

**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**



**METAL KAPLAMA ENDÜSTRİSİ ATIK SULARININ
ELEKTROKOAGÜLASYON VE ELEKTRO-FENTON YÖNTEMLERİ
İLE ARITILMASI**

Yüksek Lisans Tezi

Sümeyye DOĞRUCA

Danışman

Prof. Dr. Nevzat BEYAZIT

Bu çalışma Ondokuz Mayıs Üniversitesi tarafından 1904.22.005 proje numarası ile desteklenmiştir.

SAMSUN
2023

TEZ KABUL VE ONAYI

Sümeyye DOĞRUCA tarafından, Prof. Dr. Nevzat BEYAZIT danışmanlığında hazırlanan “METAL KAPLAMA ENDÜSTRİSİ ATIK SULARININ ELEKTROKOAGÜLASYON VE ELEKTRO-FENTON YÖNTEMLERİ İLE ARITILMASI” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 13.3.2023 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Unvanı Adı Soyadı Üniversitesi Ana Bilim/Ana Sanat Dalı	Sonuç
Başkan Prof. Dr. Feryal AKBAL Ondokuz Mayıs Üniversitesi Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye (Danışman) Prof. Dr. Nevzat BEYAZIT Ondokuz Mayıs Üniversitesi Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye Doç. Dr. Levent GÜREL Pamukkale Üniversitesi Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

Prof. Dr. Ahmet TABAK
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım Yüksek Lisans tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

Etik Kurul Gerekli mi?

Evet ☐ (Gerekli ise ekler kısmına ekleyiniz)

Hayır ☒

10 / 04 / 2023
Sümeyye DOĞRUCA

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı: METAL KAPLAMA ENDÜSTRİSİ ATIK SULARININ ELEKTROKOAGÜLASYON VE ELEKTRO-FENTON YÖNTEMLERİ İLE ARITILMASI

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 06.01.2023 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 18

Tek kaynak oranı : % 3 çıkmıştır.

10 /04/ 2023
Prof. Dr. Nevzat BEYAZIT

ÖZET

METAL KAPLAMA ENDÜSTRİSİ ATIK SULARININ ELEKTROKOAGÜLASYON VE ELEKTRO-FENTON YÖNTEMLERİ İLE ARITILMASI

Sümeyye DOĞRUCA
Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Yüksek Lisans, Nisan/2023
Danışman: Prof. Dr. Nevzat BEYAZIT

Bu çalışmada elektrokoagülasyon ve elektro-fenton yöntemleri kullanılarak, metal kaplama endüstrisi atık suyundan KOİ giderimi üzerine çalışılmıştır. Elektrokoagülasyon yöntemiyle pH, akım yoğunluğu, iletkenlik ve elektrotlar arası mesafe etkileri incelenmiş olup optimum deneysel koşullar belirlenmiştir. Bu kapsamda belirlenen optimum koşullarda (pH: 6,01, akım yoğunluğu: 200 A/m², elektrotlar arası mesafe: 0,9 cm, iletkenlik: 5000 µS/cm, karıştırma hızı: 250 rpm, reaksiyon süresi: 80 dk.) 7,36 kWh/m³'lük elektrik enerjisi tüketimi ile maksimum %46,5'lik KOİ giderimi elde edilmiştir. KOİ giderimi için anot ve elektrik enerjisi tüketimi toplamından hesaplanan nihai arıtma maliyeti 69,57 TL/m³ atık su ve kg KOİ başına 210,81 TL/kg KOİ olarak hesaplanmıştır. Elektro-fenton yöntemi ile de pH, H₂O₂ konsantrasyonu, akım yoğunluğu ve elektrotlar arası mesafe etkisi incelenmiştir. Optimum koşullar (pH: 3, H₂O₂: 1500 mg/L, akım yoğunluğu: 150 A/m², elektrotlar arası mesafe: 1,25 cm, iletkenlik: 5000 µS/cm, karıştırma hızı: 250 rpm, reaksiyon süresi: 40 dk.) belirlenmiştir. 3,24 kWh/m³'lük elektrik enerjisi tüketimi ile maksimum %82,16'lık KOİ giderimi elde edilmiştir. KOİ giderimi için hesaplanan nihai arıtma maliyeti 631,83 TL/m³ atık su ve kg KOİ başına 1116,30 TL/ kg KOİ olarak hesaplanmıştır. Elektro-fenton yöntemi ile KOİ giderim veriminin daha fazla olduğu bulunmuştur.

Anahtar Sözcükler: Metal kaplama atık suyu, Elektrokoagülasyon, Elektro-Fenton, KOİ

ABSTRACT

TREATMENT OF METAL COATING INDUSTRY WASTEWATER BY ELECTROCOAGULATION AND ELECTRO-FENTON METHODS

Sümeyye DOĞRUCA

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Environmental Engineering

Master, April/2023

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Nevzat BEYAZIT

In this study, COD removal from metal plating industry wastewater was studied using electrocoagulation and electro-Fenton methods. The effects of pH, current density, conductivity, and distance between electrodes were investigated by the electrocoagulation method and optimum experimental conditions were determined. In the optimum conditions determined in this context (pH: 6,01, current density: 200 A/m², distance between electrodes: 0,9 cm, conductivity: 5000 µS/cm, stirring speed: 250 rpm, reaction time: 80 min.), maximum of 46,5% COD removal was achieved with electrical energy consumption of 7,6 kWh/m³. The final treatment cost, calculated from the sum of the anode and electrical energy consumption for COD removal, was calculated as 69,57 TL/m³ of wastewater and 210,81 TL/ kg of COD per kg of COD. The effects of pH, H₂O₂ concentration, current density and distance between electrodes were investigated by the electro-Fenton method. Optimum conditions (pH: 3, H₂O₂: 1500 mg/L, current density: 150 A/m², distance between electrodes: 1,25 cm, conductivity: 5000 µS/cm, stirring speed: 250 rpm, reaction time: 40 min.) were determined. A maximum of 82,16% COD removal was achieved with an electrical energy consumption of 3,24 kWh/m³. The total treatment cost for COD removal was 631,83 TL/m³ of wastewater and 1116,30 TL/ kg of COD per kg of COD. It was found that the COD removal efficiency was higher with the electro-Fenton method.

Keywords: Metal coating wastewater, Electrocoagulation, Electro-Fenton, COD

ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması, OMÜ-BAP PYO.MUH.1904.22.005 numaralı “METAL KAPLAMA ENDÜSRTİSİ ATIK SULARININ ELEKTROKOAGÜLASYON VE ELEKTRO-FENTON YÖNTEMLERİ İLE ARITILMASI” başlıklı proje kapsamında yürütülmüştür. Maddi yardım ve destekleri için OMÜ-BAP birimine teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca her zaman bilgi ve birikimleriyle beni yönlendirerek destek olan ve en doğru kararları almamı sağlayan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Nevzat BEYAZIT ’a teşekkürü bir borç bilir, saygılarımı sunarım.

Bilgi birikimi ve önerileriyle yardımcı olan Dr. Öğr. Üyesi Kasım Atmaca’ya teşekkür ederim.

Atık suyumun temin ettiğim Fatsa ilçesinde bulunan KARME METAL SAN.TİC.AŞ çalışanlarına teşekkür ederim.

Tüm zorlu süreçlerimde her daim yanımda olan, pozitif enerjisi ile beni destekleyen, maddi ve manevi katkılarda bulunan sevgili eşim İnşaat mühendisi Uğur DOĞRUCA’ ya teşekkür ederim.

Beni bu günlere getiren ve her türlü fedakarlığı yapan annem Ayşe TEPETAM ve babam Süleyman TEPETAM’ a teşekkür ederim.

Sümeyye DOĞRUCA

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAYI	i
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI	ii
TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
TABLolar DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER.....	2
2.1 Metal Kaplama Endüstrisi	2
2.1.1.Yüzey Temizleme İşlemi	3
2.1.2. Elektrolitik ve Kimyasal Parlatma	3
2.1.3. Banyolarda Kaplama.....	3
2.1.4. Metal Kaplama İşlemlerinin Tanımlanması	4
2.1.4.1 Elektrokaplama	5
2.1.4.2 Elektrik Olmadan Kaplama	5
2.1.4.3 Dönüştürerek Kaplama	5
2.1.4.4 Kimyasal Öğütme ve Aşındırma	5
2.1.4.5 Temizleme İşlemi.....	5
2.1.4.6 Talaş İle Düzeltme	5
2.1.4.7 Parlatma ve Cilalama	5
2.1.4.8 Kırpma, Etki ve Basınç İşlemleri	6
2.1.4.9 Isı Verme	6
2.1.4.10 Lehimleme	6
2.1.4.11 Kumlama.....	6
2.1.4.12 Sıcağa Batırma	6
2.1.4.13 Püskürtme ve Buhar Kaplama	6
2.1.4.14 Tuzlama Ve Kabuk Alma	6
2.1.4.15 Yağ Temizleme	6
2.1.4.16 Boya Çıkarma	7
2.1.4.17 Boyama, Elektrolitik Boyama ve Elektrostatik Boyama	7
2.1.4.18 Vakumlama.....	7
2.1.4.19 Parça montajı, Test etme.....	7
2.2. Metal Kaplama Endüstrisi Atık Suları Özellikleri	7
2.3. Metal Kaplama Atık Suları Arıtımı	8
2.4. Ağır Metallerden Kaynaklanan Kirlilikler.....	9
2.5 Ağır Metal ve Etkileri	10
2.5.1. Demir Metali.....	10
2.5.2. Nikel Metali	11
2.5.3. Arsenik.....	11
2.5.4. Kadmiyum	11
2.5.5.Civa.....	11
2.5.6. Kurşun.....	12
2.6. Ağır Metallerin Kirliliklerini Giderme Yöntemleri.....	12
2.6.1. Kimyasal Çöktürme	12
2.6.2. Koagülasyon-Flokülasyon	13
2.6.3. Flotasyon.....	13
2.6.4. Membran Filtrasyon.....	13
2.6.5. İyon Değiştirme	14
2.6.6. Adsorpsiyon.....	14

2.6.7. Elektrokimyasal Yöntem	14
2.7. Elektrokoagülasyon Prosesi	14
2.7.1. Elektrokoagülasyon Prosesinde Kullanılan Reaktör Tipleri	16
2.8. Elektro-Fenton Prosesi	18
2.8.1. Elektro-Fenton Prosesi ile Yapılan Bazı Çalışmalar	19
2.9. EC ve Elektro-Fenton Proseslerini Etkileyen Parametreler	19
2.9.1. pH Etkisi	20
2.9.2. Akım Yoğunluğu Etkisi	20
2.9.3. Elektrotlar Arasındaki Mesafe Etkisi	20
2.9.4. H ₂ O ₂ Konsantrasyon	21
2.9.5. Sıcaklık	21
2.9.6. Elektrot Türü	21
2.10. Reaksiyon Kinetiği	21
2.10.1. Sıfırıncı Derece Reaksiyon Kinetiği	23
2.10.2. Birinci Derece Reaksiyon Kinetiği	24
2.10.3. İkinci Derece Reaksiyon Kinetiği	25
3. MATERYAL VE YÖNTEM	27
3.1. Atık Su ve Özellikleri	27
3.2. Kullanılan Cihazlar ve Kimyasal Maddeler	27
3.3. Elektrokoagülasyon Deney Düzeneği	28
3.4. Elektro-Fenton Deney Düzeneği	29
3.5. KOİ Analizi	31
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	33
4.1. Elektrokoagülasyon Prosesi	33
4.1.1. pH Etkisi	33
4.1.2. Akım Yoğunluğu Etkisi	35
4.1.3. Elektrotlar Arasındaki Mesafe Etkisi	37
4.1.4. İletkenlik Etkisi	38
4.1.5. EC Prosesi İçin Reaksiyon Kinetiği	40
4.2. Elektro-Fenton Prosesi	42
4.2.1. pH Etkisi	43
4.2.2. H ₂ O ₂ Konsantrasyonu	45
4.2.3. Akım Yoğunluğu Etkisi	46
4.2.4. Elektrotlar Arasındaki Mesafe Etkisi	48
4.2.5. EF Prosesi İçin Reaksiyon Kinetiği	49
4.3. Maliyet Analizi	52
4.3.1. Elektrokoagülasyon Prosesi İçin Maliyet Hesabı	52
4.3.2. Elektro-Fenton Prosesi İçin Maliyet Hesabı	43
5. SONUÇ VE TARTIŞMA	55
KAYNAKLAR	58
ÖZGEÇMİŞ	61

SİMGELER VE KISALTMALAR

KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
BOİ	: Biyolojik Oksijen İhtiyacı
SKKY	: Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği
EC	: Elektrokoagülasyon Prosesi
EF	: Elektro-Fenton
H ₂ SO ₄	: Sülfürik asit
HCl	: Hidroklorik asit
OH ⁻	: Hidroksil iyon
W	: Watt
Kw	: Kilowatt
OH [•]	: Hidroksil radikali
H ₂ O ₂	: Hidrojen peroksit
HO ₂ [•]	: Hidroperoksil radikal
NaOH	: Sodyum Hidroksit
NaCl	: Sodyum Klorür
SO ₄	: Sülfat
Cl	: Klorür
Fe	: Demir
Zn	: Çinko
Mn	: Mangan
CN	: Siyanür
As	: Arsenik
Cd	: Kadmiyum
Co	: Kobalt
Ni	: Nikel
Pb	: Kurşun
Cr	: Krom
Cu	: Bakır

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Genel Olarak Metal Kaplama Prosesi Akım Şeması	3
Şekil 2.2. Metal kaplama Proseslerinin Genel Akım Şeması	4
Şekil 2.3. Elektrokoagülasyon Reaktörünün Şematik Diyagramı.....	15
Şekil 2.4. EC Reaktörlerinin Şematik Diyagramı	17
Şekil 2.5. Log Grafik ile Reaksiyon Derecesi Belirlenmesi	23
Şekil 2.6. Sıfırncı Derece Reaksiyon Hız Sabitinin Bulunması	24
Şekil 2.7. Birinci Derece Reaksiyon Hız Sabitinin Bulunması	25
Şekil 2.8. İkinci Derece Reaksiyon Hız Sabitinin Bulunması	26
Şekil 3.1. Elektrokoagülasyon Deney Düzeneği.....	29
Şekil 3.2. EC Deneyinde Kullanılan Reaktör ve Malzemeler	29
Şekil 3.3. Elektro-Fenton Deney Düzeneği	30
Şekil 3.4. EF Deneyinde Kullanılan Reaktör ve Malzemeler	30
Şekil 3.5. KOİ Analizi Çözelti Ekleme Sırası	31
Şekil 3.6.KOİ Kalibrasyon Grafiği	32
Şekil 4.1. EC Prosesinde KOİ Giderimi Üzerine pH'nın Etkisi	34
Şekil 4.2. EC Prosesinde KOİ değerlerinin Değişiminde pH'nın Etkisi.....	35
Şekil 4.3. EC Prosesinde KOİ Giderimi Üzerine Akım Yoğunluğunun Etkisi.....	36
Şekil 4.4. EC Prosesinde KOİ Değerlerinin Değişiminde Akım Yoğunluğunun Etkisi	36
Şekil 4.5. EC Prosesinde KOİ Giderimi Üzerine Elektrotlar Arası Mesafe Etkisi	37
Şekil 4.6. EC Prosesinde KOİ Değerlerinin Değişiminde Elektrotlar Arası Mesafe Etkisi ...	38
Şekil 4.7. EC Prosesinde KOİ Giderimi Üzerine İletkenlik Etkisi	39
Şekil 4.8. EC Prosesinde KOİ Değerlerinin Değişiminde İletkenlik Etkisi.....	39
Şekil 4.9. EC Prosesi Sıfırncı Derece Reaksiyon Grafiği	41
Şekil 4.10. EC Prosesi Birinci Derece Reaksiyon Grafiği	41
Şekil 4.11. EC Prosesi İkinci Derece Reaksiyon Grafiği.....	42
Şekil 4.12. EF Prosesinde KOİ Giderimi Üzerine pH'nın Etkisi.....	44
Şekil 4.13. EF Prosesinde KOİ Değerlerinin Değişiminde pH'nın Etkisi	44
Şekil 4.14. EF Prosesinde KOİ Giderimi Üzerine H ₂ O ₂ Konsantrasyonu Etkisi	45
Şekil 4.15. EF Prosesinde KOİ Değerlerinin Değişiminde H ₂ O ₂ Konsantrasyonu Etkisi.....	46
Şekil 4.16. EF Prosesinde KOİ Giderimi Üzerine Akım Yoğunluğu Etkisi.....	47
Şekil 4.17. EF Prosesinde KOİ Değerlerinin Değişiminde Akım Yoğunluğu Etkisi	47

Şekil 4.18. EF Prosesinde KOİ Giderimi Üzerin Elektrotlar Arası Mesafe Etkisi.	48
Şekil 4.19. EF Prosesinde KOİ Değerlerinin Değişiminde Elektrotlar Arası Mesafe Etkisi. .	49
Şekil 4.20. EF Prosesi Sıfırıncı Derece Reaksiyon Grafiği	50
Şekil 4.21. EF Prosesi Birinci Derece Reaksiyon Grafiği	51
Şekil 4.22. EF Prosesi İkinci Derece Reaksiyon Grafiği.....	51



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Metal kaplama işlemleri	4
Tablo 2.2. Sektör: Metal Sanayii (SKKY, Tablo 15.5).....	9
Tablo 2.3. Çeşitli Sanayi Kollarından Kaynaklanan Ağır Metaller	10
Tablo 2.4. Ağır Metaller ve Sebep Oldukları Hastalıklar	12
Tablo 3.1. Deneylerde Kullanılan Atık Suyun Özellikleri.....	27
Tablo 3.2. Deneyler İçin Kullanılan Cihazlar	27
Tablo 3.3. Deneylerde Kullanılan Kimyasallar	28
Tablo 4.1. EC Yöntemi ile KOİ Giderimi İçin Optimum Koşullar	33
Tablo 4.2. EC prosesi için sırası ile sıfırncı-birinci-ikinci derece reaksiyon kinetikleri sonuçları.....	40
Tablo 4.3. EF Yöntemi ile KOİ Giderimi İçin Optimum Koşullar	42
Tablo 4.4. EF prosesi için sırası ile sıfırncı-birinci-ikinci derece reaksiyon kinetikleri sonuçları.....	50

1. GİRİŞ

Günümüz şartlarında oluşan hızlı nüfus artışı, kentleşme ve sanayileşme ile birlikte çeşitli kirleticilerin suya karışması ile su kaynaklarının kalitesinin bozulması ve çevre kirliliğinin artması ile sonuçlanmaktadır. Kirliliğe sebep olan maddeler incelendiğinde ağır metaller de bu sınıfta yer almaktadır. Ağır metaller önemli kirletici parametrelerinden sayılmakta olup canlı bünyesinde birikme göstererek zamanla toksik özellik gösterirler.

Hızla gelişen teknoloji ve sanayi dalı içerisinde metal kaplama sektörü önemli bir yere sahiptir. Metal kaplama sektöründe birçok farklı yöntemler vardır ve uygulanan bu yöntemler çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Tesislerde kaplanan metaller daha sonrasında durulanmak üzere banyolardan geçirilmektedir. Banyolama işlemi sonrasında organik maddeler, ağır metallerin oluşturdukları bileşikler gibi kirleticiler meydana gelmektedir (Uzun Parlak, 2008). Endüstriyel kaynaklı ağır metal su kirliliğini önlemek için atık su deşarjdan önce arıtılmalıdır. Örneğin; endüstriyel atık sularda bulunan çinko, kurşun ve bakır gibi ağır metaller zehirli ve yaygın yeraltı suyu kirleticisidir (Tasmakıran, 2010). Bu ağır metaller canlı yaşamı için tehlikeli olup canlı mekanizmasında birikim göstererek kansorejen etkilere sebep olmaktadır. Ağır metallerin atık sulardan uzaklaştırılarak ilgili yönetmelik gereğince deşarj limitlerinin sağlanması çok önemlidir (Bailey, 1999).

Metal kaplama endüstrisi atık sularında olası KOİ bileşenlerin klasik arıtma yöntemleri ile yeterli miktarda giderilememektedir. Çoğunlukla kimyasal çöktürme yöntemlerinin kullanıldığı bu tür atık suların arıtılmasında deşarj limitlerinin sağlanması için ileri oksidasyon proseslerinin denendiği birçok çalışma mevcuttur.

Bu tez çalışmasının amacı, kimyasal ve ileri oksidasyon proseslerinden elektrokoagülasyon ve elektro-Fenton yöntemleri kullanılarak seçilmiş bir metal kaplama endüstrisi atık suyundan KOİ giderim verimliliğinin incelenmesidir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Metal Kaplama Endüstrisi

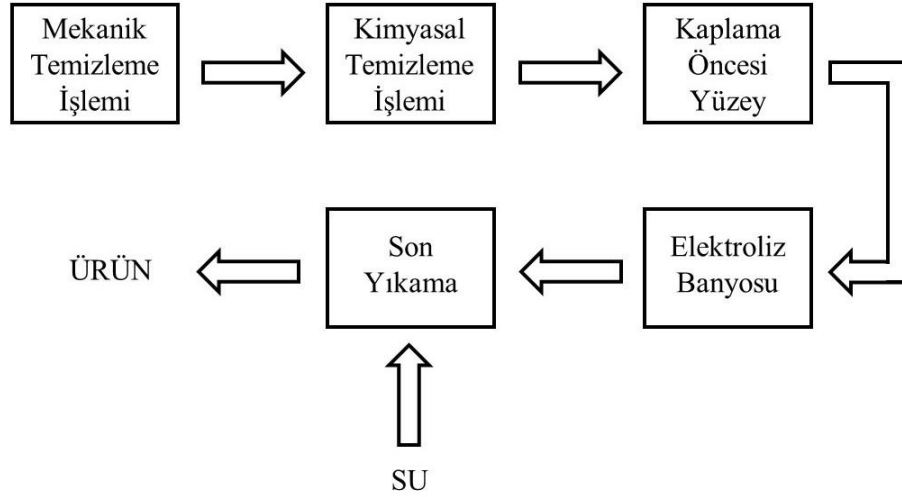
Metal kaplama endüstrisinde, metal yüzeylerin işlenmesini ve kullanıma uygun hale getirilmesini amaçlayan çeşitli işlemler söz konusudur. Galvanizleme işlemi istenilen parçanın doğru akım ile sulu bir elektrolit çözücü içerisinde metal bir tabaka ile kaplanması işlemidir. Kaplanacak malzemeler metal ve yapay malzemeler olabilir.

Metal Kaplama İşleminin avantajları:

- Korozyona ve aşınmaya karşı dayanıklılık
- Parlak, pürüzsüz ve düz yüzey
- Aşınmaya ve eskimeye karşı dayanıklılık
- Sertleşmiş yüzey
- Elektrik iletkenliğinin daha iyi gerçekleşmesi (Sönmez, 2006).

Kaplama malzemeleri olarak genellikle tercih edilen nikel ve çinko metallere aittir. Alternatif olarak tunç, krom, altın, alüminyum, kadmiyum, bakır, pirinç, gümüş ve kalay gibi metaller de kullanılmaktadır (Denz, 2009). Ayrıca kullanılan proseslerdeki farklılıklar nedeniyle banyolar; asitler, bazlar, kompleks oluşturmalar, siyanürler, organik katkıları, yağlar ve yüzey aktif maddeler içerebilir. Metal kaplama sektörü prosesleri üç ana başlıkta toplanabilir. Şekil 2.1’de metal kaplama prosesinin genel akım şeması gösterilmiştir.

- Kaplama öncesi temizleme ve ara kaplama
- Boyama İşlemi
- Metal kaplama



Şekil 2.1. Metal kaplama prosesinin genel akım şeması. (Demir, 2000).

