

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**METAL KAPLAMA ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ İLERİ ARITIM
YÖNTEMLERİYLE ARITILMASININ İNCELENMESİ**

EBRU BUDAK ÖZLÜ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. YAŞAR AVŞAR**

İSTANBUL, 2016

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METAL KAPLAMA ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ İLERİ ARITIM
YÖNTEMLERİYLE ARITILMASININ İNCELENMESİ

Ebru BUDAK ÖZLÜ tarafından hazırlanan tez çalışması 14.04.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Yaşar AVŞAR
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Yaşar AVŞAR
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Yaşar NUHOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa S. YAZGAN
İstanbul Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Öncelikle, bu tez çalışmasının hazırlanmasında, tüm aşamalarındaki yardımlarından dolayı, gösterdiği ilgi ve her alandaki desteği sebebiyle tez danışmanım, Sayın Prof. Dr. Yaşar AVŞAR'a,

Tez çalışmamın en başından beri beraber çalıştığımız, tezimin en önemli ve yorucu kısımları olan ön işlemler kısmında her türlü destek ve yardımını esirgemeyen Arş. Gör. Harun Akif KABUK'a,

Kendilerinin tecrübe ve kaynaklarından istifade ettiğimiz, sorularımıza her zaman cevap veren çok değerli hocalarıma,

Tez çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen ve kaynaklarıyla bana her zaman yardımcı olan Arş. Gör. Dr. Fatih İLHAN'a

Benimle birlikte aynı dönemde farklı projelerde görev alan, her zaman yanımda manevi desteklerini esirgemeyen arkadaşlarım Çevre Yük. Müh. Gülsüm SUMMAK'a ve Yrd. Doç. Dr. Nihan UYGUR'a,

Manevi desteğini benden hiçbir zaman esirgemeyen çok değerli dostlarıma,

İsmi burada yer almayan, dolaylı ya da dolaysız olarak üzerimde emeği bulunan hocalarım, büyüklerim ve arkadaşlarıma,

Tüm bunların yanında bugünlere gelmem konusunda yardım ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs, 2016

Ebru BUDAK ÖZLÜ

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖZET.....	xiii
ABSTRACT	xv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez	3
BÖLÜM 2	
ENDÜSTRİYEL ATIKSULAR.....	4
2.1 Genel Bilgiler	4
2.2 Metal Endüstrisi ile ilgili Genel Bilgi.....	6
2.2.1 Ön İşlem / Temizleme.....	9
2.2.2 Galvanizleme	9
2.2.3 Yıkama	10
2.2.4 Kurutma	10
2.2.5 Banyo Temizliği.....	11
2.3 Metal Kaplama İşlemleri	11
2.3.1 Sıcak Daldırma	11
2.3.2 Sıcak Püskürtme	11
2.3.3 Elektrolitik Kaplama.....	12
2.3.4 Elektriksiz Kaplama	14
2.3.5 Kimyasal Dönüştürme Kaplaması	15

2.3.6	Aşındırma ve Kimyasal İşleme	15
2.3.7	Talaşlı İmalat ve Bileme	15
2.3.8	Parlatma ve Cilalama	15
2.3.9	Kırpma, Etki ve Basınç İşlemleri.....	15
2.3.10	Isıl İşlem.....	16
2.3.11	Isı ile Kesme, Kaynaklama, Pirince Benzer Hale Getirme, Lehimleme	16
2.3.12	Kum Püskürtme	16
2.3.13	Püskürtme ve Buhar Kaplama	16
2.3.14	Tuz Banyosunda Tufal Giderme	16
2.3.15	Çözücü ile Yağ Giderme.....	17
2.3.16	Boya Sökme İşlemi	17
2.3.17	Boyama, Elektrolitik Boyama, Elektrostatik Büyüme.....	17
2.3.18	Vakum Metalleme ve Mekanik Büyüme	17
2.3.19	Montaj, Kalibrasyon ve Test İşlemleri	17
2.4	Metal Kaplama Endüstrisinde Atık Türleri	18
2.5	Metal Kaplama Endüstrisi Atıksuları	23
2.6	Ağır Metaller ve Etkileri	26
2.6.1	Demir	26
2.6.2	Bakır	27
2.6.3	Nikel	28
2.6.4	Çinko	28
2.6.5	Krom	28
2.6.6	Siyanür	29
2.7	Yasal Düzenlemeler	30
2.8	Metal Kaplama Endüstrisi Atıksularının Arıtım Alternatifleri	32
2.8.1	Elektrokimyasal Arıtım.....	33
2.8.1.1	Faraday Yasaları	34
2.8.1.2	Elektrokoagülasyon	36
2.8.1.3	Elektrokoagülasyon Teorisi	38
2.8.2	Kimyasal Oksidasyon ve Fenton Prosesi.....	45
2.8.2.1	Fenton Prosesi.....	47
2.8.3	Elektro-Fenton	50
2.8.4	Hidroksit Çöktürmesi	50

BÖLÜM 3

MATERYAL VE METOD	54
3.1 Materyal.....	54
3.1.1 Galvanoteknik Sanayi	54
3.1.2 Mevcut Arıtma tesisi ve Atıksu Numunesi	55
3.1.3 Deney Düzenneği.....	58
3.2 Metot	60

BÖLÜM 4

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	69
---------------------------------------	----

4.1	Elektrokoagülasyon için Bulgular	69
4.2	Fenton için Bulgular	112
4.3	Elektro-Fenton için Bulgular	136
4.4	Hidroksit Çöktürmesi için Bulgular	160
BÖLÜM 5		
SONUÇ VE ÖNERİLER		166
KAYNAKLAR.....		170
ÖZGEÇMİŞ.....		176



SİMGE LİSTESİ

°C	Santigrat derece
µm	Mikrometre
V	volt



KISALTMA LİSTESİ

A	Amper
aq	Suda
As	Arsenik
Cd	Kadmiyum
Cl	Klorür
CN ⁻	Siyanür İyonu
Cr	Krom
Cu	Bakır
EC	Elektrokoagülasyon
EDTA	Etilen diamin tetra asetik asit
EF	Elektrofenton
EPA	Çevre Koruma Ajansı
Fe	Demir
I	Akım
İSKİ	İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi
KOI (COD)	Kimyasal Oksijen İhtiyacı
mA	Miliamper
mS	Milisiemens
Ni	Nikel
OH [·]	Hidroksil radikali
Pb	Kurşun
ppm	Milyonda bir
SKKY	Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği
SO ₄ ²⁻	Sülfat
sa	Saat
TOK	Toplam Organik Karbon
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
WHO	Dünya Sağlık Örgütü
Zn	Çinko

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Endüstriyel sistemlerden çıkan atık türleri [8]..... 4
Şekil 2.2	Metal kaplama prosesi için akış diyagramı [1]..... 7
Şekil 2.3	Bakır ayırma işlemi [15] 10
Şekil 2.4	Elektrokaplamanın kısımları [19] 13
Şekil 2.5	Metal endüstrisiyle ilgili genel prosesler, oluşan kirleticiler ve kirleticilerin ortaya çıktığı prosesin kaynağı [19]..... 20
Şekil 2.6	Metal son işlemleri endüstrisinde üretim düzeni [8] 24
Şekil 2.7	Elektrokimyasal metotlar 33
Şekil 2.8	Elektrokoagülasyon ünitesinde meydana gelen reaksiyonlar [16]..... 40
Şekil 2.9	EC reaktöründe alüminyum (Al) elektrodu kullanılması durumunda gerçekleşen reaksiyonlar [51]..... 41
Şekil 2.10	Elektrokoagülasyon reaktöründe demir (Fe) elektrodu kullanılması durumunda gerçekleşen reaksiyonlar [51]..... 43
Şekil 2.11	Çeşitli metallerin hidroksit çözünürlüklerinin pH ile değişimi [58] 52
Şekil 3.1	Galvanoteknik sanayi sitesi 55
Şekil 3.2	Galvanoteknik mevcut atıksu arıtma tesisi şeması..... 56
Şekil 3.3	Deney düzeneği ve reaktörün genel görüntüsü 58
Şekil 3.4	Atomik Absorpsiyon Spektrofotometresi 59
Şekil 3.5	Fenton uygulamasının yapıldığı jar test düzeneği 64
Şekil 3.6	Fenton uygulamasında son çöktürme işlemi 65
Şekil 3.7	EF uygulamasında son çöktürme işlemi..... 67
Şekil 4.1	500 ml EC prosesinde değişken parametrelere bağlı Cu giderim verimi 72
Şekil 4.2	500 ml EC prosesinde değişken parametrelere bağlı Zn giderim verimi 75
Şekil 4.3	500 ml EC prosesinde değişken parametrelere bağlı Fe giderim verimi 78
Şekil 4.4	500 ml EC prosesinde değişken parametrelere bağlı Ni giderim verimi 81
Şekil 4.5	500 ml EC prosesinde değişken parametrelere bağlı Cr giderim verimi 84
Şekil 4.6	500 ml EC prosesinde değişken parametrelere bağlı SO_4^{-2} giderim verimi 87
Şekil 4.7	500 ml EC prosesinde değişken parametrelere bağlı Cl^- giderim verimi 88
Şekil 4.8	500 ml EC prosesinde değişken parametrelere bağlı TOK giderim verimi . 93
Şekil 4.9	1 L EC prosesinde değişken parametrelere bağlı Cu giderim verimi 96
Şekil 4.10	1 L EC prosesinde değişken parametrelere bağlı Zn giderim verimi 98
Şekil 4.11	1 L EC prosesinde değişken parametrelere bağlı Fe giderim verimi 100
Şekil 4.12	1 L EC prosesinde değişken parametrelere bağlı Ni giderim verimi..... 102
Şekil 4.13	1 L EC prosesinde değişken parametrelere bağlı Toplam Cr giderim verimi 104

Şekil 4.14	1 L EC prosesinde değişken parametrelere bağlı SO_4^{2-} giderim verimi	106
Şekil 4.15	1 L EC prosesinde değişken parametrelere bağlı Cl^- giderim verimi	106
Şekil 4.16	1 L EC prosesinde değişken parametrelere bağlı TOK giderim verimi	110
Şekil 4.17	500 ml Fenton prosesinde değişken parametrelere bağlı Cu giderim verimi	113
Şekil 4.18	500 ml Fenton prosesinde değişken parametrelere bağlı Zn giderim verimi	116
Şekil 4.19	500 ml Fenton prosesinde değişken parametrelere bağlı Fe giderim verimi	119
Şekil 4.20	500 ml Fenton prosesinde değişken parametrelere bağlı Ni giderim verimi	122
Şekil 4.21	500 ml Fenton prosesinde değişken parametrelere bağlı toplam Cr giderim verimi	125
Şekil 4.22	500 ml Fenton prosesinde değişken parametrelere bağlı Cl^- giderim verimi	128
Şekil 4.23	500 ml Fenton prosesinde değişken parametrelere bağlı SO_4^{2-} giderim verimi	131
Şekil 4.24	500 ml Fenton prosesinde değişken parametrelere bağlı TOK giderim verimi	134
Şekil 4.25	500 ml Elektrofenton prosesinde değişken parametrelere bağlı Cu giderim verimi	137
Şekil 4.26	500 ml Elektrofenton prosesinde değişken parametrelere bağlı Zn giderim verimi	140
Şekil 4.27	500 ml Elektrofenton prosesinde değişken parametrelere bağlı Fe giderim verimi	143
Şekil 4.28	500 ml Elektrofenton prosesinde değişken parametrelere bağlı Ni giderim verimi	146
Şekil 4.29	500 ml Elektrofenton prosesinde değişken parametrelere bağlı toplam Cr giderim verimi	149
Şekil 4.30	500 ml Elektrofenton prosesinde değişken parametrelere bağlı SO_4^{2-} giderim verimi	152
Şekil 4.31	500 ml Elektrofenton prosesinde değişken parametrelere bağlı Cl^- giderim verimi	155
Şekil 4.32	500 ml Elektrofenton prosesinde değişken parametrelere bağlı TOK giderim verimi	158
Şekil 4.33	500 ml Hidroksit çöktürme yönteminde değişken parametrelere bağlı Cu giderim verimi	160
Şekil 4.34	500 ml Hidroksit çöktürme yönteminde değişken parametrelere bağlı Zn giderim verimi	161
Şekil 4.35	500 ml Hidroksit çöktürme yönteminde değişken parametrelere bağlı Fe giderim verimi	162
Şekil 4.36	500 ml Hidroksit çöktürme yönteminde değişken parametrelere bağlı Ni giderim verimi	163
Şekil 4.37	500 ml Hidroksit çöktürme yönteminde değişken parametrelere bağlı toplam Cr giderim verimi	164

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	Çeşitli endüstrilerin atıksularında bulunan ağır metaller [12] 5
Çizelge 2.2	Metal kaplama işlemleri [1] 8
Çizelge 2.3	Metal hazırlama, metal üretme ve metal son işlem proseslerinden ortaya çıkan madde girişleri ve kirletici çıkışları [19]..... 18
Çizelge 2.4	Metal sanayi (Galvanizleme) atıksularının alıcı ortama deşarj standartları 31
Çizelge 2.5	TSE, WHO ve EPA'ya göre bazı toksik maddelerin atıksulardaki sınır değerleri..... 32
Çizelge 2.6	Bir hücrede ortaya çıkan elektrokimyasal yükseltgenme ve indirgenme reaksiyonları..... 34
Çizelge 2.7	Elektrotlarda oluşan reaksiyonların mekanizmalar 44
Çizelge 2.8	Bazı yükseltgenlerin sulu ortamda indirgenme yarı tepkimeleri ve standart indirgenme potansiyelleri 47
Çizelge 2.9	Metallerin hidrositlerinin çözünürlükleri..... 51
Çizelge 3.1	Aritma tesisine gelen atıksudaki kirlilik karakterizasyonu 57
Çizelge 3.2	İSKİ Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği [61] 57
Çizelge 3.3	500 ml EC çalışma şartları 60
Çizelge 3.4	1 L'lik EC çalışma şartları 61
Çizelge 3.5	Fenton çalışma şartları [62] 63
Çizelge 3.6	ElektroFenton çalışma şartları [62] 66
Çizelge 4.1	500 ml elektrokoagülasyon çalışma şartları 70
Çizelge 4.2	500 ml EC prosesi çalışması bakır giderimi sonuçları 73
Çizelge 4.3	500 ml EC prosesi çalışması çinko giderimi sonuçları 76
Çizelge 4.4	500 ml EC prosesi çalışması demir giderimi sonuçları 79
Çizelge 4.5	500 ml EC prosesi çalışması nikel giderimi sonuçları 82
Çizelge 4.6	500 ml EC prosesi çalışması krom giderim sonuçları 85
Çizelge 4.7	500 ml EC prosesi çalışması sülfat giderim sonuçları 90
Çizelge 4.8	500 ml EC prosesi çalışması klorür giderim sonuçları 91
Çizelge 4.9	500 ml EC prosesi çalışması TOK giderim sonuçları 95
Çizelge 4.10	1 L EC prosesi çalışması Bakır giderim sonuçları..... 97
Çizelge 4.11	1 L EC prosesi çalışması Çinko giderim sonuçları..... 99
Çizelge 4.12	1 L EC prosesi çalışması Demir giderim sonuçları..... 101
Çizelge 4.13	1 L EC prosesi çalışması Nikel giderim sonuçları..... 103
Çizelge 4.14	1 L EC prosesi çalışması Krom giderim sonuçları 105

Çizelge 4.15	1 L EC prosesi çalışması Sülfat giderim sonuçları	108
Çizelge 4.16	1 L EC prosesi çalışması Klorür giderim sonuçları.....	109
Çizelge 4.17	1 L EC prosesi çalışması TOK giderim sonuçları	111
Çizelge 4.18	Fenton prosesi çalışması Bakır giderim sonuçları.....	114
Çizelge 4.19	Fenton prosesi çalışması Çinko giderim sonuçları.....	117
Çizelge 4.20	Fenton prosesi çalışması Demir giderim sonuçları	120
Çizelge 4.21	Fenton prosesi çalışması Nikel giderim sonuçları.....	123
Çizelge 4.22	Fenton prosesi çalışması Toplam krom giderim sonuçları	126
Çizelge 4.23	Fenton prosesi çalışması Klorür giderim sonuçları	129
Çizelge 4.24	Fenton prosesi çalışması Sülfat giderim sonuçları.....	132
Çizelge 4.25	Fenton prosesi çalışması TOK giderim sonuçları	135
Çizelge 4.26	Elektrofenton prosesi çalışması Bakır giderim sonuçları.....	138
Çizelge 4.27	Elektrofenton prosesi çalışması Çinko giderim sonuçları.....	141
Çizelge 4.28	Elektrofenton prosesi çalışması Demir giderim sonuçları	144
Çizelge 4.29	Elektrofenton prosesi çalışması Nikel giderim sonuçları.....	147
Çizelge 4.30	Elektrofenton prosesi çalışması Toplam krom giderim sonuçları	150
Çizelge 4.31	Elektrofenton prosesi çalışması Sülfat giderim sonuçları.....	153
Çizelge 4.32	Elektrofenton prosesi çalışması Klorür giderim sonuçları	156
Çizelge 4.33	Elektrofenton prosesi çalışması TOK giderim sonuçları	159
Çizelge 4.34	Hidroksit çöktürmesi çalışması Bakır giderim sonuçları	161
Çizelge 4.35	Hidroksit çöktürmesi çalışması Çinko giderim sonuçları	162
Çizelge 4.36	Hidroksit çöktürmesi çalışması Demir giderim sonuçları	163
Çizelge 4.37	Hidroksit çöktürmesi çalışması Nikel giderim sonuçları	164
Çizelge 4.38	Hidroksit çöktürmesi çalışması Krom giderim sonuçları	165

METAL KAPLAMA ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ İLERİ ARITIM YÖNTEMLERİYLE ARITILMASININ İNCELENMESİ

Ebru BUDAK ÖZLÜ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Yaşar AVŞAR

Endüstriyel faaliyetlerden biri olan metal kaplama sanayisi, hızla gelişen sanayi dalları arasında önemli bir yere sahiptir. Metal kaplama sanayinden kaplama işlemi sonrasında uygulanan durulama banyo işlemi sonrasında çevre kirliliğine sebep olan organik maddeler, Ni, Cu, Fe, Cr, Zn vb. ağır metal bileşikleri, siyanür gibi katı, sıvı ve gaz atıklar ortaya çıkmaktadır. Kaplama atıksuyunda bulunan ağır metallerden ötürü ise metal kaplama sanayi riskli sanayi sektörleri arasında yer almaktadır.

Bu çalışmada hidroksit çöktürmesi ile arıtılabilirliğin yanında özellikle metal kaplama sanayi atıksularının klasik kimyasal arıtma yöntemlerine alternatif olarak düşünülen elektrokoagülasyon (EC), Fenton ve Elektro-Fenton (EF) gibi yöntemlerin laboratuvar ölçeğine uygulayarak bu sanayiden kaynaklanan atıksuların arıtılabilirlik performansları araştırılmış ve ağır metal (bakır, nikel, krom, demir, çinko), sülfat ve klorür iyonlarının konsantrasyonlarının İSKİ Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği standartlarına ulaştırılması hedeflenmiştir. Çalışmanın literatürdeki yaygın uygulamalardan ayrıldığı nokta ise EC, Fenton ve EF arıtım yöntemlerinin klasik kimyasal arıtım yöntemi olan hidroksit çöktürmesiyle bir arada uygulanarak kendi aralarında değerlendirmeler yapılmış olmasıdır.

Laboratuvarında yapılan deneysel çalışmalar neticesinde İSKİ Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği standartlarına göre bakır, nikel, sülfat gideriminde istenilen çıkış konsantrasyonlarına ulaşamamış olup bu parametreler için sırasıyla en etkili giderim yöntemi Fenton, Hidroksit çöktürmesi ve elektrokoagülasyon olmuştur. Deşarj

standartlarını sağlamayan parametrelerin standartları sağlayacak şekilde giderilebilmesi için elektrokoagölasyon, fenton, elektrofenton veya hidroksit çöktürmesi sonrasında veya öncesinde ilave arıtım prosesleri konulmalıdır.

Anahtar Kelimeler: Metal kaplama, ağır metaller, elektrofenton, elektrokoagölasyon, Fenton, hidroksit öktürmesi.



**INVESTIGATION OF METAL COATING INDUSTRY WASTEWATER
TREATMENT WITH THE ADVANCED TREATMENT METHODS**

Ebru BUDAK ÖZLÜ

Department of Environmental Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Yaşar AVŞAR

Metal plating industry has an important role in rapidly evolving industries. Organic materials and some heavy metals such as Ni, Cu, Fe, Cr, Zn, cyanide and so on that cause environmental pollution occur after rinsing bath. Because of being the heavy metals in the metal plating wastewater the industry is among the risky sectors.

Besides the treatability by hydroxide precipitation in this study, particularly as an alternative to this conventional chemical treatment methods such as electrocoagulation (EC), Fenton and electro-Fenton (EF) methods and their performances were searched on removal of heavy metals (copper, nickel, chromium, iron, zinc), sulfate and chloride ion concentrations as laboratory scale. The results were evaluated some discharge limitations such as Istanbul Water and Sewerage Administration.

The results of the study did not reach discharge limit values of Istanbul Water and Sewerage Administration, yet the order of the best methods obtained during the study were determined as Fenton, hydroxide precipitation and electrocoagulation, respectively in terms of copper, nickel, chromium, iron, zinc, sulfate and chloride ion concentrations. In order to eliminate the parameters and ensure discharge standards, some additional treatment methods should be placed either at the end or before these methods.

Keywords: Metal coating, heavy metals, electrofenton, electrocoagulation, Fenton, hydroxyl precipitation



**YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

1.1 Literatür Özeti

Gelişen endüstriyel faaliyetler endüstri dallarına bağlı olarak çeşitli çevre sorunlarını da beraberinde getirmektedir. Çeşitli kirleticilerin ortaya çıktığı bu faaliyetler yaşamımız için vazgeçilmez olan hava, su ve toprak kalitesinin olumsuz yönde etkilemektedir. Çevre kirliliğine sebep olan bu kirleticilerin türü, konsantrasyonu, kirleticilerin kendi aralarında etkileşimi sonucu ortaya çıkan problemlerin çözümünde çeşitli zorluklar da oluşturmaktadır. Bu sebepten, her sanayi kirliliğinin çevreye hiç zarar vermeyecek yada bu zararı minimize edecek şekilde kaynağında etkili ve yeni teknolojiler kullanılarak artırılması gerekmektedir [1].

Metal kaplama sanayisi hızla gelişen sanayi dalları arasında önemli bir yere sahiptir. Metal kaplama tesislerinde birçok amaca yönelik farklı şekillerde kaplama yöntemleri uygulanmaktadır. Bu tesislerde metaller kaplandıktan sonra durulama banyolarından geçirilirler ve bunun sonucunda çevre kirliliğine neden olan organik maddeler (proteinler, karbonhidratlar, yağ ve gres, sürfaktanlar, fenoller, pestisidler, klorlu bileşikler vb.), ağır metal bileşikleri (antimon, arsenik, bor, bakır, baryum, çinko, demir, kadmiyum, kurşun, nikel, krom, kalay, kobalt, gümüş, magnezyum, molibda, kalyum vb.), siyanür gibi birçok katı, sıvı ve gaz atıklar ortaya çıkmaktadır [1]. Metal kaplama, atıksuyunda Ni, Cu, Fe, Cr, Zn gibi ağır metaller bulundurduğu için potansiyel tehlike arz etmekte ve riskli sanayi sektörü arasında görülmektedir [2].

Ağır metaller sucul ortamdaki yüksek çözünürlüğünden dolayı canlı mikroorganizmalar tarafından absorbe edilebilirler. Besin zincirine girdikten sonra ağır metallerin fazla

konsantrasyonları insan vücudunda birikebilir. Eğer metaller izin verilen konsantrasyonların ötesinde vücuda alınırsa ciddi sağlık bozukluklarına sebep olabilirler. Bu yüzden alıcı ortama deşarj edilmeden önce metalle kirlenmiş bu atıksuların arıtılması gereklidir [3]. Ağır metallerin atıksulardan uzaklaştırılmasında ise; kimyasal çöktürme, kimyasal oksidasyon redüksiyon iyon değişimi, filtrasyon, elektrokimyasal işlemler, membran teknolojisi, ters osmoz, adsorpsiyon gibi metal giderim teknolojileri kullanılmaktadır [4].

Türkiye’de endüstriyel kirlenme konusunda 1974 yılına kadar yasal bir düzenleme görülmemektedir. 1971 yılında 1380 sayılı Su Ürünleri Kanunu ile beraber endüstriler için deşarj standartları belirlenmiştir. 1983 tarihli 2872 sayılı Çevre Kanunu’nda endüstriyel kirlenme kontrolü, genel kirlenme kontrolü çerçevesinde belirli esaslara bağlanmıştır. Metal kaplama endüstrisi atıksuları içerdiği toksik ağır metaller nedeniyle potansiyel bir tehlike olmaktadır. Bu yüzden bu atıksular işletme tarafından ya kanalizasyon deşarj standartlarına indirilerek ya da İSKİ’ye verilip deşarj limitlerine ulaştırılmalıdır [1].

1.2 Tezin Amacı

Günümüzde insanoğlunun çeşitli aktiviteleri sonucunda ortaya çıkan atıklar çevrede hızla artmaları sonucunda birçok çevre problemini de beraberinde getirmiştir. Bu atıkların beraberinde birtakım faaliyetler sonucu deşarj edilen atıksular, içerdiği çeşitli toksik yada zararlı maddelerle su yaşamı üzerinde negatif etkiye sebep olarak çevreyi sık sık kirletmektedir [5]. Bu endüstriler içerisinde bulunan metal kaplama endüstrisi bu konuda önemli bir yere sahiptir. Bu endüstriden ortaya çıkan atıksular, uygun bir arıtım yapılmadan deşarj edilirse içerdiği çeşitli toksik maddelerle hem çevreye hemde besin zinciri yoluyla insanoğluna zarar verebilmektedir [6].

