28,31	43,4
3	9,5	23,3	3,23	29,2	20	1	0,029	1,49	97,0
5	6,4	24,4	3,18	28,4	20	1	0,020	1,01	98,0
10	10,8	26,8	3,22	26,5	20	1	0,033	1,70	96,6
15	11,0	28,7	3,27	24,9	20	1	0,026	1,33	97,3
20	11,1	31,8	3,29	23,8	20	1	0,026	1,33	97,3
25	11,2	33,8	3,29	22,9	20	1	0,024	1,22	97,6
30	11,3	35,2	3,39	22,1	20	1	0,028	1,43	97,1

Tablo B. 18: C₀: 50 mg/L, M: 1gr/L Sepiyolit, j: 20 mA/cm², pH₀: 3,0

t (dk)	pH	T (°C)	S (mS/cm)	V (volt)	J (mA/cm ²)	M (gr/L)	A (abs)	C (mg/L)	Verim (%)
0	3,0	22,2	5,03	30,4	20	1		50	0
1	6,0	22,5	3,32	29,8	20	1	0,615	32,49	35,0
3	6,5	24,1	3,34	27,3	20	1	0,018	0,90	98,2

5	6,7	25,3	3,27	27,1	20	1	0,005	0,22	99,6
10	6,4	27,4	3,24	25,8	20	1	0,005	0,22	99,6
15	6,8	30,2	3,22	24,5	20	1	0,003	0,11	99,8
20	6,7	32,4	3,22	23,6	20	1	0,006	0,27	99,5
25	7,0	34,5	3,21	22,9	20	1	0,004	0,16	99,7
30	8,1	36,0	3,28	22,5	20	1	0,008	0,38	99,3

Tablo B. 19: C₀: 50 mg/L, M: 1gr/L Sepiyolit, j: 20 mA/cm², pH₀: 7,0

t (dk)	pH	T (°C)	S (mS/cm)	V (volt)	J (mA/cm ²)	M (gr/L)	A (abs)	C (mg/L)	Verim (%)
0	7,0	20,8	4,77	30,7	20	1		50	0
1	7,4	21,3	3,22	30,2	20	1	0,698	36,88	26,2
3	6,6	22,8	3,25	29,4	20	1	0,012	0,59	98,8
5	7,0	24,1	3,19	28,5	20	1	0,005	0,22	99,6
10	10,4	26,7	3,22	26,3	20	1	0,012	0,59	98,8
15	10,8	29,4	3,22	24,8	20	1	0,009	0,43	99,1
20	11,0	31,8	3,23	23,7	20	1	0,009	0,43	99,1
25	11,0	34,1	3,29	22,9	20	1	0,005	0,22	99,6
30	11,1	35,8	3,35	22,3	20	1	0,010	0,48	99,0

Tablo B. 20: C₀: 50 mg/L, M: 1gr/L Sepiyolit, j: 20 mA/cm², pH₀: 8,5

t (dk)	pH	T (°C)	S (mS/cm)	V (volt)	J (mA/cm ²)	M (gr/L)	A (abs)	C (mg/L)	Verim (%)
0	8,5	21,8	4,77	30,8	20	1		50	0
1	8,4	22,0	3,25	30,7	20	1	0,730	38,58	22,9
3	7,3	23,7	3,25	28,7	20	1	0,007	0,32	99,4
5	9,7	25,2	3,23	27,8	20	1	0,000	0,00	100
10	10,3	27,5	3,23	25,7	20	1	0,001	0,005	99,9
15	10,7	29,8	3,27	24,3	20	1	0,005	0,22	99,6
20	10,9	32,1	3,22	23,3	20	1	0,003	0,11	99,8
25	10,9	34,1	3,25	22,5	20	1	0,000	0,00	100
30	11,1	36,5	3,38	21,9	20	1	0,007	0,32	99,4

Tablo B. 21: C₀: 50 mg/L, M: 1gr/L Üleksit, j: 20 mA/cm², pH₀: 3,0

t (dk)	pH	T (°C)	S (mS/cm)	V (volt)	J (mA/cm ²)	M (gr/L)	A (abs)	C (mg/L)	Verim (%)
0	3,0	22,5	5,13	28,1	20	1		50	0
1	9,1	22,7	3,46	27,2	20	1	0,712	37,62	24,8

3	9,1	23,8	3,51	26,6	20	1	0,010	0,48	99,0
5	9,2	25,3	3,43	26,1	20	1	0,003	0,11	99,8
10	9,4	27,4	3,42	24,7	20	1	0,002	0,06	99,9
15	9,7	30,3	3,46	23,5	20	1	0,004	0,16	99,7
20	10,0	32,4	3,47	22,4	20	1	0,003	0,11	99,8
25	10,4	34,9	3,36	21,4	20	1	0,003	0,11	99,8
30	10,6	36,8	3,50	20,9	20	1	0,005	0,22	99,6