2.1.1. Yüzeylerin Temizlenmesi

Alkali yüksek sıcaklıkta yağlama banyosunda sabunlaştırma işlemi, yüzey yağlarından ve cila kalıntılarından organik yağ lekelerini çıkarır. Demir ve çelik parçalardan yüzey oksitlerini ve pası çıkarmak için tuz ruhu, tek başına sülfürik asit veya her ikisinin çeşitli konsantrasyonlardaki karışımları etkilidir.

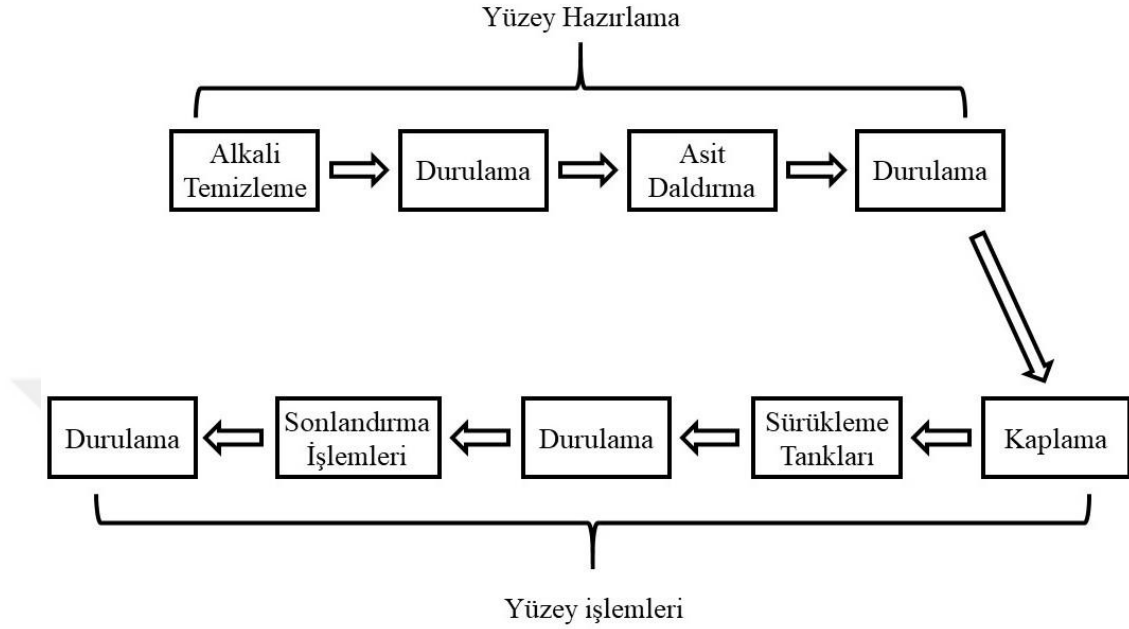
2.1.2. Elektrolitik Kimyasal Parlatma

Metaller elektrolitik pillerde anot malzemesi olarak kullanılır. Bu sayede metal çözünerek yüzeyde oluşan pürüzler yok olarak metalin yüzey parlaklığı artar. Elektrolitik kimyasal parlatma işlemi metaller için kendi özelliklerine göre farklı banyolarda yapılır. Kimyasal parlatma, metalin kendiliğinden çözünen bir banyoya daldırılmasını ve metalin yüzeyini pürüzsüzleştirmek için harici uygulama olmadan kimyasal olarak çözülmesini içerir.

2.1.3. Banyolarda Kaplama

Metal parçalar elektrolit içine tamamen daldırılır, enerji verilir ve bazen enerji verilirken parçalar askıda tutulur. Aksi takdirde metal yüzeyde oksit tabakası oluşabilir. Kaplama işlemi kesintisiz olarak devam etmelidir. Sürekli kaplama banyolarında parçalar havaya maruz bırakılmamalıdır. İşlem sırasında akımın kesilmesi ihtimaline karşı yarım kaplanmış ve son kaplama işlemi görmüş malzemeler sonraki yıkama banyolarında bekletilmelidirler. Tamamen kaplama işlemi biten

malzemeler 95 °C'deki sıcak suyun içerisinde 5-10 dakika bekletilir. Sonrasında işlem tamamlanmış olur. Şekil 2.2'de genel olarak metal kaplama akım şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Metal kaplama akım şeması (Wang L K, 1992).

2.1.4. Metal Kaplama İşlemleri

Tablo 2.1' de metal kaplama işlemleri gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Metal kaplama işlemleri (Wang L K, 1992).

Elektrokaplama	Kaynaklama
Elektrik olamadan kaplama	Sertçe Lehimleme
Buhar kaplama	Lehimleme
Konversiyon kaplama	Isı Verme
Talaş ile düzeltme	Tuzlama ve Banyolama
Vakumlama	Sıcak Kaplama
Dönüştürerek Kaplama İşlemleri	Püskürtme
Yağ Temizleme	Temizleme
Termal kesme	Kumlama
Kaynaklama	Kalibrasyon

2.1.4.1 Elektrokaplama

Elektrokaplama, bir metal yüzeyi başka bir metalle kaplamak için bir elektrik akımının uygulanmasıdır. Metalin kaplanması için kaplama banyosunda metalik duruma indirgenmiş metal iyonları içerir. Katot olarak kaplanan metal tercih edilir. Anot ise genel olarak çözündürülecek metal yüzeyinde birikmektedir.

2.1.4.2 Elektrik Olmadan Kaplama

Kaplama işleminde elektrik akımı kullanılmayan yöntemdir. Elektriksiz kaplama daldırarak kaplama olabilir.

2.1.4.3 Dönüştürerek Kaplama İşlemleri

Dönüştürerek kaplama işlemi metal kaplama yöntemleri içinde temel methodlardan biridir. Sıkça bu yöntem kullanılır. Kaplanmış olan malzemelerden ince bir film oluşturulmaktadır. İnce film sayesinde malzeme dayanıklı olur.

2.1.4.4 Kimyasal Öğütme ve Aşındırma

Şekil verme yöntemi kullanılarak metal parçaların sonraki işlemlere hazır olması sağlanır. Kimyasal öğütme işleminde hidroksit solüsyonu kullanılır. Aşındırma işleminde metal yüzeyinde küçük miktarlarda metal kaldırılır veya yüzeyde bir desen oluşturulur.

2.1.4.5 Temizleme İşlemi

Temizleme işlemi metal kaplama proseslerinde çok önemlidir. Metal yüzeylerde kirin ve yağların giderilmesi işlemidir. Kirler ve yağlar inorganik ve organik yapıda olabilir. Temizleme işlemi sırasında çok fazla su harcanır. Elektriksiz kaplama ve elektrokaplama işlemleri çok fazla temizleme işlemi gerektirir.

2.1.4.6 Talaş ile Düzeltme

Metal malzemenin şekillendirilmesi ve yüzeyinin düzgün hale getirilmesi için yapılan bir işlemdir. Doğal ve sentetik yağlar kullanılarak soğutma ve yağlama sağlanır.

2.1.4.7 Parlatma ve Cilalama

Parlatma ve cilalama işlemlerinin temel amacı yüzeylerin pürüzsüzleştirilmesi ve parlatılmasıdır.

2.1.4.8 Kırpma, Etki ve Basınç İşlemleri

Metal yüzeylere bir etki uygulayarak yapılan işlemlerdir. Kırpma ve basınç deformasyonu mekanik işlemlerdir. Kırpma ve şekillendirme ekipmanlarında yağlar, hafif gresler ve renkli yağlayıcılar kullanılır.

2.1.4.9 Isı Verme

Isıl işlemin amacı, parçanın kontrollü bir şekilde ısıtılarak ve soğutularak fiziksel özelliklerini değiştirmektir.

2.1.4.10 Lehimleme

Elektrikli aletler veya oksijen kullanılarak gerçekleştirilir. Kesme işlemini durulama işlemi takip edebilir. Metalleri ve dolgu maddelerini eritmek için ısı ve basınçtan faydalanarak parçaları birleştirme işlemidir.

2.1.4.11 Kumlama

Bu süreçte, yüzeyi mekanik olarak temizlemek için aşındırıcı tanecikleri metal parçalara göndererek yapılan işlemdir.

2.1.4.12 Kaplama ve Sıcağa Batırma

Bu işlemde, kaplanacak metal kaplama için başka bir metalin erimiş havuzuna daldırılır. İki metal arasında alaşım meydana getirilerek kaplama sağlanır. Kurşun alüminyum ve kalay sıcak havuz içine daldırarak kaplama yöntemi kullanılabilir. Çinko kaplama genel olarak en fazla tercih edilen kaplamadır (galvanizleme).

2.1.4.13 Püskürtme ve Buhar Kaplama

İyon gönderilmesiyle düşük basınçlı bir vakum tüpünün içindeki metalik bir kaplamadır.

2.1.4.14 Tuzlama ve Kabuk Alma

Elektrolitik ve oksitleyici banyolar ve daldırma parçaları için indirgeyici banyolar, yüzeyde var olan oksitleri ve pürüzleri yok etmek için kullanılır. Sonrasında asit daldırma ve söndürme işlemleri uygulanır.

2.1.4.15 Yağ Temizleme

Bu işlem ile yağ ve yağlı kirleri temizleme sağlanır. Üç ana yöntem kullanılır: soğuk temizleme, iki fazlı temizleme ve gaz fazlı temizleme. Soğuk temizleme,

ısıtılmamış, halojen içermeyen bir solüsyon uygulanarak yapılmaktadır. İki fazlı temizlik için su ve çözücü kullanır. Buhar fazı temizleme, bir halojen çözeltinin bir tankta kaynama noktasına kadar ısıtılmasını içerir.

2.1.4.16 Boya Çıkarma

Bu yöntem, parçaların organik kaplamasını çıkarma işlemidir. Sıyırma solüsyonları kostik soda, ıslatıcı maddeler, deterjanlar, sabunlar, alkol aminler veya çözücüler içerebilir.

2.1.4.17 Boyama, Elektrolitik Boyama ve Elektrostatik Boyama

Vernik ve boyalar gibi benzer maddeler kaplama yöntemi olup çoğunlukla spreyci boyama yöntemi çok fazla kullanılır. Elektrostatik boyama, yüklü boya parçacıklarının zıt yüklü bir yüzeye uygulanmasıdır.

2.1.4.18 Vakumlama

Metal buharının kaplanacak yüzey üzerinde yoğunlaştırılması ve başka bir metalin indirgenmiş basınç altında ısıtılarak kaplanması işlemine vakumlu metalleme denir. Kadmiyum, çinko ve kalay tuzları asidik çözeltilere daldırılarak metal kaplama işlemi yapılır. Daha sonrasında kaplanan kısımlar durulanır.

2.1.4.19 Parça Montajı, Test etme

Parçaların biraraya getirilerek birleştirilmesi işlemidir. Kalibrasyon, parça üzerinde bir referans noktası oluşturmak için termal, mekanik ve elektrik enerjisi uygulama işlemidir. Test ise, bitmiş olan parçaların uygunluğunun ve çalışılabilirliğinin incelenmesi işlemidir.

2.2. Metal Kaplama Endüstrisi Atık Sularının Özellikleri

Metal kaplama işlemlerinden kaynaklanan kirlenmiş suyun kimyasal yapısı ve hacmi değişiklik gösterir. Sıyırma, yıkama, temizleme ve kaplama sonrasında oluşan atık sular; karışık kimyasallar, kaplama sırasında kaçan çözelti atıkları ve siyanürlü bileşikler içermektedir. Bu maddelere ek olarak metal kaplama işletmelerinde oluşabilecek diğer atıklar; siyanürlü sular, konsantre alkali madde, metal bileşimleri, yağ, sabun ve askıda kalan maddelerdir. Metal kaplama işlemi sonrasındaki atıklar oran olarak fazla hacimli değildir. Fakat bu atıklar oldukça tehlikelidir. Bu atıklar

içinde en fazla toksikolojik etki yapan maddeler; asitli içerikler, krom, kalay, siyanür ve nikeldir. Bu tesislerde oluşan atık sular özellik olarak alkali ve asidik özellikte olabilirler. Krom kaplama tesisi atıkları krom içeriği yüksek olan atıklardır. Bunun yanında çinko kaplamalı proseslerde ise siyanürlü atıklar meydana gelmektedir. (Şengül 1991).

2.3. Metal Kaplama Endüstrisi Atık Suları Arıtımı

Metal kaplama sırasında kullanılmakta olan tuzları geri kazanabilmek için iyon değişimi veya ters osmoz yöntemleri tercih edilebilir. Krom kaplama işletmelerinde oluşmakta olan kirlenmiş sularda krom iyonlarının atık sudan uzaklaştırılarak ilgili yönetmelik gereğince deşarj limitlerine getirilmelidir. Metal kaplama sektöründen kaynaklanan atık sular için uygulanabilecek arıtma yöntemleri şunlardır;

- Siyanürlerin oksidasyonu
- +6 değerlikli kromun +3 değerlikli hale indirgenmesi ve çöktürülmesi
- Asit atıkların nötralizasyonu
- Kimyasal yolla çöktürme
- Çöktürme
- İyon değiştirme
- Ters ozmos
- Nötralizasyon

Atık sularda oluşan ağır metalleri giderme yöntemleri; kimyasal çöktürme, iyon değiştirme, filtrasyon, elektrokimyasal işlemler, membran prosesler, ters osmoz ve adsorpsiyondur (Kratochvil, 1998). Bu yöntemler, ağır metal iyonları yüksek konsantrasyonlarda mevcut olduğunda etkili arıtma sağlar, ancak özellikle düşük iyonik konsantrasyonlarda (1–100 mg/L) etkisiz olabilir. Bu ileri arıtma yöntemlerinin dezavantajları; pahalı ekipmanlar gerektirmesi, fazla kimyasal madde kullanımı, metal içeren atık suyun tam olarak arıtılamaması ve toksik çamur oluşturmalarıdır.

Tablo 2.2’de metal kaplama endüstrisi atık suları için su kirliliği yönetmeliğince öngörülen deşarj limitleri ve değerleri ile birlikte verilmiştir.

Tablo 2.2. Sektör: Metal sanayii (SKKY, Tablo 15.5))

Parametre	BiRiM	Kompozit numune 2 saatlik	Kompozit numune 24 saatlik
Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ)	(mg/L)	100	50
Askıda katı madde (AKM)	(mg/L)	125	100
Kadmiyum (Cd)	(mg/L)	0.5	-
Yağ ve gres	(mg/L)	20	-
Civa (Hg)	(mg/L)	-	0.05
Çinko (Zn)	(mg/L)	5	-
Kurşun (Pb)	(mg/L)	2	-
Bakır (Cu)	(mg/L)	2	-
Demir (Fe)	(mg/L)	10	-
Toplam krom	(mg/L)	2	-
Krom (Cr ⁺⁶)	(mg/L)	0.5	-
Arsenik	(mg/L)	0.1	-
Nikel (Ni)	(mg/L)	3	-
Toplam siyanür (Cn ⁻)	(mg/L)	0.1	-
pH	-	6-9	6-9

2.4. Ağır Metallerden Kaynaklanan Kirlilikler

Ağır metal tanımı, fiziksel özellikleri bakımından yoğunluğu 5 g/cm³'ten daha büyük olan metal bileşimleri için kullanılır. Bu grup kadmiyum, kurşun, demir, krom kobalt, bakır, nikel, civa ve çinko gibi çok fazla metal içerir. Atık sulara bulunan ağır metaller, organik bileşikler gibi biyolojik olarak ayrışmazlar. Bazı ağır metaller atık sulara yaygın olarak bulunmakta olup bu durum istenmeyen konsantrasyonlarda ağır metal kirliliğine yol açabilir. Bu ağır metaller, çeşitli endüstrilerin atık sularında çok miktarlarda bulunur ve "öncelikli kirleticiler" listesine dahil edilir. Özellikle kaplama, madencilik ve metal alaşımı endüstrilerinden kaynaklanan atıklar ve atık sulara yüksek konsantrasyonlarda ağır metaller mevcuttur (Çelik, 2014). Ağır metal içeren atıksuların endüstriyel kaynakları Tablo 2.3'de verilmiştir.

Tablo 2.3. Endüstriyel tesislerden kaynaklanan ağır metaller (Çelik, 2014)

Endüstri Adı	As	Be	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn
Metal Alışım	x		x	x	x			x	x	x	x
Bateri ve Pil Üretimi		x					x	x	x	x	x
Tarım	x						x	x			
Seramik ve Cam Üretimi	x								x	x	
Kimya, İlaç ve Dişçilik	x		x	x	x		x			x	x
Kaplama			x	x	x					x	x
Elektronik Cihaz Üretimi		x					x				
Gübre	x		x	x			x	x	x	x	x
Fosil Yakıt Yakımı	x		x				x			x	
Madencilik	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x
Boya ve Pigment	x		x	x	x				x	x	x
Petrol Rafinasyonu	x			x	x				x	x	x
Makine					x	x				x	
Plastik Üretimi			x							x	
Kağıt Üretimi				x	x		x			x	
Tekstil	x			x	x						

2.5. Ağır Metaller ve Etkileri

Atık sulardaki Cu, Cr, As, Ni, Pb, Zn gibi ağır metaller sucul ortamlardaki çözünürlüklerinden dolayı zararlıdırlar. Bazı ağır metaller canlı organizmalar için gereklidir. Ancak kaplama atık sularında bulunan ağır metaller olan kadmiyum, cıva, kurşun ve krom besin zinciri yoluyla vücuda girerek vücuttan atılamayarak vücutta fizyolojik birikime neden olurlar. Metaller kabul edilebilir konsantrasyon seviyelerinin üzerinde alındığında ciddi sağlık sorunları ortaya çıkabilir (Bakarat, 2011). Tablo 2.4. ağır metaller ve sebep oldukları hastalıklar verilmiştir.

2.5.1 Demir Metali

Beyazımsı renkli, gümüşümsü, genişleyen ve uzayan, parlak, pirit (FeS_2), hematit (Fe_2O_3), limonit ($\text{Fe}(\text{OH})_2$), magnetit (Fe_3O_4) gibi bileşikler halinde doğada bulunur. (Okunmuş, 2007). 0,1 ppm'den fazla demir hem belediye sularında hem de endüstriyel kullanımda kabul edilemez. Tarihi incelemeler sonucunda en çok kullanılan metal olup birçok sektörde kullanılır. Günlük kullandığımız araç ve gereçlerde çok fazla kullanılan bir metaldir.

2.5.2 Nikel Metali

Nikel yaygın bir elementtir ve en yaygın olarak çevredeki oksijen veya sülfitle ilişkilidir. Metal kaplama işlemlerinde nikel tuzları kullanılmaktadır. Nikel metali sulu ortamda fazla konsantrasyonlarda bulunması durumunda alerji ve balıklar için toksik özelliktedir. Nikel, bitkisel yağların hidrojenasyonundaki en önemli kaynaklardan biridir. Alınan nikelin çoğu vücut tarafından dışkıyla dışarı atılır, bir kısmı akciğerler, bağırsaklar ve deri gibi dokularda birikir. Rusya’da nikel rafinasyon işlemleri yapan işçiler üzerinde yapılan bir araştırmada, mide ve akciğer kanseri olma olasılığının yüksek olduğu sonucuna varılmıştır (Çağlarırnak, 2010).

2.5.3. Arsenik

Atom numarası 33 ve simgesi As olan elementtir. Arseniğin yüzey ve içme sularında 0,5 ila 1,0 mg/L bulunması insanlar için zararlıdır. Arsenik ile paketlenmiş sütle zehirlenen bebeklerde karaciğerde büyüme ve anemi belirtileri, ciltte kahverengi pigmentasyon ve tırnak çizgileri olabilir (Çağlarırnak, 2010). Arsenik konsantrasyonunun fazla olduğu suları içen yetişkinlerde deride nasır şeklinde kalınlaşma, idrarda protein ve reflekslerde yavaşlama görülmüştür. Arsenik miktarının 70-180 mg dan fazla olması durumunda canlı yaşamında ölümcül sorunlara sebep açtığı bilinmektedir.

2.5.4. Kadmiyum

Simgesi Cd olup, gümüşümsü rengindedir. Kadmiyumun birçok endüstride kullanılması toprak, hava ve su gibi elementlere bulaşma riskini arttırmıştır. Yapılan çalışmalarda; böbreklerde bulunan kadmiyum konsantrasyonu yaş ağırlık üzerinden 200 mg/kg'a ulaştığı durumlarda, böbrek fonksiyonlarının bozulduğu tespit edilmiştir.

2.5.5. Cıva

Rengi gümüş, ağır bir metal olan cıva, oda sıcaklığında (25° C) sıvı halde bulunabilen zehirli bir maddedir. Cıva, kostik soda ve klor üretiminde katotlar da, cıva gazlı lambalarda, elektrikli aletlerin üretiminde kullanılmaktadır. Cıva buharı solunduğunda akciğerlerde birikir ve akciğer kanserine sebep olabilir.

2.5.6. Kurşun

Gri renkli görünümde olup atom numarası 82'dir. Akü ve pil üretiminde kullanılmaktadır. İnsan sağlığı için önemli bir metaldir. Zaman içinde birikme göstermeye açıktır. İnsanların böbrekleri ve karaciğerlerinde zamanla birikebilir.

Tablo 2.4. Ağır metaller ve sebep oldukları hastalıklar

Ağır Metaller	Sistem ve Organ	Ağır Metal Etkisi
Hg Pb	Sinir Sistemi	Beyinde tahribat
Cd	Böbrek	Nefron başlangıcı
Hg, As	Üretim Sistemleri	Gebelik sonlanma
Pb Cd As	Kan Dolaşımları	Kan hücresi az üretilmesi Anemi
Cd As Hg Se Zn Cu	Solunum Sistemleri	Anfizem Solunum yolları iltihabı Akut zehirlenmeler
Hg Cu	Beyin	Bozulma
As	Karaciğer	Siroz
Cd	Akciğer	Kanser
As	Cilt	Kanser
Cd Se Zn	İskelet	Osteomoloz Diş Çürükleri Eklemelerde Ağrılar
Cd, As	Kromozom	Kromozal Bozulmalar

2.6. Ağır Metal Kirliliklerini Giderme Yöntemleri

Atık su arıtmanın temel amacı, kullanım amacına bağlı olarak suyun kirlilik seviyesini istenilen seviyeye getirmektir. Bunun için çeşitli yöntemler uygulanmaktadır.

2.6.1. Kimyasal Çöktürme

Yüksek pH değerlerinde çözünmüş metal iyonları, kireç gibi bir çöktürücü ile kimyasal reaksiyonlara girerek çözünmez formlara dönüşebilir. Bu yöntemle ağır

metaller, biyolojik olarak parçalanamayan organik bileşikler ve fosfor, flor, ferrosiyandır ve diğer inorganik maddeler giderilebilir (Soyel, 2019). Çözeltideki metal çökeltileri genellikle hidroksit formunda oluşur. Ağır metallerin kimyasal çöktürme ile uzaklaştırılması basit ve ekonomiktir. Bu yöntemde aşırı miktarda çamur oluşması dezavantajdır.

2.6.2. Koagülasyon-Flokülasyon

Temel olarak pıhtılaşma süreci, koloidal parçacıkların eklenen pıhtılaştırıcılar tarafından destabilizasyonuna ve çökeltilmesine dayanır. Çözünür haldeki ağır metalleri, metal hidroksitler haline dönüştürür. Metal hidroksitler flok haline getirildikten sonra çöktürülür. Koagülasyon-flokülasyon işlemi, biyolojik olarak parçalanamayan organik maddelerin ve ağır metallerin kimyasal koagülant eklenerek atık sudan uzaklaştırılmasını sağlar. Koagülant eklenmesi, negatif yüklü koloidal parçacıklar arasındaki elektriksel itmeleri azaltır ve bunları bir çökelti oluşturmak için birbirine bağlar (Soyel, 2019).