Farklı endüstriyel tesislerden farklı türde atıksuların ortaya çıktığı ve atıksuların arıtılması için genelde uygulanan arıtma yöntemlerinin klasik kimyasal arıtma yöntemlerinden ibaret olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada hidrosit çöktürmesi ile arıtılabilirliğin yanında özellikle metal kaplama sanayi atıksularının klasik kimyasal arıtma yöntemlerine alternatif olarak düşünölen elektrokoagölasyon (EC), Fenton ve Elektro-Fenton (EF) gibi yöntemlerin laboratuvar ölçeğine uygulayarak bu sanayiden

kaynaklanan atıksuların arıtılabilirlik performansları araştırılmıştır. Bilindiği üzere metal kaplama sanayi atıksuları ağır metal (Fe, Cu, Cr, Ni, Zn, Cd gibi), siyanür, yüksek sülfat ve klorür içeriğinden dolayı çevresel açıdan son derece toksik ve mutlak surette arıtılması gereken bir atıksu olarak tanımlanmıştır. Bu tez çalışması ile bu hedefin gerçekleştirilmesi klasik kimyasal arıtma tekniklerine alternatif olarak ortaya konmuştur.

1.3 Hipotez

Metal içeren atıksuların büyük miktardaki deşarjı sebebiyle Cd, Cr, Cu, Ni, As, Pb, Zn gibi ağır metal içeren metal kaplama endüstrileri kimyasal yoğunluğu olan endüstriler arasında en zararlılarından biridir. Sucul ortamdaki yüksek çözünürlüğünden dolayı ağır metaller canlı organizma tarafından absorbe edilebilirler. Çevre kirlenmesi, canlıların sağlığı ve taşıdıkları teknolojik önem göz önüne alınacak olursa ağır metallerin atıksulardan uzaklaştırılması yada geri kazanılması gerekmektedir [7].

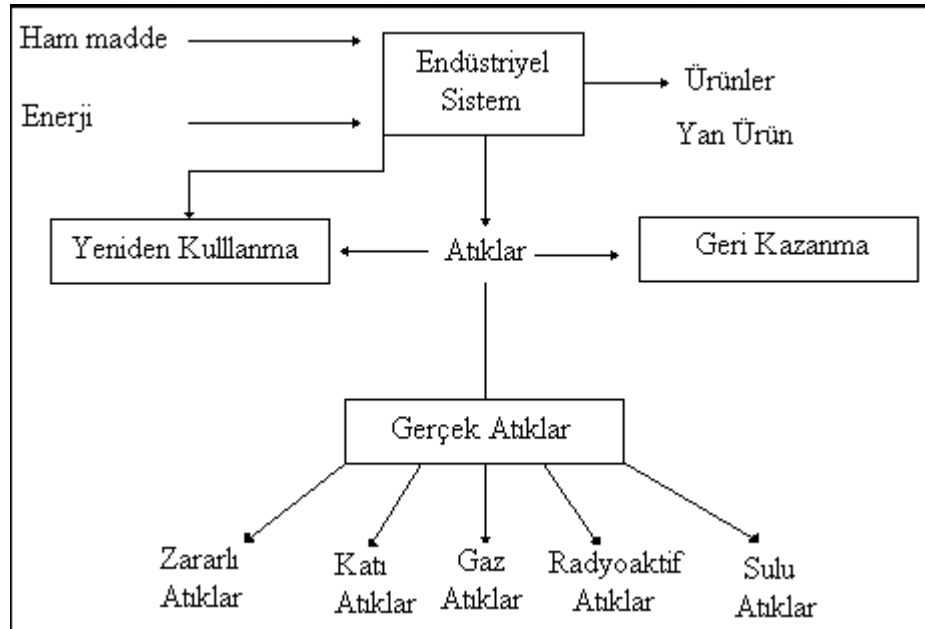
Bu tez çalışması kapsamında ise ağır metal, sülfat ve klorür gibi zararlı maddeler içeren metal endüstrisi atıksularının literatürde var olan klasik kimyasal arıtımına karşılık alternatif olarak düşünülen EC, Fenton ve EF gibi ileri arıtım yöntemlerinin arıtılabilirlik performanslarının detaylı bir incelemesi yapılmaya çalışılmıştır.

Çalışmanın asıl değer kazandığı ve diğer çalışmalardan ayrıldığı nokta ise EC, Fenton ve EF arıtım yöntemlerinin klasik kimyasal arıtım yöntemi olan hidrosit çöktürmesiyle bir arada uygulanarak kendi aralarında değerlendirmeler yapılmış olmasıdır. Bu konuda literatürde daha önce böyle bir çalışmaya rastlanmamıştır. Yapılan değerlendirmeler ile birlikte deşarj standartlarını sağlamaya yönelik prosesler aralarında değerlendirilmiştir. Bu hususta bu çalışmayla birlikte ülkemizde alıcı ortam kalitesini arttırmak, metal kaplama atıksuyu içerisinde bulunan ağır metallerin ileri kimyasal arıtım teknolojileri ile arıtımının araştırılması ve gelecek çalışmalara referans olması amaçlanmıştır.

ENDÜSTRİYEL ATIKSULAR

2.1 Genel Bilgiler

Nüfus artışı ve endüstrileşmeye paralel olarak oluşan endüstriyel atıkların çevreye bırakılması, canlı yaşamını ve gelecek nesillere bırakacağımız ortamı tehdit etmektedir. Gün geçtikçe gelişen teknoloji, beraberinde endüstri ürünlerinde çeşitliliğe yol açmıştır. Endüstriyel ve teknolojik gelişimlere bağlı olarak yaşam standartları kaliteleştirilmiş ve bu durum endüstriyel proseslerden çıkan atıkların miktarında artışa neden olmuştur. Şekil 2.1’de endüstriyel sistemlerden çıkan atık türlerinin genel hali görülmektedir.



Şekil 2.1 Endüstriyel sistemlerden çıkan atık türleri [8]

Sulu atıklar olarak ortaya çıkan “endüstriyel atıksular”; endüstriyel tesislerde, hammaddelerin işlenmesi ve ürün üretilmesi işlemlerinden kaynaklanan atıksular

olarak tanımlanmaktadır. Bu atıksular yıkama, pişirme, ısıtma, ekstraksiyon, reaksiyon ürünleri, ayırma, taşıma ve kalite kontrol işlemlerinden ortaya çıkabilmektedir. Çıkan atıksular endüstri türüne ve işlenen hammaddeye bağlı olarak birbirinden farklı özellikler göstermektedir. Bazı “endüstriyel atıksular aşırı organik içerikli olup kolayca biyolojik olarak ayrışabilirken bazıları aşırı inorganik içerikli veya zehirleyici özellikte olabilir. Bu atıksular arıtım yapılmadan alıcı ortama ve çevreye verildiğinde oksijen azalması, inhibisyon, ötrofikasyon, patojenik etkiler gibi olumsuz sonuçlara sebep olmaktadır [9]. Ayrıca metal kaplama faaliyetleri, deri sanayi, madencilik gibi bazı endüstrilerin atıksu deşarjında bulunan bakır, nikel, krom, çinko, demir gibi ağır metaller sucul yaşamda toksik etkiye neden olmanın yanı sıra besin zinciri boyunca birikmekte ve insan sağlığını tehdit edebilmektedir [10], [11]. Çeşitli endüstrilerin atıksularında bulunan ağır metaller Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Çeşitli endüstrilerin atıksularında bulunan ağır metaller [12]

	Otomotiv	Azotlu Gübre	Cam	Çimento	Deri	Metal	Petrol	Plastik	Madde	Kâğıt	Termik	Enerji	Çelik	Tekstil
Krom	×	×	×	×	×	×		×	×	×	×	×	×	×
Siyanür	×					×	×	×					×	
Bakır	×		×			×	×				×			
Nikel	×					×	×							
Demir	×		×			×	×				×	×		
Çinko	×	×	×	×		×	×	×			×	×		
Kalay	×		×										×	
Kurşun	×					×	×							
Kadmiyum	×					×								

Bu olumsuz gelişmeleri ortadan kaldırmak amacıyla; atıksu arıtım çıkışlarını nehir, göl ve deniz gibi alıcı ortamlara deşarj etmeden önce uygun standartlara getirmek gereklidir. Bunun içinde kimyasal, fiziksel yada biyolojik yöntemlerle endüstriyel atıksuları arıtmak gereklidir [13]. Bu yöntemler endüstriyel atıksuların arıtımında kendi içerisinde bir çok proses barındırmaktadır. Çizelge 2.1’de belirtilen ağır metallerin ekolojik sisteme ve özellikle insan vücuduna etkileri önemli olduğundan ise, arıtımlarında çöktürme, adsorbsiyon, biosorpsiyon, iyon değıştirme, elektrodializ, elektrokoagülasyon, membran ayırma gibi prosesler kullanılmaktadır [14].

2.2 Metal Endüstrisi ile ilgili Genel Bilgi

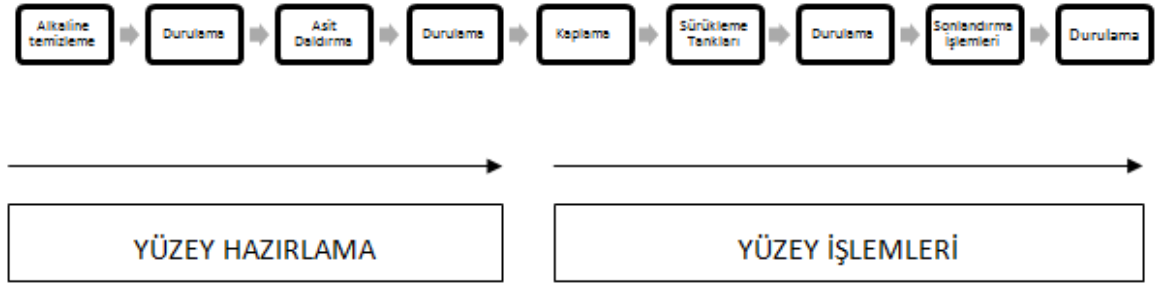
Metal kaplama endüstrisi, metal yüzeyini işleyerek kullanıma elverişli duruma getirmeyi amaçlayan endüstri dalıdır [4]. Galvanizleme işlemi ise, “gerekli parçaların sulu elektrolit çözücü içinde doğru akımla metalik tabaka ile kaplanmasıdır”. Kplama yapılacak malzeme metal olabilmesinin yanı sıra suni maddeler de olabilmektedir [15]. Kplamaların sağladığı avantajları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

- Korozyona karşı dayanım
- Daha iyi bir dış görünüş
- Parlak ve pürüzsüz-düzgün yüzey
- Eskime ve aşınmaya karşı dayanıklılık
- Sertlik
- Lehimlenebilme
- Elektrik iletkenliğinin artması [12]

Kplamada sıkça kullanılan malzemeler çinko ve nikel olmakla beraber tunç, krom, altın, alüminyum, kadmiyum, bakır, pirinç, gümüş ve kalay gibi maddeler de sık kullanılmaktadır [15]. Ayrıca uygulanan işlemin farklılığından dolayı banyolar; asitler, bazlar, kompleks yapıcılar, siyanür bileşikleri, organik katkı maddeleri, yağlar ve yüzey aktif maddeler içerebilmektedir [16]. Kplama olarak hangi metalin seçileceğine ise aşağıdaki faktörler göz önüne alınarak ve ekonomik değerlendirmeler yapılarak karar verilmektedir.

- Atmosferik korozyonun şiddeti
- Yapının ömrü
- Malzemenin biçimi ve boyutu
- Mekanik faktörler
- Yüzeyin dekoratif görünümü. [17]

Kaplama işlemine başlanmadan önce ise; kaplama yapılacak olan malzeme yağlardan ve oksitlenmelerden (menevişleme ile) temizlenmesi gerekmektedir. Her işlemten sonra malzeme yıkanması gerektiğinden, galvanizleme (metal kaplama) işleminde birbirini takip eden yıkama işlemleri yapılmakta ve sonunda da lekesiz olarak kurutulmaktadır. Kaplama yapılacak malzeme çengellere asılarak, kaldırma ve nakliye sistemleri aracılığıyla sırasıyla etkileşim kazanlarına daldırılmaktadır [15]. Farklı metal kaplama işletmesinden edinilen bilgilere göre metal kaplama proseslerinde kullanılan genel proses adımları Şekil 2.2’ de ve proses işlemleri de Çizelge 2.2’de gösterildiği gibidir.



Şekil 2.2 Metal kaplama prosesi için akış diyagramı [1]

Yüzey hazırlama işleminde; kaplanacak olan herhangi bir parça, yüzey hazırlama işlemini engelleyecek yağ, kir, oksit ve diğer kimyasalları giderilmesi için öncelikle ön arıtım yapılarak temizlenmektedir. İlk adım, genellikle ya organik çözücü ya da su bazlı temizleyici sisteme parçanın uygulanmasını gerektirmektedir. Temizleme fazının ardından iş parçası, parça üzerinde kalan temizleyici materyallerin giderimi için su banyosunda durulamaya geçirilmektedir. Parça üzerinde oluşabilecek olan herhangi bir oksit giderilmesinin yanında, iş parçası kaplama için ileride hazırlanmış olan asit daldırmaya ilerlemektedir. Yüzey hazırlamada son adım ise; kalan asit kalıntılarını gidermek için bir diğer durulama aşamasından oluşmaktadır.

Yüzey bitirme aşaması, parça yüzeyine esas değişikliğin yapıldığı kısımdır. Esas yüzey kaplama prosesi, istenen son kaplamayı gerçekleştirmek için çökelme banyoları ve durulama serisinden oluşmaktadır. Örneğin, yaygın bir üç basamaklı kaplama sistemi “bakır-nikel-krom” dur [18].

Çizelge 2.2 Metal kaplama işlemleri [1]

Elektrokaplama	Termal kesme	Sıcak daldırma kaplama
Elektriksiz kaplama	Kaynaklama	Püskürtme
Anodik metal işleme	Sert lehimleme	Buhar kaplama
Konversiyon kaplama	Lehimleme	Termal enfüzyon
Kimyasal frezeleme	Alev spreyleme	Tuz banyo çöktürme işlemleri
Temizleme	Kum parlatma	Sıcak buhara daldırmayla Çözme
Talaşlı imalat	Diğer zımparalama jet talaşlı imalatları	Boya soyma
Toz haline getirme ve öğütme	Elektriksel deşarj talaşlı imalatı	Boyama
Parlatma	Elektrokimyasal kaplama	Elektrostatik boyama
Daldırma işlemi	Elektron elektron ışınıyla imalat	Elektroboyama
Cilalama	Lazer ışınıyla imalat	Vakumla metal kaplama
Sıkıştırma deformasyonu	Plazma kaynak işlemleri	Birleştirme
Basınç deformasyonu	Ultrasonik metal işlemleri	Kalibrasyon
Kırpma	Sinterleme	Test etme
Isıl işlem	Astarlama	Mekanik kaplama

Metal kaplama sanayilerine bakıldığında; kaplama, sıcak galvanizleme, elektrolitik galvanizleme farklı ihtiyaçlar doğrultusunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Proses gereği her bir sistem seçiminin şartları mevcuttur. Bu şartları belirleyen en önemli

hususların başında, yapılacak kaplama ve kaplanacak malzemenin türü ve ürünlerin üretim sonrası kullanım alan ve amaçları gelmektedir. Bir galvanizleme prosesi ise aşağıda belirtilen işletme prosedürlerinden oluşmaktadır.

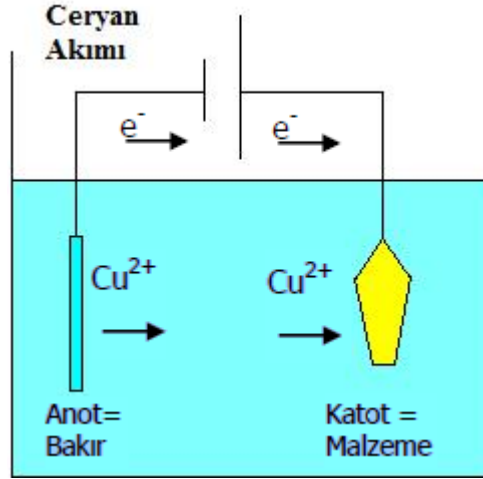
2.2.1 Ön İşlem / Temizleme

Metal kaplama (galvanizleme) işlemleri için çok önemli bir aşama olan bu işlem, metal yüzeylerinde biriken kir ve yağların giderilmesi işlemidir. Yağ ve kir organik yapıda olabileceği gibi inorganik yapıda da olabilmektedir. Organik maddeler, bitkisel ve hayvansal kaynaklı sabunlaşabilen yağlar, mineral yağlar, balmumu ve inhibitör gibi diğer organik kirliliklerden oluşmaktadır. İnorganik maddeler içerisinde ise metal oksitler parlatma, aşındırma, yüksek ısılarda eritmek işlem kalıntıları ve toz döküntüleri yer almaktadır. Temizleme işleminde büyük miktarlarda su harcanmakta ve bu işlem için değişik kimyasal kullanımı gerekmektedir. Galvanizleme de en sık uygulanan ön işlemler ise aşağıda verilmiştir [1].

- Solvent veya sulu alkalik temizleyiciler yardımıyla temizlenmek yada yağını almak. Bu temizleme sıcaklık (sıcak yağsızlaştırma) ultrason veya elektroliz yardımıyla desteklenmektedir.
- Asitle aşındırma (genelde seyreltilmiş sülfürik asit, hidroklorik asit veya nitrik asit kullanılır)
- Konsantre asitlerle yakma (sülfürik, hidroklorik ve nitrik asit)
- Elektrolitik küf indirme
- Nötralize
- Dekape etme (genelde sülfürik, hidroklorik-sitrik- veya asetik asit) [15]

2.2.2 Galvanizleme

Galvanizleme banyoları metal iyonlarının yanı sıra başka maddelerde içermektedir. Bu maddeler ise kaplama cinsine göre değişiklik göstermektedir. Örneğin tuzlar, asitler, parlatma ekleri, amonyak, siyanür, bafır ekleri ve bağlayıcılar vb.'dir. Şekil 2.3'de bakır ayırma işlemine ait galvanizleme örneği gösterilmiştir [15].



Şekil 2.3 Bakır ayırma işlemi [15]

2.2.3 Yıkama

Birinci ve ikinci kısımda verilen proses adımlarının her birinden sonra üretim parçasında kontamine olarak yapışan proses kimyasalları su veya demineralize su ile temizlenmesi gerekmektedir. Bu temizlik oranı bir sonraki proses adımı için gerekmede ve onun tarafından belirlenmektedir. Yıkama suyu banyoda kullanılmış olan etken maddeleri içermekte ve bu yüzden geri kazanılması gerekmektedir. Tek defa yıkama yöntemi ile oluşacak yıkama suyu miktarı buharlaşma ve eksiltme neticesinde oluşacak eksik miktarları karşılamaya yeterli gelmeyecektir. Bu durum arka arkaya kurulmuş banyolarla çözülmektedir.

Daha yüksek yıkama kriterleri elde edebilmek için çeşitli yıkama banyolarının “kaskat yıkama” şeklinde arka arkaya kullanılması tavsiye edilmektedir. Bu sayede yıkama suyu miktarı da düşürülmektedir. Etkenlerin büyük bir bölümü banyo rejenerasyonunda prosese yeniden geri kazanılmaktadır. Bu amaçla yıkanması gereken parçalar ters yön yöntemi ile yani ilk olarak en yoğun ve son olarak en temiz banyoda yıkanmalıdır. [15]

2.2.4 Kurutma

Tüm prosesin son yıkama adımından sonra elde edilen parçaların lekesiz kurutulması gerekmektedir. Bunu ya tamamen demineralize edilmiş su veya organik su iticiler (Örnek; Testbenzini) ile elde etmek mümkündür [15].

2.2.5 Banyo Temizliği

Proses banyolarının uzun süre kullanılmasını sağlayabilmek için kir, toz, indirgeme ve yabancı maddeler gibi rahatsız edici maddelerin (kirliliklerin, reaksiyon ve işlem atıklarının) sürekli proseslerden alınması gerekmektedir [15].

2.3 Metal Kaplama İşlemleri

Çizelge 2.2’de görüldüğü gibi birçok metal kaplama işlemleri mevcuttur. Bu işlemlerden birkaçı aşağıda tanımlanmıştır.

2.3.1 Sıcak Daldırma

Kaplanacak metali başka bir metalin erimiş banyosu içerisine daldırarak yapılan kaplama işlemidir. Erimiş metal iki metal arasında alaşım meydana getirerek kaplamayı sağlamaktadır. Sıcak daldırma kaplamasından önce temizleme işlemi yapılmaktadır. Ayrıca en yaygın ve en ucuz kaplama yöntemi bu yöntemdir. Alüminyum, kurşun ve kalay için sıcak daldırma yöntemi kullanılabilir [1]. Özellikle çelik üzerine çinko kaplama (galvanizleme) bu yöntemle yapılmaktadır.

Sıcak daldırma yöntemi ile çelik üzerine çinko kaplama aşağıdaki gibi yapılmaktadır.

- Metal yüzey iyice temizlenir.
- Boyutları uygun bir banyo içinde çinko metali 450 °C’de eritilir.
- Metal erimiş banyo içine daldırılır ve bu arada Zn-Fe alaşımı meydana gelir.
- Kaplama kalınlığı en az 85 µm (600 g/m²) olmalıdır. Kaplama kalınlığı banyo sıcaklığına ve malzemenin banyodan çekiliş hızına bağlıdır.
- Kaplama tek daldırma ile yapılır.

Yüzey temizliği yeterli ise sıcak daldırma ile yapılan çinko kaplamalar kuru kırsal atmosferde en az 20 yıl dayanıklıdır[17].

2.3.2 Sıcak Püskürtme

Daha önce yüzeyleri temizlenmiş olan çelik üzerine erimiş haldeki metal (genellikle çinko ve alüminyum) sıcak halde püskürtülmektedir. Bu amaçla toz metal veya tel

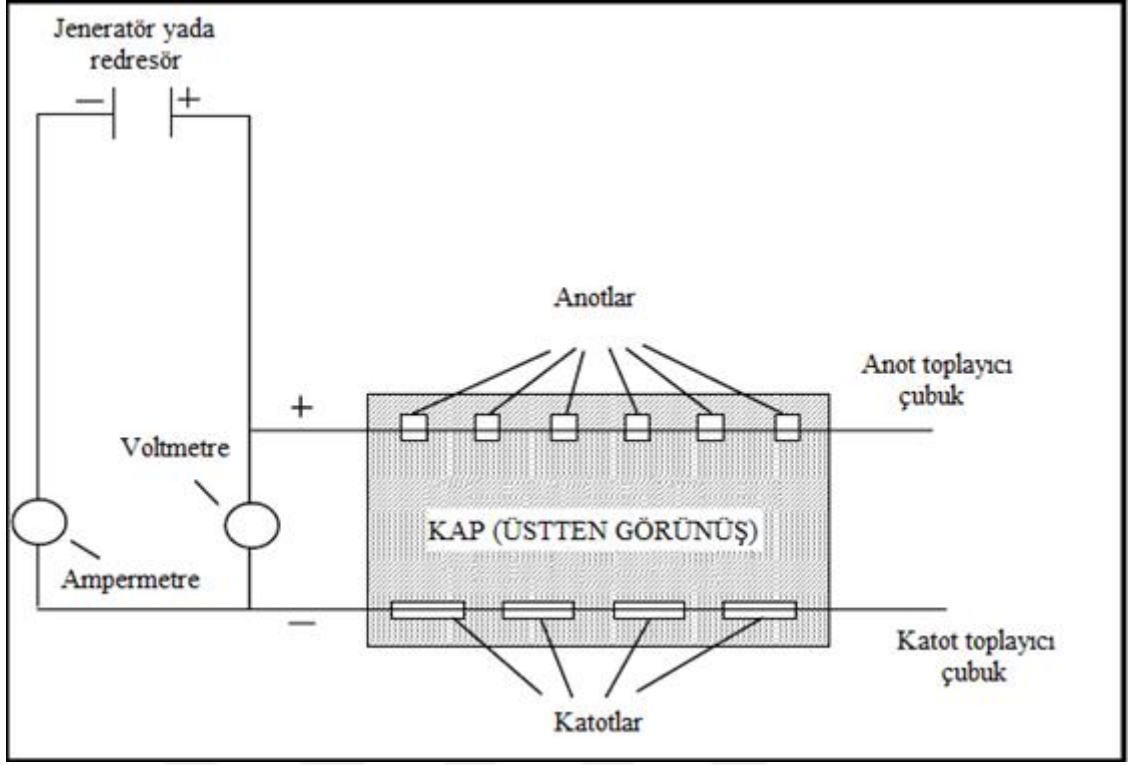
halinde metal kullanılmakta ve tel kullanılması halinde elektrik arkı yaptırılarak telin hızla erimesi sağlanmaktadır.

Püskürtme sırasında metal soğuk haldedir. Bu kaplama sırasında çelik yüzeyinde herhangi bir metalurjik değişme meydana gelmez. Sıcak daldırmada alaşım meydana geldiği burada yalnız bir yapışma söz konusudur. Örneğin kum püskürtme ile kaplanmış metal sökülebilmektedir.

Sıcak püskürtme yapmadan önce çelik yüzeylerin kum püskürtme yöntemi ile temizlenmiş olması gerekmektedir. Kaplama kalınlığı 75 µm-200 µm arasında olabilmektedir. Alt tabaka çinko, üst tabaka alüminyum olmak üzere iki tabaka halinde de kaplama yapılabilmektedir [17].