Tablo B. 22: C₀: 50 mg/L, M: 1gr/L Üleksit, j: 20 mA/cm², pH₀: 7,0

t (dk)	pH	T (°C)	S (mS/cm)	V (volt)	J (mA/cm ²)	M (gr/L)	A (abs)	C (mg/L)	Verim (%)
0	7,0	21,5	4,82	28,3	20	1		50	0
1	9,5	22,0	3,38	27,5	20	1	0,537	28,36	43,3
3	9,6	23,5	3,36	26,8	20	1	0,020	1,01	98,0
5	9,7	24,7	3,35	26,4	20	1	0,015	0,75	98,5
10	1,0	27,4	3,33	24,8	20	1	0,017	0,85	98,3
15	10,4	30,1	3,35	22,7	20	1	0,017	0,85	98,3
20	10,8	32,0	3,40	21,5	20	1	0,020	1,01	98,0
25	10,9	33,8	3,48	20,7	20	1	0,025	1,27	97,5
30	10,9	35,8	3,55	20,2	20	1	0,032	1,65	96,7

Tablo B. 23: C₀: 50 mg/L, M: 1gr/L Üleksit, j: 20 mA/cm², pH₀: 8,5

t (dk)	pH	T (°C)	S (mS/cm)	V (volt)	J (mA/cm ²)	M (gr/L)	A (abs)	C (mg/L)	Verim (%)
0	8,5	24,1	4,92	28,8	20	1		50	0
1	9,5	24,2	3,32	28,1	20	1	0,690	36,46	27,1
3	9,5	25,0	3,35	27,4	20	1	0,030	1,54	96,9
5	9,6	26,3	3,30	26,9	20	1	0,022	1,12	97,8
10	10,0	28,1	3,29	25,1	20	1	0,024	1,22	97,6
15	10,1	31,2	3,29	23,6	20	1	0,024	1,22	97,6
20	10,5	33,6	3,32	22,3	20	1	0,025	1,27	97,5
25	10,7	34,8	3,39	21,4	20	1	0,030	1,54	96,9
30	10,7	37,0	3,47	20,8	20	1	0,035	1,80	96,4

Tablo B. 24: C₀: 50 mg/L, M: 1gr/L Kolemanit, j: 20 mA/cm², pH₀: 3,0

t (dk)	pH	T (°C)	S (mS/cm)	V (volt)	J (mA/cm ²)	M (gr/L)	A (abs)	C (mg/L)	Verim (%)
0	3,0	20,6	4,88	30,3	20	1		50	0

1	8,8	21,5	3,37	29,2	20	1	0,790	41,75	16,5
3	8,8	22,8	3,39	28,3	20	1	0,012	0,59	98,8
5	8,9	24,1	3,35	27,7	20	1	0,010	0,48	99,0
10	9,4	26,9	3,33	25,6	20	1	0,001	0,005	99,9
15	9,7	29,3	3,32	24,4	20	1	0,000	0,00	100
20	10,4	31,2	3,40	23,1	20	1	0,008	0,38	99,3
25	10,9	33,8	3,40	22,1	20	1	0,002	0,058	99,9
30	11,1	35,2	3,45	21,3	20	1	0,002	0,058	99,9

Tablo B. 25: C₀: 50 mg/L, M: 1gr/l K Colemanit, j: 20 mA/cm², pH₀: 7,0

t (dk)	pH	T (°C)	S (mS/cm)	V (volt)	J (mA/cm ²)	M (gr/L)	A (abs)	C (mg/L)	Verim (%)
0	7,0	22,8	4,63	28,8	20	1		50	0
1	9,4	23,2	3,28	27,8	20	1	0,721	38,10	23,8
3	9,5	24,4	3,27	27,1	20	1	0,009	0,43	99,1
5	9,5	25,6	3,21	26,7	20	1	0,000	0,00	100
10	10,2	27,2	3,26	24,9	20	1	0,000	0,00	100
15	10,6	29,6	3,25	23,4	20	1	0,000	0,00	100
20	10,9	32,3	3,30	22,4	20	1	0,008	0,38	99,3
25	10,9	34,9	3,30	21,7	20	1	0,000	0,00	100
30	11,0	36,3	3,34	21,1	20	1	0,003	0,11	99,8

Tablo B. 26: C₀: 50 mg/L, M: 1gr Colemanit, j: 20 mA/cm², Başlangıç pH₀: 8,5

t (dk)	pH	T (°C)	S (mS/cm)	V (volt)	J (mA/cm ²)	M (gr/L)	A (abs)	C (mg/L)	Verim (%)
0	8,5	22,5	4,74	28,1	20	1		50	0
1	9,6	23,1	3,30	27,3	20	1	0,606	32,02	36,0
3	9,7	24,3	3,30	26,2	20	1	0,008	0,38	99,3
5	10,1	25,4	3,25	25,9	20	1	0,041	2,12	95,8
10	10,4	27,9	3,24	24,1	20	1	0,013	0,64	98,7
15	10,3	30,4	3,24	22,9	20	1	0,052	2,70	94,6
20	10,6	31,9	3,28	22,0	20	1	0,018	0,90	98,2
25	11,1	33,8	3,40	21,0	20	1	0,017	0,85	98,3
30	11,2	36,1	3,45	20,4	20	1	0,016	0,80	98,4

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Fadime Songül ÖZÇELİK

Doğum tarihi ve yeri : 10.03.1995/ADANA

e-posta :fadime__colak@hotmail.com

Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans		
Lisans	Balıkesir Üniversitesi/Çevre Mühendisliği	2013-2017
Lise		