2.6.3. Flotasyon

Flotasyon işlemi, sıvı bir ortama beslenen, katı parçacıklara yapışan ve yukarı doğru hareket eden hava kabarcıkları şeklinde gerçekleşir. Flotasyon işlemiyle yüzeyde birikmiş olan maddelerin toplanması ve uzaklaştırılması için sıyırıcı kullanılır ve arıtılmış su, kabarcık seviyesinden daha derinden toplanır.

2.6.4. Membran Filtrasyon

Membran filtrasyon prosesleri, atıksulardan ağır metallerin uzaklaştırılmasında çoğunlukla kullanılan yöntemlerdir. Bu yöntemler; ters osmoz, elektrodiyaliz ve ultrafiltrasyondur.

Ters osmoz, çözünür iyonları ve makro molekülleri sudan ayırmayı amaçlayan bir işlemdir. Bu yöntemle sıvı yükseklikleri arasında fark meydana gelir. Yüksek su (çözelti) tarafına denge basıncından daha yüksek bir basınç uygulandığında, çözücü ters yönde hareket etmeye zorlanır. Bu işleme ters osmoz denir. Ters osmoz yönteminin dezavantajları; maliyetinin yüksek olması, kısa sürede tıkanması, ön işlemlere ihtiyaç duyulmasıdır.

Ultrafiltrasyon işlemi, yüksek moleküler ağırlıklı çözünmüş maddeyi, mikroorganizmaları ve askıda kalmış maddeleri sıvılardan uzaklaştıran bir ayırma

işlemidir. Bu işlem, membran yüzeyine yıkanan yüksek hızlı paralel sıvı akışıyla gerçekleştirilir. Giriş ve çıkış arasındaki basınç farkından dolayı akış yönüne dik yönde ayrılma süreci gerçekleşir. Ters osmoz yöntemine göre daha az basınç uygulanır. Dezavantajı fazla çamur oluşumudur. Nanofiltrasyon yöntemi eleme ve elektriksel etkileri içerir. Nanofiltrasyon işleminde, iyonları seçici olarak geçiren bir dizi membran kullanır. Bir membran katyonların geçmesine izin verir ve anyonları geçirmezken, diğer zar ise anyonların geçmesine izin verir ve katyonları geçmesine izin vermez.

2.6.5. İyon Değiştirme

İyon değişimi, iyon değiştiricideki iyonlarla elektrostatik kuvvetler tarafından gerçekleşir. Sulu ortamda metal iyonlarının yer değiştirmesine dayanan ağır metal su ya da atıksudan uzaklaştırılması istenen çözünmüş iyonların giderilme yöntemidir.

2.6.6. Adsorpsiyon

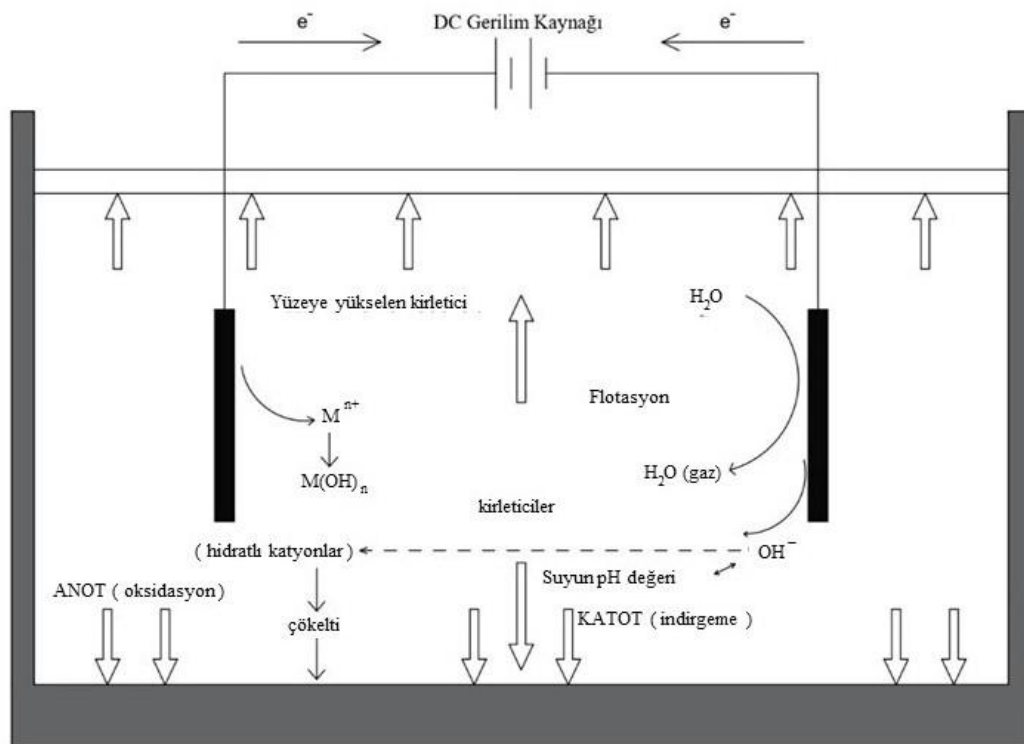
Adsorpsiyon, madde yüzeyi ile adsorbe edilen kimyasal arasındaki çekici kuvvete dayanan bir yöntemdir. Kirli hava ve su, aktif karbon ile hava ve sudaki kirlenmeleri adsorbe edilerek iyileştirilir. Adsorpsiyon yöntemi, su arıtma işlemlerinde çoğunlukla kullanılan temel yöntemlerden biri olup diğer yöntemlere göre düşük maliyet ve yüksek verimliliği açısından daha avantajlıdır (Mukherjee, 2014).

2.6.7. Elektrokimyasal Yöntem

Elektrokimyasal reaksiyonlar, elektrolitten göç eden iyonik bileşiklerin elektrotlarda oksitlendiği veya indirgendiği heterojen iyon transfer reaksiyonlarıdır. Bu yöntem son yıllarda atık su artımında dikkat çekmektedir. Avantajları koku ve renk giderimi, az kimyasal madde kullanımı, daha az iş gücü ve diğer yöntemlere göre daha az bakım maliyeti gerektirmesi olarak sıralanabilir (İlhan, 2007)

2.7. Elektrokoagülasyon (EC) Prosesi

Şekil 2.3’de gösterildiği gibi basit bir elektrokoagülasyon reaktörü, anot malzeme ve katot malzemedan oluşur. Güç kaynakları ile sağlanan enerji metalin katyona tutunmasını sağlarken, anot bu durumda oksidasyona uğrar.

$$2\text{H}_2\text{O}_{(1)} + 2\text{e}^- \Rightarrow \text{H}_{(2)} + 2\text{OH}^- \quad (2.4)$$


Şekil 2.3. Elektrokoagülasyon reaktörünün şematik diyagramı.

Elektrokoagülasyon sistemini ortamın kimyasal yapısı ve iletkenlik etkiler. pH değeri, partikül boyutları ve atık su içinde ki maddenin konsantrasyonu EC prosesini etkiler (Chen, 2004).

Genel olarak, EC prosesinin birbirini takip eden genel olarak 3 aşamadan oluştuğu kabul edilerek,

1. Kirleticilerin koagülant oluşturması;
2. Kirleticilerin destabilizasyonu, parçacık süspansiyonu ve emülsiyonların parçalanması;
3. Son aşamada istenmeyen kirleticilerden flok oluşumu.

EC'nin Avantajları;

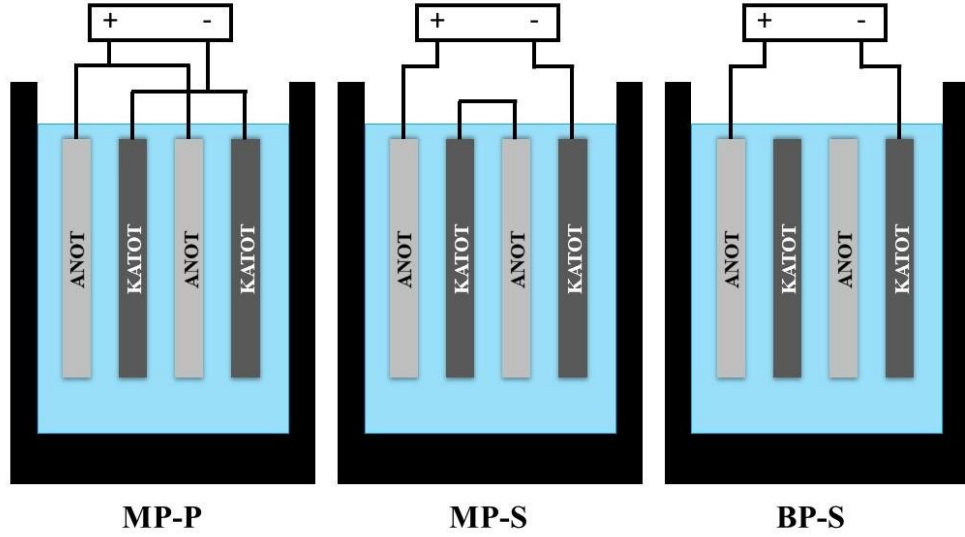
1. İşletme koşulları diğer yöntemlere göre kolaydır ve karmaşık olmayan araç ve gereçler gerektirir.
2. Kokusuz, şeffaf ve renksiz atık su arıtımı sağlanır.
3. Oluşan çamur oranı düşüktür. Atık sudan çamuru arıtmakta kolaydır.
4. Kimyasal yol ile ayrıştırılan floklarla aynı özelliklerdedir. Boyut olarak EC prosesinde oluşturulan floklar daha büyüktür. Su içeriği bakımından daha az bağlı su bulunmaktadır.
5. Çok küçük kolladial partikül maddelerin giderilmesinde etkilidir. Bunun sebebi EC süreci boyunca uygulanmakta olan akımın bu partikülleri hızlı hareket ettirmesidir.
6. EC prosesinde kimyasal kullanımı azdır. Bu yüzden de kimyasal madde kirliliği azdır. Atık sudan tekrar kimyasal madde arıtmak için uğraşmaya gerek yoktur.

EC' nin Dezavantajları;

1. Elektrotlar zamanla suda çözünür ve aşınır. Bu durumda da düzenli olarak değiştirilmesi gerekebilir.
2. Elektrik enerjisi pahalı olan yerlerde maliyet artabilir.
3. Katot üzerinde oluşabilecek geçirimsiz tabakadan kaynaklı verim kaybı yaşanabilir.
4. Yüksek iletkenlikli atık su ihtiyacı söz konusudur.

2.7.1. Elektrokoagülasyon Prosesinde Kullanılan Reaktör Tipleri

Basit bir EC reaktörü, elektrolit içine daldırılmış bir anot ve bir katottan oluşur. Anot ve katot elektrotları bir güç kaynağına bağlanır. Paralel ve seri bağlı olmak üzere anot ve katot elektrotlar tek kutuplu (monopolar) elektrokimyasal reaktörler oluşturulabilir. Paralel bağlı olmak üzere çift anot ve katottan oluşan monopolar elektrokoagülasyon reaktörü Şekil 2.4' de gösterilmiştir (Eyvaz, 2006).



Şekil 2.4. EC reaktörlerinin şematik diyagramı (Eyvaz, 2006).

Paralel bağlı monopolar EC reaktörü Şekil 2.4’ de gösterilen MP-P sisteminde iki adet paralel iletken metal plaka paralel elektrotları oluşturmaktadır. Sistemde gösterildiği üzere elektrotlar bir güç kaynağına bağlıdır. Güç kaynağı sayesinde EC prosesinde akım ve voltaj değerleri ayarlanır.

Seri bağlı tek kutuplu (bipolar) EC reaktörü Şekil 2.4’ de BP-S sistemi gösterilmektedir. Şekilde de gösterildiği üzere anot elektrot çiftleri birbirine bağlanmaktadır. Monopolar anot ve katot elektrotlar ise bir güç kaynağına bağlıdır. İç kısımda bulunan anot elektrotlar ile en dışta bulunan monopolar anot ve katot elektrotlar ile bağlantısı bulunmamaktadır. Sistemde gösterildiği üzere elektrotlar bir güç kaynağına bağlıdır. Güç kaynağı sayesinde EC prosesinde akım ve voltaj değerleri ayarlanır.

Paralel bağlı çift kutuplu (bipolar) EC reaktörü Şekil 2.3’ de BP-S sistemi gösterilmektedir. Bir güç kaynağına bağlı monopolar anot ve katot elektrot arasında birbiri ile bağlantısı olmayan çözünen anot elektrotlar yerleştirilmiştir. Elektrokoagülasyon reaktörü içindeki sıvı çözeltiye elektrik akımı uygulandığında, ortadaki bulunan bağımsız anot elektrotların bir yüzü anot diğer yüzü katot gibi davranmaktadır (Mameri, 2001). Sistemde gösterildiği üzere elektrotlar bir güç kaynağına bağlıdır. Güç kaynağı sayesinde EC prosesinde akım ve voltaj değerleri ayarlanır.

2.8. Elektro-Fenton (EF) Prosesi

İlk olarak elektro-fenton, 1984 yılında Fenton tarafından bulunmuştur ve H_2O_2 ile demir (Fe^{2+}) katalizörlüğünde ki metal iyonu arasındaki elektron transferine dayanmaktadır (Umar, 2010). Fenton sistemlerinin temelini, en güçlü kimyasal oksidantlardan olan hidroksil radikallerinin ($OH^\bullet$) oksidasyonu oluşturur. Temel Fenton reaksiyonları aşağıda gösterilmiştir



Fenton prosesleri; oksidant olarak hidroksil radikallerinin üretimi ve atık sudaki organik kirleticilerin oksidantlarla olan reaksiyonlarından oluşur (Otur, 2014). Bu ileri oksidasyon prosesinde, H_2O_2 'nin oksidant olarak kullanılması, nispeten ucuz, bol ve suda çözünür olması gibi avantajlardan ötürüdür. Denklem (2.5-2.7) serbest radikal teorisine göre, O_2 'nin salındığı döngüyü tanımlar. Durdurma reaksiyonları olarak denklem (2.8-2.9) işlev görür. $OH^\bullet$ organik bileşiği dehidrasyon veya hidroksilasyon yoluyla zararsız bileşiklere indirgeyen güçlü bir oksidant olarak kabul edilir (Zhou, 2018). Fenton reaksiyonuna ek olarak, elektro-Fenton işlemi için yaygın kullanılan mekanizma, katotta H_2O_2 oluşumudur. Katotta H_2O_2 oluşumu denklem 2.10 da gösterilmiştir. Üzerinde Fe^{+2} üretimi ise denklem 2.11'de gösterilmiştir.



Hidroksil radikallerinin kaynağı yalnızca Fenton oksidasyonu değildir. Suyun oksidasyonu ile anotta $OH^\bullet$ oluşumu meydana gelebilmektedir. Bu durumun oluşabilmesi için elektrolitik sulu ortamda yeterli elektrik akımına ihtiyaç vardır. Denklem 2.12'de gösterilmiştir.



Elektro-Fenton Prosesinin Avantajları;

- 1.Yüksek AKM konsantrasyonlarında etkili, basit ve kolay ekipman/uygulama,
2. Yüksek KOİ giderimi (reaktif boyalar hariç),
3. Kullanılan kimyasalların kolayca elde edilebilirliği,
4. Parçalanmaya dirençli ve aynı zamanda toksik bileşenlerin atık sudan uzaklaştırılmasında kısmen etkili olması.

Elektro-Fenton Prosesi Dezavantajları;

- 1.Kısıtlı bir pH aralığında etkili olması $pH < 3,5$,
2. Çamur oluşumu,
3. Oluşan demir çökelekleri,
- 4.Çamur bertarafı ve kullanılan kimyasallardan kaynaklanan maliyet.

2.8.1. Elektro-Fenton Prosesi ile Atıksu Arıtımında Yapılan Bazı Çalışmalar

Elektrot olarak alüminyum kullanılan bir kağıt işletmesinden oluşan atık suda hidrojen peroksit ilavesi ile AKM, KOİ ve renk giderimini incelemiştir. Çalışma sonucuna göre 24 dakikadan daha kısa sürede %97 KOİ gideriminin olduğu deney sonucuna göre belirlenmiştir (Kasap, 2017)

2.9. EC ve EF Prosesini Etkileyen Parametreler

Pek çok parametre EC ve EF prosesini etkileyen ana faktörlerin belirlenmesi ve en uygun şartların sağlanması için önemlidir. Bu parametrelerin çalışma süreci boyunca sistemi ne kadar etkilediği önemlidir. Bu parametreler aşağıda yer almaktadır;

- pH
- Akım yoğunluğu
- İletkenlik
- Elektrotlar arası mesafe
- H_2O_2 konsantrasyonu (elektro-Fenton)
- Sıcaklık
- Elektrot türü

2.9.1. pH Etkisi

pH değeri, EC ve elektro-Fenton sistemlerinin performansında çok etkili olan bir parametredir. Elektro-Fenton sistemlerinde yapılmış olan çalışmalara göre optimum pH değeri kirletici türü göz ardı edilerek yaklaşık 3 olarak belirlenmiştir. Elektro-Fenton prosesinde hidroksil radikalleri için ortamın asidik olması gerektiği belirlenmiştir. Genel olarak EF yönteminde pH 2,5- 3 aralığındadır (Tambosi, 2006). Suyun veya atık suyun pH değeri de metal hidroksitlerin çözünürlüğü üzerinde çok güçlü bir etkiye sahiptir ve bu nedenle giderim verimini büyük ölçüde etkiler. Her iki yöntemde de yapılan işlem esnasında ortamın pH'ı değişir. Bu değişiklik uygulanan akım miktarına, kullanılan elektrot malzemelerin cinsine ve başlangıç pH'ına bağlıdır (Koby, 2008). Önceki bazı çalışmalar, Fenton işleminin demir iyonlarının oksidasyonu, hidrolizi ve çökmesi nedeniyle yüksek pH'ta kirletici madde giderimi için etkili olmadığını göstermiştir.

2.9.2. Akım Yoğunluğunun Etkisi

Akım yoğunluğu, EC ve EF proseslerini etkileyen çok önemli parametrelerden biridir. EF prosesinde Fe^{2+} üretimi için akım yoğunluğunun miktarı önemlidir. Fe^{2+} miktarı arttıkça H_2O_2 ayrışması artar. Bu sayede de $OH^\bullet$ radikalleri üretilmiş olur. Fe^{2+} yeteri kadar üretilmezse oksidasyon verimi düşer ve bu durumda işletme veriminin düşmesine sebep olur. Aşırı yüksek akım uygulandığı durumlarda verim sistemi etkileyecek bazda değişmez. Akımın fazla verilmesi kullanılan enerji miktarını arttırır.

2.9.3. Elektrotlar Arası Mesafe Etkisi

Elektrotlar arası mesafe, sistemin enerji tüketimi ve potansiyelinde etkilidir. EF prosesinde mesafenin artması reaksiyonda etkili olan iyonların hareket etme süresini arttırır (He&Zhou, 2017). Elektrotlar arasındaki mesafe arttıkça sistemin enerji tüketimi de artar. Elektrotlar arasındaki mesafe elektrokoagülasyonu önemli ölçüde etkilemez, ancak mesafe arttıkça proses verimliliği biraz artar. Elektrotlar arasındaki mesafe arttıkça oluşan iyonların hareketi yavaşlar ve topak oluşumu artar. Üstelik bu floklar daha fazla kirleticiyi tutabilir (Daneshvar, 2004).

2.9.4. H₂O₂ Konsantrasyonu

H₂O₂ konsantrasyonu, teorik olarak üretilen OH•'nin miktarını doğrudan etkilediğinden, elektro-Fenton sistemlerinin verimliliğinde önemli bir rol oynar. Genel olarak, kirletici parçalanma hızı artan hidrojen peroksit konsantrasyonu ile artar. Bununla birlikte, hidroksil radikalleri ile reaksiyona girdiği için çok yüksek bir hidrojen peroksit konsantrasyonu önerilmez. Aynı zamanda aşırı hidrojen peroksit konsantrasyonu yüksek KOİ değerlerinin ölçülmesine neden olur (Kang, 2000). H₂O₂'nin eldesi kolaydır ve doğal olarak bulunur.

2.9.5. Sıcaklık

EC ve EF proseslerinde sıcaklıkta diğer parametreler gibi sistemi etkileyen bir parametredir. Genel olarak diğer kimyasal reaksiyonlardaki gibi sıcaklık arttıkça elektrokimyasal hız artmaktadır. 18.30C'nin altındaki bir sıcaklık, başlangıç kinetiğini yavaşlatabilir ve reaksiyon hızını ve giderim verimliliğini olumsuz yönde etkileyebilir. (Deng, Y., Englehardt, 2006).

2.9.6. Elektrot Türü

Elektrokoagülasyon prosesinde Fe ve Al elektrotları en yaygın kullanılan elektrotlardır. Bu malzemeler ucuz ve kolayca bulunabilen verimli elektrotlardır (Chen, 2004). Fe elektrotu elektrokoagülasyon prosesinde anot olarak kullandığında, arıtılan atık su ilk olarak yeşilimsidir daha sonrasında sarı – kahverengimsi renge dönüşür. Bu durumun sebebi EC esnasında oluşan Fe²⁺ ve Fe³⁺ türlerinden kaynaklanmaktadır. Elektrot malzemesi seçimi, elektro-Fenton proseslerinde önemli bir adım olup uygun anot malzemeleri, denklem 2.12'ye göre olası elektrot aşınmasını önleyebilir ve sistemin artıma verimliliğini etkileyebilir (He ve Zhou, 2017).

2.10. Reaksiyon Kinetiği

Kinetik, kelime anlamı olarak hareket ve eylem anlamına gelir. Bir reaksiyonun kinetiği, o reaksiyonun eylemi ve davranışı anlamına gelir. Kimyasal kinetik, bir reaktördeki reaksiyon hızının davranışını, bu hızı etkileyen parametreleri ve reaksiyon sonucu oluşan parametreleri inceler.

Reaksiyon kinetiği, reaksiyon mekanizmasını açıklar. Maddenin bir halden diğerine dönüşümü, reaksiyona katılan maddelerin reaksiyon hızı ile belirlenir. Madde konsantrasyonu, ortam pH'ı ve sıcaklık koşulları gibi faktörler reaksiyon hızını etkiler.

Oluşan reaksiyonun derecesi de reaksiyon hızını etkileyen bir faktördür. Reaksiyon sabiti, reaksiyon hızlarının belirlenmesinde en önemli parametredir. Sıfırıncı, birinci ve ikinci dereceden reaksiyonlar tipik olarak atık su arıtma tesislerinde meydana gelen reaksiyon türleridir.

n. dereceden bir kimyasal reaksiyonda A'nın konsantrasyonu (C_A) ve bunun zamanla değişim hızı aşağıdaki eşitlik ile tanımlanır. Denklem 2.13 de zamanla değişimi gösterilmiştir.