2.3.3 Elektrolitik Kaplama

Elektrokaplama, elektrik akımı uygulanarak (elektroliz) bir metal yüzeyi üzerine bir başka metali kaplama olarak tanımlanmaktadır. Elektrokaplama banyoları kaplanacak metal üzerinde metalik duruma indirgenen metal iyonlarını içermektedir. Kaplanacak olan metal katot olarak kullanılırken anot ise çoğunlukla banyo çözeltisi içerisinde çözündürülerek kullanılacak metal yüzeyinde birikmektedir. Elektrokaplama banyoları metal tuzları, kompleksleştirici kimyasalla, pH tamponları yanı sıra organik ve organometalik katkı maddeleri içermektedir. Şekil 2.3'te genel olarak kullanılan elektrokaplama donanımının önemli kısımları gösterilmiştir [1].



Şekil 2.4 Elektrokaplamanın kısımları [19]

Elektrokaplama kullanılan en yaygın alaşım veya metaller; pirinç (bakır-çinko), kadmiyum, krom, bakır, altın, nikel, gümüş ve çinkodur [19].

Şekil 2.4'e göre elektrokaplamanın kısımlarından bahsedecek olunursa; elektrolit, normal olarak kaplanacak metali iyonik halde içeren sulu bir çözeltilidir. Bir hücreye bir gerilim uygulandığında, hücrede geçerli şartlar altında en az negatif değerde yük bırakma potansiyeli için katotta reaksiyon gerçekleşmektedir. Yük bırakma potansiyelleri iyonik derişim, akım yoğunluğu, sıcaklık gibi parametrelerle değişkenlik göstermektedir. Bu değişimin büyüklüğü farklı türler için farklı değerdedir. Katotta istenen birikimin sağlanabilmesi için elektrolitin durumu önceden düzenlenmelidir. Elektrolitte metali iyonik halde bulundurmanın en basit yolu, o metalin basit bir tuzunun çözeltilisini kullanmaktır. Nitrat, klorür ve sülfat genellikle kullanılan anyonlardır ve bunların tuzlarının karışımı da kullanılmaktadır [20].

Kaplama banyosunda kaplanacak metal ise katot olarak bağlanmaktadır. Bir metal yüzeyinin kaplamadan önce yalnızca yağ ve kirden değil aynı zamanda yüzeydeki diğer tabakaların giderilmesi gerekmektedir. Yağ ve pisliğin giderilmesinde en etkili organik çözücü ise trikloretilendir. Parça bu aşamadan sonra su ile tamamen yıkanmakta ve

temizlemenin tamamlanması için alkali bir çözelti ile temas ettirilmektedir. Alkali ile yapılan işlemde sonra parça yıkanmakta ve asit içerisine daldırılmaktadır. Asit içerisine daldırma alkali ile yıkama sırasında oluşan herhangi bir oksit tabakasının giderilmesini ve kaplama için daha uygun bir yüzeyin oluşmasını sağlamaktadır.

Elektrolitik kaplamalarda anot olarak da, uygulamada kaplanacak metalin çözünebilen türde anodu kullanılmaktadır. Bu sayede metal iyonu derişimi sürekli olarak sabit tutulacak ve kaplanacak parça, sistem çalıştığı müddetçe metal iyonu alacaktır. Dengenin sağlanması için ise, aynı metal iyonundan elektrolit bünyesine katılması gerekmektedir. Örneğin, bir bakır banyosunda katotta bakır kaplanırken, elektrolitteki bakır iyonu azalmaya başlayacaktır. Bu ise elektrolitteki dengenin bozulmasına sebep olacaktır. Bu dengeyi sağlamak için de anoda bakır asılması gerekmektedir [12].

2.3.4 Elektriksiz Kaplama

Elektriksiz kaplama elektrik akımı olmadan yapılan kaplama işlemidir. Elektriksiz kaplama otokatalitik ve daldırma kaplama olmak üzere 2 türlü yapılabilmektedir. Otokatalitik kaplama, indirgen kimyasal maddeler kullanılarak çözelti içerisindeki metal iyonlarının metalik duruma geçirilerek kaplanacak madde üzerine kaplama yöntemidir. Genellikle metal kaplamada metal yüzeyi bir ön işlemde geçirilmektedir. Elektriksiz kaplama dediğimiz işlem de metal ve metal olmayan yüzeylere uygulanabilmektedir. Bu kaplama işleminde hidrazin, formaldehit gibi indirgen kimyasal maddelerin yanı sıra etilen diamin tetra asetik asit (EDTA) ve tartarat gibi değişik kompleks yapıcı kimyasallar da kullanılmaktadır.

Daldırma kaplama ise, yine elektrik akımı kullanılmadan yapılan bir kaplama işlemidir. Bu işlemde diğer işlemde farklı olarak, bazı metaller ile çözeltideki metal elektrot potansiyel farkından dolayı meydana gelen ince film kaplama biçiminde kendiliğinden çözelti içerisindeki metal iyonu ana metal üzerine kaplanır. Çözelti içerisindeki metalin elektrot potansiyeli daha yüksek ve indirgenmeye daha meyillidir. Kompleks maddeler olarak genellikle laktik, glukolik, malik asit tuzları, amonyak ve siyanür kullanılmaktadır. Ayrıca kadmiyum, bakır, nikel, kalay, çinko ve değerli metaller de kullanılmaktadır [1].

2.3.5 Kimyasal Dönüştürme Kaplaması

Metal kaplamada yaygın olarak kullanılan ana işlemlerdendir. Direkt olarak baz metale yada daha önceden kaplanmış metale uygulanarak metal yüzeyinin çeşitli özelliklerinin geliştirilmesi ve dekoratif bir görünüm kazandırılması amaçlı yapılmaktadır. Kromatlama, fosfatlama, metal renklendirmesi ve pasifleştirme işlemleri bu kaplama işlemi içerisinde yer almaktadır [16].

2.3.6 Aşındırma ve Kimyasal İşleme

Bu işlemler arasında aşındırma, kimyasal işlem ve parlak daldırma yer almaktadır. Aşındırma işlemi konsantre sodyum hidroksit çözeltisi kullanılarak metal parçaları şekillendirmek amaçlı uygulanmaktadır. Kimyasal işleme amonyum persülfat, kromik asit, nitrik asit ve bunların bileşimleri olan konsantre asidik çözeltilerden oluşmaktadır [16].

2.3.7 Talaşlı İmalat ve Bileme

Metalin kendisini ve yüzeyini şekillendirmek amaçlı kullanılan işlemlerdir. Yağlama ve soğutma amaçlı doğal ve sentetik yağlar bu işlemler de kullanılmaktadır [1].

2.3.8 Parlatma ve Cilalama

Parlatma işlemi, parlatici ve cilalayıcı bileşikler kullanılarak yüzeyi pürüzsüz hale getirmedir. Metalik sabunlar, mineral yağlar, disperse maddeler ve vakslar (balmumları) kullanılan kimyasallar arasındadır. Cilalama işlemi ise, küçük yüzey düzensizliklerinin ortadan kaldırılarak pürüzsüz hale getirilmesidir. Yağlayıcılar ve sabun çözeltileri cilalama aletlerinin soğutmasında kullanılmaktadır. Bu işlem için sodyum siyanür (ıslatici ajanlar) ve pas inhibitörleri kullanılmaktadır [1].

2.3.9 Kırpma, Etki ve Basınç İşlemleri

Bu işlemlerin hepsi mekanik işlemlerdir. Yağlar, hafif gresler ve pigmentli yağlayıcılar kırpma ve deformasyon ekipmanları için kullanılmaktadır [1].

2.3.10 Isıl İşlem

Karbürizasyon, su verme ve temperleme gibi ısıl işlemler çalışılan parçanın kontrollü ısıtma ve soğutma ile fiziksel özelliklerinin geliştirilmesini amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda söz konusu işlemin banyolarında yağlar, alkoller, deterjanlar, sodyum klorür, sodyum siyanür, sodyum florür, kalsiyum klorür, mineral asitler kullanılmaktadır [16].

2.3.11 Isı ile Kesme, Kaynaklama, Pirince Benzer Hale Getirme, Lehimleme

Isıl kesme işlemi oksiasetlen, oksijen veya elektrik ark aleti kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu işlemin ardından durulama işlemi gelebilir. Kaynaklama, pirinçle ve lehimleme işlemleri ise parçaları ısı ve basınç uygulayarak metallerin ve dolgu metallerin eritilmesi sonucunda birleştirme işlemidir [1].

2.3.12 Kum Püskürtme

Hava basıncı yardımıyla kum, silika veya fındık kabuğu gibi doğal maddeleri metal parça üzerine gönderip yüzeyi mekanik olarak temizleme işlemidir. Durulama işlemi bu işlemin ardından uygulanabilmektedir [1].

2.3.13 Püskürtme ve Buhar Kaplama

Pıtırdamak şeklinde düşük basınçlı vakumlu tüp içerisinde metalin iyon bombardımanı ile kaplanması işlemidir [1].

2.3.14 Tuz Banyosunda Tufal Giderme

Yüzeyde meydana gelen oksitleri ve pulları temizlemek için parçaların daldırıldığı elektrolitik, oksitleyici ve indirgeyici banyolar kullanılmaktadır. Tuz banyolarını, söndürme ve asit daldırma işlemleri izlemektedir. Bu banyolar içerisinde ise erimiş tuzlar, sodyum hidroksit, sodyum hidrit ve çeşitli kimyasal katkı maddeleri bulunmaktadır [1].

2.3.15 Çözücü ile Yağ Giderme

Organik çözücüler kullanılarak metal yüzeyler üzerindeki yağ ve gresin temizlenme işlemidir [1]. Soğuk temizlik, iki fazlı temizlik ve buhar fazlı temizlik olarak üç kısma ayrılmaktadır. Soğuk temizlik ısıtılmamış halojensiz çözelti ile yapılmaktadır. İki fazlı temizleme işleminde hem su hem de çözücü kullanılmakta ve su banyosundan sonra yağı gidermek amaçlı çözücü sprey uygulanmaktadır [16].

2.3.16 Boya Sökme İşlemi

Parça üzerindeki organik kaplamanın giderilmesi işlemidir. Boya sökme çözeltisi kostik soda, ıslatma kimyasalları, deterjanlar, emülsifiye maddeler, asitler ve solventler içerebilmektedir [1].

2.3.17 Boyama, Elektrolitik Boyama, Elektrostatik Büyüme

Boya, vernik ve plastik gibi organik madde ile kaplama işlemidir. En çok kullanılan boyama sprey boyamadır. Elektrostatik boyama elektrik yüklü boya parçacıklarının karşıt yüklü yüzey üzerine uygulanması işlemidir. Elektrolitik boyama da sulu emülsiyon banyolarında boyanacak maddelerin boyayı toplayacak biçimde anot ya da katot yapılması işlemidir. Boyama sırasında pigment, reçine, çözelti gibi çok sayıda kimyasal madde kullanılmaktadır [1].

2.3.18 Vakum Metalleme ve Mekanik Büyüme

Parçanın vakum altında metal buharıyla teması sonucu vakumda metal kaplanması yapılırken kadmiyum, çinko ve kalay tozlarının parça üzerinde kaplanması mekanik kaplama işlemlerini oluşturmaktadır. Mekanik kaplama işleminden önce ve sonra temizleme ve durulama işlemleri uygulanmaktadır [16].

2.3.19 Montaj, Kalibrasyon ve Test İşlemleri

Parçalar montaj ile birleştirilmekte ve bir bütün oluşturulmaktadır. Kalibrasyon işlemi ile parçada çeşitli referans noktaları belirlenmektedir. Kontrol ile de üretimi biten parçanın istenen kaliteye uygunluğu test edilmektedir [16].

2.4 Metal Kaplama Endüstrisinde Atık Türleri

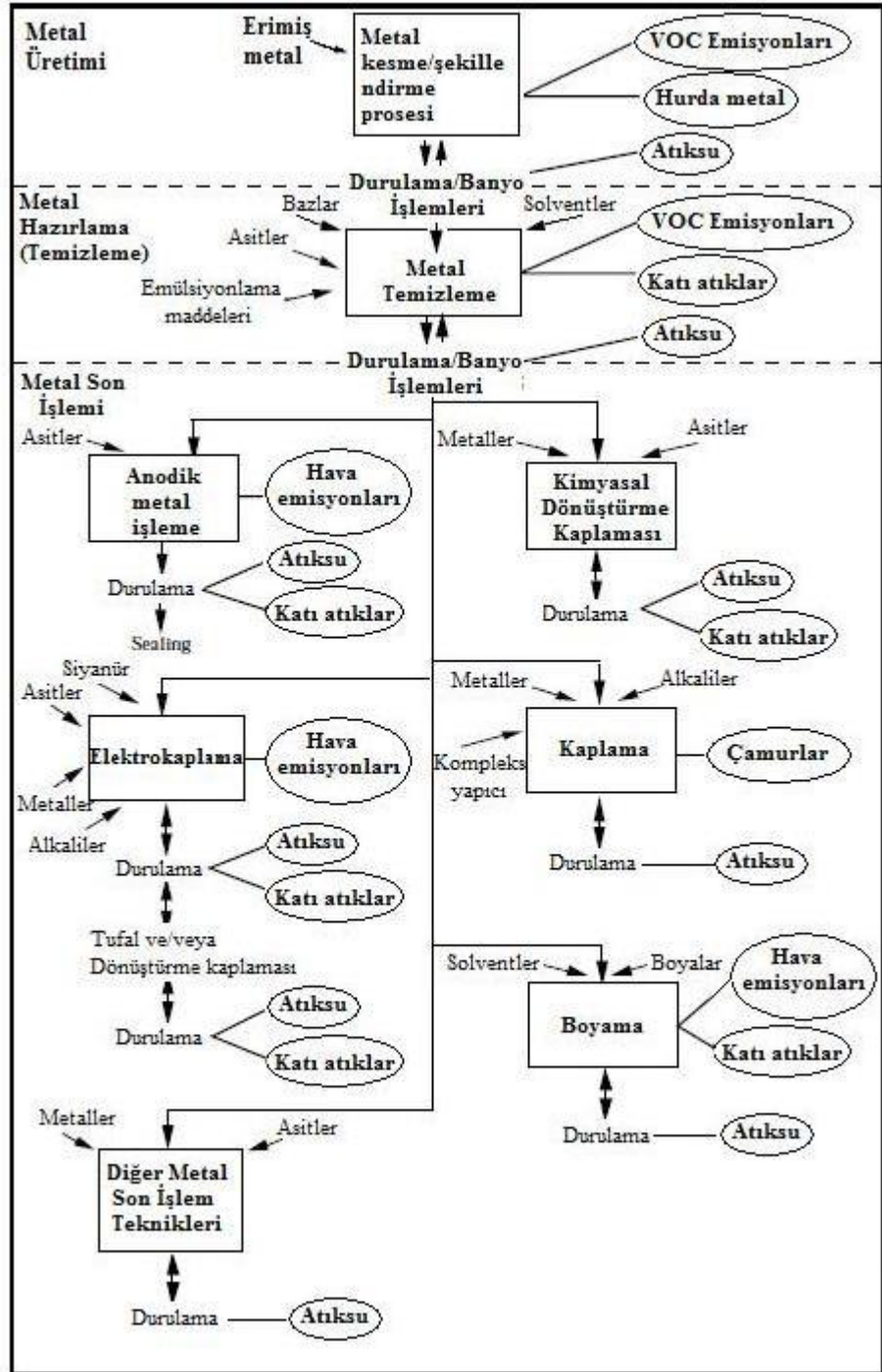
Metal hazırlama, metal üretme ve metal son işlem proseslerinden ortaya çıkan madde girişleri ve kirletici çıkışları Çizelge 2.3’de gösterilmiştir. Şekil 2.5’de bu endüstriyle ilgili genel prosesler, oluşan kirleticiler ve kirleticilerin ortaya çıktığı prosesin kaynağı gösterilmiştir.

Çizelge 2.3 Metal hazırlama, metal üretme ve metal son işlem proseslerinden ortaya çıkan madde girişleri ve kirletici çıkışları [19]

Proses	Madde girişi	Hava emisyonu	Proses atıksuyu	Katı atık
Metal şekillendirme				
Metal kesme ve/veya şekillendirme	Kesme yağları, yağ alma ve temizleme solventleri, asitler, alkaliler ve ağır metaller	Solvent atıkları (örneğin: 1,1,1 trikloreten, aseton, ksilen, toluen)	Atık yağlar (örneğin: etilen glikol) ve asit (hidroklorik, sülfirik, nitrik), baz ve solvent atıksuları	Metal parçaları (örneğin: hurda çelik ve alüminyum), metal bağlayan kesme sıvısı çamurları ve solvent kap atıkları
Yüzey hazırlama				
Solvent temizleme ve emülsiyon, baz ve asit temizleme	Solventler, emülsiyonlama maddeleri, alkaliler ve asitler	Solventler (yalnızca solvent giderme ve emülsiyon temizleme ile ilgili)	Solvent, baz ve asitli sular	Yanıcı atıklar, solvent atıklar ve solvent kapları
Metal son işlemleri				
Anodik metal işleme	Asitler	Metal iyon bağlayan buharlar ve asit buharı	Asitli atıksular	Bitmiş çözeltiler, atıksu arıtma çamurları ve adi metaller

Çizelg 2.3 Metal hazırlama, metal üretme ve metal son işlem proseslerinden ortaya çıkan madde girişleri ve kirletici çıkışları (devamı) [19]

Kimyasal dönüşüm kaplaması	Metaller ve asitler	Metal iyon bağlayan buharlar ve asit buharı	Metal tuzları, asit ve adi metaller	Bitmiş çözeltiler, atıksu arıtma çamurları ve adi metaller
Elektrokaplama	Asit/baz çözeltileri, ağır metal bağlayan çözeltiler ve siyanür bağlayan çözeltiler	Metal iyon bağlayan buharlar ve asit buharı	Asit/baz, siyanür ve metal içeren atıksular	Metal ve reaktif atıklar
Kaplama	Metaller (örnek: tuzlar), kompleks yapıcılar ve bazlar	Metal iyon bağlayan buharlar	Siyanür ve metal atıkları	Siyanür ve metal atıkları
Boyama	Solventler ve boyalar	solventler	Solvent atıklar	Solvent kapları, çamurlar, boya çözücüler ve metaller
Diğer metal son işlemleri (cilalama, sıcak daldırma ve aşındırma)	Metaller ve asitler	Metal gazları ve asit gazları	Metal ve asit atıkları	Cilalama çamurları, sıcak daldırma tank cürufu ve aşındırma çamurları



Şekil 2.5 Metal endüstrisiyle ilgili genel prosesler, oluşan kirlenmeler ve kirlenmelerin ortaya çıktığı prosesin kaynağı [19]

Metal şekillendirme proseslerinin her biri kimyasal içeren atıklar oluşturabilir. Örneğin, makine ve metale solventlerin uygulanması hava emisyonlarına sebep olmaktadır. Bunun yanı sıra baz yada asit içeren atıksular; atık yağlar, metal ve solvent kapları gibi kıta atıklar genellikle bu prosesin kullanımı boyunca ortaya çıkmaktadır.

Metal işleme suları, şekillendirme işlemini kolaylaştırmak için ya işlenmiş olan metale ya da parçaya uygulanmaktadır. Bertaraf edildiğinde, bu sular yüksek miktarlarda metal (örneğin; demir, alüminyum ve bakır) içerebilirler. Proseslerden ortaya çıkan sılarda oluşan diğer kirleticiler asitler, bazlar (örneğin; hidroklorik, sülfürik ve nitrik), atık yağlar, solvent atıklarıdır. Hurda metal ise, orijinal parçadan ortaya çıkan metalden (örneğin; çelik) oluşabilmektedir.

Yüzey hazırlama işlemleri genellikle hava emisyonlarına, kirlenmiş atıksulara ve katı atıklara sebep olmaktadır. Temizlemeden kaynaklanan başlıca hava emisyonları, emülsiyon temizleme prosesleri ve solvent temizlemeden ortaya çıkan kimyasalların buharlaşmasından dolayı oluşmaktadır. Bu emisyonlar gazların doğrudan havalandırılması, kullanım boyunca kaçak kayıpları ve depolama süresince solventlerin buharlaşması vasıtasıyla ortaya çıkabilmektedir. Temizlemeden ortaya çıkan başlıca atıksular olan durulama suları genellikle metal son işlem (örneğin elektrokaplama) atıksularıyla birleştirilir ve aynı yerde hidroksit çöktürmesiyle arıtılmaktadır. Katı atıklar (örneğin; atıksu arıtım çamurları, çözelti kapları, temizleme tank kalıntıları, işleme sıvı kalıntıları vb.) temizleme işlemiyle oluşabilmektedir.

Birçok metal son işlemi genellikle banyolarda (tanklar) uygulanmaktadır ve sonra bunu durulama işlemleri takip etmektedir. Metal kaplama ve o türden atıklar en fazla miktarda metal (örneğin; kadmiyum, bakır, kurşun ve nikel) ve siyanür taşıyan atıklar olarak açıklanmaktadır.

Diğer bir işlem olan anotlama işlemlerinden hava emisyonları, atıksular ve katı atıklar ortaya çıkmaktadır. Isınan sıvılardan yükselen gaz baloncukları ve buharlar, banyoda oluşan metalleri yada diğer maddeleri içerebilen emisyonların kaynağıdır. Anodik kaplama yapılırken oluşan atıksular nikel asetat içeren veya nikel içermeyen kaplamalardan ya da boyamalardan oluşmaktadır. Boyama veya kaplama proseslerinde oluşan metal ve kompleksleri diğer potansiyel kirleticilerdendir. Anotlamada oluşan atıksular genellikle diğer metal son işlem atıksularıyla birleştirilir ve konvansiyonel hidroksit çöktürmesiyle aynı yerde arıtılmaktadır. Krom içeren atıksularda, Cr VI Cr III'e indirgeyerek ön arıtım yapılmalıdır. Konvansiyonel arıtma prosesinde oluşan çamur metalleri genellikle geri alma ve/veya bertarafı için tesis dışına gönderilmektedir.

Anotlamada oluşan katı atıklar ise, atıksu arıtım çamurlarını ve harcanan solüsyonları içermektedir. Anotlama solüsyonları, prosesin doğal yapısından dolayı işlenmiş olan adi metallerle kirlenebilmektedir. Bu solüsyonlar zamanla çözünmüş metalleri kabul edilemez bir konsantrasyona ulaştırır. Bunları arıtmak yada kabul edilebilir bir seviyeye getirmek için ise bir takım işlemler gerekmektedir.

Kimyasal dönüştürme kaplaması ise, genellikle atıksu ve katı atıktan oluşturmaktadır. Bu proseslerle ilgili kirleticiler proses banyolarının boşaltılması ve durulanması ile atık akışına girer. Proses banyoları genellikle metal tuzları, asitler, bazlar ve çözünmüş temel bileşenler içermektedir. Krom içeren atıksulara genellikle Cr VI'yı Cr III'e indirmek için ön arıtım yapılmaktadır. Konvansiyonel arıtma prosesinde oluşan çamur metalleri genellikle geri alma ve/veya bertarafı için tesis dışına gönderilmektedir. Bu proseslerde oluşan katı atıklar ise, atıksu arıtım çamurlarını ve harcanan solüsyonları içermektedir. Dönüştürme kaplama solüsyonları da, prosesin doğal yapısından dolayı işlenmiş olan adi metallerle kirlenebilmektedir. Bu solüsyonlar zamanla çözünmüş metalleri kabul edilemez bir konsantrasyona ulaştırır. Bunları arıtmak yada kabul edilebilir bir seviyeye getirmek için ise bir takım işlemler gerekmektedir.

Elektrokaplama işlemleri atık türü olarak hava emisyonları, atıksu ve katı atık oluşturmaktadır. Elektrokaplama sıvılarından kaynaklanan buharlar ve proses gazları, banyoda oluşan diğer maddeler yada metalleri içerebilen hava emisyonlarının bir kaynağı olabilir. Atıksular proses temizleme suları ve işlenecek parçanın durulamasından oluşmaktadır. Elektrokaplamadan gelen durulama suları genellikle diğer metal son işlem atıksularıyla birleştirilir ve konvansiyonel hidroksit çöktürmesiyle aynı yerde arıtılırlar. Konvansiyonel arıtma prosesinde oluşan çamur metalleri genellikle geri alma ve/veya bertarafı için tesis dışına gönderilmektedir.