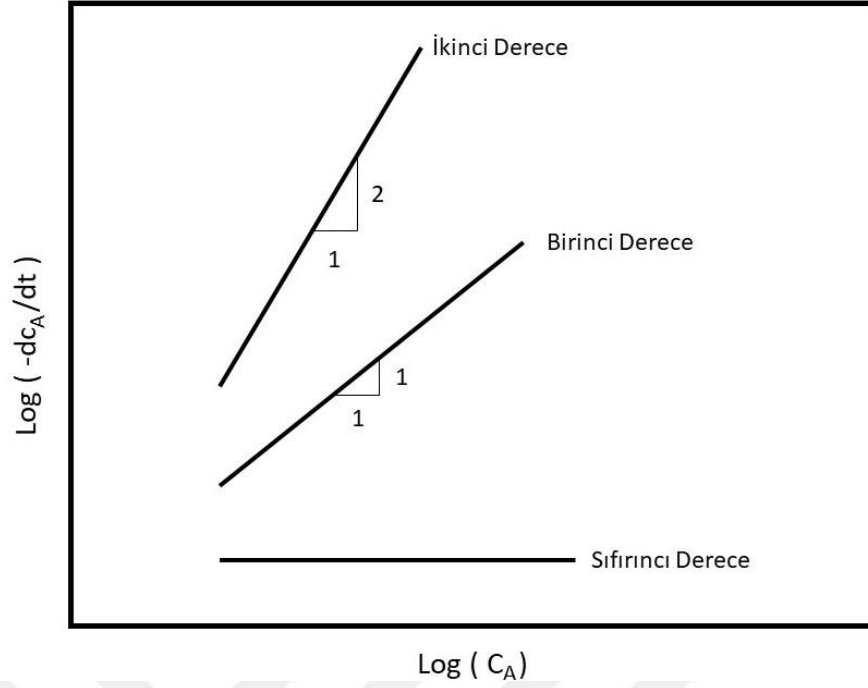
$$-\frac{dC_A}{dt} = K(C_A)^n \quad (2.13)$$

K = Hız sabiti

Eşitliğin her iki tarafının logaritmasının alınması ile,

$$\log \left[\frac{-dC_A}{dt} \right] = \log K + n \log(C_A) \text{ elde edilir.} \quad (2.14)$$

Deneysel sonuçların yardımıyla bir reaksiyonun hız ve derecesi bulunabilir. Herhangi sabit dereceli bir reaksiyon için reaksiyona giren madde konsantrasyonunun değişimi hızının logaritması, reaksiyona giren madde konsantrasyonunun logaritmasının fonksiyonu olarak grafiğe aktarılırsa ve bu aktarım sonucunda veriler bir doğru üzerine düşerse, bu doğrunun eğimi reaksiyonun derecesi olur (Şekil 2.5.). Sıfırıncı dereceden bir reaksiyon yatay bir çizgi oluşturur ve reaksiyon hızı konsantrasyondan bağımsız olur ve herhangi bir giren konsantrasyonunda aynıdır. Birinci dereceden bir reaksiyon için reaksiyon hızı doğrudan doğruya giren maddenin konsantrasyonuna ve ikinci dereceden eşitliklerde hız giren maddenin karesi ile orantılıdır .



Şekil 2.5. Log grafik ile reaksiyon derecesinin belirlenmesi.

2.10.1 Sıfırıncı Derece Kinetik Reaksiyon

Reaksiyon hızı sabittir ve bozunan madde konsantrasyondan bağımsızdır.

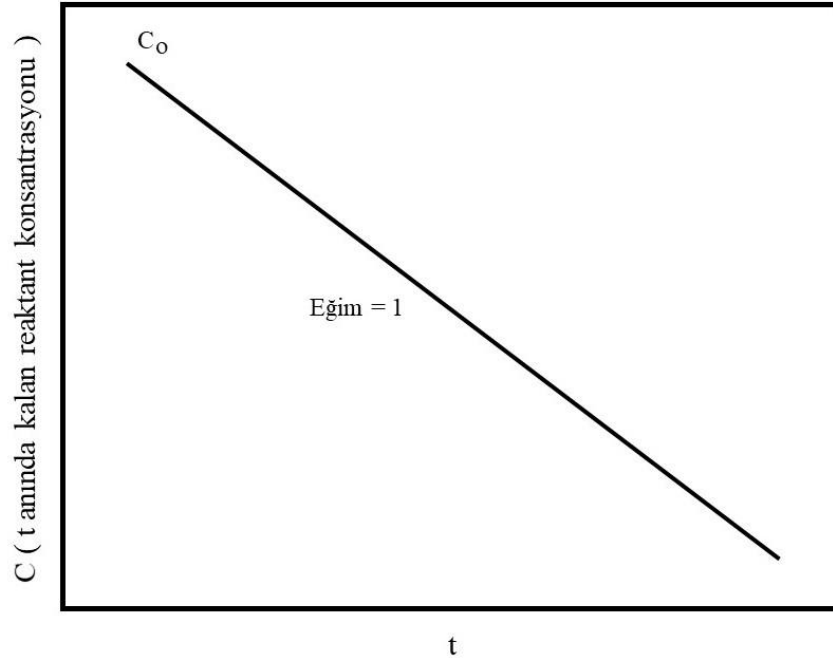
Sıfırıncı derece $n=0$ için eşitlik yazılacak olursa;

$$\frac{dc}{dt} = -k \quad (2.15)$$

$t=0$ için $C=C_0$ durumunda, 2.15 denkleminin integrali alınır ise,

$$C = C_0 - kt$$

$t - C$ değerleri arasında grafik çizildiğinde, elde edilecek doğrunun eğiminde k ve doğrunun y eksenini kestiği noktadan da C_0 değeri hesaplanabilir.



Şekil 2.6.Sıfırncı derece reaksiyon hız sabitinin bulunması

2.10.2 Birinci Derece Kinetik Reaksiyon

Reaksiyon hızı konsantrasyona bağlıdır. Atıksu arıtma sistemlerinde organik maddelerin mikroorganizmalar tarafından parçalanması reaksiyonları (BOİ ve KOİ reaksiyonları) birinci derece reaksiyonlardır.

Birinci derece $n=1$ için eşitlik yazılacak olursa;

$$\frac{dC}{dt} = -kC \quad (2.16)$$

k 'nın birimi T^{-1} 'dir.

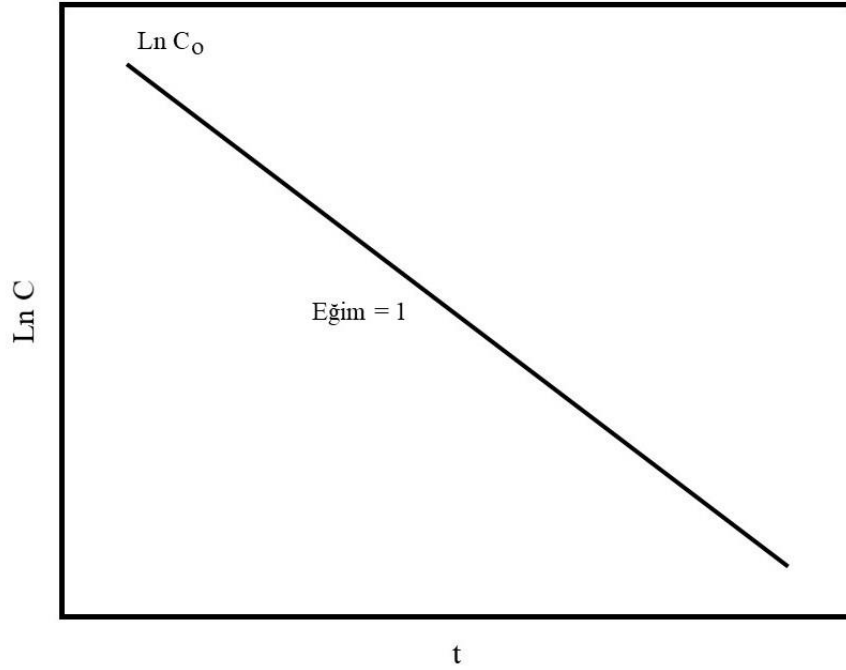
$t=0$ anında

$C=C_0$ durumunda

$$\ln C - \ln C_0 = -kt \quad (2.17)$$

2.17 denklemini tekrar düzenlenirse;

$$C = C_0 e^{-kt} \quad (2.18)$$



Şekil 2.7. Birinci derece reaksiyon hız sabitinin bulunması

2.10.3 İkinci Derece Kinetik Reaksiyon

Reaksiyon derecesi farklı hız kanunlarındaki reaktant konsantrasyonlarının üssel toplamı olarak ifade edilir.

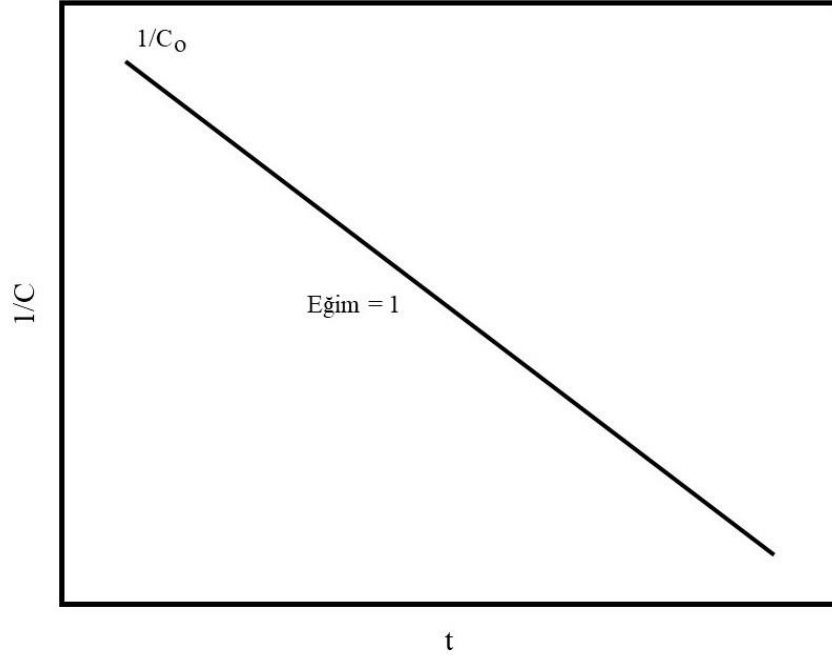
İkinci derece $n=2$ için eşitlik yazılacak olursa;

$$\frac{dc}{dt} = -kC^2 \quad (2.19)$$

$t=0$ anında

$C=C_0$ durumunda 2.19 denkleminin integrali alındığında,

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_0} + kt \text{ elde edilir.} \quad (2.20)$$



Şekil 2.8. İkinci derece reaksiyon hız sabitinin bulunması

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Atık Su ve Özellikleri

Deneylerde kullanılan atık su, Ordu İline bağlı Fatsa İlçesinde bulunan KARME METAL SAN.TİC.A.Ş. den alınmıştır. Bu çalışmada metal kaplama atık suyundan elektrokoagülasyon yöntemi ile KOİ giderim verimleri incelenmiştir. Deney sürecinde sistemi etkileyen parametreler pH, akım yoğunluğu, elektrotlar arası mesafe ve iletkenlik etkileri belirlenmiştir. Daha sonrasında elektro-Fenton yöntemi ile de KOİ giderim verimleri incelenmiş olup süreci etkileyen pH, H₂O₂, akım yoğunluğu, elektrotlar arası mesafe parametrelerinin etkileri belirlenmiştir. Bu iki farklı yöntem birbirleri ile kıyaslanarak, hangi yöntem ile daha iyi verim alındığı araştırılmıştır. Deneylerde kullanılan atık suyun özellikleri Tablo 3.1 de verilmiştir.

Tablo 3.1 Deneylerde kullanılan atık suyun özellikleri

Parametre	Birim	Değer
pH		2 – 2.30
Sıcaklık	°C	10 - 25
İletkenlik	mS/cm	2400 -2600
KOİ	mg/L	500 - 537

3.2. Deneyler İçin Kullanılan Cihazlar ve Kimyasallar

Deneylerde kullanılan cihazların özellikleri Tablo 3.2’de, kimyasal maddelerin özellikleri ise Tablo 3.3’te verilmiştir

Tablo 3.2 Deneyler için kullanılan cihazlar

Cihaz	Marka/Model
Spektrofotometre	Merck Spectroquant Nova 60
Termoreaktör	Merck Spectroquant-TR 420
Gerilim metre	GW GPC-3060 D Güç kaynağı
pH ölçer	Thermo Orion 4 Star
Santrifüj Sigma	Sigma
Manyetik karıştırıcı	Chiltern HS31

Tablo 3.3. Deneylerde kullanılan kimyasallar

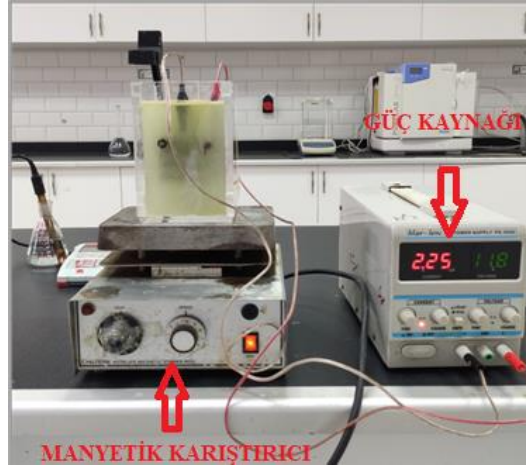
Kullanılan kimyasal	Marka
Hidrojen peroksit %35 lik (H_2O_2)	Merck
Hidroklorik asit (HCl) %37 lik	Merck
Sülfürik asit (H_2SO_4) %98 lik	Merck
Nitrik asit (HNO_3)	Tekkim
Sodyum Hidroksit (NaOH)	Carlo Erba
Potasyum dikromat ($K_2Cr_2O_7$)	Carlo Erba
Civa sülfat ($HgSO_4$)	Isolab
Gümüş sülfat (Ag_2SO_4)	Merck
Potasyum hidrojen ftalat ($HOCC_6H_4COOK$)	Carlo Erba

3.3. Elektrokoagülasyon Deney Düzenegi

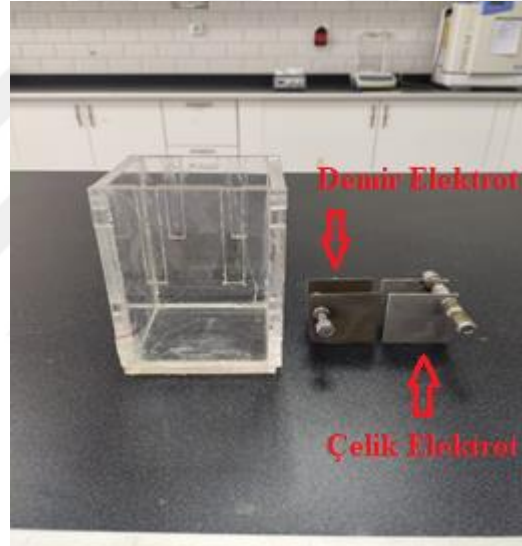
EC deneyleri Şekil 3.1’de gösterilen sistemde gerçekleştirilmiştir. Reaktör asit aşındırmalarına karşı dayanıklı sert plexiglas maddeden yapılmıştır. Kullanılan reaktör şekil olarak dikdörtgendir. Şekil 3.2’de kullanılan reaktör gösterilmiştir. Reaktörde maksimum kullanılan atık su hacmi 750 ml’dir. Elektrotlarımız birbirine paralel olarak bağlanmıştır. Kullanılan elektrot arası mesafe 0,9 cm olarak ayarlanmıştır. Deneylerde anot olarak seçilen malzeme demir, katot olarak seçilen malzeme çeliktir. Kullanılan 2 adet demir plakaların toplamda yüzey alanı 90,164 cm² dir. Akım ve voltaj ; GW GPC-3060 D marka güç kaynağı tarafından sağlanmıştır.

Her deney öncesi, EC reaktörü 750 mL atık su ile doldurulmuş ve 250 rpm’de artı formda manyetik karıştırıcı ile sürekli olarak karıştırılmıştır. Elektrokoagülasyon deney sürecini etkilememesi için alınan ham atık su kum filtreden süzülme işlemine eş değer olan 0,063 mm çapında bir elek kullanılarak ön filtreleme yapılmıştır (Panizza, 2013).

Metal kaplama atık suyunun pH’ı istenilen değere getirildikten sonra, her deney için ham atık suda KOİ ölçümleri yapılmıştır. Daha sonra reaktöre konan atık su 250 rpm’de manyetik bir karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Deneyler sırasında 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 ve 80 dakikalık periyodik aralıklarla numuneler alınmış ve gerekli ölçümler yapılmadan önce 10 dakika 9000 rpm’de santrifüjlenmiştir. KOİ analizleri Merck Spectroquant Nova 60A marka spektrofotometre ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1. Elektrokoagülasyon deney düzeneği



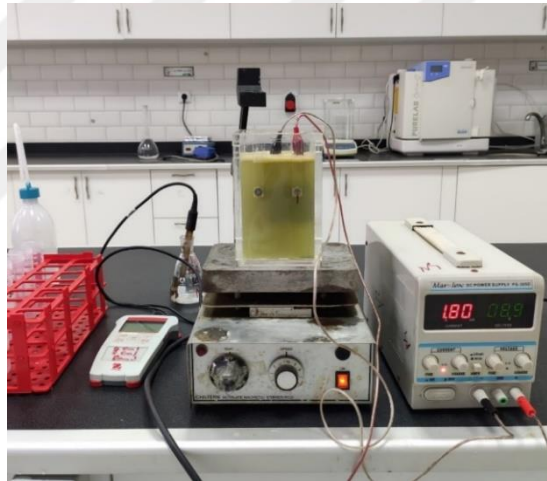
Şekil 3.2. EC deneyinde kullanılan reaktör ve malzemeler.

3.4. Eletro- Fenton Deney Düzeneği

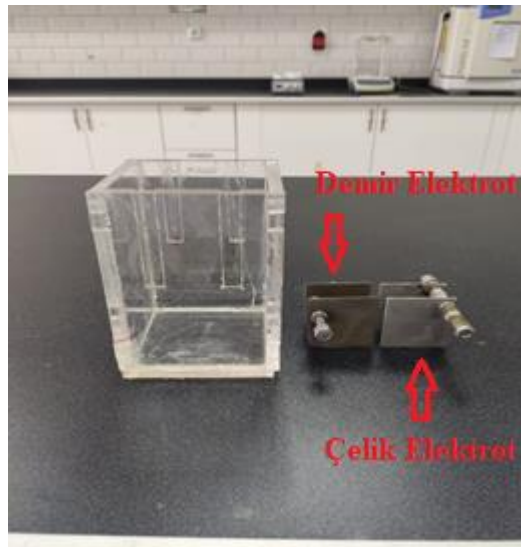
EF deneyleri şekil 3.3’de gösterilen sistemde gerçekleştirilmiştir. Reaktör asit aşındırmalarına karşı dayanıklı sert plexiglas maddeden yapılmıştır. Kullanılan reaktör şekil olarak dikdörtgendir. Şekil 3.4’de kullanılan reaktör gösterilmiştir Reaktörde maksimum kullanılabilen atık su hacmi 750 ml’dir. Elektrotlar birbirine paralel olarak bağlanmıştır. Kullanılan elektrot arası mesafe 1,25 cm olarak ayarlanmıştır. Deneylerde anot olarak seçilen malzeme demir, katot olarak seçilen malzeme çeliktir. Kullanılan 2 adet demir plakaların toplamda yüzey alanı 90,164 cm² dir. Akım ve voltaj ; GW GPC-3060 D marka güç kaynağı tarafından sağlanmıştır.

Her deney öncesi, EF reaktörü 750 mL atık su ile doldurulmuş ve 250 rpm'de artı formda manyetik karıştırıcı ile sürekli olarak karıştırılmıştır. EF deney sürecini etkilememesi için alınan ham atık suyun 0,063 mm çapında bir elek kullanılarak ön filtreleme yapılmıştır. Hidrojen peroksit (H_2O_2) reaktöre dışarıdan ilave edilirken, demir iyonları ise elektrik akımı ile atık su ortamında çözünebilir demir elektrotlar ile üretilmiştir.

Metal kaplama atık suyunun pH'ı istenilen değere getirildikten sonra, her deney için ham atık suda KOİ ölçümleri yapılmıştır. Daha sonra reaktöre konan atık su 250 rpm'de manyetik bir karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Deneyler sırasında 0, 2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20, 25, 30 ve 40 dakikalık periyodik aralıklarla numuneler alınmış ve gerekli ölçümler yapılmadan önce 10 dakika 9000 rpm'de santrifüjlenmiştir. KOİ analizleri Merck Spectroquant Nova 60A marka spektrofotometre ile gerçekleştirilmiştir.



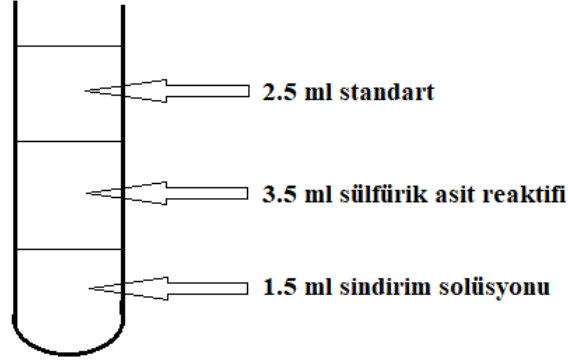
Şekil 3.3. Elektro-Fenton deney düzeneği



Şekil 3.4. EF deneyinde kullanılan reaktör ve malzemeler

3.5 KOİ Analizi

- KOİ analizinde, Hach Lange LCK 514 marka 13 mm çaplı KOİ test tüpleri kullanılmıştır.
- KOİ tüplerine sırasıyla Şekil 3.5'teki maddeler eklenmiştir.
-



Şekil 3.5. KOİ analizi çözelti ekleme sırası

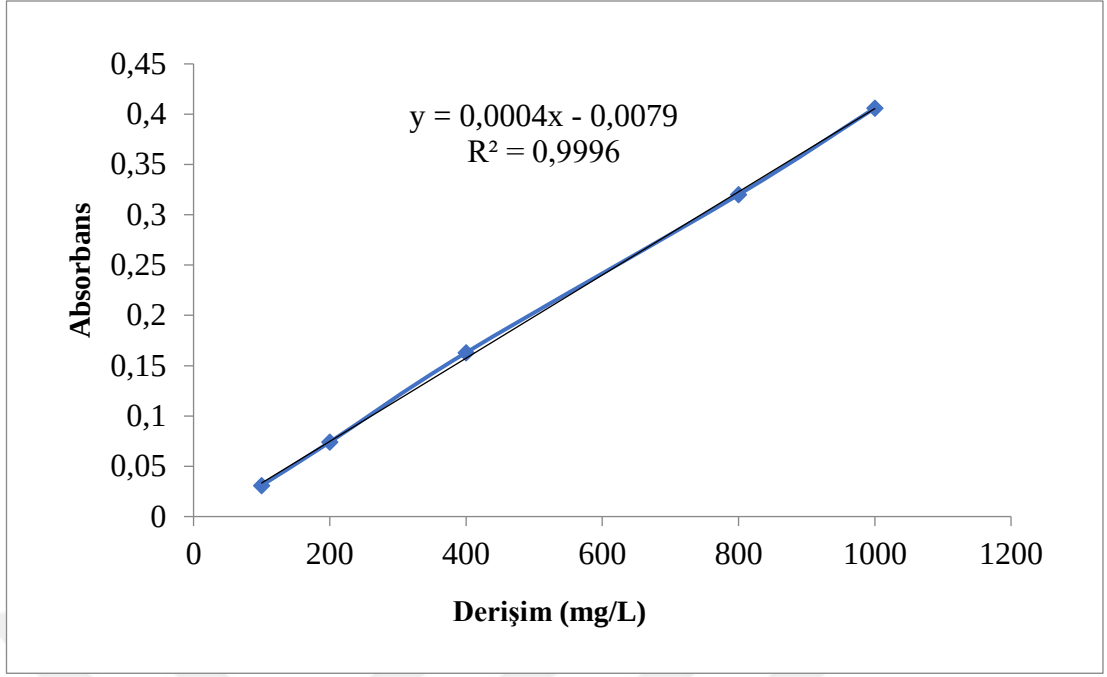
- Güzelce karıştırılan tüpler 148 °C de 2 saat boyunca termoreaktörde kaynatılır.
- Daha sonrasında KOİ tüpleri termoreaktörden çıkarılıp oda sıcaklığına gelinceye kadar soğumaya bırakılır.
- Konsantrasyona karşılık absorbans değerlerinden faydalanılarak kalibrasyon grafiği elde edilir.
- Numunelerin KOİ değerleri hazırlanan kalibrasyon grafiği yardımıyla numunelerin absorbans değerleri okutularak hesaplanmıştır. Deneylerde kullanılan kalibrasyon grafiği Şekil 3.6 da gösterilmiştir.