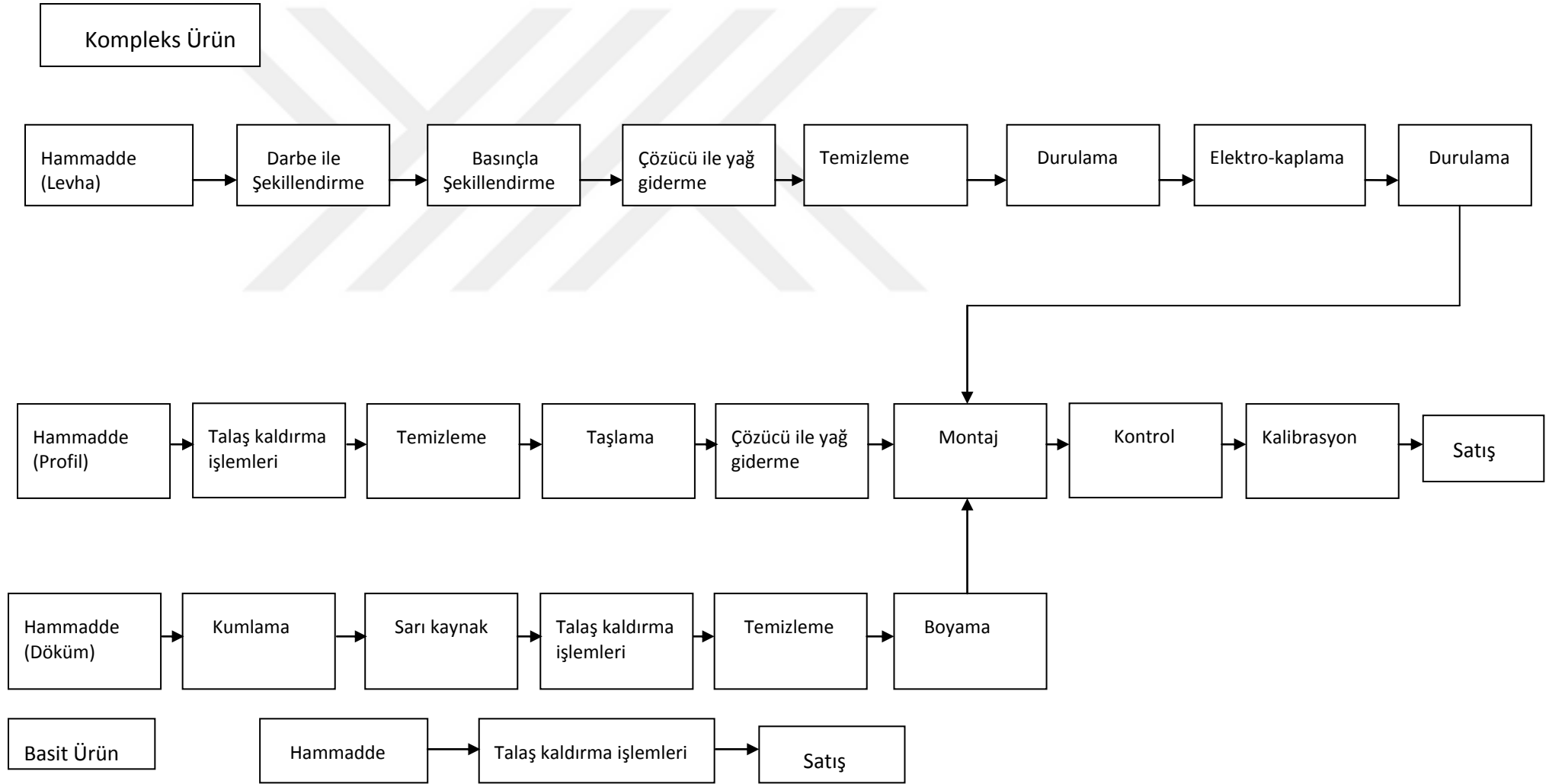
Elektriksiz kaplama işleminde atıksu ve katı atıklar üretilmektedir. Harcanan kaplama çözültisi ve durulama suyu, genellikle siyanürü yok etmek ve toksik metalleri gidermek için kimyasal olarak arıtılmaktadır. Çoğu çamur toksik metalleri ve uygun bir şekilde arıtılmazsa siyanür komplekslerini önemli konsantrasyonlarda içerebilir.

Boyama işlemlerinde de katı atıklar, atıksular ve emisyonlar ortaya çıkmaktadır. Atmosferik emisyonlar en çok boya taşıyıcıları olarak kullanılan organik solventleri içermektedir. Emisyonlar boya depolaması, karıştırması, uygulaması ve kurumasında oluşmaktadır. Atıksular, su bölme kabinlerindeki su deşarjından dolayı ortaya çıkmaktadır. Katı atıklarda boya solventleri ve temizleme solventleri gibi organik solventler ve boya pigmentleri nedeniyle ağır metal içerebilmektedir.

Diğer metal son işlemleri boyunca da atıksular oluşmaktadır. Örneğin; cilalama işlemleri, mekan temizleme ve yıkama metal taşıyan atıksular üretebilmektedir. Galvanizleme gibi sıcak daldırma kaplama tekniklerinde ön temizlemeyi takip eden durulamalarda su kullanılmaktadır. Sıcak daldırma kaplama ayrıca katı atığada sebep olmaktadır. Aşındırma çözeltileri güçlü asitler (demir klorür, nitrik asit, amonyum persülfat) ya da bazlardır [19].

2.5 Metal Kaplama Endüstrisi Atıksuları

Metal kaplama, atıksuyun sahip olduğu metal (nikel, bakır, çinko, krom vs.) miktarlarının potansiyel tehlike arz etmesinden dolayı riskli sanayi sektörü olarak tespit edilmiştir [21]. Bu tip endüstriyel atıksular siyanür, yağ, gres, temizleme solventleri, alkali temizleyiciler ve metaller gibi çeşitli toksik maddeler içermektedir [14]. Metal kaplamanın içinde yer alan metal son işlemlerinde çok çeşitli türde ürün üretilmektedir. Üretimde çok sayıda işlem kullanılmakta ve bir ürün için bu işlemlerden birkaçı veya büyük bir çoğunluğu kullanılmaktadır. Üretim işlemleri 45 temel işlemde oluşmaktadır. Bu işlemlerin bir kısmı şekil verme ile ilgili olurken diğer bir kısmı da yüzey işlenmesi ile ilgilidir. Bu işlemleri gösteren genel bir tanıtım Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6 Metal son işlemleri endüstrisinde üretim düzeni [8]

Metal son işlemleri endüstrisinde üretimle ilgili faktörlerden çok atıksu karakteri ve arıtılabilirliği dikkate alınarak alt kategorizasyon yapılmaktadır. Tanımlanan yedi alt kategori şu şekildedir:

- 1- Adi metaller
- 2- Değerli metaller
- 3- Kompleks metaller
- 4- Cr (+6) içeren atıksular
- 5- Siyanür içeren atıksular
- 6- Yağlı atıksular
- 7- Solventler (Çözücüler)

Altkategori atıkları tehlikeli atık kapsamındadır. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliğinde Tablo 15.2 – 15.8 arası 7 grupta ele alınan endüstri galvaniz, metal hazırlama, dağlama, elektrolitik kaplama, su verme ve metal renklendirme gibi üretimler cinsinden ifade edilmektedir.

Metal son işlemleri endüstrisinde;

- Durulama
- Soğutma
- Söndürme
- Temizleme
- Boyama
- Gaz yıkama
- Hava kirlenmesi kontrol düzenleri
- Montaj ve test işlemlerinde

su kullanımı gerçekleştirilmektedir [8].

Su kullanım değerleri üretim türü ve tesis yapısına bağlı olarak çok değişkendir ve bu yüzden belirli değerler verilememektedir. Fakat işlemler arasında elektrokaplama, elektriksiz kaplama, eloksalleme, kimyasal dönüştürme kaplaması, aşındırma, temizleme ve boyama işlemleri en fazla su kullanılan ve atıksu açığa çıkaran birimlerdir.

Atıksuların içerdiği kirleticiler işlenen metal ve kullanılan kimyasal maddelerinden oluşmaktadır. Ayrıntılı karakterizasyon çalışmaları ile endüstrinin atıksularının temel kirletici parametreleri kadmiyum, toplam krom, bakır, kurşun, nikel, çinko, gümüş, siyanür, florür, toplam fosfor, yağ ve gres ve askıda katı madde olarak belirlenmiştir. Bazı durumlarda amonyak ve KOI de kirletici grubuna alınmaktadır. Bunların yanı sıra kullanılan çözücü ve soğutma yağları başta olmak üzere çeşitli kimyasal maddelerle gelen birçok mikrokirletici metal son işlemleri atıksularında bulunmaktadır.

Metal kaplama atıksuları hem alkali hem de asidik özellik taşıyabilmektedir. Siyanürlü veya alkali temizleme banyolarının kullanımı sonucunda oldukça yüksek pH'lı atıksular oluşmaktadır. Yıkama ve temizleme işlemlerinden gelen atıksular ise oldukça asidiktir. Krom ve çinko temizleme işleminden sonraki yıkamalardan atılan atıklar alkali, asit banyolarından sonraki yıkamalardan çıkan atıklar da asidiktir. Bunun yanı sıra krom kaplama tesislerinden krom içeriği yüksek atıklar, çinko kaplama tesislerinden de siyanürlü atıklar gelmektedir [12].

2.6 Ağır Metaller ve Etkileri

Bu atıksularda bulunan Cr, Cu, Ni, Ar, Pb ve Zn gibi ağır metaller sucul ortamdaki yüksek çözünürlüğünden dolayı zararlı hale gelmektedir [3]. Ağır metallerin bazıları biyolojik yaşam için gerekli olmakta ve yeterli miktarlarda bulunmayışı alglerin çoğalmasını sınırlandırabilmektedir. Ancak metal kaplamadan gelen atıksular içindeki ağır metallerden kadmiyum, civa, kurşun ve krom besin zincirleriyle girdikleri canlı bünyesinden atılamadıkları için canlılarda fizyolojik birikime neden olurlar [12]. Eğer metaller izin verilen konsantrasyonların ötesinde vücuda alınırsa, ciddi sağlık bozukluklarına sebep olabilirler [3].

2.6.1 Demir

Gümüşümsü, beyaz renkli demir, parlak, genleşebilen ve uzayabilen, pirit (FeS_2), hematit (Fe_2O_3), limonit ($Fe(OH)_2$), magnetit (Fe_3O_4) gibi bileşikler halinde doğada bulunan bir çeşit elementtir [22]. Demir maden işleme, cevher öğütme, kimya endüstrisi atıksuları, boya üretimi, metal işleme, tekstil, petrol rafinerileri de dahil birçok endüstriyel atıksularda yer almaktadır. Kimyasal olarak oldukça aktif bir element

olmanın yanısıra en önemli demir bileşikleri pH ve çözünmüş oksijen konsantrasyonuna bağlı olarak Demir (II) ve Demir (III) formlarının bileşikleri şeklinde olmaktadır [23]. Çözünmüş demir, asidik, nötral ve oksijenli ortamlarda genelde $Fe(OH)^{2+}$ (sulu çözeltide) formunda bulunmaktadır. Oksijence fakir ortamlarda ise Fe^{+2} oluşmaktadır [22].

Demirin 0.1 ppm'den daha fazla bulunması, hem şehir sularında hem de endüstriyel kullanımlarda kabul edilmez. Bu konsantrasyonların üzerinde çökeltiler havayla temas halinde olur. Demir, suda çözünür demir tuzu yada demir bakterisi (örneğin filamentus bakterilerinin hücre yapısında çevrelenmiş sulu demir oksit, *Crenothrix polyspora* gibi) olarak bulunabilir. Çözünmüş organik demir genellikle havalandırmayla, kimyasal çöktürme yada iyon değiştirme yöntemiyle giderilmektedir.

Çözünmüş demir tuzlarının gideriminde arıtım olarak genellikle (1) filtrasyonu takip eden ozon yada klor, hava ile oksidasyon; (2) filtrasyonu takip eden kimyasal çöktürme yada (3) iyon değiştirme içermektedir. Arıtma tesisinin kapasitesi, suyun pH'sı ve diğer kirleticilerin varlığı hangi prosesin en ekonomik olduğuna karar vermektedir. Demir organik bileşikleri tutar ve genellikle filtrasyon ve çöktürmeyi takip eden koagülasyonla arıtılmaktadır.

Eğer demir, demir içeren humatlar olarak bulunursa, kireçle kimyasal çöktürme genellikle etkilidir. pH 9.6'nın üzerinde demirin çoğu demir hidroksit olarak giderilmektedir [24].

2.6.2 Bakır

Bakır doğada yaygın olarak bulunmaktadır. Uzayabilir ve genişlenebilir özelliğinin yanı sıra ısı ve elektriği iyi iletmektedir [22]. Bakır çok değişik alanlarda kullanılmaktadır. Yüzeysel sularda 1,0 mg/l'nin altında bile su bitkilerine zehirli etki yapabilmektedir. Bazı balıklar için 1 mg/l konsantrasyonda bile toksik olabilmektedir [12]. Uzun süreli maruz kalmalarda, burun, ağız ve gözde rahatsızlığa neden olabilmektedir. Ayrıca baş ağrısı, mide ağrısı, baş dönmesi, ishal, kusma gibi rahatsızlıklara yol açabilmektedir. Yüksek oranlarda alındığında ise böbreklere ve karaciğere zarar verebilmektedir [22].

Çözünmeyen bakır hidroksit tuzunun çöktürülmesi bakır gideriminde kullanılan en yaygın yöntemdir. Suyun pH'sı 9'a ayarlanarak gerçekleştirilmektedir.

2.6.3 Nikel

Nikel yaygın bir elementtir ve çevrede en çok oksijen ya da sülfürlerle birlikte bulunmaktadır [25]. Nikel tuzları metal kaplama işlerinde kullanılmaktadır. Yüzey ve yer altı sularına yapılan deşarj sonucunda sulardaki nikel miktarı artmaktadır. Nikel alg ve balıklar için toksik olmasının yanında insanlara sulu yiyeceklerden geçerek akciğer, bağırsa, deri gibi dokularda birikebilmektedir. [26]. Siyanür gibi kompleks oluşturucu ortamlarda nikel, çözülmüş kompleks formda olabilir. Nikel siyanür kompleksi nikel ve siyanür giderimini olumsuz etkilemektedir [23]. Nikel, kireçle 8 yada üzeri pH'ta çöktürmeyle tamamen giderilebilir [24].

2.6.4 Çinko

Çinko yerkabuğunda en yaygın bulunan elementlerden biri ve havada, toprakta, suda ve tüm besinlerde bulunmaktadır [25]. Çinko mavimsi açık gri renkte, kırılğan bir metaldir. Çinko çelik işleri, elyaf üretimi, kaplama ve metal işleme endüstrileri atıksularında bulunmaktadır. Bu metal ve birçok bileşiği diğer ağır metallerle kıyaslandığında düşük zehirlilik etkisi göstermektedirler [27]. Çinko kireç veya kostik kullanılarak hidroksiti şeklinde çöktürülmektedir. pH 11 değeri için çıkış suyunda iyi bir çinko seviyesine ulaşıla bilinir.

2.6.5 Krom

Krom 6 tuzları; metal kaplama, alüminyum anotlama işlemi, deri endüstrisi ve kimyasal tesis atıksuları ve krom bileşikleri korozyonu önlemek amacıyla soğutma sularına eklenmesi sebebiyle krom kirliliği ortaya çıkmaktadır [24]. Hekzavalent krom (Cr^{6+}) havada ve saf suda nispeten kararlı iken ekosistemdeki organik yapılarda, toprakta ve suda üç değerliğe geri redüklenmektedir. Kromun kayalardan ve topraktan suya, ekosisteme, havaya ve tekrar toprağa dönen doğal bir dönüşümü mevcuttur [28]. +6 değerlikli krom ağır metaller arasında özellikle endişe vericidir çünkü kanserojenik ve mutajenik, toprağa ve sucul ortama hızlıca yayılır, güçlü bir oksitleyici bir ajandır,

bitkileri ve hayvan dokusunu tahriş edebilmektedir [10]. Yüksek seviyelerde krom 6 solumaya zarar verebilir ve burun, akciğer, mide ve bağırsağa zarar verebilmektedir [29]. Yetişkin bir insan için ağızdan alınan öldürücü doz 50-70 mg Crⁿ⁺/kg olmaktadır. Cr⁶⁺ya göre daha az toksik olan Cr³⁺ günlük doz sınırları içinde alındığında insanlar ve hayvanlar üzerinde olumsuz bir etkisi görülmemiştir [28]. Krom daha çok sucul ortamlarda birikerek çoğalır ve bu ortamda Cr⁺⁶ genellikle Cr₂O₇²⁻, CrO₄²⁻, HCrO₄⁻ olarak bulunmaktadır [10]. Bu sebeple yüksek seviyelerde kroma maruz kalmış balık yemek oldukça tehlikelidir.

Sudan ve atıksulardan kromu uzaklaştırmak için ise kimyasal çöktürme, iyon değişimi, membran ayırımı, ultrafiltrasyon, yüzdürme, elektrokoagülasyon, çözücü özütleme, çökeltme, çöktürme, elektrokimyasal çöktürme, indirgeme, ters osmoz, diyaliz, elektrodializ, adsorpsiyon, filtrasyon, buharlaştırma gibi birçok arıtım teknolojisi geliştirilmiştir. En sık kullanılan yöntem ise, hidrojen bisülfid veya demirle düşük pH değerinde Cr⁶⁺'yı Cr³⁺'ya indirgemek ve sonra kireç ile çöktürülmesi olan kimyasal çöktürme işlemidir. Çöktürmenin dezavantajı ise ortaya çıkan çamurdur. Son yıllarda ise elektrokimyasal ve aktif karbon adsorbsiyon teknikleri gibi yöntemlere ilgi artmaktadır [30].

2.6.6 Siyanür

Siyanür iyonu (CN⁻) çok zayıf bir asit olan hidrosiyanik asidin (HCN) anyonudur [31]. HCN, renksiz, acı bademi andıran batıcı kokulu bir gazdır. Siyanür sıcak, kuru havada son derece uçucu bir maddedir [32]. Normalde siyanür bileşikleri binlerce bitki türü ve diğer canlı hayat şekilleri tarafından üretilmektedir [33]. Diğer bir taraftan doğaya atıksu ile karışan siyanürün sebebinin büyük bir kısmı ise metal son işlem ve metal kaplama tesislerindedir. Siyanür özellikle asidik pH seviyelerinde aşırı derecede zehirlidir. Hidrosiyanik asit olarak bulunduğu güçlü bir zehirleyici etkisi oluşturmaktadır [24]. Siyanürün toksisitesi, sıcaklıkla orantılı olarak yükselmekte, her 10 °C sıcaklık artışı için, öldürücü doz, 2-3 kat artmaktadır. Ayrıca çözünmüş oksijenin düşük seviyede bulunması toksisiteyi artıran bir diğer unsurdur [34]. Siyanür; yeme, soluma ve deri ile temas yolları ile canlı vücuduna girmektedir. HCN ve diğer siyanür bileşiklerinin etkileri; solunum eksikliği ve hücrelere ve sinir sistemi dokularına oksijen taşınımının

engellenmesi, sitokrom oksidaz ve diğ er enzim sistemlerine inhibisyon, laktik asit dengesinin bozulması ve dokularda ölüm gözlenmesi Şeklinde kendini göstermektedir. Siyanür bileŐik ve kompleksleri canlılar üzerinde akut veya kronik etkileme Őekillerine de sahiptir [31]. Bu yüzden siyanür içeren atıksular, kanalizasyona, akarsuya yada nehre deşarj edilmeden önce arıtılmalıdır. Siyanürün tam olarak giderilebilmesi için $pH > 8.5$ olması gerekir. Siyanür arıtımında uygulanan yöntemleri Şu Şekilde özetlemek mümkündür: Klor ve hipokloritler ile kimyasal oksidasyon, Potasyom permanganat ile kimyasal oksidasyon, Ozon ile kimyasal oksidasyon, Elektrokimyasal oksidasyon, Biyolojik yöntemler, Fiziksel ve kimyasal yöntemlerdir [4].

2.7 Yasal Düzenlemeler

Metal kaplama endüstrisinden çıkan ve toksik etkisi bulunan ağır metal içerikli atıksuların alıcı ortama verilmeden önce zararlarını ortadan kaldırmak amaçlı birtakım arıtmalara tabii tutulması gerekmektedir. Türkiye’de endüstriyel atıksuların kontrolü için mevcut durumda yasal düzenleme, 31 Aralık 2004 tarihli ve 25687 sayılı Resmi Gazete’de yayınlanarak yürürlüğe giren Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği’dir. Her bir endüstri için ayrı ayrı alt baŐlıklar altında deşarj kriterleri getirilmiştir. Metal endüstrisi SKKY’de 17 alt baŐlık altında toplanmıŐtır. Bir çeşit metal kaplama işlemi olan Galvanizleme işlemi için istenilen deşarj standartları  izelge 2.4’te verilmiştir [35].

Çizelge 2.4 Metal sanayi (Galvanizleme) atıksularının alıcı ortama deşarj standartları

PARAMETRE	BİRİM	KOMPOZİT NUMUNE 2 SAATLİK	KOMPOZİT NUMUNE 24 SAATLİK
KİMYASAL OKSİJEN İHTİYACI (KOİ)	(mg/L)	600	-
ASKIDA KATI MADDE (AKM)	(mg/L)	125	-
YAĞ VE GRES	(mg/L)	20	-
AMONYUM AZOTU (NH ₄ -N)	(mg/L)	100	-
AKTİF KLOR	(mg/L)	0.5	-
TOPLAM KROM	(mg/L)	2	-
KROM (Cr ⁺⁶)	(mg/L)	0.5	-
KURŞUN (Pb)	(mg/L)	1	-
TOPLAM SİYANÜR (CN ⁻)	(mg/L)	0.2	-
KADMİYUM (Cd)	(mg/L)	0.5	-
ALÜMİNYUM (Al)	(mg/L)	3	-
DEMİR (Fe)	(mg/L)	3	-
FLORÜR (F ⁻)	(mg/L)	50	-
BAKIR (Cu)	(mg/L)	2	-
NİKEL (Ni)	(mg/L)	3	-
ÇİNKO (Zn)	(mg/L)	5	-
GÜMÜŞ (Ag)	(mg/L)	0.1	-
BALIK BİYODENEYİ (ZSF)	-	8	-
pH	-	6-9	-

Diğer taraftan Türk standartları enstitüsü (TSE), Dünya Sağlık Teşkilatı (WHO) ve ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA)'ya göre bazı toksik maddelerin atıksulardaki sınır değerleri de Çizelge 2.5'te gösterilmiştir [7].

Çizelge 2.5 TSE, WHO ve EPA'ya göre bazı toksik maddelerin atıksulardaki sınır değerleri

mg/L	TSE 266	WHO	EPA
Cd	0.01	0.01	0.01
Cr	0.05	0.05	0.05
Zn	5.00	-	5.00
Ni	0.02	0.02	0.02
Cu	3.00	-	-
Fe	0.30	0.10	0.30
pH	6.5 – 9.2	6.5 – 8.5	6.5 – 8.5

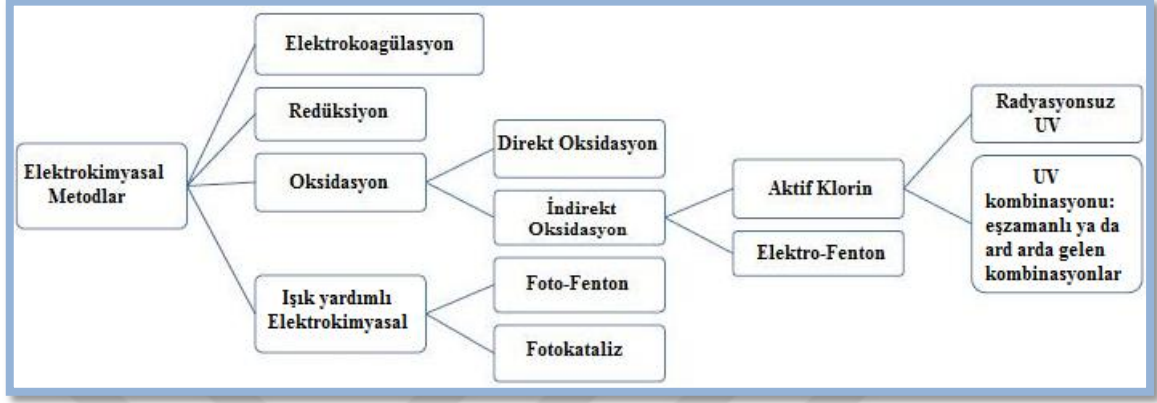
2.8 Metal Kaplama Endüstrisi Atıksularının Arıtım Alternatifleri

Endüstriyel faaliyetler sonucu deşarj edilen atıksular, su yaşamı üzerinde negatif etkiye sahip olan çeşitli toksik ya da zararlı maddelerle sık sık kirletilmektedir. Örneğın; metal son işlem ve elektrokaplama endüstrisi, alıcı su ortamının kirletici yüküne büyük katkıda bulunan siyanür kirleticilerinin ve Zn, Cu, Cr gibi ağır metallerin en büyük kaynaklarından biridir. Bu zararlı kimyasalların istenmeyen etkileri deşarj öncesi, atıksuların arıtılmasıyla ortadan kaldırılabilir [5]. Ağır metallerin atıksulardan uzaklaştırılmasında; kimyasal çöktürme, kimyasal oksidasyon redüksiyon iyon değışimi, filtrasyon, elektrokimyasal işlemler, membran teknolojisi, ters osmoz, adsorpsiyon gibi metal giderim teknolojileri kullanılmaktadır [4].

Bu çalışmanın esas konusunu oluşturan ileri kimyasal arıtım yöntemlerinin, öncesinde iyi bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Bundan dolayı bu konuyla ilgili proseslerin temel prensipleri aşağıda ayrı ayrı incelenmiştir.

2.8.1 Elektrokimyasal Arıtım

Elektrokimyasal arıtım proseslerinin genel mekanizması içinde koagülasyon, adsorpsiyon, absorpsiyon, çöktürme ve flotasyon prosesleri yer almaktadır. Elektrokimyasal metotlar Şekil 2.7’de gösterilmiştir [36].



Şekil 2.7 Elektrokimyasal metotlar

Son yıllarda elektrokimyasal arıtım çevreye uyumlu ve çok yönlü bir arıtım prosesi olmasından dolayı atıksu arıtımında önemli bir yere sahip olmuştur. Elektrokimyasal arıtım; elektrokoagülasyon, elektrooksidasyon ve elektroflotasyon olmak üzere 3 yöntemden oluşmaktadır [37]. Bu prosesler birlikte veya ayrı olarak bir sistem içerisinde gerçekleşebilmektedir [38]. Elektrokimyasal tepkimeler ise elektrolitten göç eden iyonik bileşiklerin anotta ve katotta yükseltgendiği veya indirgendiği heterojen iyon transferi tepkimeleridir. Anot ve katotta genellikle metal, karbon veya yarı iletken elektrot kullanılmaktadır. Bir elektroliz işleminin gerçekleşmesi için anot ve katot arasında bir bağlantı ve elektroliz çözeltisinde belli bir iletkenlik olması gerekmektedir. Bir hücrede ortaya çıkan elektrokimyasal yükseltgenme ve indirgenme reaksiyonları Çizelge 2.6’da gösterilmiştir [28].

Çizelge 2.6 Bir hücrede ortaya çıkan elektrokimyasal yükseltgenme ve indirgenme reaksiyonları

Anot Reaksiyonları	Katot Reaksiyonları
<ul style="list-style-type: none"> • Anot elektron verir. • Anotta yükseltgenme • Anodik çözünme ($Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$) • Anyonlar anotta toplanır. • Anolit bölge oluşur. • Anot oksijen: $2H_2O + 4e^- \rightarrow O_2 \uparrow + 4H^+$ • Klor var ise; $2Cl^- + 2e^- \rightarrow Cl_2 \uparrow$ 	<ul style="list-style-type: none"> • Katot elektron alır. • Katotta indirgenme • Katodik birikme ($Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$) • Katyonlar katotta toplanır. • Katolit bölge oluşur. • Katotta hidrojen: $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 \uparrow + 2OH^-$ • Gazın indirgenmesi; $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$

Elektrokimyasal arıtım kimyasal koagülasyona oranla yüksek verim elde edilmesi ve işletme kolaylığı gibi birçok avantajından dolayı yakın gelecekte çok daha fazla kullanım alanı bulacağı tahmin edilmektedir. Elektrokimyasal arıtım yöntemi günümüzde evsel atıksularda, atık yağların, boyaların, askıda katı maddelerin, organik madde atıklarının, sentetik atıksuların, ağır metallerin gideriminde ve suların deflorinasyonu gibi birçok dalda uygulanmaktadır.

2.8.1.1 Faraday Yasaları

Birinci Faraday Yasası: Bir elektroliz hücresinden akım geçmesiyle elektrotlarda açığa çıkan ve kaybolan madde miktarları, elektroliz devresinden geçen akım miktarı ile doğru orantılıdır.

$$m \text{ gram} \propto Q \text{ kulon} = i * t \quad (2.1)$$

İkinci Faraday Yasası: Bir elektroliz hücresinden 96500 kulon akım geçtiğinde elektrotlarda bir eşdeğer gram madde açığa çıkar yada kaybolur. Bir eşdeğer gram madde açığa çıkaran elektrik miktarına 1 Faraday denir.

1 Faraday = 96500 kulon

1 Amper * saat = 3600 kulon

$$1 \text{ Faraday} = \frac{96500}{3600} = 26,8 \text{ A.saat} \quad (2.2)$$

Faraday yasası matematiksel olarak ise şöyle ifade edilebilir;

$$m = \frac{A/n.it}{96500} \quad (2.3)$$

m= elektrotlarda açığa çıkan madde miktarı, g

A= Atom ağırlığı, g

n= Tesir değeri

i= Devreden geçen akım şiddeti, Amper

t= Akımın geçme süresi, saniyedir.

Pratikte yapılan bazı elektrolizlerde deneysel olarak bulunan madde miktarı ile Faraday yasası ile bulunan madde miktarlarının birbirinden farklı olduğu görülebilir. Bunun iki ana sebebi vardır.

- Elektrotlarda asıl reaksiyon yanında başka bir yan reaksiyon da meydana gelebilir. Devreden geçen akımın bir kısmının bu reaksiyon için harcanmış olduğundan, deneysel olarak daha küçük bir madde miktarı bulunur.
- Elektrotlarda toplanan maddede mekanik kayıplar olabilir. Devreden geçen akımın kısa devre veya kaçak yapması omik direnç etkisi ile ısı enerjisine dönüşmesi de söz konusudur. Bu olaylar da elektrotlarda deneysel olarak ölçülen miktarın teorik değerden daha küçük olmasına neden olur.

Endüstride, elektrotlarda açığa çıkan gerçek madde miktarının, Faraday Yasasına göre teorik olarak elde edilmesi gereken madde miktarına oranı "Akım verimi" olarak tanımlanmaktadır [39].

2.8.1.2 Elektrokoagülasyon

Elektrokimyasal arıtımda kullanılan en yaygın proses elektrokoagülasyondur. Elektrokoagülasyonun esası, koagülan maddenin elektroliz hücresinde, anot materyali olarak seçilmesi ve elektrik akımı ile ortama geçirilmesidir [40]. Elektrokoagülasyon sırasında belirli ölçüde elektroflotasyon da oluştuğundan dolayı giderim verimi iyi bir şekilde gerçekleşmektedir [41].

Klasik kimyasal arıtımda, Fe^{+2} , Fe^{+3} ve Al^{+3} iyonlarının kimyasal madde şeklinde ilavesi yapılarak gerçekleştirilen koagülasyon işlemleri, elektrokoagülasyonda anot materyali olarak seçili Fe ve Al metalinin elektroliz esnasında çözünüp ortama geçmesiyle gerçekleşmektedir [40]. Genellikle elektrotlar demir veya alüminyum olurken, elektrolit ise su veya atıksu olmaktadır [42]. Elektrotlar prosesin işletme aşamasında suyla reaksiyona girerek beyaz renkli $Al(OH)_3$, yeşil renkli $Fe(OH)_2$ ve kahverenkli $Fe(OH)_3$ gibi metal hidroksitler oluşacaktır. Sistemde arıtım bundan sonra başlar. Adsorbsiyon kapasitesi çok yüksek olan metal hidroksitlerin sudaki değişik kirletici parametreleri adsorbe ederek çökme yoluyla sudan uzaklaştırma prensibine dayanan bu arıtım metodu günümüzde birçok yerde kullanım alanı bulmuştur [41]. Tekstil, yemek, petrol, katran kumu ve bitümlü şist, halı, kentsel kanalizasyon, kimyasal iplik, elektrokaplama, yağ-su emülsiyonu, yağlı atıksu, nitrit ve boyar madde gibi atıksuların arıtımında bu proses kullanılmaktadır [43]. Ayrıca bu işlem esnasında katotta oluşan hidrojen kabarcıkları proste oluşan kabarcıkları adsorbe etmekte ve bu sayede flotasyon ile bazı kirleticilerin sudan uzaklaştırılması sağlanmaktadır. [44]. Ortak olarak oluşan bu reaksiyonlar neticesinde sudaki kirletici konsantrasyonu ve kirletici parametrelerine bağlı olarak yüksek giderim verimi elde edilebilmektedir.

Akbal ve arkadaşları (2011) yaptıkları çalışmada, monopolar yapıdaki demir ve alüminyum elektrotlu EC prosesi yardımıyla metal kaplama atıksuyundan Cu, Cr ve Ni giderimini ve giderim performansı üzerine atıksu pH'sının, akım yoğunluğunun, elektrot materyalinin ve iletkenliğin etkisini araştırmışlardır. Akım yoğunluğu, pH ve iletkenliğin artmasıyla metal gideriminin arttığını gözlemişlerdir. Cu, Cr ve Ni için en yüksek giderim verimliliklerini pH 9'da elde etmişlerdir. Karşılaştırılan farklı elektrot materyalleri arasında Fe-Al elektrot parçasının EC esnasında çok etkili olduğunu ve pH 3, akım

yoğunluğu 10 mA/cm^2 , 20 dakikalık EC süresinde 100% Ni, 100% Cr ve 100% Cu giderimini başarabilmişlerdir [14].

Kabdaslı ve arkadaşları (2008) yaptıkları çalışmada, çelik elektrotlarının EC yönteminin metal son işlemleri endüstrisi kompleks olarak bağlı metal içeren atıksularına uygulanabilirliğini ve başlangıç pH'sının, elektrolit konsantrasyonunun ve akım yoğunluğunun proses verimi üzerine etkilerini araştırmışlardır. Akım yoğunluğu $22,5 \text{ mA/cm}^2$, pH 6 optimum işletme koşullarında numunenin kendi bünyesindeki çözünmüş madde konsantrasyonundan elektrolit olarak faydalanarak çinko ve nikeli 100%, TOK'u ise 50% gidermişlerdir [45].

Heidmann ve arkadaşları (2008) Zn^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , Ag^+ , $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ağır metal iyonlarının gideriminde alüminyum elektrotlarıyla EC performansı araştırılmıştır. Başlangıç metal konsantrasyonu, mevcut metal bileşiklerinin türü, verilen akım ve akım yoğunluğunun EC'ye etkisini araştırmışlardır. Farklı başlangıç konsantrasyonlarında Zn, Cu, Ni ve Ag giderim hızını etkilemediği görülürken, en yüksek başlangıç konsantrasyonunun Cr için en yüksek giderim hızına sebep olduğunu görmüşlerdir. Artan akım yoğunluğunun EC sürecini hızlandırdığını ama daha az verim olduğunu tespit etmişlerdir [46].

Adhoum ve arkadaşları (2004) Tunus'ta yaptıkları çalışmada Cu^{2+} , Zn^{2+} ve Cr(VI) metal iyonlarının arıtımında alüminyum elektrotları kullanarak EC performansını araştırmışlardır. pH, akım yoğunluğu ve metal iyon konsantrasyonları gibi birkaç parametreyle daha yüksek bir giderim kapasitesi elde etmek için çalışma yapmışlardır. Çalışılan metallerin en etkili giderim kapasitesini pH 4-8 aralığında tutulduğunda elde etmişlerdir. $0.8\text{--}4.8 \text{ Adm}^{-2}$ aralığında çalışılan akım yoğunluklarında AY arttıkça arıtım hızının arttığını ve giderim mekanizma farklılığından dolayı çinkonun giderim hızının bakırdan 2 kat, kromdan 5 kat daha hızlı olduğunu görmüşlerdir. 20 dakika sonra Cu^{2+} , Zn^{2+} ve Cr(VI) konsantrasyonlarını yasal limitlerin altında tutmayı başarmışlardır [47].

Hasar ve Hanay (2011) yaptıkları çalışmada, başlangıç metal konsantrasyonu ve pH gibi bazı işletme parametrelerine göre çözelti içerisindeki anyon tipine bağlı olarak Cu^{2+} , Zn^{2+} ve Mn^{2+} arıtımında alüminyum elektrotlarıyla yapılan EC performansını araştırmışlardır. Sentetik atıksuyla elde ettikleri sonuçlardan anyon tipinin metal giderimi üzerine önemli bir etkisi olduğunu gözlemişlerdir. Mn^{2+} ve Cu^{2+} metallerle elde edilen sonuçlarla karşılaştırdıklarında, EC performansının çinko başlangıç

konsantrasyonuyla önemli bir şekilde etkilendiğini görmüşlerdir. Farklı anyonların bulunması EC boyunca çeşitli pH aralıklarında önemli bir farklılık oluşturmadığı ve üç metal içinde en iyi giderimlerin her iki anyonun bulunmasında pH artışıyla beraber olduğunu tespit etmişlerdir. Bakır ve çinko gideriminin pH>7'de 5 dakika sonra sülfat anyonu bulunması durumunda neredeyse 100%'e ulaştığını bulmuşlardır [48].

2.8.1.3 Elektrokoagülasyon Teorisi

Arıtılacak atıksuyun içine aşınan elektrotların kattığı aktif koagülan çekirdeklerin (genellikle alüminyum ve demir katyonları) etrafını sarmalayan negatif yüke sahip birbiri içinde çözünmeyen, askıda katı maddeler ve koloidal maddelerin meydana getirdiği pıhtılar elektriksel alanda yumaklaşarak çökelmektedirler. Bu prosesin mekanizması koagülasyon, adsorpsiyon, çöktürme ve flotasyon giderme gibi işlemlerden biri veya birkaçına dayanmaktadır [40]. Elektrokoagülasyon boyunca 3 aşama gerçekleşmektedir:

- 1) Kurban elektrotların elektrolitik oksidasyonu ile koagülantların oluşumu
- 2) Kirleticilerin destabilizasyonu, partikül süspansiyonu ve emülsiyonların kırılması
- 3) Destabilize edilmiş fazlarda flokların toplanması

Kirleticilerin destabilizasyon mekanizması, partikül süspansiyonu ve emülsiyonların kırılması şu şekilde tanımlanabilir:

- Kurban anodun oksidasyonu ile oluşan iyonların etkileşimiyle yüklü türler etrafında çift tabakanın sıkıştırılması
- Kurban anodun elektrokimyasal çözünmesiyle oluşan zıt iyonlar tarafından atıksuda bulunan iyonik türlerin yük nötralizasyonu.
- Flok oluşumu

Katı oksitler, hidroksitler ve oksihidroksitler kirletici türlerin adsorpsiyonunda aktif yüzey sağlamaktadır.

Elektrokoagülasyon; endüstrilerden açığa çıkan metallerin, askıda partiküllerin, kil minerallerinin, organik boyaların ve yağ-gresin gideriminde başarılı olmaktadır. Bu

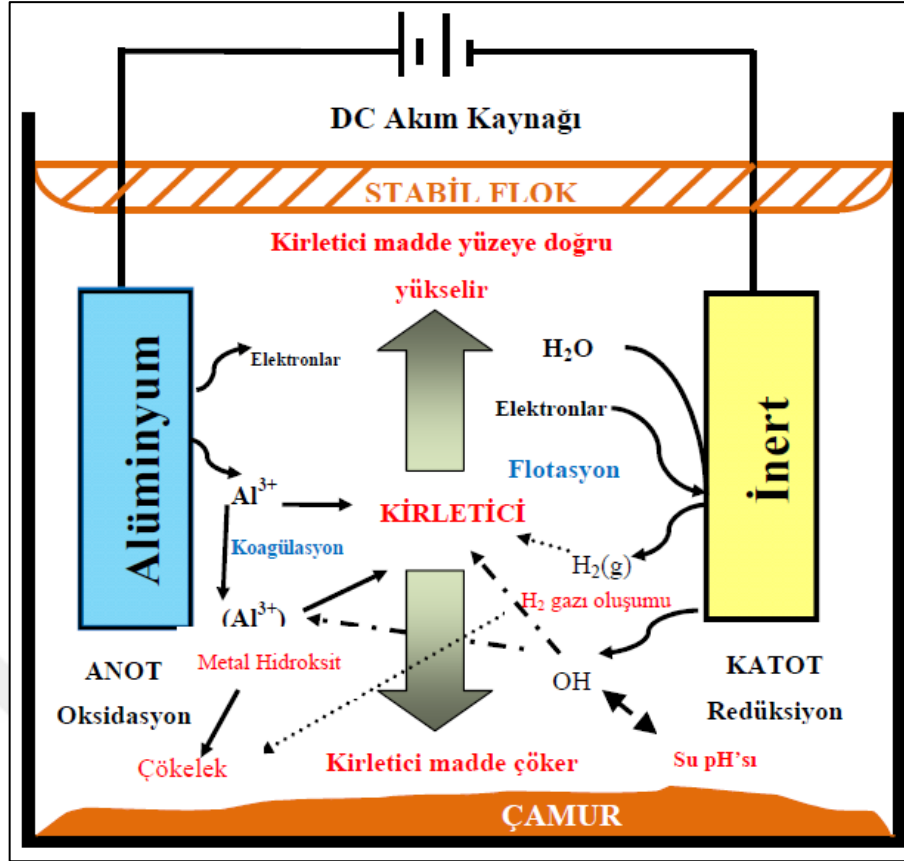
proseste metal anoda, genellikle demir yada alüminyumdan oluşan, bir gerilim uygulanmaktadır. İki ayrı reaksiyon oluşmaktadır:

- Fe/Al alüminyum hidroksite yada polimerik demire hemen hidrolize olmakta ve bu polimerik hidroksitler çok iyi bir koagülant maddedir. Tükenebilir (kurban) anotlar, anot çevresinde polimerik hidroksitleri üretmek için kullanılmaktadır. Metal katyonlar elektroforetik hareketle anoda doğru taşınan negatif partiküllerle birleştiğinde koagülasyon meydana gelmektedir. Atıksuda bulunan kirleticiler ya kimyasal reaksiyon ve çöktürmeyle yada fiziksel ve elektrot aşınmasıyla oluşan koloidal materyalleri kimyasal olarak bağlaması ile arıtılmaktadır. Kirleticiler daha sonra elektroflotasyonla yada sedimentasyon ve filtrasyonla giderilmektedir. Konvansiyonel koagülasyon prosesi gibi koagülant kimyasalı eklemeyen, bu koagüle edici maddeler doğal durumda oluşmaktadır.
- Su paralel reaksiyonda, katotta hidrojen ve anotta küçük oksijen hava kabarcıkları üretimiyle elektrolize olmaktadır. Bu kabarcıklar floküle olmuş partikülleri kendine çekmektedir ve doğal bir kaldırma kuvvetiyle floküle olmuş kirleticileri yüzeye taşımaktadır.

Bunun yanı sıra elektrokoagülasyon hücresinde fizikokimyasal reaksiyonlar da meydana gelebilmektedir. Bunlar;

- Atıksuda bulunan kirleticilerin katodik redüksiyonu
- Koloidal partiküllerin koagülasyonu
- Çözelti içindeki iyonların elektroforetik parçalanması
- Elektrotlarda üretilen O_2 ve H_2 kabarcıklarıyla koagüle olmuş partiküllerin elektroflotasyonu
- Katotta metal iyonların redüksiyonu
- Diğer elektrokimyasal ve kimyasal prosesler. [49]

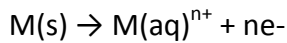
Elektrokoagülasyon prosesi içerisinde bu reaksiyonların oluşmasına ve mekanizmanın ilerlemesine yardımcı olan Şekil 2.8'de görüldüğü gibi elektrolit içerisine daldırılmış anot ve katot bulunmaktadır. Şekildende görüldüğü gibi koagülan madde ve onun hidrolizi sonucu oluşan ürünler kirleticilerle, diğer iyonik maddelerle yada gaz kabarcıklarıyla birçok etkileşim göstermektedir.



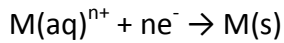
Şekil 2.8 Elektrokoagülasyon ünitesinde meydana gelen reaksiyonlar [16]

Anot ve katot elektrotları bir güç kaynağına bağlanmaktadır. Akım verildiğinde katotta indirgenme olurken anotta yükseltgenme gerçekleşmektedir. Metaller "M" ile gösterilecek olursa anot ve katottaki reaksiyonlar şu şekilde özetlenebilir: [49]

Anotta:



Katotta:

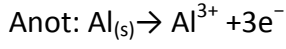


Elektrokoagülasyon uygulamasında anot olarak kullanılan alüminyum, demir ve çelik elektrotların kimyasal reaksiyonları ise sırasıyla aşağıdaki gibi gerçekleşmektedir.

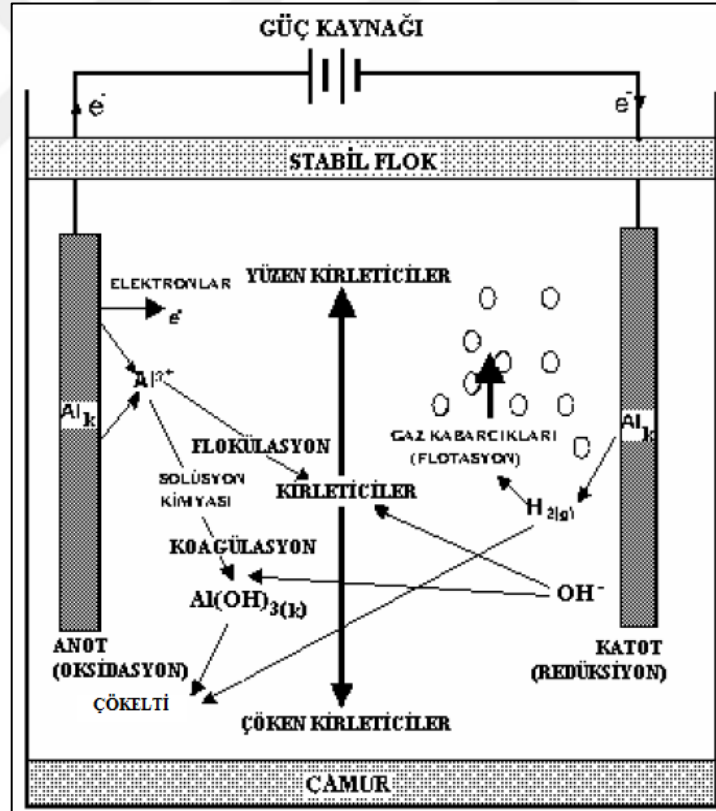
Alüminyum elektrotları kullanılması ile Al anotta çözünür (Denklem 2.4) ve katotta hidrojen gazı (Denklem 2.5) açığa çıkmaktadır. Al'nin çözünmesi sırasında anotta farklı

Al türleri oluşmaktadır. Bu alüminyum türleri, büyük boyutta floklar oluşturmak için koagülant madde olarak kirleticilerle birleşir.

Al elektrodu kullanılması durumunda proseste meydana gelen reaksiyonlar Şekil 2.9'da gösterilmiştir. Al anotlarının oksidasyonla suda elektrolitik olarak çözünmesi sulu Al^{3+} türleri oluşturur.



Hidroliz sırasında oluşan H_2 gazı su yüzeyine doğru hareket eder ve flotasyon prosesi bu sayede hızlanır. Al^{3+} iyonlarının katı $Al(OH)_3$ çökelti oluşum reaksiyon Denklem 2.7'de gösterilmiştir [50].



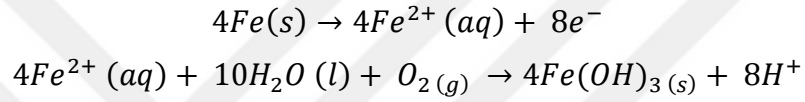
Şekil 2.9 EC reaktöründe alüminyum (Al) elektrodu kullanılması durumunda gerçekleşen reaksiyonlar [51]

Ayrıca sulu ortamda Al^{3+} 'nin oluşturduğu hidroksil kompleksleri ve bu komplekslerin oluşum sabitleri pH'ya bağlı olarak farklılık göstermektedir. Al^{3+} iyonlarının hidrolizi sonucunda $Al(H_2O)_6^{3+}$, $Al(H_2O)_5OH^{2+}$, $Al(H_2O)_4(OH)^{2+}$ oluşabilir. Geniş bir pH aralığında da $Al(OH)^{2+}$, $Al(OH)_2^+$, $Al_2(OH)_2^{4+}$ gibi monomerik ve $Al_6(OH)_{15}^{3+}$, $Al_7(OH)_{17}^{4+}$, $Al_8(OH)_{20}^{4+}$, $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$, $Al_{13}(OH)_{34}^{5+}$ gibi polimerik alüminyum türleri oluşabilmektedir [49].

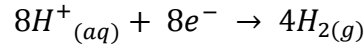
Demir elektrotlarında ise Fe^{2+} ve Fe^{3+} oksidasyonu ile $Fe(OH)_n$ oluşur. $Fe(OH)_n$ 'lerin oluşumu için iki mekanizma mevcuttur. Bunlardan birincisi Denklem 2.8, ikincisi ise Denklem 2.9'da verilmiştir.

I. Mekanizma:

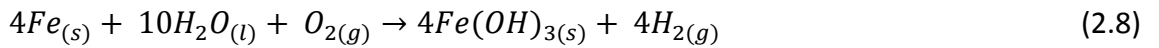
Anotta;



Katotta;

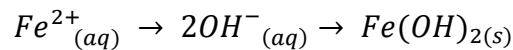
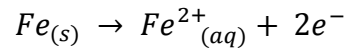


Sonuçta;

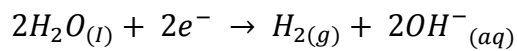


II. Mekanizma

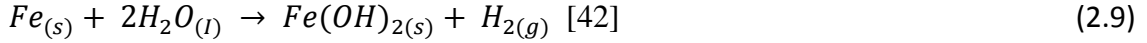
Anotta;



Katotta;

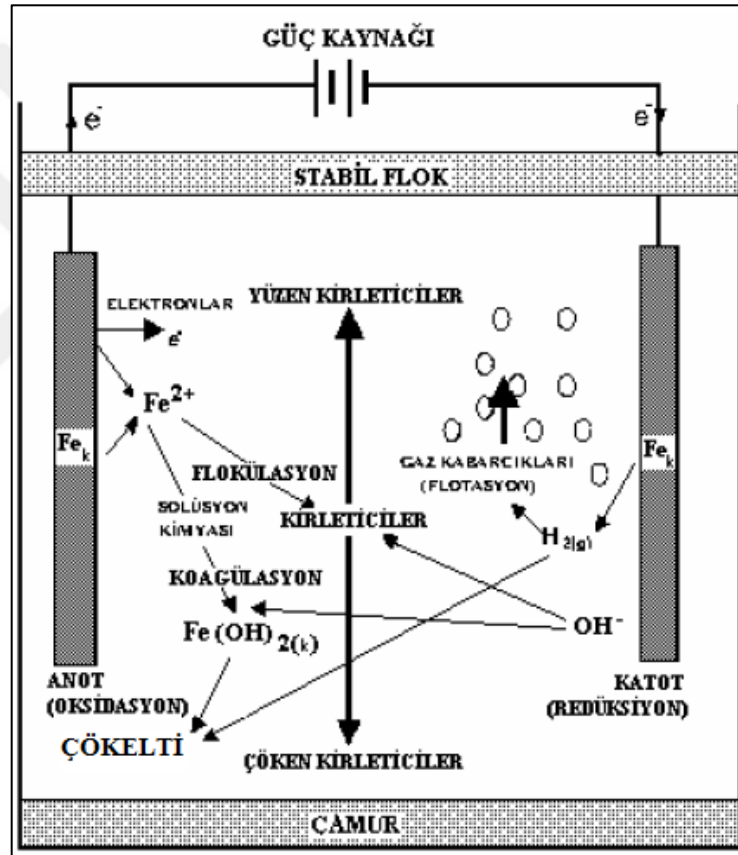


Sonuçta;



Demir elektrodun elektrokimyasal oksidasyonu ile üretilen demir iyonları, su ortamının pH değerine bağlı olarak $Fe(H_2O)_6^{3+}$, $Fe(H_2O)_5(OH)^{2+}$, $Fe(H_2O)_4(OH)^{2+}$, $Fe_2(H_2O)_8(OH)_2^{4+}$ ve $Fe_2(H_2O)_6(OH)_4^{4+}$ gibi monomerik iyonları, $Fe(OH)_3$ ve polimerik hidroksi kompleksleri oluşturabilir [49].