KOİ giderim verimi;

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

C_0 = Başlangıç konsantrasyonu KOİ (mg/L)

C_t = KOİ konsantrasyonu t anındaki (mg/L)



Şekil 3.6. Kalibrasyon grafiğı

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Elektrokoagülasyon Prosesi

Elektrokoagülasyon yöntemi ile KOİ giderim verimi için belirlenen optimum deneysel koşullar Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1 Elektrokoagülasyon yöntemi ile KOİ giderimi için optimum deneysel koşullar.

t(dk)	pH _i	pH _e	Volt	COD Verimi (%)
0	6,01	6,01	2,9	-
10	6,01	5,99	2,8	5,63
20	6,01	5,94	2,7	10,8
30	6,01	5,89	2,6	16,9
40	6,01	5,93	2,6	22,07
50	6,01	6	2,4	25,83
60	6,01	6,11	2,4	32,4
70	6,01	6,2	2,4	41,33
80	6,01	6,23	2,3	46,5

Elektrotlar arasındaki mesafe: 0,9 cm
Anot: Demir, Katot: Çelik
pH_i: 6,01
Reaktör ebatı: 74 mm x 83 mm x 140 mm
Aktif elektrot yüzey alanı: 90,164 cm²
Uygulanan akım yoğunluğu: 200 A/m²
İletkenlik: 5000 mS/cm

4.1.1. pH Etkisi

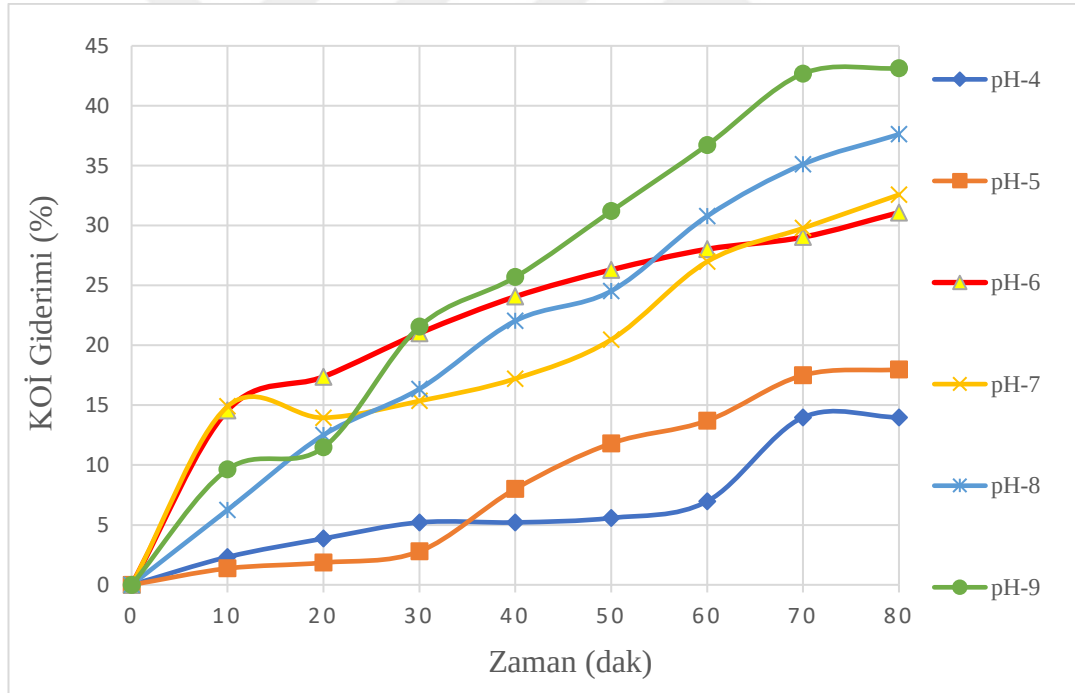
Elektrokoagülasyon sisteminde başlangıçtaki pH sistem verimini etkileyen ana parametrelerdendir. Daha önce yapılan çalışmalarda pH parametresinin önemi ortaya konmuştur (Daneshvar, 2006). pH parametresinin EC reaksiyonlarını nasıl etkilediğini belirlemek amacı ile atık suyun pH değerinin istenilen aralığa getirilebilmesi için NaOH ve H₂SO₄ çözeltileri eklendi.

pH'ın KOİ giderimi üzerindeki etkisini incelemek için diğer koşullar sabit tutularak (anot: demir, katot: paslanmaz çelik, akım yoğunluğu: 100 A/m², karıştırma hızı: 250 rpm, elektrotlar arası mesafe: 0,9 cm) farklı pH'lar (4, 5, 6, 7, 8, 9)

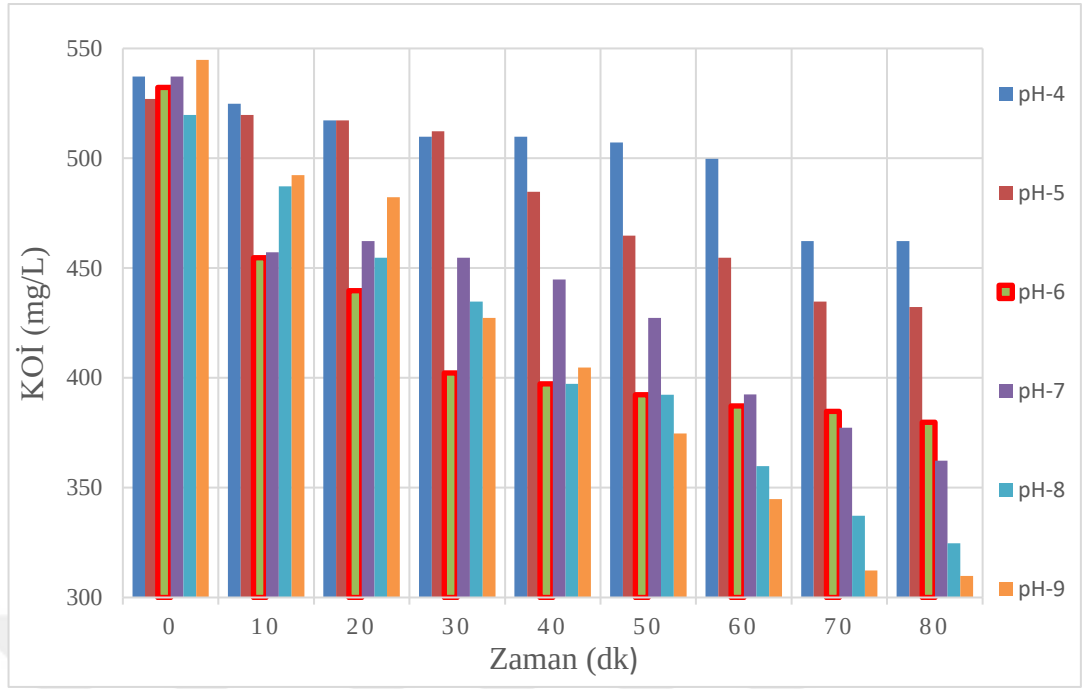
denenmiştir. Şekil 4.1’de pH değişiminin KOİ giderim verimi üzerindeki etkisi gösterilmiştir.

Metal iyonları, uygun bir pH’da, asılı parçacıkları kümeleştiren veya çözünmüş kirlenmeleri çökeltip adsorbe eden çok çeşitli pıhtılaşmış türler ve metal hidroksitler oluşturabilir. (Beyazıt, 2014). Başlangıç pH’ının çok alkali veya nötral durumda olması demir elektrotta $Fe(OH)_3$ ’ün ortamlardaki çözünürlüğünün azalmasına neden olur (Zodi, 2009).

Optimum pH değeri 6,01 seçilmiştir. Elektrokoagülasyon prosesinde pH: 6,01’de KOİ giderim verimi %31,08 çıkmıştır. En yüksek KOİ giderim verimi pH: 9’da çıkmıştır. Metal kaplama atık suyunun başlangıç pH: 2,30’dur. NaOH ilavesinin en az şekilde eklenebilmesi için ve ortamın pH değerinin çok alkali olmasını engellemek için pH:6 seçilmiştir. Şekil 4.2’de KOİ değerlerinin değişiminde çıkış pH’larının etkisi gösterilmiştir.



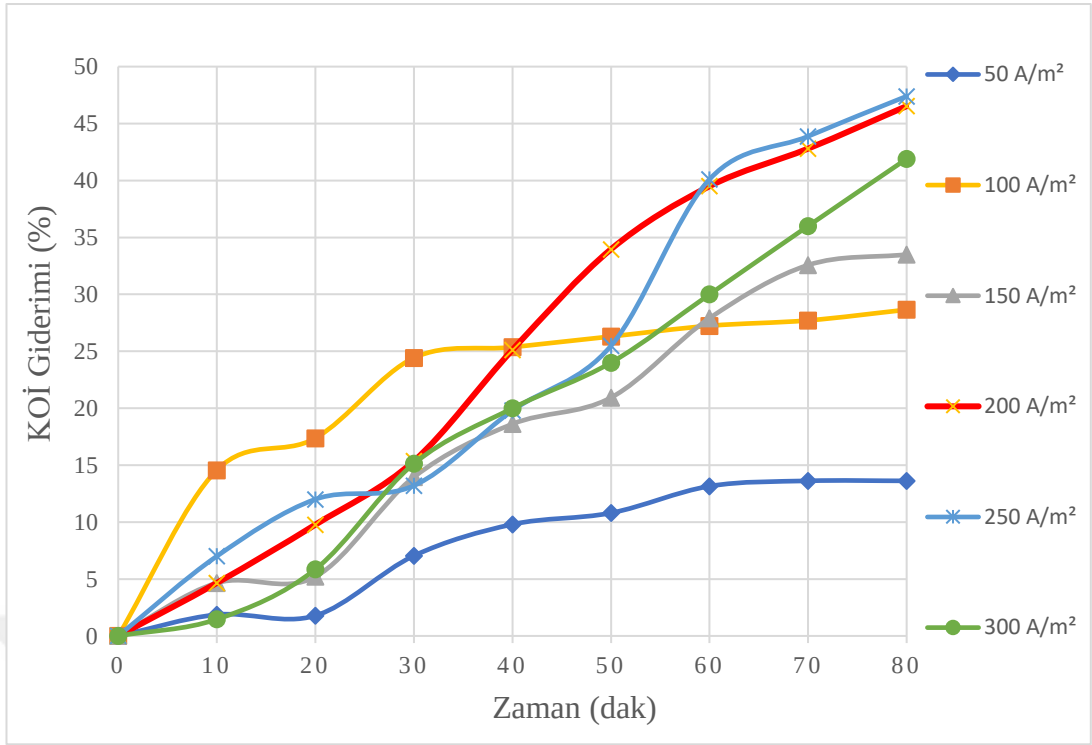
Şekil 4.1. KOİ giderimi üzerine pH'nın etkisi (Anot: demir, katot: çelik, akım yoğunluğu: 100 A/m², karıştırma hızı: 250 rpm, elektrotlar arası mesafe:0,9 cm)



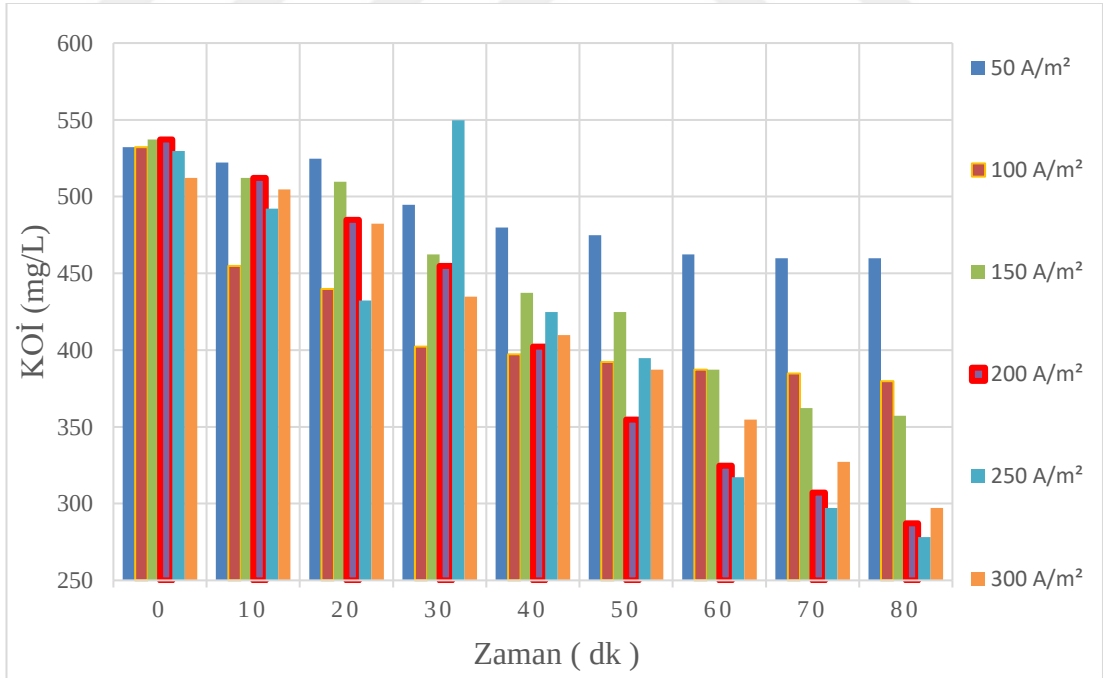
Şekil 4.2. KOİ değerlerinin değişiminde çıkış pH'larının etkisi (Anot: demir, katot: çelik, akım yoğunluğu: 100 A/m², karıştırma hızı: 250 rpm, elektrotlar arası mesafe:0,9 cm

4.1.2. Akım Yoğunluğu

Akım yoğunluğunun KOİ giderimi üzerindeki etkisini incelemek için, diğer deneysel koşullar (anot: demir, katot: paslanmaz çelik, pH: 6,01, 250 rpm, elektrotlar arası mesafe: 0,9 cm) sabit tutulmak şartıyla farklı akım yoğunlukları (50, 100, 150, 200, 250, 300 A/m²) denenmiştir. Şekil 4.3'de akım yoğunluğu değişiminin KOİ giderim verimi üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Akım yoğunluğu KOİ giderim verimi en fazla 250 A/m²'de %47,4'dür. Fakat optimum koşullar için 200 A/m² akım yoğunluğu seçilmiştir. 200 A/m² akım yoğunluğu seçilmesine sebep olarak elektrik enerjisi tüketiminin daha az olması gösterilebilir. Akım yoğunluğunun incelendiği çalışmalarda akım arttıkça verim artmıştır. Daha sonrasında fazla akımda tekrar verim düşmüştür. Aşırı oksijen birikmesini önlemek ve olumsuz etkileri ortadan kaldırmak için uygulanacak olan akım yoğunluğunun miktarı çok önemlidir (Kabdaşlı, 2012). Şekil 4.4. KOİ değerlerinin değişiminde akım yoğunluğunun etkisi gösterilmiştir.



Şekil 4.3. KOİ giderimi üzerine akım yoğunluğunun etkisi (Anot: demir, katot: çelik, pH: 6.01, karıştırma hızı: 250 rpm, elektrotlar arası mesafe: 0,9 cm)

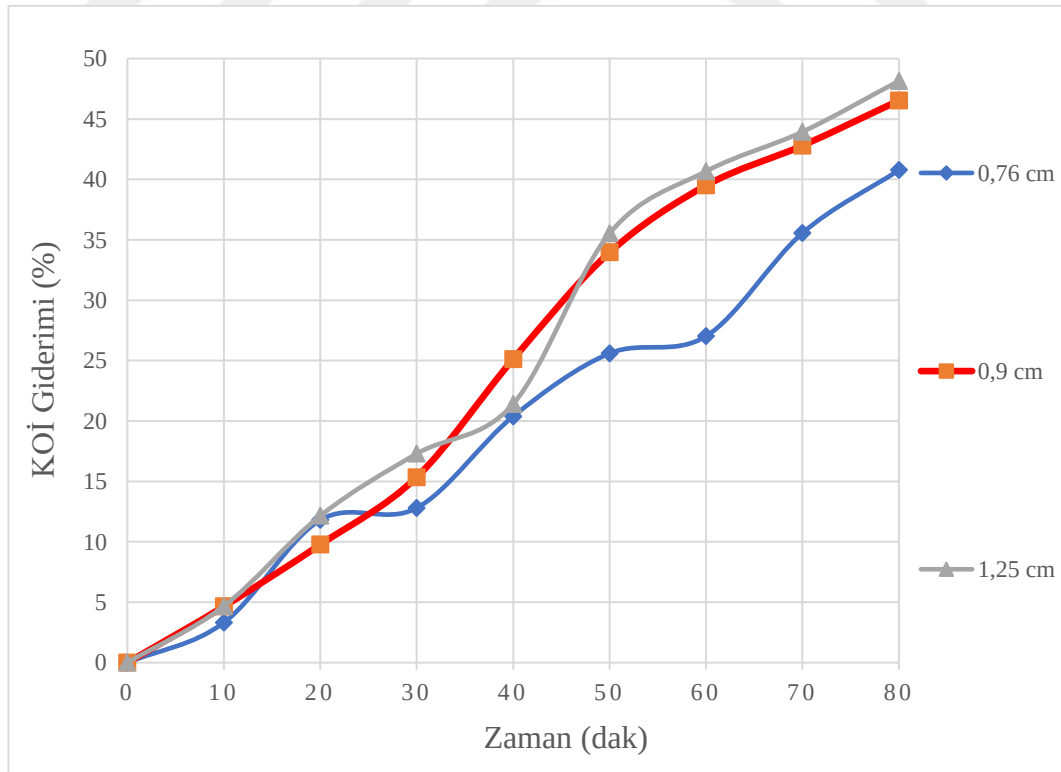


Şekil 4.4. KOİ değerlerinin değişiminde akım yoğunluğunun etkisi (Anot: demir, katot: çelik, pH: 6.01, karıştırma hızı: 250 rpm, elektrotlar arası mesafe: 0,9 cm)

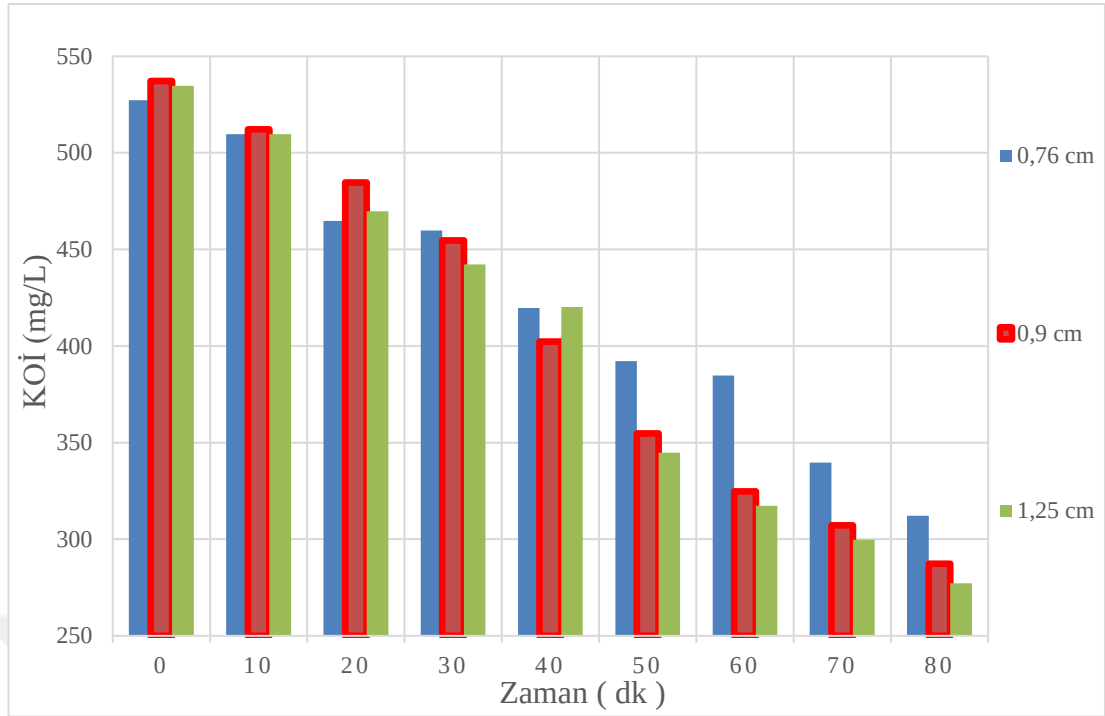
4.1.3. Elektrotlar Arasındaki Mesafe Etkisi

Elektrotlar arasındaki mesafe, elektrokoagülasyon işleminde kirlетici giderme verimliliğini etkileyen bir diğer önemli parametredir (Nidheesh, 2012). Elektrotlar arasındaki mesafe arttıkça elektrotlar arasındaki elektrik direnci artar, elektroliz süresi uzar ve kirlетici giderme verimi düşer (He, 2017). Diğer taraftan, elektrotlar arasındaki mesafenin artması elektrik enerjisi tüketimini de artırmaktadır.

Elektrotlar arası mesafe etkisinin KOİ giderimi üzerindeki etkisini incelemek için, diğer deneysel koşullar (anot: demir, katot: paslanmaz çelik, pH: 6,01, 250 rpm, akım yoğunluğu 200, A/m²) sabit tutulmak şartıyla farklı mesafeler (0,76 - 0,9 - 1,25 cm) denenmiştir. Şekil 4.5’de elektrotlar arası mesafe etkisinin KOİ giderim verimi üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Elektrotlar arası mesafe azaldıkça KOİ giderim verimi azalmıştır. Mesafe arttıkça verim artmıştır. En yüksek verim 1,25 cm mesafede % 48,15 olmuştur. Fakat optimum deney koşulları için % 46,53 KOİ giderim verimi ile 0,9 cm elektrot arası mesafe seçilmiştir. Çünkü elektrotlar arası mesafe arttıkça elektrik enerjisi tüketimi de artmaktadır. Şekil 4.6’da KOİ değerlerinin değişiminde elektrotlar arası mesafe etkisi gösterilmiştir.