Demir elektrodu kullanılması durumunda EC hücresinde meydana gelen prosesler Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10 Elektrokoagülasyon reaktöründe demir (Fe) elektrodu kullanılması durumunda gerçekleşen reaksiyonlar [51]

Elektrotlarda oluşan reaksiyonların mekanizmaları genel olarak Çizelge 2.7'de verilmiştir.

Çizelge 2.7 Elektrotlarda oluşan reaksiyonların mekanizmaları

ELEKTROLİZ ÖRNEKLERİ		
Elektrot	Katot (elektron alma)	Anot (elektron verme)
Tepkimeler (Genel olarak)	Redüksiyon Reaksiyonu $\text{Oks} + ze^- \rightarrow \text{Red}$	Oksidasyon Reaksiyonu $\text{Red} - ze^- \rightarrow \text{Oks}$
Suyun Elektrolizi $\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$	Hidrojen Oluşması $\text{H}^+ + e^- \rightarrow \text{H}$ $\text{H} + \text{H} \rightarrow \text{H}_{2(\text{g})}$	Oksijen Oluşması $4\text{OH}^- - 4e^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_{2(\text{g})}$
Anyon	$\text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O}$	$\text{CN}^- + 2\text{OH}^- - 2e^- \rightarrow \text{CNO}^- + \text{H}_2\text{O}$
Kasyon	$\text{Zn}^{+2} + 2e^- \rightarrow \text{Zn}$ $\text{Cu}^{+2} + 2e^- \rightarrow \text{Cu}$ $\text{Fe}^{+3} + e^- \rightarrow \text{Fe}^{+2}$	$\text{Cu}^+ - e^- \rightarrow \text{Cu}^{+2}$ $\text{Fe}^{+2} - e^- \rightarrow \text{Fe}^{+3}$
Metal	Yok	$\text{Cu} - 2e^- \rightarrow \text{Cu}^{+2}$ $\text{Fe} - 2e^- \rightarrow \text{Fe}^{+2}$ $\text{Fe}^{+3} - e^- \rightarrow \text{Fe}^{+2}$ $\text{Al} - 3e^- \rightarrow \text{Al}^{+3}$
İnorganik Molekül	$\text{O}_2 + 2e^- + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$ $2\text{H}_2\text{O} + 2e^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	$2\text{H}_2\text{O} - 4e^- \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+$
Organik Madde	$\text{CH}_2\text{O} + 2e^- + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$	$\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_2 - 2e^- + 2\text{H}_3\text{O}^+ \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$

Elektrokoagülasyon prosesi yüksek oranda sulu ortamın kimyasına, özellikle iletkenliğine bağlıdır. Ayrıca pH, partikül büyüklüğü, ortamın kimyası, elektrot tipi, reaksiyon süresi, etkin elektrot yüzey alanı da önemli parametreler arasındadır [41].

2.8.2 Kimyasal Oksidasyon ve Fenton Prosesi

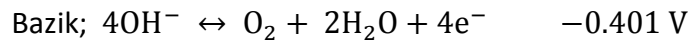
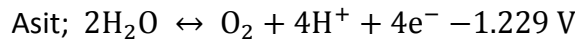
Kimyasal oksidasyon, bileşiğin oksidasyon mertebesinde artış olduğu bir süreçtir. Su ve atıksu arıtımında oksidasyonun amacı, suda bulunmasını istemediğimiz kimyasal maddeleri zararsız ürünlere dönüştürmektir. Mühendislik uygulamalarında ortaya çıkan ürünler zararsız ise, oksidasyon prosesini son ürünler olan CO₂ ve H₂O oluşumuna kadar ilerletmek zaman ve ekonomik açıdan uygun görülmemektedir. Kimyasal oksidasyon ile arıtılabilen Mn²⁺, Fe²⁺, S²⁻, CN⁻, SO₃²⁻ gibi inorganik maddeler ve fenoller, aminler, humik asitler, renk ve tat oluşturan bileşikler, algler ve toksik bileşikler gibi organiklerdir [40].

Su ve atıksu arıtımında kullanılan başlıca oksitleyici maddeler aşağıda açıklanmıştır;

Oksijen: Oksijen en yaygın ve en ekonomik oksidasyon aracıdır. Oksijen ile oksidasyon daha çok havalandırma prosesi ile gerçekleştirilmektedir.

Oksijen suda az çözünür (20 °C'da, 1 atm ~ 9 mg O₂/l) ve oksijenin atom olarak reaktifliğinin yüksek olmasına karşılık, molekül olarak reaktifliği çok azdır. Bu sebeple havalandırma ile oksidasyon reaksiyonlarında hız oldukça düşüktür. Hızın artırılması oksijen molekülündeki bağların kırılıp oksijenin atomlara ayrılmasıyla mümkündür. Katalizör kullanımı ile bu işlem hızlandırılabilir.

Asit ve bazik çözeltilerde oksijenin su ile verdiği reaksiyonların standart elektrot potansiyelleri aşağıdaki gibidir;



Havalandırma ile oksidasyon işlemi başlıca demir ve sülfür oksidasyonunda kullanılmaktadır. Ayrıca tat ve koku kontrolü ile diğer oksidasyon proseslerine yardımcı olmak amaçlı da kullanılmaktadır [52].

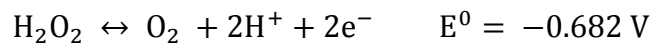
Klor (Cl₂): Su ve atıksu arıtılmasında en yaygın olarak kullanılan madde klordur. Elde edilmesi, depolanması, uygulanması, ekonomik olması ile üstün özellikler taşıyan klor aynı zamanda iyi bir dezenfektandır [52]. Ancak bulunduğu ortamda klorlu organikler oluşturması sebebiyle kullanımını giderek azalmaktadır [40].

Potasyum permanganat (KMnO₄): Kristal halde, kullanımı kolay, suda %5 oranına kadar çözünen ve şartlara bağlı olarak kuvvetli oksidasyon yapabilen bir bileşiktir. Geniş bir pH aralığında etkili olmaktadır. Demir ve mangan oksidasyonunda, tat, koku ve renk gideriminin yanı sıra siyanür oksidasyonunda da kullanılabilir [52].

Ozon (O₃): Normal basınç ve sıcaklıkta gaz halinde olan ozon, oksijenin bir allotropudur (O₃). Ozonun suda 20°C'da çözünürlüğü 0.57 g/l'dir. Çözünürlük artan sıcaklıkla azalmaktadır. Ozon gerek gaz halinde gerekse sulu çözeltisinde kararsız olup süratle bozunmaktadır. Sıcaklık artmasıyla, metallerin ve metal oksitlerin bozunması ile ozon bozunması hızlanmaktadır. Çözelti halindeki ozonun bozunması hidroksil iyonunun etkisi ile çok daha hızlıdır. Ozonun reaktifliği bozunma eğilimine paralel olarak çok yüksektir.

Ozonun kararsız bir madde olması nedeniyle taşınması, depolanması mümkün olmadığından kullanılacağı yerde ve anda üretilmesi gerekmektedir [52]. Havanın veya saf oksijenin yüksek voltajdan geçirilmesi ile elde edilen ozon bu yüzden pahalı bir sistemdir.

Hidrojen Peroksit (H₂O₂): Hidrojen peroksidin molekül yapısı H-O-O-H şeklinde lineerdir. Suda %100 çözünmektedir. Hidrojen peroksit suda çözünür ve sulu çözeltide oldukça karardır. Sıcaklık ve pH değerleri artırıldıkça hidrojen peroksidin bozunma hızı da artmaktadır. Asidik ortamlarda H₂O₂ daha kararlı yapıdadır [40]. Oksidasyon gücü oldukça yüksek olan hidrojen peroksit asit ortamda;



reaksiyonunu vermektedir.

Hidrojen peroksit demir oksidasyonunda, klor giderilmesinde ve çeşitli organik maddelerin özellikle metal iyonları katalizi eşliğinde oksidasyonu için kullanılmaktadır

[52]. Ayrıca hidrojen peroksit güçlü ve ucuz bir oksidant olmasının yanı sıra uygulaması kolaydır. Bu oksidant, renk ve toksin etkisi olan bileşikler üretmemektedir.

2.8.2.1 Fenton Prosesi

İleri yükseltgeme yöntemleri toksik, ve biyo-bozunur olmayan kirleticiler içeren su ve atıksuların arıtılmasında önemli metodlar arasında yerini almıştır. Bu yöntemlerin amacı, ortam sıcaklık ve basınç şartlarında, yüksek reaktivlikte OH[·] oluşturarak suyu arıtmaktır [40]. Çizelge 2.8'de gösterildiği gibi hidroksil radikali flordan sonra gelen en yüksek standart indirgenme potansiyeline sahip oksidant türüdür.

Çizelge 2.8 Bazı yükseltgenlerin sulu ortamda indirgenme yarı tepkimeleri ve standart indirgenme potansiyelleri

Yükseltgen	İndirgenme tepkimesi	E° / V (SHE)
Flor	$F_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow 2HF$	3,05
	$F_{2(g)} + 2e^- \rightarrow 2F^-$	2,87
Hidroksil radikali	$OH^{\cdot} + H^+ + e^- \rightarrow H_2O$	2,80
Sülfat radikal iyonu	$SO_4^{\cdot-} + e^- \rightarrow SO_4^{2-}$	2,60
Ferrat iyonu	$FeO_4^{2-} + 8H^+ + 3e^- \rightarrow Fe^{3+} + 4 H_2O$	2,20
Ozon	$O_{3(g)} + 2H^+ + 2e^- \rightarrow O_{2(g)} + H_2O$	2,075
Peroksidisülfat	$S_2O_8^{2-} + 2e^- \rightarrow 2 SO_4^{2-}$	2,01
Hidrojen peroksit	$H_2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow 2 H_2O$	1,763
Permanganat iyonu	$MnO_4^- + 4H^+ + 4e^- \rightarrow MnO_{2(k)} + 2H_2O$	1,67
Hidroperoksil iyonu (I)	$HO_2 + 3H^+ + 3e^- \rightarrow 2H_2O$	1,65

Çizelge 2.8 Bazı yükseltgenlerin sulu ortamda indirgenme yarı tepkimeleri ve standart indirgenme potansiyelleri (devamı)

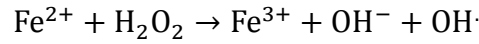
Yükseltgen	İndirgenme tepkimesi	E° / V (SHE)
Hidroperoksil iyonu (II)	$\text{HO}_2 + \text{H}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	1,44
Dikromat iyonu	$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 14 \text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow 2 \text{Cr}^{3+} + 7\text{H}_2\text{O}$	1,36
Klor	$\text{Cl}_{2(\text{g})} + 2\text{e}^- \rightarrow 2 \text{Cl}^-$	1,358
Oksijen	$\text{O}_{2(\text{g})} + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	1,229

Fenton yöntemi ise asidik ortamda H_2O_2 ve Fe^{2+} iyonlarının tepkimesi sonucunda OH^\cdot radikallerinin tarafından ortaya çıkan bir seri oksidasyon ve pıhtılaştırma-yumaklaştırma uygulamasıdır [53]. Fenton metoduyla yapılan arıtma işlemi şu sırada gerçekleşmektedir;

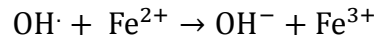
1. Başlangıçta asidik şartlar sağlanır ve uygun pH aralığı 2-5 arasındadır.
2. Önce Fe^{2+} tuzları ardından hidrojen peroksit ilave edilerek, hidroksil radikalleri oluşturulur. Oksidasyonla yüksek moleküllü organik maddeler daha düşük ağırlıktaki moleküllere dönüşür. Bu sırada Fe^{2+} Fe^{3+} 'e yükseltgenir.
3. Reaksiyondan sonra, kireç veya sodyum hidroksit ile nötralizasyon yapılarak ortam pH'sı Fe^{3+} floklarının en uygun çökebilme aralığı olan pH 7-8'e getirilir.
4. Nötralizasyon sonrasında Fe^{3+} floklarını çöktürmek için belli bir süre beklenir ve duru faz çamurdan ayrılır. Fenton çamuru arıtılan veya rengi giderilen atıksudan kolayca ayrılmakta fakat adsorbe edilen organik maddeler dolayısıyla bertarafı zor olmaktadır [4].

Fenton oksidasyonunda oluşan redoks reaksiyonları incelenecek olursa, organik maddelerin ve Fe^{2+} iyonlarının var olduğu bir su ortamına hidrojen peroksit verildiğinde aşağıda verilmiş olan kompleks reaksiyonlar meydana gelmektedir.

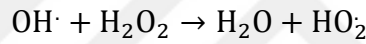
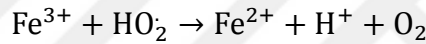
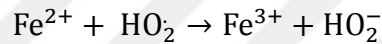
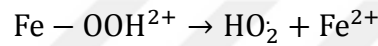
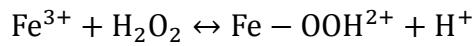
Fenton oksidasyonu, reaksiyon esnasında yüksek oksitleme kapasitesine sahip hidroksil radikallerinin oluşumunu destekleyen ve aşağıdaki gösterildiği gibi kimyasal mekanizmalar içermektedir.



Hidroksil radikalleri başka bir Fe^{2+} ile reaksiyona girebilir ve Fe^{3+} ortaya çıkar.



Fe^{3+} 'ün katalitik etkisiyle hidroksil ve hidroperoksil radikal oluşum mekanizmaları ile hidrojen peroksit bozunur [54].



Demir iyonları suya verildiği zaman hidroksil iyonları ile ferrik hidroksi kompleksleri oluşturarak koagülasyon reaksiyonları meydana getirmektedir [4].

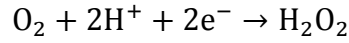
Fenton reaksiyonlarına demir iyonları konsantrasyonu, sıcaklık, pH, reaksiyon zamanı ve H_2O_2 konsantrasyonu etki etmektedir [40].

S. Yılmaz 2008 yılında yapmış olduğu yüksek lisans tez çalışmasında metal kaplama endüstrisi krom kaplama banyolarından deşarj edilen atıksulardaki Cr^{+6} ve KOI parametrelerinin fenton oksidasyonu ile arıtılabilirliğini araştırmıştır. Ham atıksuya uygulanan fenton prosesi sonucunda istenen Cr^{+6} ve KOI gideriminin elde edilmesi için, optimum pH ve FeSO_4 miktarını belirlemiştir. 200 mg/L H_2O_2 dozunda ve pH = 3.5 değerinde FeSO_4 miktarı 1200 mg/L iken Cr^{+6} parametresi için en iyi verimi (%43) elde etmiştir. FeSO_4 konsantrasyonunu arttırdıkça Cr^{+6} giderim veriminin de arttığını gözlemiştir. KOI giderimi için ise optimum FeSO_4 konsantrasyonunu 500 mg/L ve giderim verimini %60 olarak belirlemiştir [4].

2.8.3 Elektro-Fenton

Elektrokimyasal proses direkt ve indirekt olmak üzere iki oksidasyon faaliyetine sahiptir. Direkt oksidasyon anodik yüzeylerde meydana gelirken indirekt oksidasyon elektrokimyasal süreçte ortaya çıkan güçlü oksidantlarla meydana gelmektedir [55].

Elektrokimyasal proseslerden biri de elektro Fenton yöntemidir. Bu yöntemde katodik oksijen indirgenerek hidrojen peroksit oluşturulur ve Fe^{+2} iyonlarının ilavesi ile oksidasyon gerçekleştirilmiş olur.



Elektro-Fenton prosesinin birkaç uygulaması mevcuttur. Bunlar genellikle elektrokimyasal reaktöre dışarıdan eklenen Fenton reaktiflerini dört grupta toplamaktadır. İlk kategoride; Fe^{+2} iyonları dışarıdan uygulanır, hidrojen peroksit ve demir iyonu eş zamanlı olarak katotta oluşturulur. İkinci kategoride; Fe^{+2} kaynağı olarak kurban demir anodu kullanılırken, hidrojen peroksit dışarıdan uygulanır. Üçüncü kategoride; hidrojen peroksit dışarıdan uygulanır ve Fe^{+3} iyonunun yada demir (III) hidroksit çamurunun indirgenmesi ile Fe^{+2} oluşturulur. Dördüncü kategoride ise; hem Fe^{+2} iyonu hem de hidrojen peroksit kurban anot ve katotta oluşturulur [56].

Elektro-Fenton diğer kimyasal proseslere göre hidroksil radikallerinin daha kontrollü üretimi gibi bir avantaja sahiptir.

Hidrojen peroksitin sürekli üretimi ve Fe^{+3} iyonunun katalitik indirgenmesinden dolayı Fe^{+2} iyonlarının birlikte oluşması daha fazla hidroksil radikali üretimini sağlar. Reaktifin minimize edilmesi, işletme maliyetinde azalma sağlamaktadır [55].

2.8.4 Hidroksit Çöktürmesi

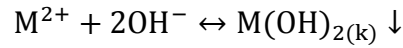
Uygulama kolaylığı, ekonomik olması ve çamur uzaklaştırılmasının kolaylığı açısından metallerin kimyasal çöktürme ile arıtılmasında daha yaygın bir uygulamaya sahiptir. Hidroksit çöktürmesi ağır metallerin hidroksitlerinin çözünürlüğünün çok düşük olmasına dayanmaktadır. Metaller arasında hidroksit olarak çöktürülemeyen en önemli istisna 6 değerlikli kromdur. Hidroksit çöktürmesinin uygulanmasında metallerin serbest halde veya zayıf komplekslerle bağlı olması gerekmektedir. Kuvvetli

komplekslerle bağı olan metal iyonları, yüksek pH değerlerinde hidroksit çöktürmesi uygulamasının yanında diğer yöntemlerle de arıtılabilmektedir. Bazı metal hidroksitlerinin çözünürlük çarpımları Çizelge 2.9’da gösterilmiştir [52].

Çizelge 2.9 Metallerin hidroksitlerinin çözünürlükleri

Hidroksit	25 °C’da pKç
Cu(OH) ₂	19.3
Pb(OH) ₂	14.3
Zn(OH) ₂	17.2
Cd(OH) ₂	13.7
Ni(OH) ₂	15.7
Cr(OH) ₃	30.2

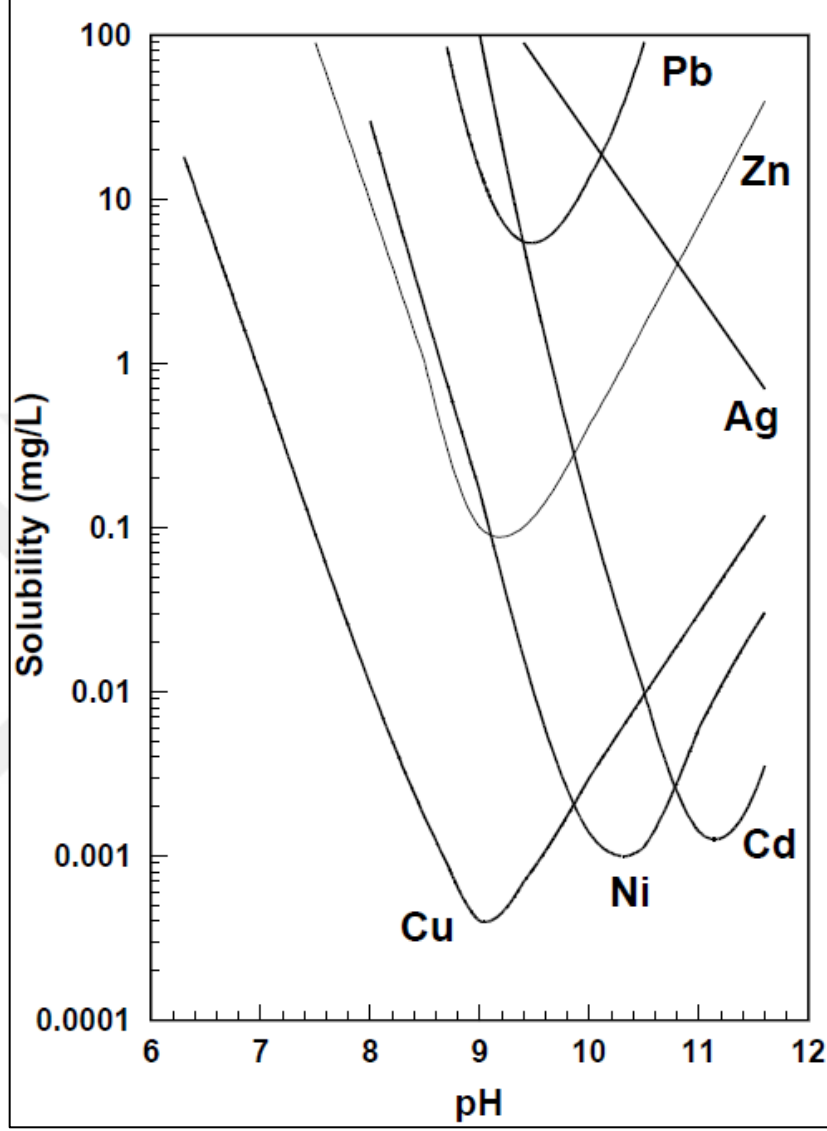
Hidroksitleri halinde çöken metaller için kimyasal çöktürme mekanizması şu şekilde gerçekleşmektedir:



M metal iyonlarını, OH⁻ çöktürücü iyonu, M(OH)₂ ise katı metal hidroksitlerini göstermektedir [57].

Hidroksit çöktürmesi yönteminde her metal için çözünürlüğün minimum olduğu bir optimum pH bulunmaktadır [45]. Metallerin kimyasal çöktürülmesinde en yüksek giderme için optimum pH civarında çalışılmaktadır. Şekil 2.11’de bazı metallerin çözünürlüğünün pH ile değişimi ve optimum pH değerleri gösterilmiştir. Ortamda birden fazla metal bulunduğunda her metalin optimum pH’sı farklı olduğundan çöktürme için uygulanacak pH önem arz etmektedir. Örneğin şekle göre bakırın çözünürlüğü pH 8.8 civarında minimum olurken kadmiyumun ise pH 11.1 civarında minimum olmaktadır. Bakır ile kadmiyumun ortak bulunduğu atıksularda yapılacak hidroksit çöktürmesi için bakırın optimum pH’sı seçildiğinde kadmiyumun çözünürlüğü çok yüksek olacaktır [52]. Bu durumda optimum pH’ları birbirine çok yakın olan

metaller için deşarj standartlarının sağlanacağı ortak bir pH değerinin bulunması olası iken, optimum pH'ları birkaç pH birimi farklı olan metaller durumunda tek bir pH değerinin sağlanması daha zor bir ihtimal olarak görünmektedir.



Şekil 2.11 Çeşitli metallerin hidroksit çözünürlüklerinin pH ile değişimi [58]

Tjoon Tow Teng ve arkadaşlarının 2009 yılında Malezya'da yapmış oldukları çalışmada, kurşun, çinko, bakır ve demir içeren atıksuyu arıtmak için hidroksit çöktürmesi ve koagülasyon-flokülasyon metodlarını kullanmışlardır. Sentetik atıksudaki ağır metal konsantrasyonları kurşun için 1-14 mg/l, çinko için 5-90 mg/l, bakır için 5-90 ve demir için 5-45 mg/l'dir. 90 mg/l'nin altındaki Zn(II) ve Cu(II) ve 45 mg/l altındaki Fe(III) konsantrasyonlarında çöktürme metoduyla sırasıyla 8.7-9.6, 8.1-11.1 ve 6.2-7.1 pH aralıklarında 99%'un üzerinde giderim sağlamışlardır [59].

Mirbagheri ve arkadaşları (2005) atıksulardan Cu(II) ve Cr(VI) gideriminde Ca(OH)₂ ve NaOH kullanarak hidroksit çöktürme prosesini değerlendirmişlerdir. Cr(VI)'yı Cr(III)'e dönüştürmek için demir sülfat kullanmışlardır. Maksimum Cr(III) çökmesini pH 8,7'de Ca(OH)₂ ekleyerek Cr(VI) konsantrasyonunu 30 mg/l'den 0,01 mg/l'ye düşürmüşlerdir. Maksimum bakır çökmesi için optimum pH'yı, hem Ca(OH)₂ hem de NaOH için yaklaşık 12 olarak ve bakır konsantrasyonunu 48,51 mg/l'den 0,694 mg/l'ye düşüğünü bulmuşlardır [60].