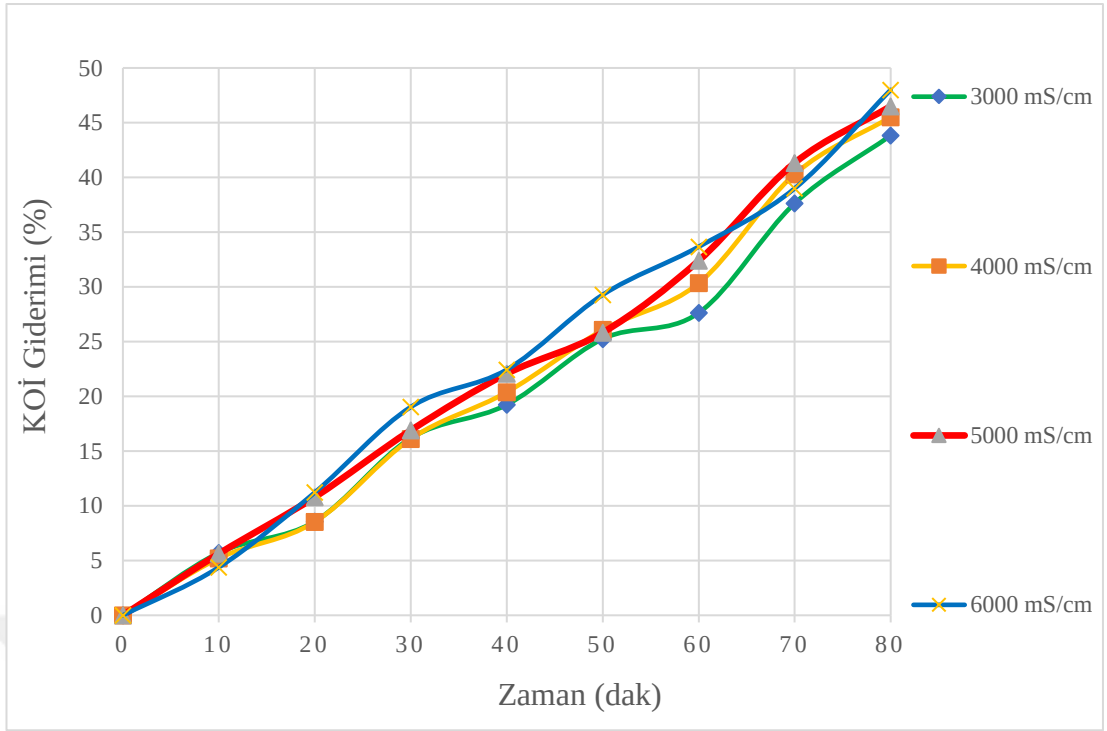
Şekil 4.5. KOİ giderimi üzerine elektrotlar arası mesafe etkisi (Anot: demir, katot: çelik, pH: 6.01, akım yoğunluğu: 200 A/m², karıştırma hızı: 250 rpm).



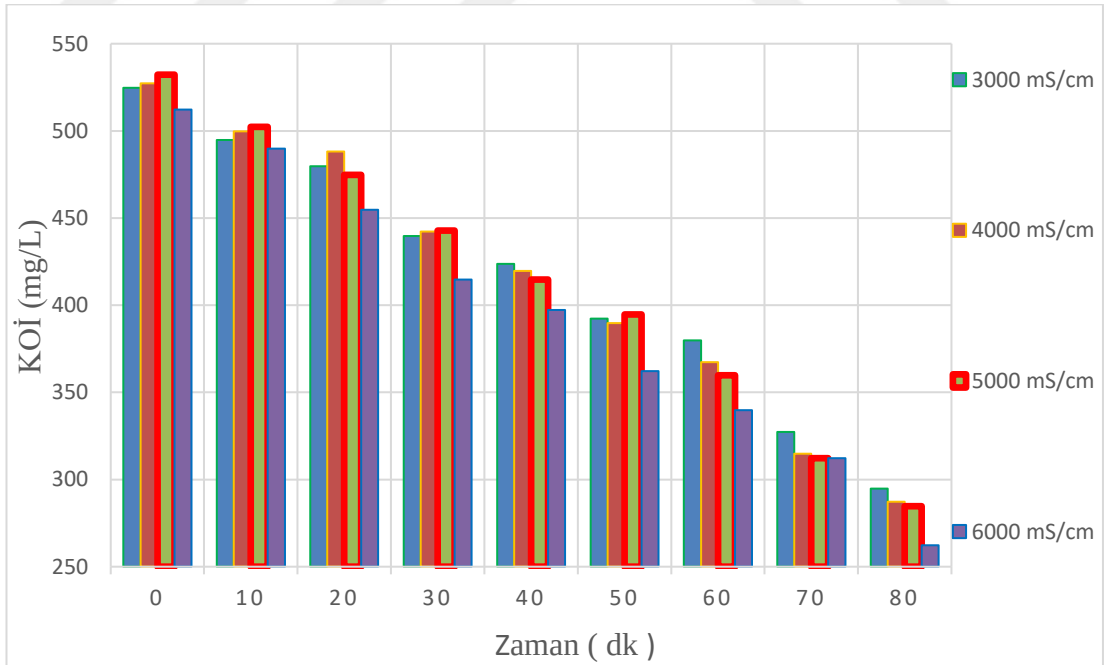
Şekil 4.6. KOİ değerlerinin değişiminde elektrotlar arası mesafe etkisi (Anot: demir, katot: çelik, pH: 6.01, akım yoğunluğu: 200 A/m², karıştırma hızı: 250 rpm).

4.1.4. İletkenlik Etkisi

Bu çalışmada iletkenlik etkisinin KOİ giderimi üzerindeki etkisini incelemek için, diğer deneysel koşullar (anot: demir, katot: paslanmaz çelik, pH: 6.01, karıştırma hızı, 250 rpm, akım yoğunluğu 200, A/m², elektrotlar arası mesafe: 0.9 cm) sabit tutulmak şartıyla farklı iletkenlikler (3000, 4000, 5000, 6000 µS/cm) denenmiştir. İletkenlik parametresinin KOİ giderim verimi üzerinde diğer parametreler kadar etkisi olmamıştır. İletkenliğin artması ile tüketilen elektrik enerjisi miktarı azalmıştır. Atık suyumuzda iletkenliğin ayarlanabilmesi için NaCl eklenmiştir. Deneylerde iletkenlik için 5000 µS/cm seçilmiştir. 5000 m µS/cm iletkenlikte KOİ giderim verimi % 46.5 tir. Şekil 4.7’de iletkenlik etkisinin KOİ giderim verimi üzerindeki değişimi gösterilmiştir. En fazla verim 6000 µS/cm iletkenlikte olmuştur. Eklenen NaCl miktarı fazla olduğundan optimum koşullar için 5000 µS/cm iletkenlik seçilmiştir. Şekil 4.8. KOİ değerlerinin değişiminde iletkenliğin etkisi gösterilmiştir.



Şekil 4.7. KOİ giderimi üzerine iletkenliğin etkisi (Anot: demir, katot: çelik, pH: 6.01, akım yoğunluğu: 200 A/m², karıştırma hızı: 250 rpm, elektrotlar arası mesafe: 0,9 cm)



Şekil 4.8. KOİ değerlerinin değişiminde iletkenliğin etkisi (Anot: demir, katot: çelik, pH: 6.01, akım yoğunluğu: 200 A/m², karıştırma hızı: 250 rpm, elektrotlar arası mesafe: 0,9 cm)

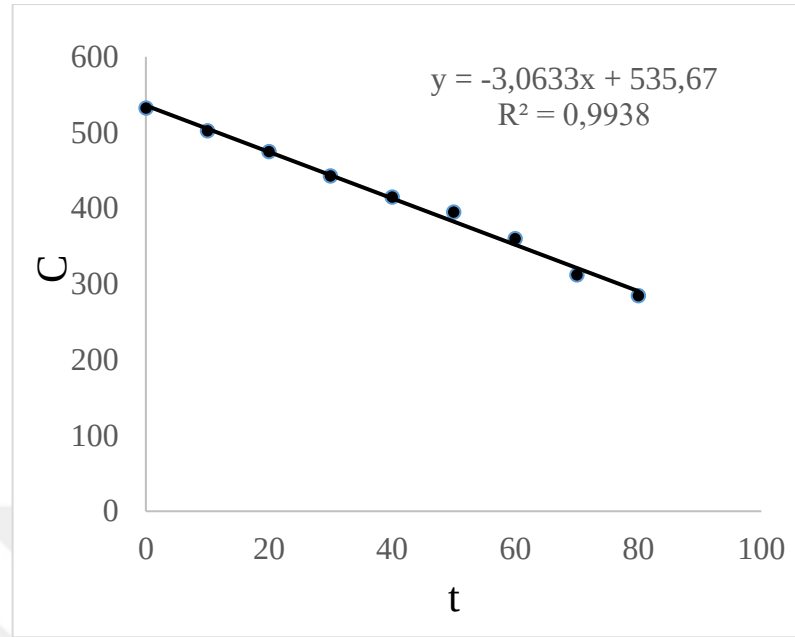
4.1.5. EC Prosesi İçin Reaksiyon Kinetiği

Reaksiyon kinetik çalışması yapılmış olup sıfıncı, birinci ve ikinci derece kinetikler için elde edilen belirtme katsayıları (R^2) sırasıyla, 0.9938, 0.9754, 0.9418 şeklinde belirlendiğinden, optimum koşulların sıfıncı derece kinetik denklemi ($y = -3.0633x + 535.67$) ile açıklanabilir olduğu sonucuna varılmıştır. Sıfıncı, birinci ve ikinci derece reaksiyon kinetik grafikleri Şekil 4.9 - 4.10 - 4.11' de gösterilmiştir. Reaksiyon kinetiği anlatımı ve denklemleri başlık '2. 10'da Reaksiyon Kinetikleri' mevcuttur. Elektrokoagülasyon prosesi için sırası ile sıfıncı-birinci-ikinci derece reaksiyon kinetik sonuçları Tablo 4.2'de gösterilmiştir.

Tablo 4.2. EC prosesi için sırası ile sıfıncı-birinci-ikinci derece reaksiyon kinetikleri sonuçları.

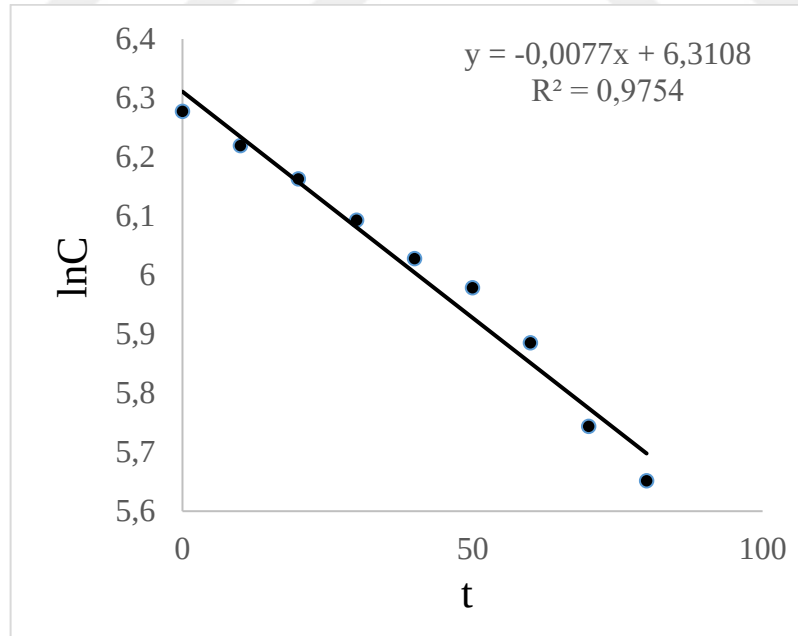
Sıfıncı		Birinci		İkinci	
t	C	t	lnC	t	1/C
0	532,25	0	6,27711	0	0,00188
10	502,25	10	6,2191	10	0,00199
20	474,75	20	6,16279	20	0,00211
30	442,75	30	6,09301	30	0,00226
40	414,75	40	6,02768	40	0,00241
50	394,75	50	5,97825	50	0,00253
60	359,75	60	5,88541	60	0,00278
70	312,25	70	5,7438	70	0,0032
80	284,75	80	5,65161	80	0,00351

Sıfırıncı Derece



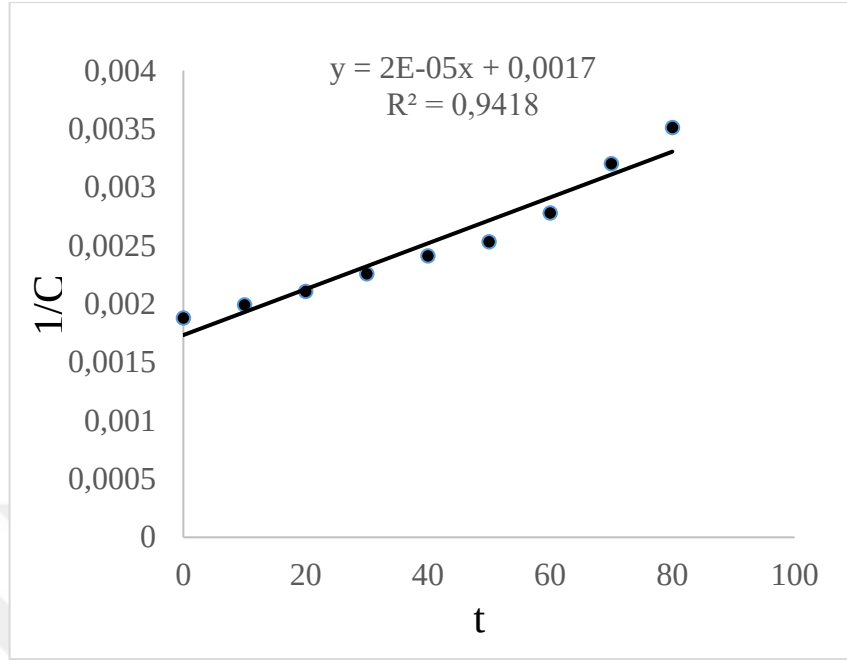
Şekil 4.9. EC prosesi sıfırıncı derece reaksiyon grafiği

Birinci Derece



Şekil 4.10. EC prosesi birinci derece reaksiyon grafiği

İkinci Derece



Şekil 4.11. EC prosesi ikinci derece reaksiyon grafiği

4.2. Elektro-Fenton Prosesi

Elektro-fenton yöntemi ile KOİ giderim verimi için belirlenen optimum deneysel koşullar Tablo 4.3’de verilmiştir.

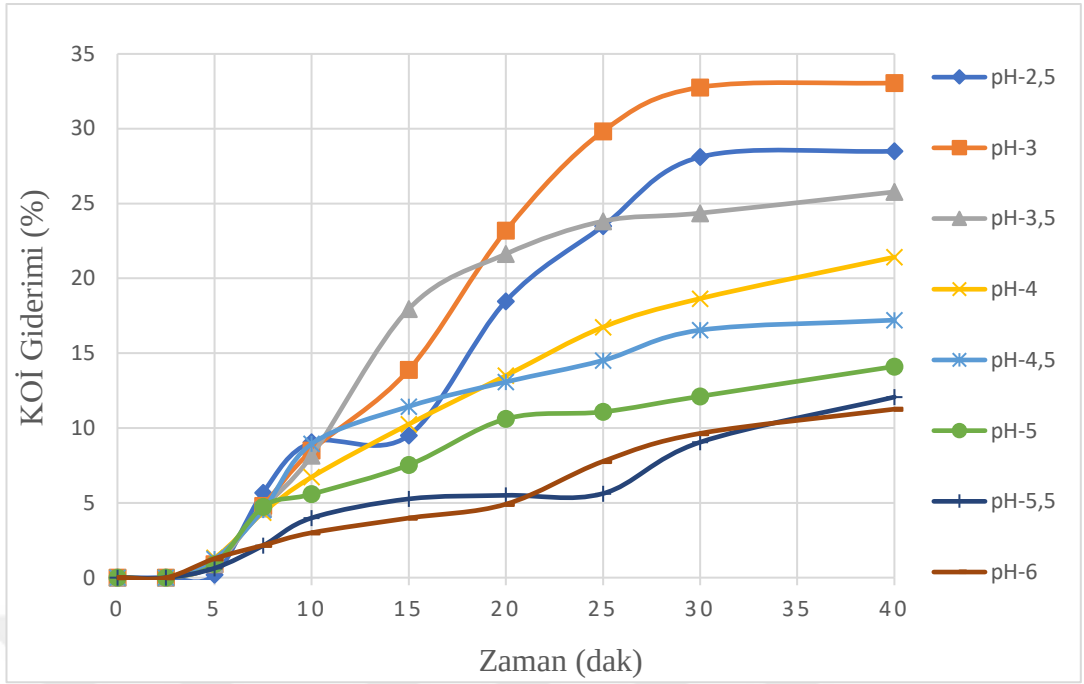
Tablo 4.3.Elektro-Fenton yöntemi ile KOİ giderimi için optimum deneysel koşullar.

t (dk)	pH _i	pH _e	Volt	COD verimi (%)
0	3.00	3	2,2	-
2,5	3.00	3,11	2,2	-
5	3.00	3,17	2,3	1,15
7,5	3.00	3,26	2,3	7,44
10	3.00	3,29	2,4	22,81
15	3.00	3,35	2,4	32,76
20	3.00	3,42	2,5	51,32
25	3.00	3,48	2,5	61,47
30	3.00	3,54	2,6	78,58
40	3.00	3,59	2,7	82,16

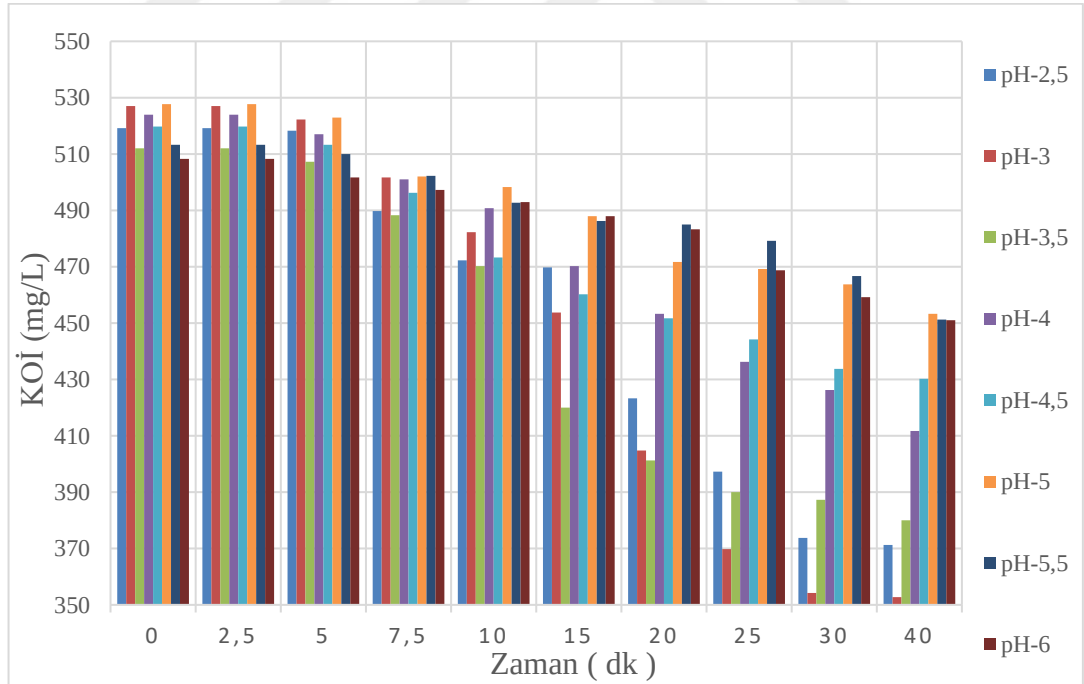
Elektrotlar arasındaki mesafe: 1,25 cm
Anot: Demir, Katot: Çelik
pHi: 3
Reaktör ebatı: 74 mm x 83 mm x 140 mm
Aktif elektrot yüzey alanı: 90,164 cm²
Uygulanan akım yoğunluğu: 150 A/m²
İletkenlik: 5000 mS/cm
H₂O₂ konsantrasyonu: 1500 mg/L

4.2.1. pH Etkisi

Elektro-Fenton sistemlerinde atık su pH 'sı performansı etkileyen ana faktörlerden biridir (He 2017). Daha önce yapılan çalışmalarda, elektro-Fenton metodu ile kirletici giderimin de optimum pH değerinin üç civarında olduğu bildirilmiştir (Ma 2016). pH'ın KOİ giderimi üzerindeki etkisini incelemek için diğer koşullar sabit tutulmak şartıyla (anot: demir, katot: çelik, akım yoğunluğu: 50 A/m², H₂O₂:1500 mg/L, karıştırma hızı: 250 rpm, elektrotlar arası mesafe: 0.9 cm) farklı pH' lar (2,5 – 3 - 3,5 – 4 - 4,5 – 5 - 5,5 - 6) denenmiştir. En yüksek KOİ giderim verimi pH 3 te % 33.06 olarak gözlemlenmiştir. Şekil 4.12'de görüldüğü üzere ilk 5 dakika boyunca KOİ giderimi gözlemlenmemiştir. Bu durum, ortamda hidroksil radikallerinin oluşmasının belirli bir zaman aldığını göstermektedir. Maksimum KOİ giderim veriminin elde edildiği 40. dakikada atık su çıkış pH' sı 3.69 olarak ölçülmüştür. Şekil 4.8'de pH değişiminin KOİ giderim verimi üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Optimum pH değeri en iyi KOİ 3 kabul edilmiştir. Şekil 4.13' KOİ değerlerinin değişiminde çıkış pH'larının etkisi gösterilmiştir.