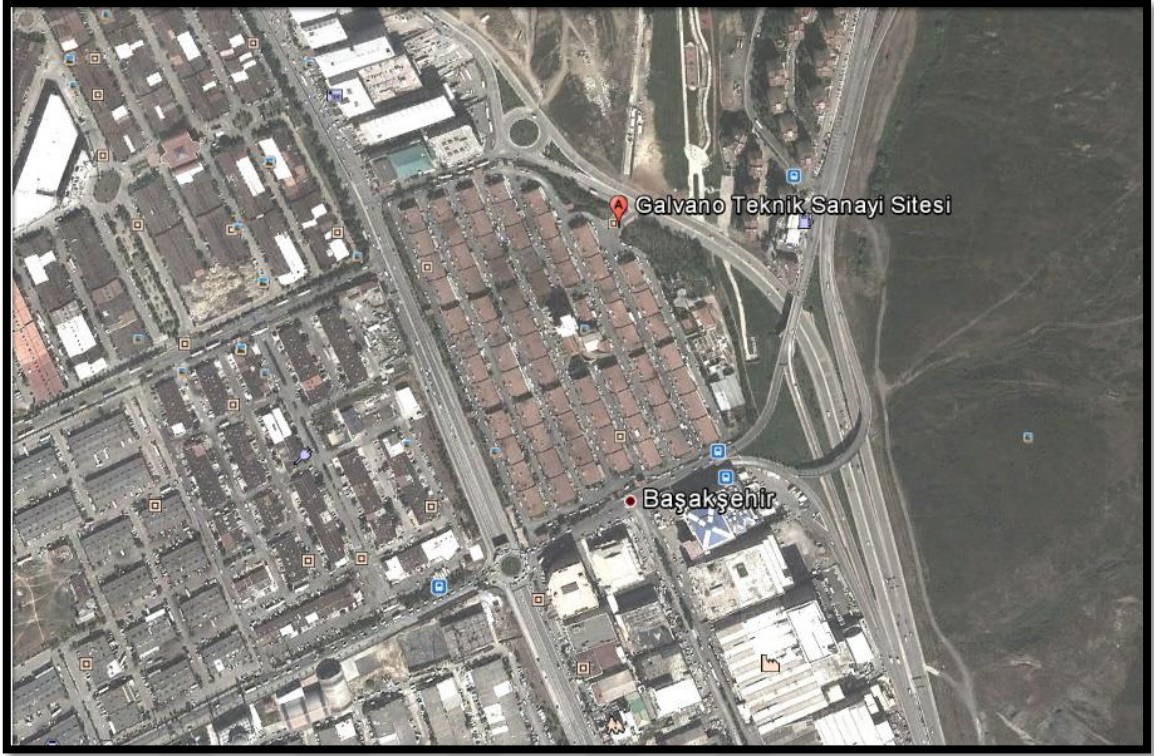


MATERYAL VE METOD

3.1 Materyal

3.1.1 Galvanoteknik Sanayi

Atıksular, İstanbul ili Küçükçekmece İlçesi İkitelli Organize Sanayi Bölgesinde bulunan Galvanoteknik Metal Kaplamacıları Küçük Sanayi Sitesinden alınmıştır. İstanbul'un çeşitli semtlerinde çalışan metal kaplamacıların bir araya gelerek oluşturulmuş olan bu site 1995 yılından beri faaliyettedir. Sitede 190 imalathane mevcuttur. Bunların 103'ü kaplamacı olup bir kısmı hem imalatçı hem de kaplamacılık yapmakta, bir kısmı kimyasal madde üreticisi ve satıcısı durumundadır. Sitede galvano cihazları üreten işyerleri ile birlikte yabancı sermaye ortaklığı ile Kimya sanayi üretimide yapılmaktadır. Ülkemizin en büyük kapasiteye sahip Metal Kaplamaları bu sitede bulunmaktadır. Site 118.000 m² arazi üzerine kurulmuş toplam 92.000 m² kapalı alandan oluşan bu sanayinin konumu Şekil 3.1'de gösterilmiştir. İşletmelerde birçok türde metal kaplama işlemi uygulanmaktadır.



Şekil 3.1 Galvanoteknik sanayi sitesi

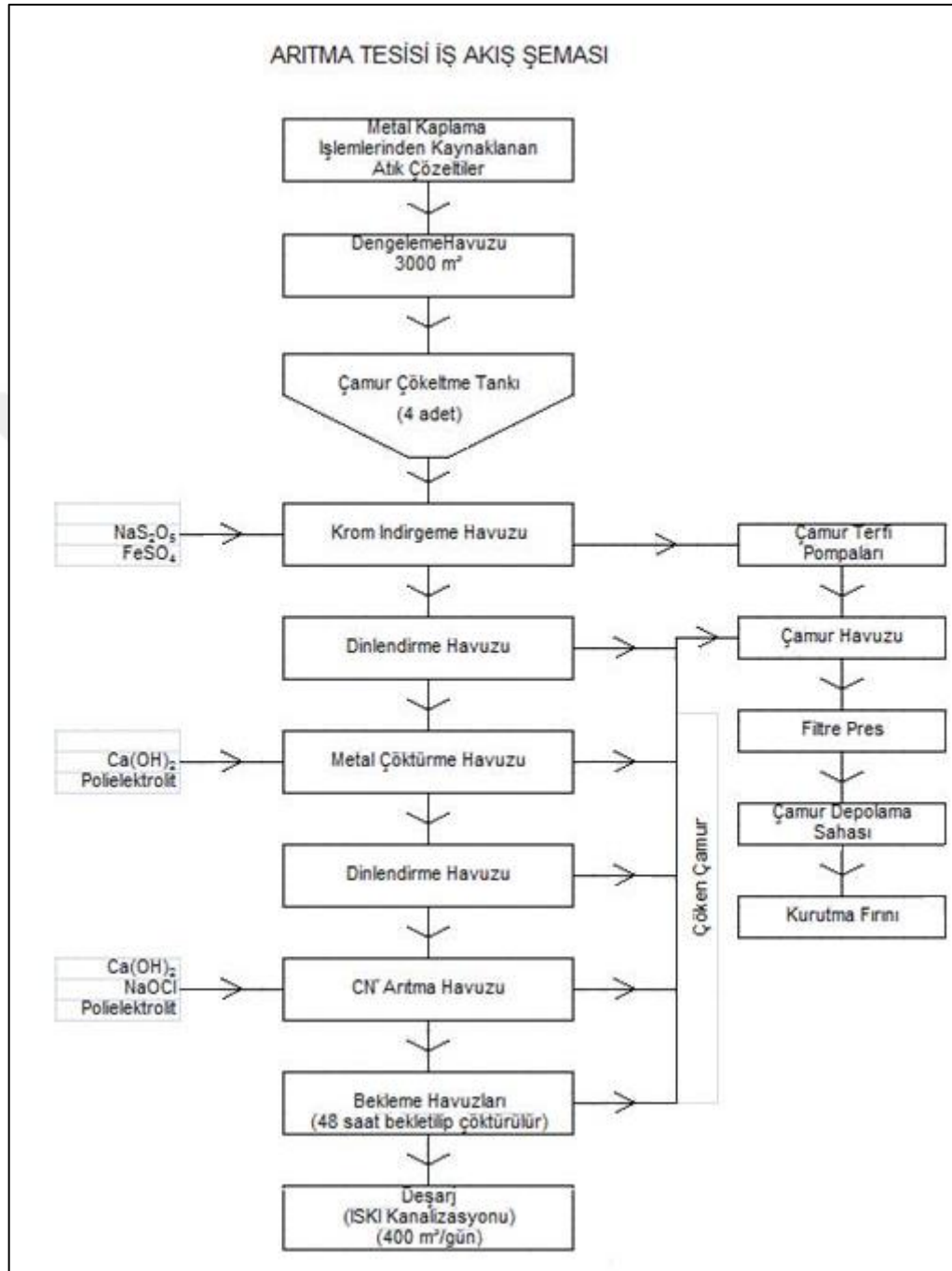
3.1.2 Mevcut Arıtma tesisi ve Atıksu Numunesi

Metal kaplama proseslerinde metal iyonlu yüklü çözeltiler, elektrolitin ömrü sona erene kadar kullanılmakta ve ekonomik ömrünü tamamlamış ve rejenere edilemeyecek hale gelmiş çözeltiler atık duruma geçmekte ve mevcut arıtma tesisine yollanmaktadır. Bu atık çözeltiler birçok farklı kaplama tesisinden geldiği için değişik bileşime sahiptirler. Atık çözeltilerin temel içeriği nikel, bakır, krom, demir gibi metal iyonları ve siyanür ve asit kökleri gibi değişik anyonlardır.

İşletmelerden gelen kaplama atık suları pompalar yardımıyla fiziksel ve kimyasal işlemlerin yapıldığı havuzlara alınmaktadır. Gelen solüsyonun pH değeri 1-7 değerleri arasında olmalı ve karakterine göre kimyasal (NaHSO_3 , NaOCl ve H_2SO_4) işlemlerden geçirilerek sönmüş $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kullanılarak pH sensörleri yardımıyla otomatik olarak getirilmektedir. Flokülant (çöktürücü) eklenerek çöktürülmektedir.

İşletmede toplam 31 havuz bulunmaktadır. Kimyasal işlemin gerçekleştirildiği son havuz 23 numaralı havuzdur. Bu havuzda sonraki havuzlar dinlendirme havuzları olarak kullanılmaktadır. 23 numaralı havuzdan iki saatte bir numune alınarak gerekli parametreler için analizler yapılmaktadır.

Çamurun rutubeti % 65-75 arasında değişmektedir. Gelen solüsyon girişinde debimetre mevcuttur. Günlük 450-600 m³ civarında atık su arıtılmaktadır. Tesisin maksimum arıtma kapasitesi 1000 m³ /gündür. Mevcut arıtma tesisi Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2 Galvanoteknik mevcut atıksu arıtma tesisi şeması

Arıtma tesisine gelen solüsyon değerleri Çizelge 3.1’de, İSKİ Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği kriterleri ise Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Arıtma tesisine gelen atıksudaki kirlilik karakterizasyonu

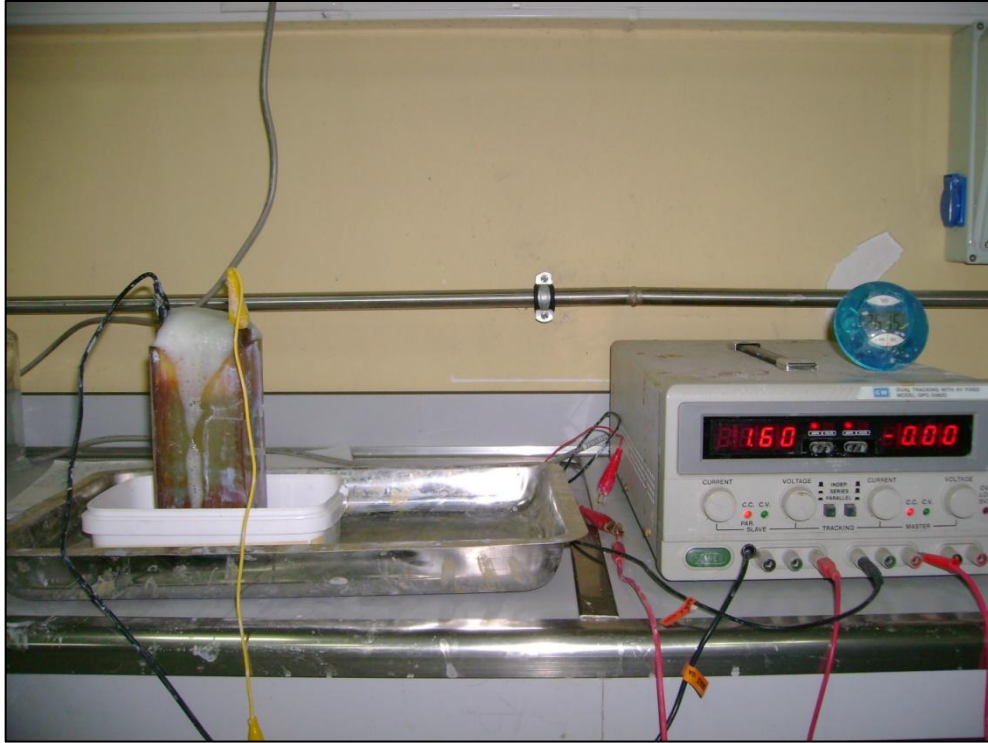
PARAMETRELER	SOLÜSYON DEĞERLERİ
pH	2 – 2,5
Cu ⁺²	70-200 mg/l
Ni ⁺²	80-200 mg/l
Toplam Cr	40-200 mg/l
CN ⁻	100 mg/l
SO ₄ ⁻²	2000-4000 mg/l
Cl ⁻	800-4000 mg/l
Fe ⁺²	50-250 mg/l
TOK	200-600 mg/l

Çizelge 3.2 İSKİ Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği [61]

PARAMETRELER	SOLÜSYON DEĞERLERİ
pH	6 – 12
KOI	1000 mg/l
Toplam bakır (Cu)	5 mg/l
Toplam nikel (Ni)	5 mg/l
Toplam siyanür (CN ⁻)	10 mg/l
SO ₄ ²⁻	1700 mg/l
Toplam Krom (Cr)	5 mg/l
Cl ⁻ (Klorür)	15000 mg/l
Toplam çinko (Zn)	10 mg/l

3.1.3 Deney Düzeneği

Bu alışmada, Galvanoteknik Metal Kaplama endüstrisinden gelen atıksuların öncelikle pH kontrolleri SX736 pH/mV/Cond/DO meter marka prob ile yapılmış ve kaydedilmiştir. Çamur hacim hesaplamalarında kullanılan filtre kâğıtlarının kurutma işlemi Termal marka etüvde, kimyasal tartım işlemleri de Kern Balance PCB marka tartı aleti ile yapılmıştır. Elektrokoagülasyon prosesinde güç kaynağı olarak GPC-3060D marka güç kaynağı ile çalışılmıştır. Deneylerde kullanılan elektrolitik reaktörler plexiglasstan yapılmış 500 ml ve 5 l elektrolit almaktadır. 1 litrelik EC deneylerinde ise cam beherler kullanılmıştır. Elektrot materyali olarak ise sırasıyla 16 cm × 5 cm, 15,8 cm × 9,9 cm ve 11,5 cm × 4,8 cm 'dir. Elektrot materyali olarakta alüminyum elektrotlar kullanılmıştır. EC proses düzeneğinin resmi şekil 3.3'te verilmiştir.



şekil 3.3 Deney düzeneği ve reaktörün genel görüntüsü

Fenton prosesinde Fe^{2+} kaynağı olarak $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ tuzu ve H_2O_2 kaynağı olarakta Merck marka ve %30'luk H_2O_2 özeltisi kullanılmıştır. pH ayarlamalarında 1 ve 6 N NaOH ve 1 N H_2SO_4 çözeltilerinden yararlanılmıştır. Deneyler 500 ml'lik cam beherlerde ve Jar test FC6S Velp-Scientifica marka jar test düzeneğinde yürütölmüştür.

Elektrofenton prosesinde Fe^{2+} kaynağı olarak demir elektrotları ve H_2O_2 kaynağı olarakta Merck marka %30'luk H_2O_2 çözeltisi kullanılmıştır. EF sırasında GPC-3060D marka güç kaynağı ile çalışılmıştır. pH ayarlamalarında 1 ve 6 N NaOH ve 1 N H_2SO_4 çözeltilerinden yararlanılmıştır. Deneyler 500 ml'lik cam beherlerde yürütülmüştür.

Hidroksit çöktürmesi işleminde ise asidik durumdaki pH'lar 6 N'lik NaOH ile ayarlanmıştır. pH ayarlamaları SX736 pH/mV/Cond/DO meter marka prob ile yapılmıştır.

Ham atıksuda ve arıtılmış atıksuda; Fe, Toplam Cr, Cu, Zn ve Ni ağır metallerine, Cl^- , SO_4^{2-} ve TOK parametre değerlerine bakılmıştır. Ağır metallerin Şekil 3.4'te gösterilen Perkin Elmer AAnalyst marka atomik absorpsiyon spektrofotometresi cihazıyla tayini yapılmıştır.



Şekil 3.4 Atomik Absorpsiyon Spektrofotometresi

Sülfat parametresi ölçümlerinde Hach Lange DR 5000 marka cihazla spektrofotometrik küvet testi uygulanmıştır. Klorür tayininde volumetrik yöntem kullanılırken, TOK parametresi ölçümlerinde HACH IR 550 TOC-TN cihazı kullanılmıştır.

3.2 Metot

Bu çalışmada, metal endüstrisi atıksularında bulunan ağır metaller, klorür ve sülfat giderimi için EC, Fenton, EF ve hidrosit çöktürmesi kullanılarak en uygun arıtım prosesi araştırması yapılmıştır. Galvanoteknik endüstrisinden 30 L'lik bidonlar içerisinde gelen atıksular homojen bir karışım sağlanması amaçlı çalkanmış ve ham atıksuyun pH'sı ölçülmüştür. Sonrasında ağır metal, Cl⁻ ve SO₄²⁻ analizleri yapılmıştır. 500 ml'lik atıksu numuneleriyle öncelikle EC prosesi çalışılmıştır. Elektrot materyal boyutları 16 cm × 5 cm ve 13 cm × 5 cm'dir. Çizelge 3.3'te 500 ml ve Çizelge 3.4'te 1 L ile çalışılan deney çalışma şartları detaylı bir şekilde gösterilmiştir.

Çizelge 3.3 500 ml EC çalışma şartları

ÇALIŞMA ŞARTLARI						
Numune sırası	Akım yoğunluğu (A/m ²)	Akım (A)	iletkenlik (ms/cm)	Başlangıç pH'sı	Elektrokoagülasyon süresi (Dakika)	Ayarlanan pH değeri
1	100	0,8	13,8	1,55	45	8
2	150	0,98	13,8	1,55	45	8
3	200	1,6	13,8	1,55	45	8
4	250	1,63	13,8	1,56	45	8
5	300	2,4	14,2	1,55	45	8
6	200	1,3	14,6	1,55	15	8
7	200	1,6	13,8	1,55	30	8
8	200	1,3	13,8	1,55	45	8
9	200	1,6	13,82	1,35	60	8
10	200	1,3	13,54	1,36	75	8

Çizelge 3.3 500 ml EC çalışma şartları (devamı)

11	200	1,6	13,3	0,84	45	6
12	200	1,3	13,6	1,17	45	7
13	200	1,6	13,78	0,72	45	8
14	200	1,3	12,78	0,6	45	9
15	200	1,6	13,85	2,35	45	10

Çizelge 3.4 1 L'lik EC çalışma şartları

ÇALIŞMA ŞARTLARI			
Numune sırası	Amper (A)	Çalışılan pH	Süre (Dakika)
1	1,2	2,48	60
2	1,2	3	60
3	1,1	4	60
4	1,2	5	60
5	1,1	6	60
6	1,2	7	60
7	1,1	8	60
8	1,2	9	60

EC'ye başlanmadan önce atıksuların pH'ları incelenmiş ve 1 ve 6 N NaOH ve 1 H₂SO₄ ile çalışma şartlarına bağlı istenilen pH seviyelerine getirilmiştir. Daha sonra elektrolitik reaktörlere alüminyum elektrotlar yerleştirilmiştir. Reaktörlere gerekli görülen hacim miktarları ilave edilerek çalışma şartlarına bağlı akımlar uygulanarak EC işlemleri gerçekleştirilmiştir. EC işlemi sırasında her 5 dak'da bir voltajlar kaydedilmiştir.

500 ml'lik çalışmalarda sadece 60. dakikada tek bir çıkış numunesi alınırken, 1 L'lik çalışmalarda 5., 10., 15., 30. ve 60.dakikalarda numuneler alınmıştır. EC'den sonra çıkış numuneleri polielektrolit ilavesiyle 1,5-2 sa'lik son çöktürme işlemine tabi tutulmuştur. Ağır metal, klorür ve sülfat analizleri için alınan numuneler, olası çamuru tutmak için kaba filtre kâğıtlarından süzölmüştür.

Uygulanan bir diğer proses olan Fenton prosesinde kullanılan çalışma şartları izelge 3.5'te gösterilmiştir.



Çizelge 3.5 Fenton çalışma şartları [62]

Çalışmalar	KOI/H ₂ O ₂	H ₂ O ₂ / Fe ⁺²	pH	KOI sample	H ₂ O ₂ (ml)	Fe ⁺² (ml)
0	-	-	-	-	-	-
1	0,43	0,55	3,00	300	2,10	16,14
2	0,50	0,55	3,00	300	1,80	13,82
3	0,75	0,55	3,00	300	1,20	9,21
4	1,00	0,55	3,00	300	0,90	6,91
5	1,25	0,55	3,00	300	0,72	5,53
6	1,50	0,55	3,00	300	0,60	4,61
7	2,00	0,55	3,00	300	0,45	3,45
8	2,50	0,55	3,00	300	0,36	2,76
9	3,00	0,55	3,00	300	0,30	2,30
10	4,00	0,55	3,00	300	0,23	1,73
11	0,50	0,75	3,00	300	1,80	10,13
12	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60
13	0,50	1,25	3,00	300	1,80	6,08
14	0,50	1,50	3,00	300	1,80	5,07
15	0,50	1,75	3,00	300	1,80	4,34
16	0,50	2,00	3,00	300	1,80	3,80
17	0,50	2,25	3,00	300	1,80	3,38
18	0,50	2,50	3,00	300	1,80	3,04
19	0,50	2,75	3,00	300	1,80	2,76
20	0,50	3,00	3,00	300	1,80	2,53
21	0,50	1,00	2,00	300	1,80	7,60
22	0,50	1,00	2,25	300	1,80	7,60
23	0,50	1,00	2,50	300	1,80	7,60
24	0,50	1,00	2,75	300	1,80	7,60
25	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60
26	0,50	1,00	3,25	300	1,80	7,60
27	0,50	1,00	3,50	300	1,80	7,60
28	0,50	1,00	3,75	300	1,80	7,60
29	0,50	1,00	4,00	300	1,80	7,60
30	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60
31	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60
32	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60
33	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60
33	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60
34	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60

pH optimizasyonu için 1 N H₂SO₄ ve 1 ve 6 N'lik NaOH kullanılarak pH seviyesi yaklaşık 3 seviyesine getirilmiştir. Sırasıyla FeSO₄ 7H₂O ile Fe²⁺ tuzları ve H₂O₂ ilaveleri yapılmıştır. Şekil 3.5'te gösterildiği gibi 2 dakikalık 200 rpm'de hızlı karıştırma, 20 dakikalık 30 rpm'de yavaş karıştırma işlemleri uygulanarak hidroksil radikallerinin oluşumu ve Fe²⁺'nin Fe³⁺'e yükseltgenmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.5 Fenton uygulamasının yapıldığı jar test düzeneği

Karıştırma işlemlerinden sonra 6 N'lik NaOH ilavesi yapılarak Fe³⁺ floklarının en uygun çökebilme aralığı olan pH \approx 7-8 aralığına getirilmiştir. Polielektrolit ilavesiyle birlikte Fe³⁺ iyonları Fe(OH)₃ şeklinde 2 sa'lik çöktürmeye bırakılmıştır (Şekil 3.6). Üst duru faz çamurdan ayrıldıktan sonra berrak fazdan örnekler alınarak numunelere gerekli analizler yapılmıştır.



Şekil 3.6 Fenton uygulamasında son çöktürme işlemi

EF prosesinde kullanılan demir elektrotları boyutları 12,5 cm × 5,7 cm ve 14,5 cm × 5,7 cm'dir. Atıksuyun pH'sı önce 3'e ayarlanarak numune sırasına göre H₂O₂ eklemeleri yapılmıştır. Deney şartları Çizelge 3.6'da verildiği gibidir.

Çizelge 3.6 ElektroFenton çalışma şartları [62]

Çalışmalar	KOI/H ₂ O ₂	H ₂ O ₂ / Fe ⁺²	pH	KOI _{sample}	H ₂ O ₂ (ml)	Fe ⁺² (ml)	I (A)
0	-	-	-	-	-	-	
1	0,43	0,55	3,00	300	2,10	16,14	3,33
2	0,50	0,55	3,00	300	1,80	13,82	2,85
3	0,75	0,55	3,00	300	1,20	9,21	1,90
4	1,00	0,55	3,00	300	0,90	6,91	1,43
5	1,25	0,55	3,00	300	0,72	5,53	1,14
6	1,50	0,55	3,00	300	0,60	4,61	0,95
7	2,00	0,55	3,00	300	0,45	3,45	0,71
8	2,50	0,55	3,00	300	0,36	2,76	0,57
9	3,00	0,55	3,00	300	0,30	2,30	0,48
10	4,00	0,55	3,00	300	0,23	1,73	0,36
11	0,50	0,75	3,00	300	1,80	10,13	2,09
12	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57
13	0,50	1,25	3,00	300	1,80	6,08	1,26
14	0,50	1,50	3,00	300	1,80	5,07	1,26
15	0,50	1,75	3,00	300	1,80	4,34	0,90
16	0,50	2,00	3,00	300	1,80	3,80	0,79
17	0,50	2,25	3,00	300	1,80	3,38	0,70
18	0,50	2,50	3,00	300	1,80	3,04	0,63
19	0,50	2,75	3,00	300	1,80	2,76	0,57
20	0,50	3,00	3,00	300	1,80	2,53	0,53
21	0,50	1,00	2,00	300	1,80	7,60	1,57
22	0,50	1,00	2,25	300	1,80	7,60	1,57
23	0,50	1,00	2,50	300	1,80	7,60	1,57
24	0,50	1,00	2,75	300	1,80	7,60	1,57
24,5	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57
25	0,50	1,00	3,25	300	1,80	7,60	1,57
26	0,50	1,00	3,50	300	1,80	7,60	1,57
27	0,50	1,00	3,75	300	1,80	7,60	1,57
28	0,50	1,00	4,00	300	1,80	7,60	1,57
29	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57
30	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57
31	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57
32	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57
33	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57
34	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57

22 dakika boyunca farklı çalışma şartları altında EF uygulanmıştır. EF uygulamasından sonra numunelerin pH'ları ölçülerek pH 6 seviyelerine getirilmiştir. 2 ml kadar polielektrolit ilavesinden sonra numuneler Şekil 3.7'deki gibi 2 saatlik son çöktürme işlemine bırakılmıştır. Çöktürme işleminin ardından analizler için duru fazdan 40 ml'lik örnekler alınmıştır.



Şekil 3.7 EF uygulamasında son çöktürme işlemi

Ağır metal gideriminde bir diğer etkili yöntem olan klasik hidroksit çöktürmesinde pH 8,5 - 9,0 - 9,5 - 10,0 - 10,5 ve 11 seviyelerinde çalışılmıştır. İstenilen pH seviyeleri için NaOH ve H₂SO₄ kullanılmıştır. %1'lik 5 ml polielektrolit ilavesinden sonra 2 saatlik çöktürmeye bırakılan numunelerden daha sonra örnekler alınarak analizler yapılmıştır.

Ağır metal, klorür ve sülfat analizleri ham atıksularda ve çöktürme sonrası duru fazlardan alınan örnekler için yapılmıştır. Ağır metal analizleri alevli atomik absorpsiyon cihazında yapılmıştır. Sülfat analizinde örneklerden alınmış olan 2 ml'lik numuneler saf suyla 100 ml'ye tamamlanarak % 50 seyreltilmiştir. Sülfat analizi için 100 ml'lik seyreltilmiş numunelerden 25 ml alınarak spektrofotometrik analiz yapılmıştır. SulfaVer 4 Metodu uygulanarak yapılan sülfat analizinde 25 ml'lik numune içerisine reaktif

eklenmesinin ardından 5 dakika kadar beklenmiştir. Daha sonra numunelerin sülfat değerleri spektrofotometre yardımıyla 450 nm'lik UV dalga boyunda ölçülmüştür.