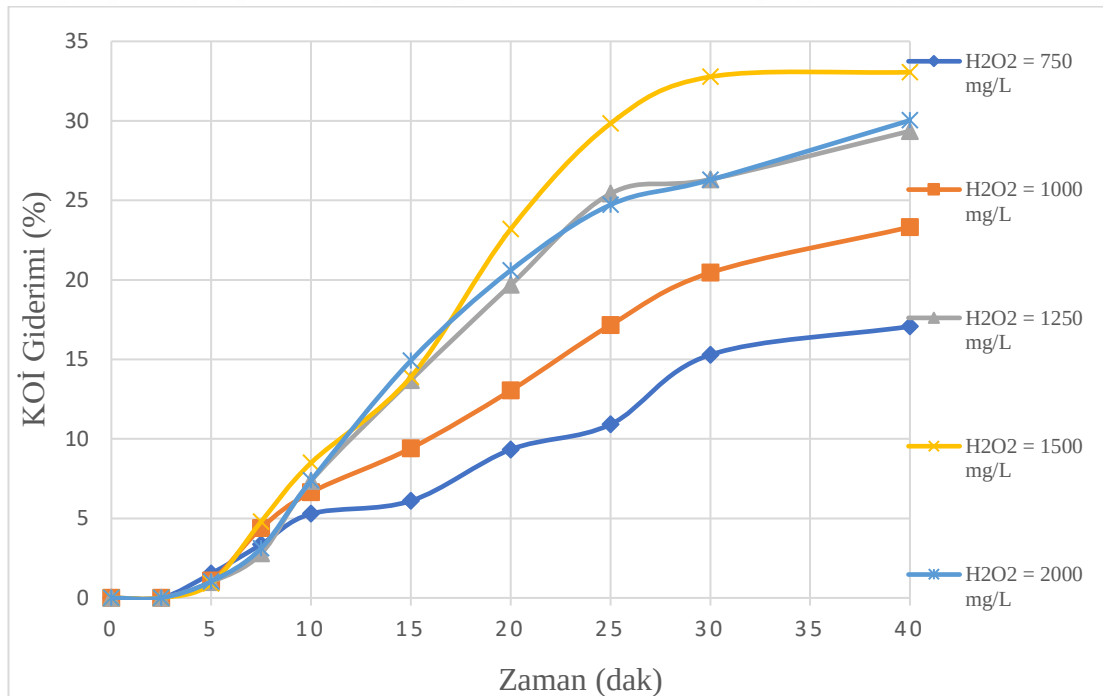
Şekil 4.12. KOİ giderimi üzerine pH' nın etkisi (Anot: demir, katot: çelik, akım yoğunluğu: 50 A/m², karıştırma hızı: 250 rpm, elektrotlar arası mesafe: 0,9 cm)



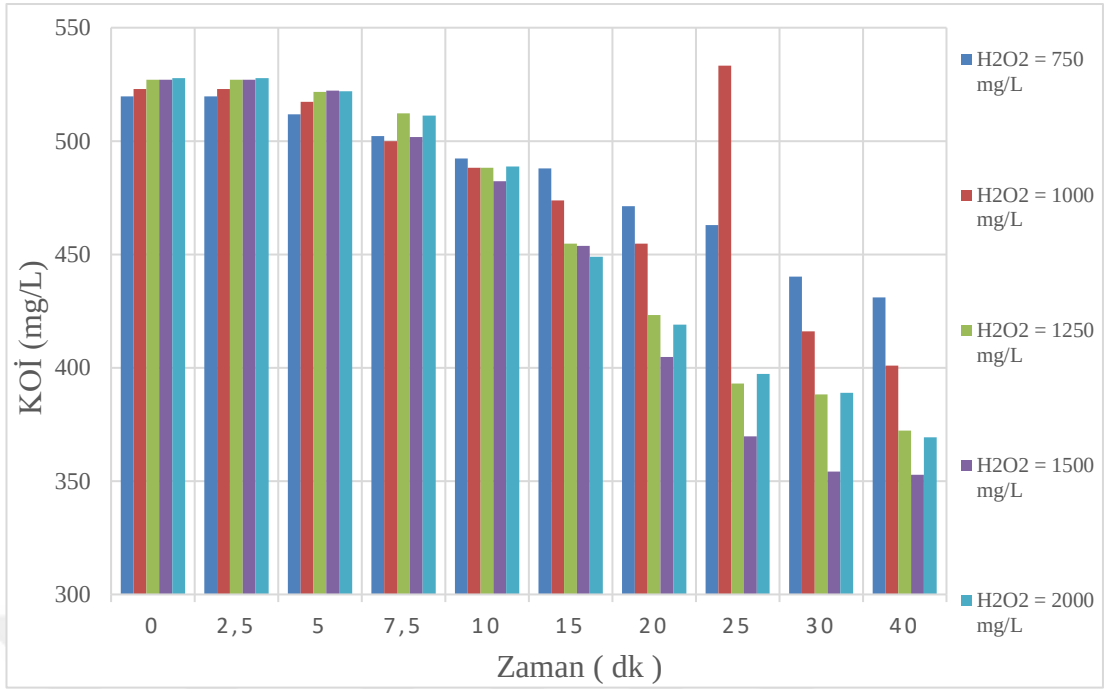
Şekil 4.13. KOİ değerlerinin değişiminde çıkış pH' larının etkisi (Anot: demir, katot: çelik, akım yoğunluğu: 50 A/m², karıştırma hızı: 250 rpm, elektrotlar arası mesafe: 0,9 cm)

4.2.2. H₂O₂ Konsantrasyonu Etkisi

Hidrojen peroksit, Elektro-Fenton reaksiyonlarında üretilen hidroksil radikallerinin ana kaynağıdır. H₂O₂ konsantrasyonunun KOİ giderimi üzerine etkisini incelemek için, diğer deneysel koşullar (anot: demir, katot: paslanmaz çelik, pH: 3, akım yoğunluğu: 50 A/m², karıştırma hızı: 250 rpm, elektrotlar arası mesafe: 0,9 cm) sabit tutulmak şartıyla farklı H₂O₂ konsantrasyonları (750, 1000, 1250, 1500, 2000 mg/l) denenmiştir. Şekil 4.14'de görüldüğü gibi, maksimum KOİ giderim verimine (% 3,06) 40. dakikanın sonunda ulaşılmıştır. 1500 mg/L'nin üzerindeki H₂O₂ konsantrasyonlarında, KOİ giderim verimleri azalmıştır. Bu durum, fazla H₂O₂'nin hidroksil radikalleri üzerindeki süpürücü etkisiyle açıklanabilir. Maksimum KOİ giderim veriminin elde edildiği 40. dakikada atık su çıkış pH sı 3.69 olarak ölçülmüştür. Şekil 4.14'de H₂O₂ konsantrasyonu değişiminin KOİ giderim verimi üzerindeki etkisi gösterilmiştir. H₂O₂ konsantrasyonu, elektro-Fenton reaksiyonlarının verimliliğinde önemli bir rol oynar ve hidroksil radikallerinin üretim hızını doğrudan etkiler (Deng, 2006). Şekil 4.15'de KOİ değerlerinin değişiminde H₂O₂ konsantrasyonu etkisi gösterilmiştir.



Şekil 4.14. KOİ giderimi üzerine H₂O₂ konsantrasyonu etkisi (Anot: demir, katot: çelik, pH:3, akım yoğunluğu: 50 A/m², karıştırma hızı: 250 rpm, elektrotlar arası mesafe: 0,9 cm)

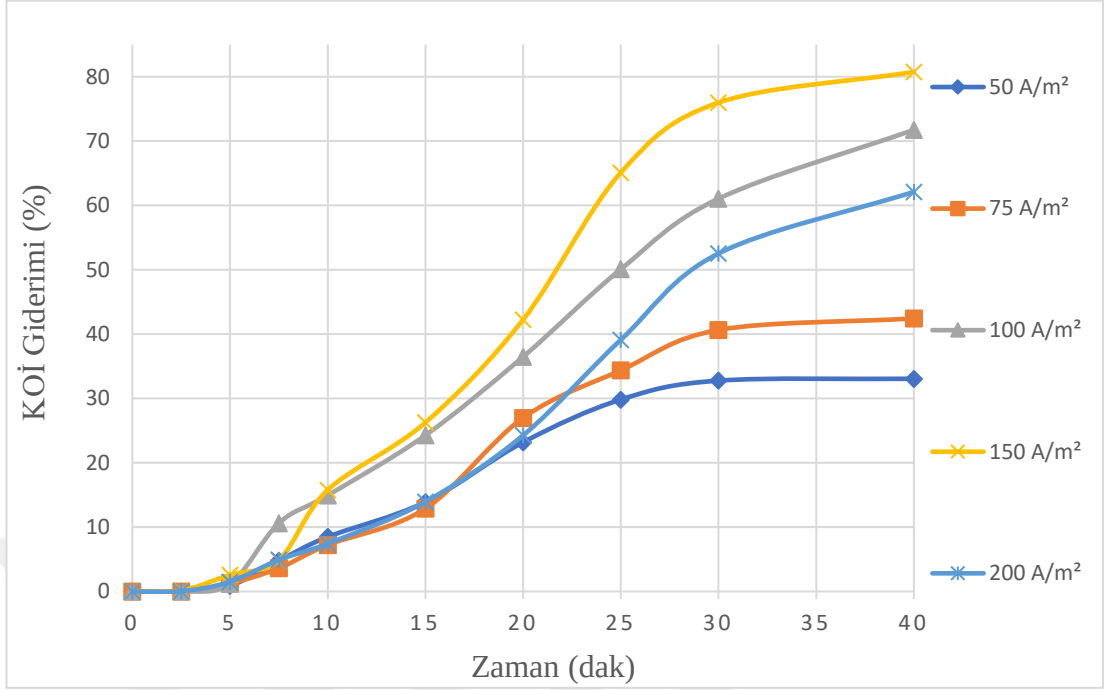


Şekil 4.15. KOİ değerlerinin değişiminde H₂O₂ konsantrasyonu etkisi (Anot: demir, katot: çelik, pH:3, akım yoğunluğu: 50 A/m², karıştırma hızı: 250 rpm, elektrotlar arası mesafe: 0,9 cm)

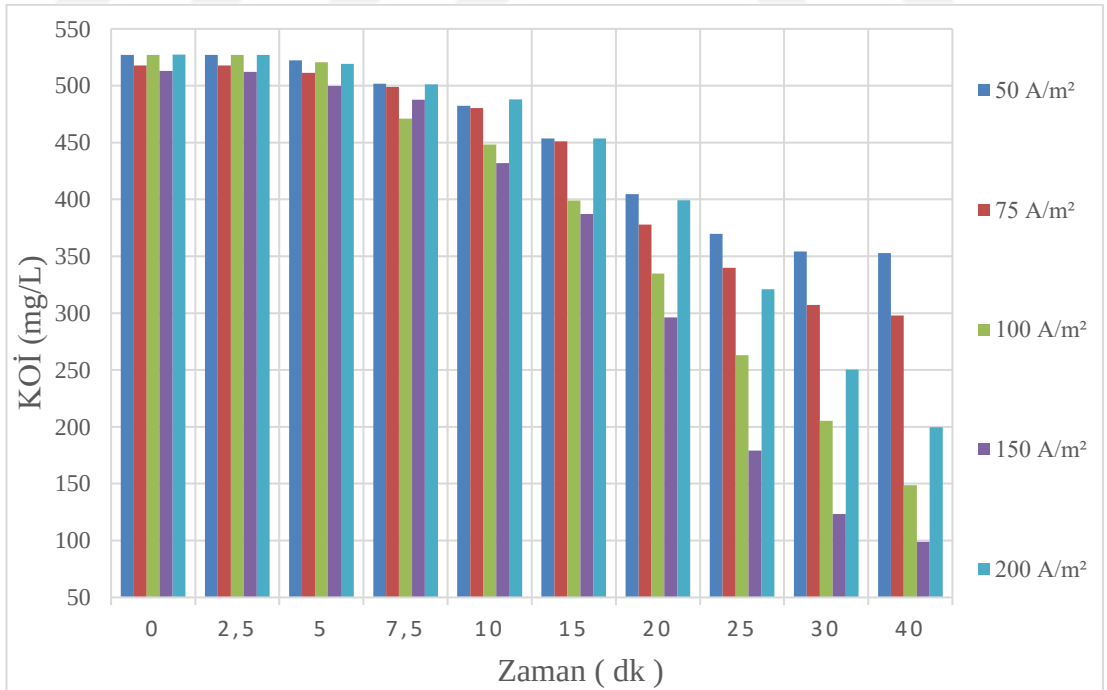
4.2.3. Akım Yoğunluğu Etkisi

Elektro-Fenton proseslerinin verimliliğini etkileyen bir diğer önemli parametre de akım yoğunluğudur. Akım yoğunluğu değerinin 50 A/m² den 150 A/m² ye çıkartılmasıyla KOİ giderim verimi % 33,06 dan % 80,75 e yükselmiştir. (Atmaca, 2009), sızıntı suyundan elektro-Fenton yöntemi ile KOİ giderimi üzerine yaptığı çalışmada akımın 1A'den 3A'e yükseltilmesiyle KOİ gideriminin % 45 ten % 70 e yükseldiğini bulmuştur. Bu durum, artan akım yoğunluğu ile çözelti içinde artan miktarda hidroksil radikali oluşumu ile ilişkilendirilebilir.

Akım yoğunluğunun KOİ giderimi üzerindeki etkisini incelemek için, diğer deneysel koşullar (anot: demir, katot: paslanmaz çelik, pH: 3, H₂O₂: 1500 mg/L, karıştırma hızı: 250 rpm, elektrotlar arası mesafe: 0,9 cm) sabit tutulmak şartıyla farklı akım yoğunlukları (50, 75, 100, 150, 200 A/m²) denenmiştir. Şekil 4.10'da akım yoğunluklarının değişiminin KOİ giderim verimi üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Şekil 4.16'da gösterildiği üzere ilk 5 dakika boyunca KOİ giderim verimi meydana gelmemiştir. Şekil 4.17'de KOİ değerlerinin değişiminde akım yoğunluğu etkisi gösterilmiştir.



Şekil 4.16. KOİ giderimi üzerine akım yoğunluğu etkisi (Anot: demir, katot: çelik, pH:3, H₂O₂ konsantrasyonu: 1500 mg/L, karıştırma hızı: 250 rpm, elektrotlar arası mesafe: 0,9 cm)

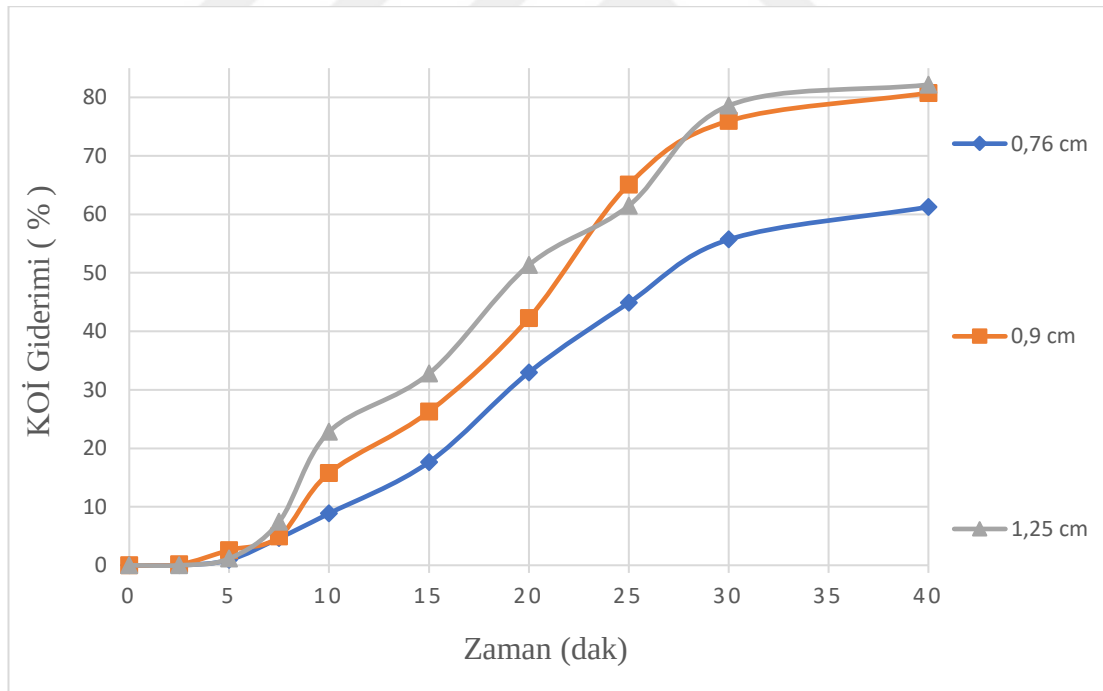


Şekil 4.17. KOİ değerlerinin değişiminde akım yoğunluğu etkisi (Anot: demir, katot: çelik, pH:3, H₂O₂ konsantrasyonu: 1500 mg/L, karıştırma hızı: 250 rpm, elektrotlar arası mesafe: 0,9 cm)

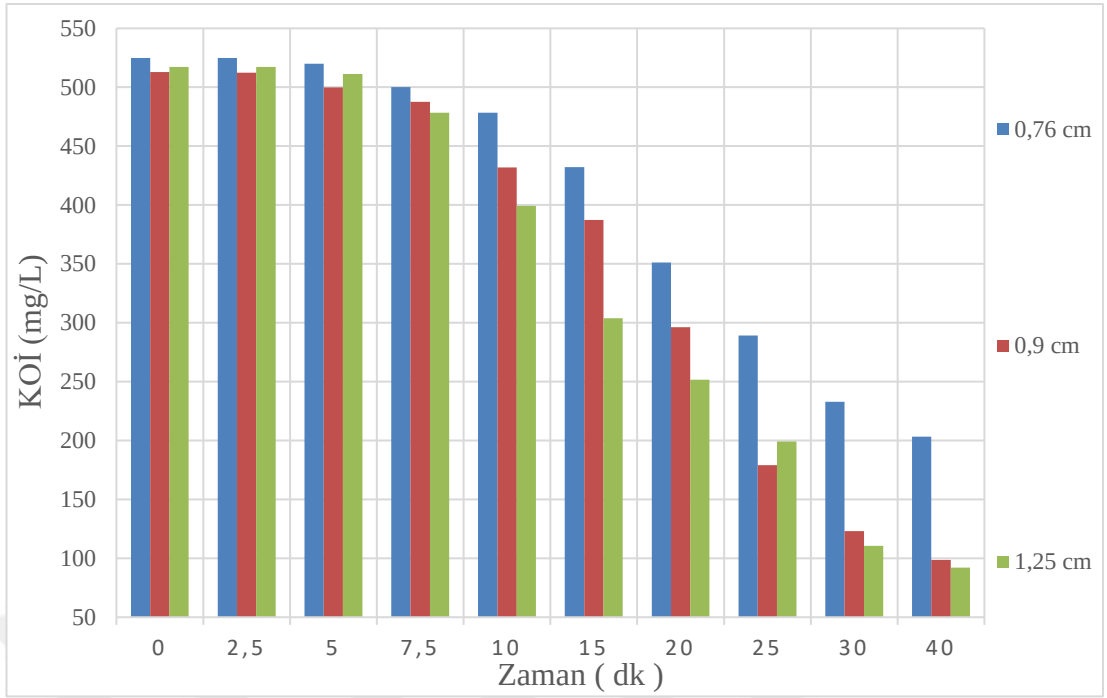
4.2.4. Elektrotlar Arası Mesafe Etkisi

Elektro-Fenton prosesinde, elektrotlar arası mesafe sistemin potansiyeli ve enerji tüketimi için önemli olduğundan verimliliği etkiler.

Elektrotlar arası mesafe etkisinin KOİ giderimi üzerindeki etkisini incelemek için, diğer deneysel koşullar (anot: demir, katot: paslanmaz çelik, pH: 3, H₂O₂: 1500 mg/L, karıştırma hızı: 250 rpm, akım yoğunluğu: 150 A/m²) sabit tutulmak şartıyla elektrotlar arası mesafe (0,76 - 0,9 - 1,25 cm) denenmiştir. Şekil 4.19'da KOİ değerlerinin değişiminde elektrotlar arası mesafe etkisi gösterilmiştir. KOİ giderim verimi en fazla 1,25 cm mesafede olmuştur. Elektrotlar arası mesafe 1,25 cm ile % 82,16 giderim verimi sağlanmıştır. Elektrotlar arası mesafe azaldıkça KOİ giderim verimi azalmıştır. Mesafe arttıkça KOİ giderim verimi artmıştır. Aynı zamanda tüketilen elektrik enerjisi miktarıda artmıştır. Şekil 4.18'de elektrotlar arası mesafe değişiminin KOİ giderim verimi üzerindeki etkisi gösterilmiştir.



Şekil 4.18. KOİ giderimi üzerine elektrotlar arası mesafe etkisi (Anot: demir, katot: çelik, pH:3, H₂O₂ konsantrasyonu: 1500 mg/L, karıştırma hızı: 250 rpm, Akım yoğunluğu: 200 A/m²)



Şekil 4.19. KOİ değerlerinin değişiminde elektrotlar arası mesafe etkisi (Anot: demir, katot: çelik, pH:3, H₂O₂ konsantrasyonu: 1500 mg/L, karıştırma hızı: 250 rpm, Akım yoğunluğu: 200 A/m²)

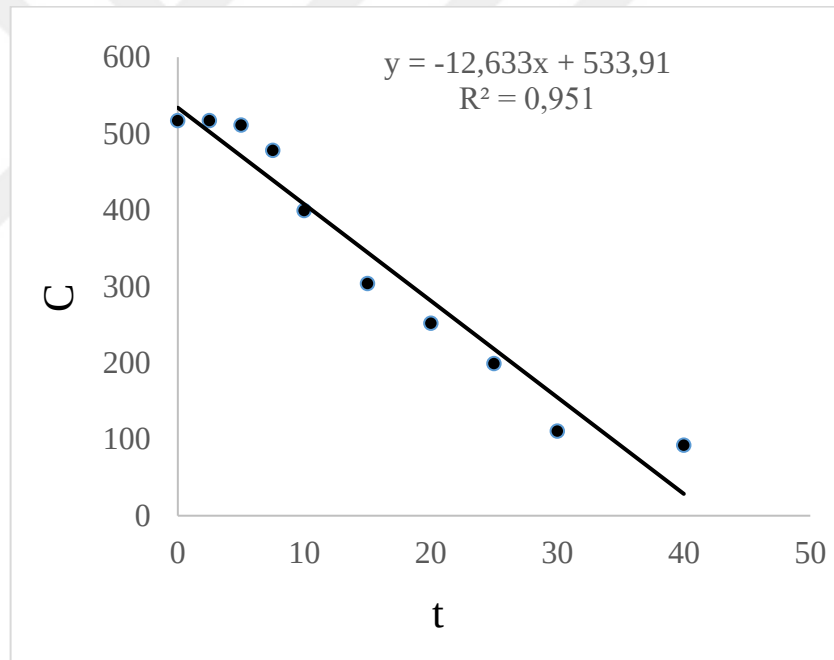
4.2.5. EF Prosesi İçin Reaksiyon Kinetiği

Reaksiyon kinetik çalışması yapılmış olup sıfırcı, birinci ve ikinci derece kinetikler için elde edilen belirtme katsayıları (R^2) sırasıyla, 0,951 – 0,9642 – 0,893 şeklinde belirlendiğinden, optimum koşulların birinci derece kinetik denklemi ($y = -0,0485x + 6,4182$) ile açıklanabilir olduğu sonucuna varılmıştır. Sıfırcı, birinci ve ikinci derece reaksiyon kinetik grafikleri Şekil 4.20 - 4.21 - 4.22’ de gösterilmiştir. Reaksiyon kinetiği anlatımı ve denklemleri başlık ‘2.10. Reaksiyon Kinetikleri’ mevcuttur. Elektrokoagülasyon prosesi için sırası ile sıfırcı-birinci-ikinci derece reaksiyon kinetik sonuçları Tablo 4.4’de gösterilmiştir.

Tablo 4.4. EF prosesi için sırası ile sıfırıncı-birinci-ikinci derece reaksiyon kinetikleri

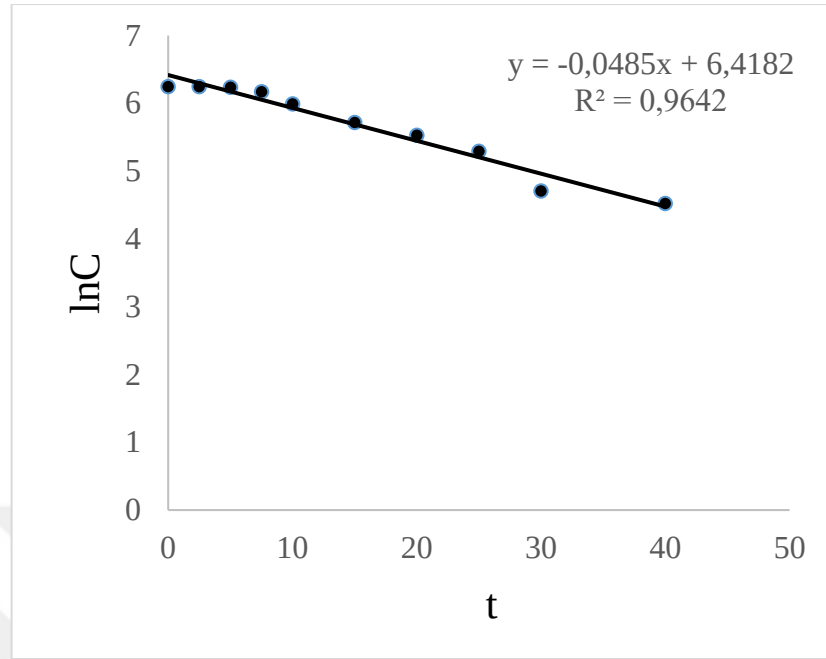
Sıfırıncı		Birinci		İkinci	
t	C	t	ln C	t	1/C
0	517,25	0	6,24853	0	0,00193
2,5	517,25	2,5	6,24853	2,5	0,00193
5	511,25	5	6,23686	5	0,00196
7,5	478,25	7,5	6,17013	7,5	0,00209
10	399,25	10	5,98959	10	0,0025
15	303,75	15	5,7162	15	0,00329
20	251,75	20	5,52844	20	0,00397
25	199,25	25	5,29456	25	0,00502
30	110,75	30	4,70728	30	0,00903
40	92,25	40	4,5245	40	0,01084

Sıfırıncı Derece



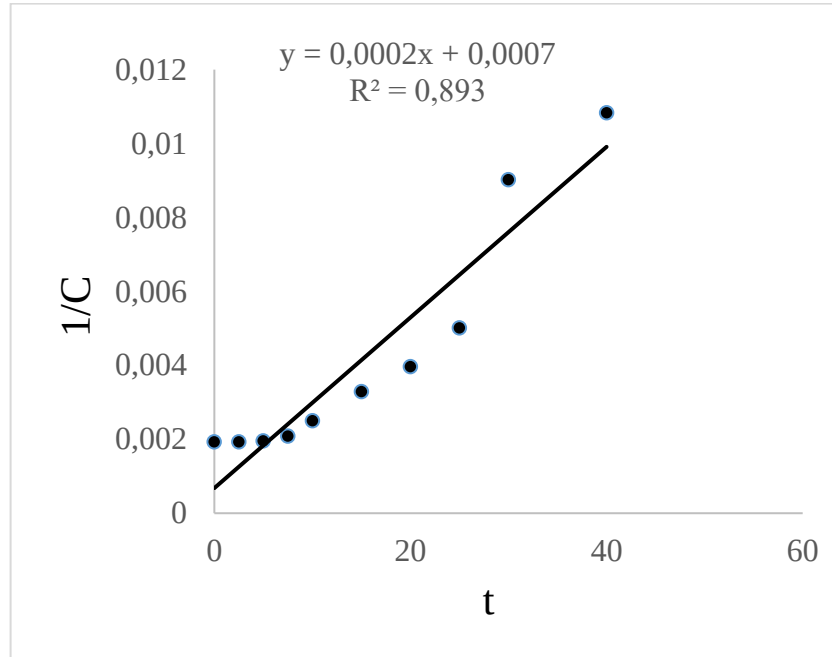
Şekil 4.20. EF prosesi sıfırıncı derece reaksiyon grafiği

Birinci Derece



Şekil 4.21. EF prosesi birinci derece reaksiyon grafiği

İkinci Derece



Şekil 4.22. EF prosesi ikinci derece reaksiyon grafiği.

4.3 Maliyet Analizi

4.3.1. Elektrokoagülasyon Prosesi İçin Maliyet Hesabı

Maliyet hesapları elektrokoagülasyon prosesi için optimum koşullardaki sonuçlara göre (pH:6.01: reaksiyon süresi 80 dk, akım yoğunluğu: 200 A/m², elektrotlar arası mesafe: 0,9 cm) hesaplanmıştır. Kasım ayı ortalama Dolar kuru, 1\$=18,53 TL olarak alınmıştır.

Elektrik enerjisi tüketimleri denklem (4.3.1.) (Alaton, 2008), anot tüketimleri denklem (4.3.2.) (Abuzaid, 2002) ye göre hesaplanmıştır.

$$E = UxIxt / V \quad (4.3.1)$$

E = Elektrik enerjisi tüketimi (kWh/m³)

U = Voltaj (V)

I = Akım (A)

t = Süre (sn)

V = Atık su hacmi (L)

$$\Delta M = UxtXM / zxFxV \quad (4.3.2)$$

$\Delta M = \text{Fe}^{2+}$ miktarı teorik olarak tüketilen (g $\text{Fe}^{2+}/\text{m}^3$)

I = Akım (A)

t = Süre (sn)

M = Demirin molekül ağırlığı (g/mol)

Z = Elektron sayısı (2)

V = Atık su hacmi (L)

Elektrik enerjisi tüketimi hesabı KOİ giderimi için:

$$E = UxIxt / V = \frac{2,3 \times 1,80 \times 80 \times 60}{0,75} = 26.496 \text{ J/L} = 26.496 .000 \text{ J/m}^3$$

1 kWh = 3.600.000 J olduğuna göre

X kWh = 26.496.000 J X = 7,36 kWh/m³

1 kWh elektrik enerjisi 1,98 TL ise

7.36 kWh elektrik enerjisi X TL

X = 14,57 TL/m³

Anot tüketimi hesabı:

$$\Delta M = UxtXM / zxFxV = \frac{1,80 \times 80 \times 60 \times 55,845}{2 \times 96485 \times 0,75} = 3,333 \text{ g/L} = 3333 \text{ g/m}^3$$

1000 g Fe²⁺ 16,50 TL ise

3333 g Fe²⁺ X TL

$$X = 54,99 \text{ TL/m}^3$$

$$\text{Arıtma Toplam Maliyeti} = 14,57 \text{ TL/m}^3 + 54,99 \text{ TL/m}^3 = 69,56 \text{ TL/m}^3$$

1US\$ = 18,53TL kabul edilerek 3,75 US\$/m³ atık su dur.

Kg KOİ başına arıtma maliyeti ise 330 mg/L KOİ'dir

0,33 kg/m³ KOİ giderimi 69,56 TL ise

1 kg/m³ KOİ X

$$X = 210,81 \text{ TL/1 kg KOİ}$$

11,37 US\$/ kg KOİ olarak bulunur.

4.3.2. Elektro-Fenton Prosesi İçin Maliyet Hesabı

Maliyet hesapları elektro-fenton prosesi için optimum koşullardaki sonuçlara göre (pH:3 reaksiyon süresi 40 dk, H₂O₂: 1500 mg/L, akım yoğunluğu: 150 A/m², elektrotlar arası mesafe: 1,25 cm) hesaplanmıştır. Kasım ayı Dolar kuru, 1\$=18,53 TL olarak alınmıştır.

Elektrik enerjisi tüketimleri denklem (4.3.1.) (Alaton 2008), anot tüketimleri denklem (4.3.2.) (Abuzaid vd., 2002) ye göre hesaplanmıştır.

$$E = UxIxt / V \quad (4.3.1)$$

E = Enerji tüketimi (kWh/m³)

U = Voltaj (V)

I = Akım (A)

t = Süre (sn)

V = Atık su hacmi (L)

$$\Delta M = UxtXM / zxFxV \quad (4.3.2)$$

ΔM = Fe²⁺ miktarı teorik olarak tüketilen (g Fe²⁺/m³)

I = Akım (A)

t = Süre (sn)

M = Demirin molekül ağırlığı (g/mol)

Z = demirin elektron sayısı valans (2)

V = Atık su hacmi (L)

Elektrik enerjisi tüketimi KOİ giderimi için hesabı:

$$E = UxIxt / V = \frac{2,7 \times 1,35 \times 40 \times 60}{0,75} = 11.664 \text{ J/L} = 11.664.000 \text{ J/m}^3$$

1 kWh = 3.600.000 J olduğuna göre

X kWh = 11.164.000 J X = 3,24 kWh/m³

1 kWh elektrik enerjisi 1,98 TL ise

3,24 kWh elektrik enerjisi X TL

X = 6,41 TL/m³

Anot tüketimi hesabı:

$$\Delta M = UxtXM / zxFxV = \frac{1,35 \times 40 \times 60 \times 55,845}{2 \times 96485 \times 0,75} = 1.250 \text{ g/L} = 1250 \text{ g/m}^3$$

1000 g Fe²⁺ 16,50 TL ise

1250 g Fe²⁺ X TL

X = 20,62 TL/m³

H₂O₂ tüketimi ise 3,78 L/m³ olarak hesaplanmıştır. H₂O₂'nin litre fiyatı 160 TL'dir.

H₂O₂ maliyeti 604,8 TL/m³ bulunmuştur.

Toplam Arıtma Maliyeti = 6,41 TL/m³ + 20,62 TL/m³ + 604,8 TL/m³ = 631,83 TL/ m³

1US\$ = 18,53 TL kabul edilerek 34.09 US\$/m³ atık su dur.

Kg KOİ başına arıtma maliyeti 566,6 mg/L KOİ'dir

0.566 kg/m³ KOİ giderimi 631,83 TL ise

1 kg/m³ KOİ X

X = 1116,30 TL/ kg KOİ

60,24 US\$/ kg KOİ olarak bulunur

5. SONUÇ VE TARTIRŞMA

Bu çalışmada, sızıntı suyundan elektrokoagülasyon ve elektro-Fenton yöntemleri kullanılarak endüstriyel atıksudan KOİ giderim verimleri incelenmiştir. KOİ giderim verimine etki eden parametreler incelenip optimum deneysel koşullar belirlenerek uygulanan ileri oksidasyon ve koagülasyon prosesleri karşılaştırılmıştır.

KOİ giderim veriminin araştırılabilmesi amacıyla öncelikle EC deneyleri yapılmıştır. EC üzerinde pH, akım yoğunluğu, iletkenlik, elektrotlar arası mesafe ve reaksiyon süresi parametreleri incelenmiş ve maliyet analizi yapılmıştır. Deneyler sonucu belirlenen parametreler ile KOİ giderim verimleri araştırılmıştır.

EC deneylerinde ilk olarak pH parametresi incelenmiştir. pH 4, 5, 6, 7, 8, 9 değerleri tek tek denemiştir. Diğer koşullar (anot: demir, katot: paslanmaz çelik, akım yoğunluğu: 100 A/m², karıştırma hızı: 250 rpm, elektrotlar arası mesafe: 0,9 cm) sabit tutulmuştur. Optimum koşullar için %31,08 KOİ giderim verimi ile pH:6 seçilmiştir.

İkinci aşama olarak akım yoğunluğu etkisi incelenmiştir. Farklı akım yoğunlukları 50, 100, 150, 200, 250, 300 A/m² denenmiştir. Diğer koşullar (anot: demir, katot: paslanmaz çelik, karıştırma hızı: 250 rpm, elektrotlar arası mesafe: 0,9 cm) sabit tutulmuştur. En iyi verim 250 A/m² akım yoğunluğunda sağlanmıştır. Fakat optimum koşullar için %46,53 KOİ giderim verimi ile akım yoğunluğu 200 A/m² seçilmiştir. Sebebi ise 200 ve 250 A/m² de giderim verimlerinin birbirlerine yakın olması ve 250 A/m² de daha çok enerji tüketimi olmasıdır.

Üçüncü aşama olarak elektrotlar arası mesafe etkisi incelenmiştir. Elektrotlar arası mesafe 0,76 - 0,9 - 1,25 cm denenmiştir. Diğer koşullar (anot: demir, katot: paslanmaz çelik, akım yoğunluğu: 200 A/m², karıştırma hızı: 250 rpm) sabit tutulmuştur. En iyi giderim verimi elektrotlar arası 1,25 cm olan mesafede sağlanmıştır. Optimum koşullar için elektrotlar arası mesafe %46,53 KOİ giderim verimi ile 0,9 cm seçilmiştir. Mesafe arttıkça tüketilen elektrik enerji miktarı da artmaktadır. Bu sebepten dolayı 0,9 cm seçilmiştir.

Dördüncü aşama olarak iletkenlik etkisi incelenmiştir. Atık suyumuzda iletkenliğin ayarlanabilmesi için NaCl eklenmiştir. Farklı iletkenlikler 3000, 4000, 5000, 6000 µS/cm incelenmiştir. Diğer koşullar (anot: demir, katot: paslanmaz çelik, akım yoğunluğu: 200 A/m², elektrotlar arası mesafe: 0,9 cm, karıştırma hızı: 250 rpm) sabit tutulmuştur. Optimum koşullar için iletkenlik %46,5 KOİ giderim verimi ile 5000

$\mu\text{S/cm}$ seçilmiştir. İletkenlik etkisinin KOİ giderim verimi üzerinde çok etkili olmadığı yapılan deneyler sonucunda belirlenmiştir.

Elektro-Fenton prosesine H_2O_2 eklenerek deneyler yapılmıştır. EC prosesi üzerinde incelenen parametreler Elektro-Fenton prosesinde de incelenmiş ve maliyet analizi yapılmıştır.

EF deneylerinde ilk olarak pH parametresi incelenmiştir. pH 3 - 3,5 - 4 - 4,5- 5- 5,5 - 6 değerleri tek tek denemiştir. Diğer koşullar (anot: demir, katot: paslanmaz çelik, akım yoğunluğu: 50 A/m^2 , karıştırma hızı: 250 rpm, elektrotlar arası mesafe: 0,9 cm, H_2O_2 :1500 mg/L) sabit tutulmuştur. Optimum koşullar için %33,06 KOİ giderim verimi ile pH:3 seçilmiştir.

İkinci aşama olarak H_2O_2 konsantrasyonu etkisi incelenmiştir. Farklı H_2O_2 konsantrasyonları 750, 1000,1250, 1500, 2000 mg/L denenmiştir. Diğer koşullar (pH: 3, anot: demir, katot: paslanmaz çelik, akım yoğunluğu: 50 A/m^2 , karıştırma hızı: 250 rpm, elektrotlar arası mesafe: 0,9 cm,) sabit tutulmuştur. Optimum koşullar için %33,06 KOİ giderim verimi ile $\text{H}_2\text{O}_2 = 1500 \text{ mg/L}$ seçilmiştir.

Üçüncü aşama olarak akım yoğunluğu etkisi incelenmiştir. Farklı akım yoğunlukları 50, 75, 100, 150, 200 A/m^2 denenmiştir. Diğer koşullar (pH: 3, anot: demir, katot: paslanmaz çelik, karıştırma hızı: 250 rpm, elektrotlar arası mesafe: 0,9 cm, H_2O_2 :1500 mg/L) sabit tutulmuştur. Optimum koşullar için %80,75 KOİ giderim verimi ile 150 A/m^2 seçilmiştir.

Dördüncü aşama olarak elektrotlar arası mesafe etkisi incelenmiştir. Elektrotlar arası mesafe 0,76 - 0,9 - 1,25 cm denenmiştir. Diğer koşullar (pH: 3, anot: demir, katot: paslanmaz çelik, akım yoğunluğu: 150 A/m^2 , H_2O_2 :1500 mg/L, karıştırma hızı: 250 rpm) sabit tutulmuştur. En iyi KOİ giderim verimi 1,25 cm'lik elektrotlar arası mesafede sağlanmıştır.

EC prosesinde, artan pH ile birlikte KOİ giderim veriminin arttığı gözlemlenmiştir. Akım yoğunluğunun artmasıyla giderim verimleri artmış, ancak belli bir akım yoğunluğundan sonra giderim verimlerinde azalma olmuştur. EC deneylerinde iletkenlik parametresi KOİ giderim veriminde çok etkili olmamıştır. İletkenliğin artması ile tüketilen elektrik enerjisi azalmıştır. Elektrotlar arası mesafe azaldıkça KOİ giderim verimi azalmıştır ancak mesafe arttıkça verim artmıştır. Elektrotlar arası mesafenin artması KOİ giderim verimini arttırmasının yanı sıra tüketilen elektrik enerjisi miktarını da arttırmıştır.

Elektro-Fenton prosesinde, artan pH ile birlikte KOİ giderim veriminin azaldığı gözlemlenmiştir. Akım yoğunluğunun artmasıyla giderim verimleri artmış, ancak belli bir akım yoğunluğundan sonra giderim verimlerinde azalma olmuştur. Elektrotlar arası mesafe azaldıkça KOİ giderim verimi azalmıştır ancak mesafe arttıkça verim artmıştır. Elektrotlar arası mesafenin artması KOİ giderim verimini arttırmasının yanı sıra tüketilen elektrik enerjisi miktarını da arttırmıştır. H_2O_2 ise 750 – 2000 mg/L aralığında çeşitli konsantrasyonlarda uygulanarak denenmiş ve artan hidrojen peroksit konsantrasyonu ile KOİ giderim veriminin arttığı gözlemlenmiştir. Ancak, fazla miktarda hidrojen peroksit konsantrasyonu oluşması durumunda hidroksil radikalleriyle reaksiyona girmesinden dolayı giderim verimleri belli bir konsantrasyondan sonra düşmeye başlamıştır.

Maliyet analizi sonuçlarına göre EF ve EC prosesleri karşılaştırılmıştır. EF yöntemi ile yapılan atık su arıtma maliyeti EC yöntemine göre daha fazla çıkmıştır. Bu duruma EF prosesinde sisteme fazladan olarak hidrojen peroksit (H_2O_2) eklenmesi sebep olarak gösterilebilir.

Elde deneysel çalışma sonuçlarına göre, Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeli'nce metal kaplama atıksuyu için öngörülen 100 mg/L'lik deşarj standardı optimum koşullarda ulaşılan %82,16 giderim verimi ile deşarj standardı sadece elektro-Fenton yöntemi ile sağlanabilmiştir.

KAYNAKLAR

(tarih yok).

Abuzaid, N. B.-H. (2002). Ground water coagulation using soluble stainless steel electrodes. *Advances in Environmental Research*, 6(3), 325-333.

Alaton, I. K. (2008). Electrocoagulation of a real reactive dyebath effluent using aluminum and stainless steel electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 150(1), 166-173.

Atmaca, E. (2009). Treatment of landfill leachate by using electro-Fenton method. *Journal of Hazardous Materials*, 163(1), 109-114.

Bailey, S. E. (1999). Review paper a review of potentially low-cost sorbents for heavy metals. *Water Research*. 33, U.S.A., 2469-2479.

Bakarat, M. (2011). "New trends in removing heavy metals from industrial wastewater". *Arabian Journal of Chemistry*, 361-377.

Beyazıt, N. (2014). Copper(II), Chromium(VI) and Nickel(II) Removal from Metal Plating Effluent by Electrocoagulation. *International Journal of Electrochemical Science*, 9, 4315 – 4330.

Chen, G. (2004). Electrochemical Technologies İn Wastewater Treatmant, Separation And Purifacation Technology. 11-41.

Çağlarırnak, N. H. (2010). Ağır metal ve toprak kirliliğinin gıda zinciri ve insan sağlığına etkisi, . *Akademik Gıda* 8 (2), 31-35.

Çelik, A. Z. (2014). Kurşun Ve Nikelin Doğal Killer Üzerinde Adsorpsiyonu. *Harran Ünivarsitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anbilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi*. Şanlıurfa, 6-20.

Daneshvar, N. ., (2004). Decolorization of Dye Solutiom Containing Acid Red 14 By Electrocoagulation With A Comparative İntestigation Of Different Electrode Connections. *Journal Of Hazardous Materials*, B112, 57-59.

Delil, A. D., & ve Gören, N. (2018). Treatment of real textile wastewater with electrocoagulation and electrooxidation methods. 3. *International Conferance on Civil and Enviromental Engineering* . 83-95.

Demir, A. D. (2000). " Atık su Arıtımında Fiziksel Kimyasa ve Bİyolojik Metodlar". *YTÜ Yayın Merkezi*. İstanbul.

Deng, Y. E. (2006). Treatment of landfill leachate by the Fenton process . *Water Research*, 40(20), 3683-3694.

Denz, W. E. (2009). Türkiye' de Saneyiden Kaynaklanan Tehlikeli Atıkların Yönetiminin İyileştirilmesi - Metal Kaplama Galvanizasyon Rehber Döküman. *Life Hawaman Projesi, Çevre ve Orman Bakanlığı*.

- Eyvaz, B. M. (2006). Tekstil endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyon ile arıtılması: teknik ve ekonomik değerlendirme. *İTÜ Dergisi/e-Su Kirlenmesi Kontr.* 55-65.
- He, H. Z. (2017). Electro-Fenton process for water and wastewater treatment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 47(21), 2100-2131.
- İlhan, F. K. (2007). Elektrokimyasal arıtım ve uygulamaları: katı atık sızıntı suyu çalışması. *Türkey AB Sürecinde Türkiye ' de Katı Atık Yönetimi ve Çevre Sorunları Sempozyumu*, 1-16.
- Kabdaşlı, I. A.-A.-H. (2012). Electrocoagulation applications for industrial wastewaters: a critical review. *Environmental Technology Reviews*, 2–45.
- Kang, Y. H.-Y. (2000). Effects of reaction conditions on the oxidation efficiency in the Fenton process. *Water Research*, 34(10), 2786-2790.
- Kasap, T. (2017). Kağıt endüstrisi atıksularının peroksit ilaveli elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımında cevap yüzey yöntemi kullanılarak proses optimizasyonu. *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul.
- Kobyas, M. B. (2008). Endüstriyel atık suların arıtılması için elektrokimyasal reaktör geliştirilmesi. *Kocaeli*, 54-58.
- Kratochvil, D. a. (1998). Biosorption of Cu from Ferruginous Wastewater by Algal Bio-mass. *Water Research*, 32, 2760-2768.
- Ma, L. Z. (2016). A highly energy-efficient flow-through electro-Fenton process for organic pollutants degradation. *Electrochimica Acta*, 200, 222-230.
- Mameri, L. H. (2001). Defluoridation of Sahara water by small plant electrocoagulation using bipolar aluminium. *Sep. Purif. Technol*, 24-113-119.
- Mollah, M. M. (2004). Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials B114*. USA, 199-204.
- Mukherjee, S. M. (2014). Contemporary environmental issues of landfill leachate: assessment & remedies. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(5), 472-590.
- Nidheesh, P. G. (2012). Trends in electro-Fenton process for water and wastewater treatment: An overview. *Desalination*, 299, 1-15.
- Okunmuş, E. (2007). "Küçülçekmece Gölü Sedimentinde Ağır Metal (Zn^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+}) Adsorpsiyonu". *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul.
- Oturan, M. A. (2014). Advanced Oxidation Processes in Water/Wastewater Treatment: Principles and Applications-A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44, 2577-2641.

- Panizza, M. M.-H. (2013). Role of electrode materials for the anodic oxidation of a real landfill leachate-Comparison between Ti-Ru-Sn ternary oxide, PbO₂ and boron-doped diamond anode. *Chemosphere*, 90(4), 1455-1460.
- Soyel, S. (2019). Microbial community monitoring of landfill leachate treating system and improvement efforts. *M.Sc.Thesis. İstanbul Technical University Department of Environmental Engineering Environmental Biotechnology Programme*. 131, İstanbul.
- Sönmez, S. (2006). Metak Kaplama Sanayi Atık Sularından Perlit Minerali ve Toplam Giderimin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*. Sakarya.
- Tambosi, J. D. (2006). Treatment of paper and pulp wastewater and removal of odorous compounds by a Fenton-like process at the pilot scale. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 81:1426-1432.
- Tasmakıran, A. F. (2010). Ziraî ürünlerin modifiye edilerek yeni adsorbanların hazırlanması ve boyaların adsorpsiyonu. *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi*. Konya, 26.
- Umar, M. A. (2010). Trends in the use of Fenton, electro-fenton and photo-fenton for the treatment of landfill leachate. *Waste Management*, 30, 2113-2121.
- Uzun Parlak, N. (2008). Metal Kaplama Prosesi Durulama Banyo Atık Suların Elektrokoagülasyon ile Arıtımı, . *Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Fakültesi*. İstanbul.
- Wang L K, H. Y. (1992). Handbook of industrial and hazardous wastes treatment. *Marcel Dekker, Inc*. Newyork.
- Zhou, M. O. (2018). Electro-Fenton Process New Trends and Scale-Up. Singapore: Springer.
- Zodi, S. P. (2009). Treatment of the textile wastewaters by electrocoagulation: effect of operating parameters on the sludge settling characteristics. *Separation And Purification Technology*, 69, 33-34.

ÖZ GEÇMİŞ

Sümeyye DOĞRUCA, Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği bölümünden 2018 yılında mezun olundu. 2020 yılında Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümünde Yüksek Lisans eğitimine başlandı.

İletişim Bilgileri

ORCID ID : 0000-0001-8170-4779

Yayınlar:

1. Dogruca, S. ve Beyazıt, N. (2022). “Metal kaplama endüstrisi atık sularının elektrokoagülasyon ve elektro-fenton yöntemleri ile arıtılması”. *The 5th International Congress of Agriculture, Environment and Health*. 17-19 Şubat 2022, Online, Aydın/Türkiye. (Özet Metin Bildiri/Sözlü Sunum)