Kalan 75 ml'lik seyreltilmiş örnek ise klorür analizinde kullanılmıştır. Öncelikle şahit numuneyi temsil eden saf suyla titrasyon mililitresi belirlenmiştir. Daha sonra erlenlere alınan örnekler 1 ml'lik potasyum dikromat $K_2Cr_2O_7$ eklenmesinin ardından standart $AgNO_3$ çözeltisi ile örnekler titre edilmiştir.

TOK analizinde ise ham atıksudan ve örneklerden 8 ml'lik numuneler alınarak TOK ölçümleri yapılmıştır.



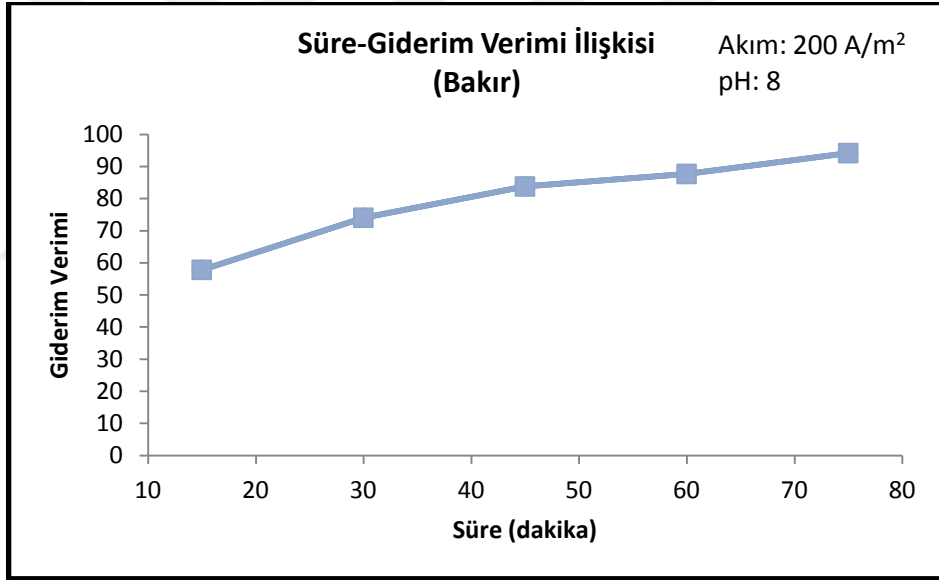
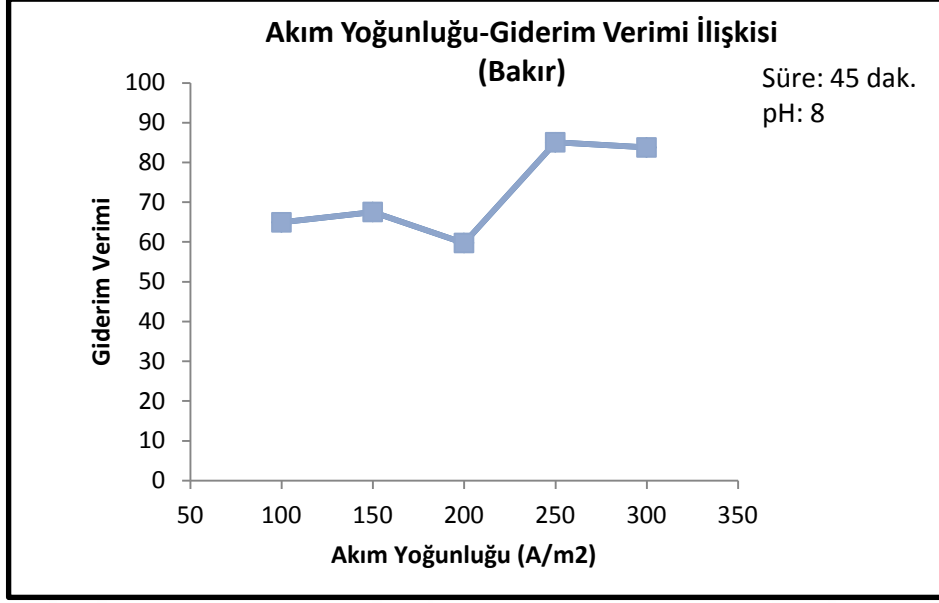
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

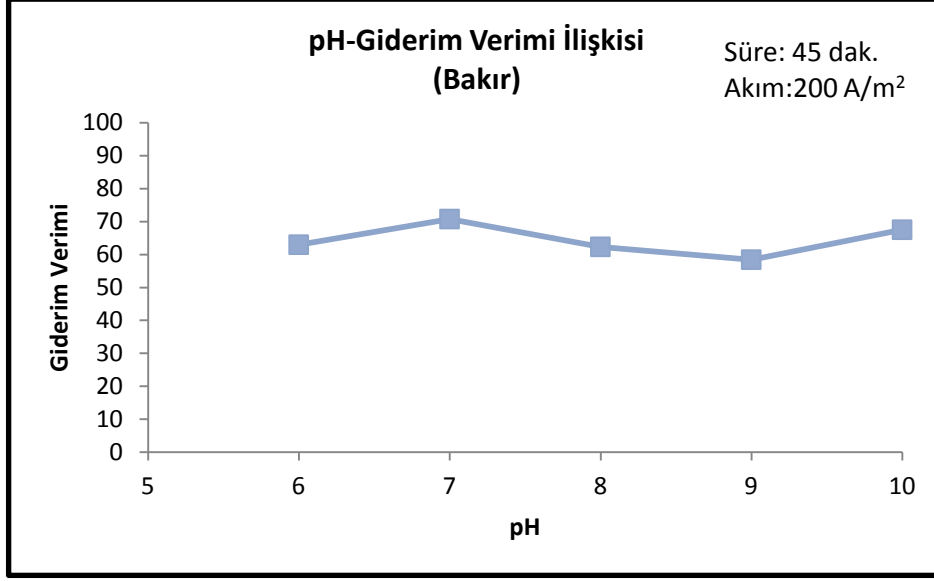
4.1 Elektrokoagülasyon için Bulgular

İstanbul ili Küçükçekmece ilçesi İkitelli Organize Sanayi Bölgesinde yer alan Galvanoteknik Metal Kaplamacıları Sanayi Sitesinden alınan metal endüstrisi atıksularına; elektrokoagülasyon, Fenton, elektro-Fenton ve pH ayarlama işlemleri uygulanmıştır. Elektrokoagülasyon prosesinde Çizelge 4.1'de verilen 500 ml'lik çalışmada farklı akım yoğunluklarında (A/m^2), farklı sürelerde (dakika) ve farklı pH değerlerinde; bakır (Cu), çinko (Zn), demir (Fe), nikel (Ni), krom (Cr), klorür (Cl^-), sülfat (SO_4) ve TOK parametreleri için farklı giderim verimleri elde edilmiştir. Şekil 4.1'de bakır (Cu) için değişken parametrelere göre elde edilen verimler verilmiştir.

Çizelge 4.1 500 ml elektrokoagülasyon çalışma şartları

ÇALIŞMA ŞARTLARI						
Numune numarası	Akım yoğunluğu (A/m ²)	Akım (A)	İletkenlik (mS/cm)	Başlangıç pH'sı	Elektrokoagülasyon süresi (Dakika)	Ayarlanan pH değeri
1. Numune	100	0,8	13,8	1,55	45	8
2. Numune	150	0,98	13,8	1,55	45	8
3. Numune	200	1,6	13,8	1,55	45	8
4. Numune	250	1,63	13,8	1,56	45	8
5. Numune	300	2,4	14,2	1,55	45	8
6. Numune	200	1,3	14,6	1,55	15	8
7. Numune	200	1,6	13,8	1,55	30	8
8. Numune	200	1,3	13,8	1,55	45	8
9. Numune	200	1,6	13,82	1,35	60	8
10. Numune	200	1,3	13,54	1,36	75	8
11. Numune	200	1,6	13,3	0,84	45	6
12. Numune	200	1,3	13,6	1,17	45	7
13. Numune	200	1,6	13,78	0,72	45	8
14. Numune	200	1,3	12,78	0,6	45	9
15. Numune	200	1,6	13,85	2,35	45	10



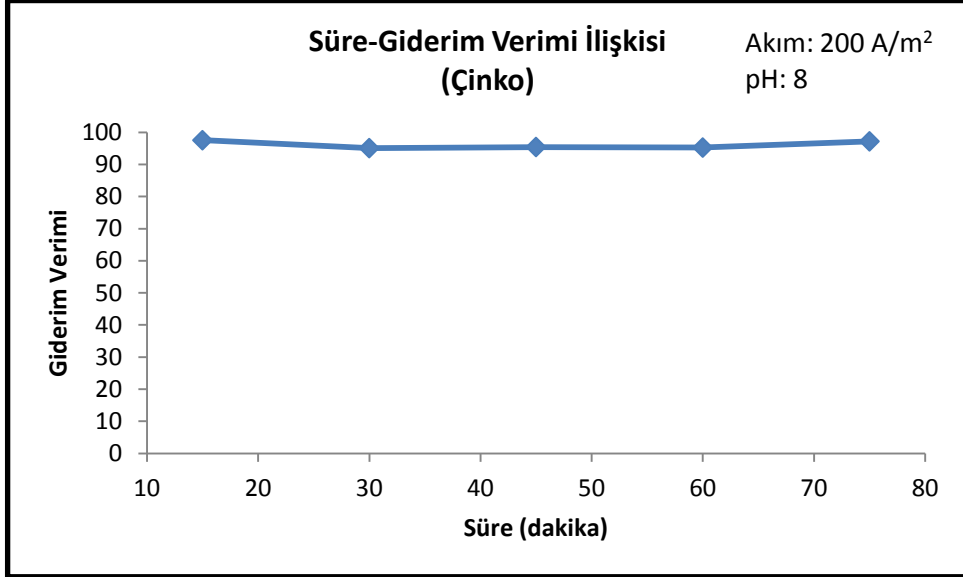
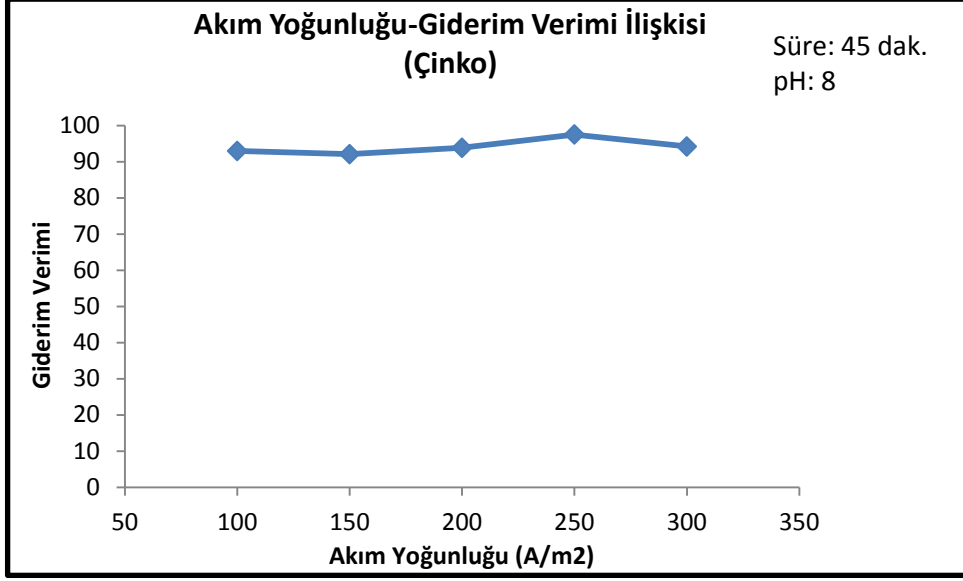


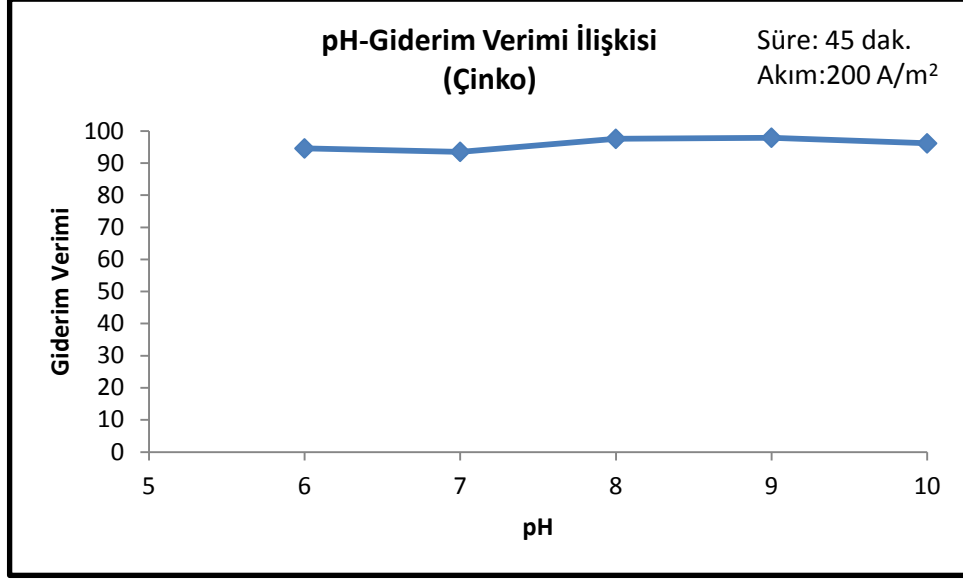
Şekil 4.1 500 ml EC prosesinde değişken parametrelere bağlı Cu giderim verimi

Metal endüstrisi atıksuyunda bakır (Cu) parametresi için; 100, 150, 200, 250, 300 (A/m²) farklı akım yoğunluklarında, 6, 7, 8, 9, 10 farklı pH ve 15, 30, 45, 60, 75 (dakika) farklı sürelerde yapılan 500 ml'lik elektrokoagülasyon çalışmasında çalışma şartlarına bağlı olarak farklı verimler elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.1'e bakıldığında, Cu giderim veriminin uygulanan akım yoğunluğu ve pH değerlerine bağlı olarak dalgalanma gösterdiği görülmektedir. Bununla birlikte artan süre ile giderim veriminin de arttığı görülmektedir. Bakır metalinin giderim verimi için optimum şartlara bakacak olursak, pH parametresi için bu değer pH:7.0 olduğu görülmektedir. Akım yoğunluğu parametresi için incelendiğinde ise optimum akım yoğunluğu değerinin 250 A/m² olduğu görülmektedir. Diğer çalışma parametresi olan süre için ise optimum değer 75 dk olduğu görülmektedir. Bütün bu çalışmalar neticesinde Çizelge 4.2'de verilen bakır giderim sonuçlarına bakıldığında da; en yüksek bakır giderim verimi pH:8, akım yoğunluğu 200 A/m² ve EC süresi 75 dk çalışma şartlarında % 94 mertebelerinde gerçekleşmiştir. Elde edilen bu yüksek giderim verim değerleri sonucunda, çıkış konsantrasyon değerleri Çizelge 3.2'de verilen İSKİ Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği standartlarını sağladığı görülmüştür.

Çizelge 4.2 500 ml EC prosesi çalışması bakır giderimi sonuçları

BAKIR GİDERİMİ					
Akım yoğunluğu (A/m²)	Amper (A)	pH	Süre (Dakika)	Giderim yüzdeleri (%)	Çıkış konsantrasyonu (mg/l)
100	0,8	8	45	65	27
150	0,98	8	45	68	25
200	1,6	8	45	60	31
250	1,63	8	45	85	11,5
300	2,4	8	45	84	12,5
200	1,3	8	15	58	32,5
200	1,6	8	30	74	20
200	1,3	8	45	84	12,5
200	1,6	8	60	88	9,5
200	1,3	8	75	94	4,5
200	1,6	6	45	63	28,5
200	1,3	7	45	71	22,5
200	1,6	8	45	62	29
200	1,3	9	45	58	32
200	1,6	10	45	68	25
					HAM ATIKSU= 77 mg/l



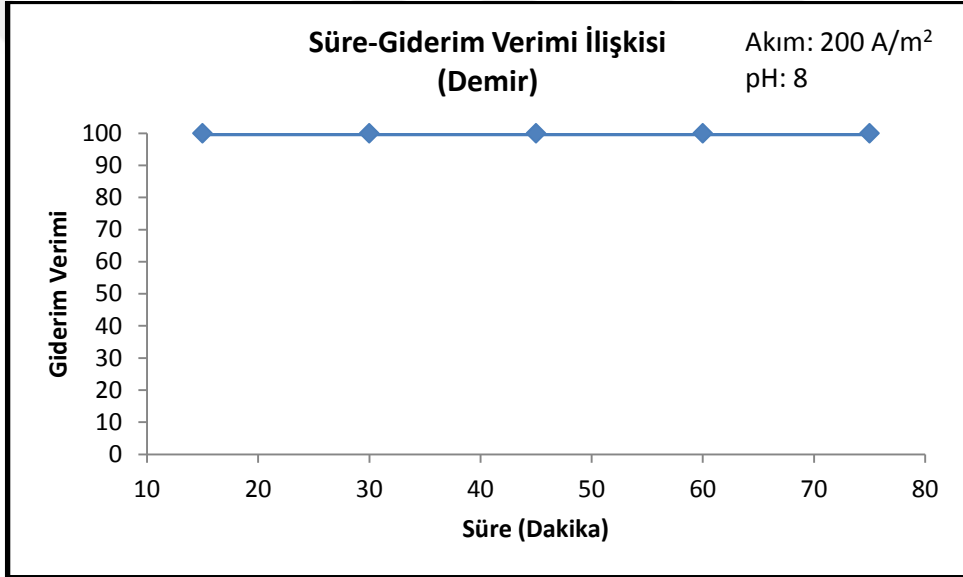
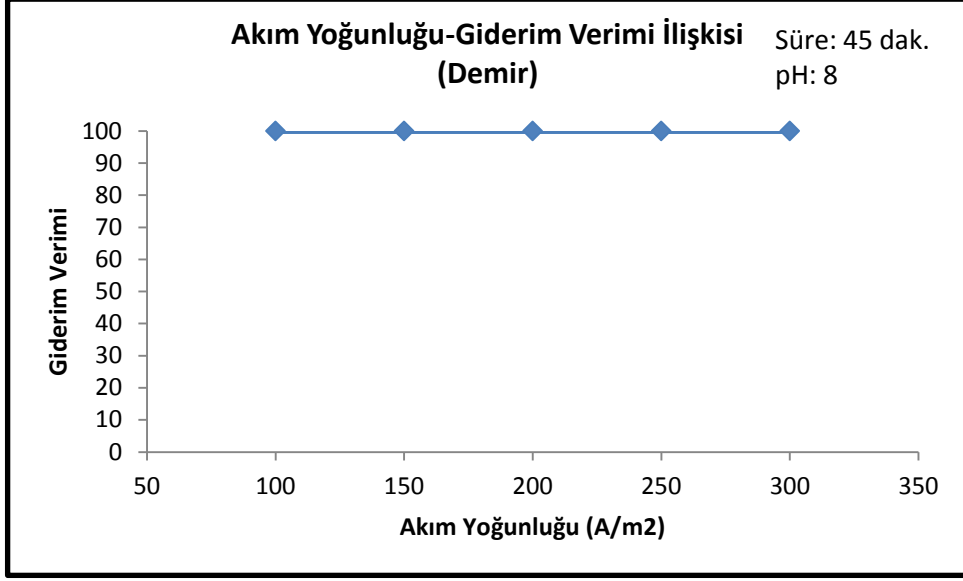


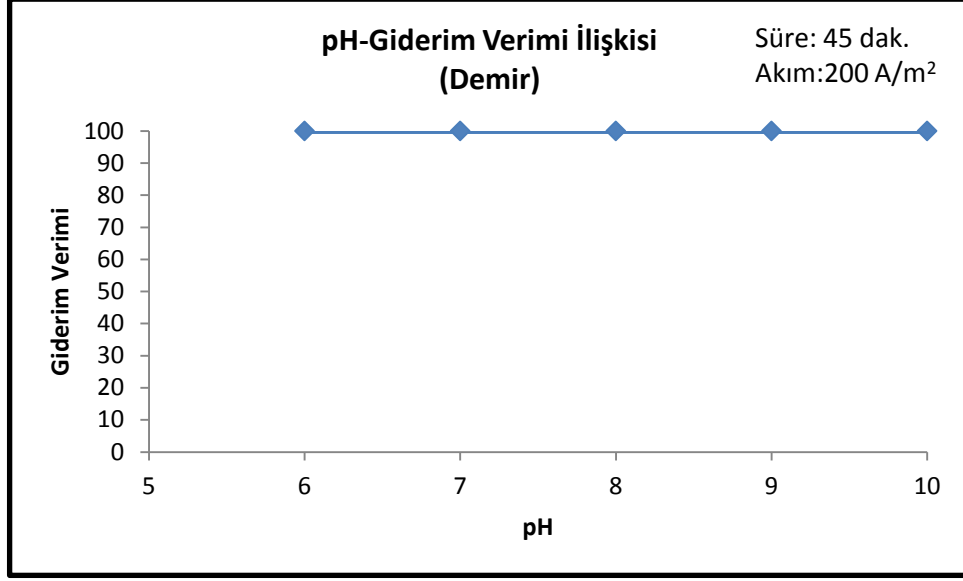
Şekil 4.2 500 ml EC prosesinde değişken parametrelere bağlı Zn giderim verimi

Metal endüstrisi atıksuyunda çinko (Zn) parametresi için; 100, 150, 200, 250, 300 (A/m²) farklı akım yoğunluklarında, 6, 7, 8, 9, 10 farklı pH ve 15, 30, 45, 60, 75 (dakika) farklı sürelerde yapılan 500 ml'lik elektrokoagülasyon çalışmasında çalışma şartlarına bağlı olarak farklı verimler elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.2'ye bakıldığında, Zn giderim veriminin uygulanan akım yoğunluğu ve pH değerlerine bağlı olarak fazla bir değişiklik olmadığı görülmektedir. Bununla birlikte artan süre ile giderim veriminin % 90 civarlarında olduğu görülmektedir. Çinko metalinin giderim verimi için optimum şartlara bakacak olursak, pH parametresi için bu değer pH:9.0 olduğu görülmektedir. Akım yoğunluğu parametresi için incelendiğinde ise optimum akım yoğunluğu değerinin 250 A/m² olduğu görülmektedir. Diğer çalışma parametresi olan süre için ise optimum değer 75 dk olduğu görülmektedir. Bütün bu çalışmalar neticesinde Çizelge 4.3'te verilen çinko giderim sonuçlarına bakıldığında da; en yüksek çinko giderim verimi pH:8, akım yoğunluğu 200 A/m² ve EC süresi 15 dk çalışma şartlarında %98 mertebelerinde gerçekleşmiştir. Elde edilen bu yüksek giderim verim değerleri, çıkış konsantrasyon değerleri Çizelge 3.2'de verilen İSKİ Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği standartlarını sağlamaktadır.

Çizelge 4.3 500 ml EC prosesi çalışması çinko giderimi sonuçları

ÇİNKO GİDERİMİ					
Akım yoğunluğu (A/m ²)	Amper (A)	pH	Süre (Dakika)	Giderim yüzdeleri (%)	Çıkış konsantrasyonu (mg/l)
100	0,8	8	45	93	20
150	0,98	8	45	92	22,5
200	1,6	8	45	94	17,5
250	1,63	8	45	98	7
300	2,4	8	45	94	16,5
200	1,3	8	15	98	7
200	1,6	8	30	95	14
200	1,3	8	45	95	13
200	1,6	8	60	95	13,5
200	1,3	8	75	97	8
200	1,6	6	45	95	15,5
200	1,3	7	45	93	18,5
200	1,6	8	45	98	7
200	1,3	9	45	98	6
200	1,6	10	45	96	11
					HAM ATIKSU= 284,5 mg/l



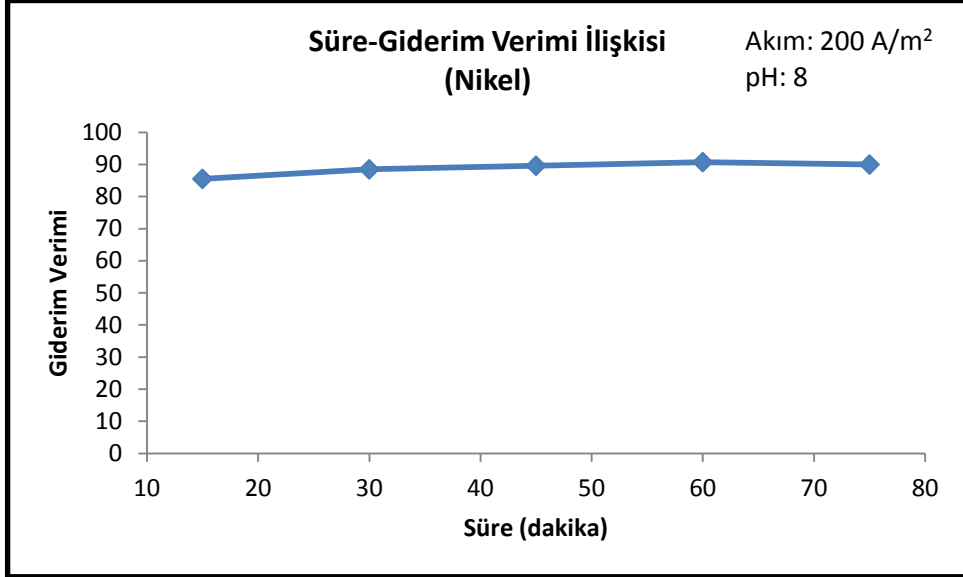
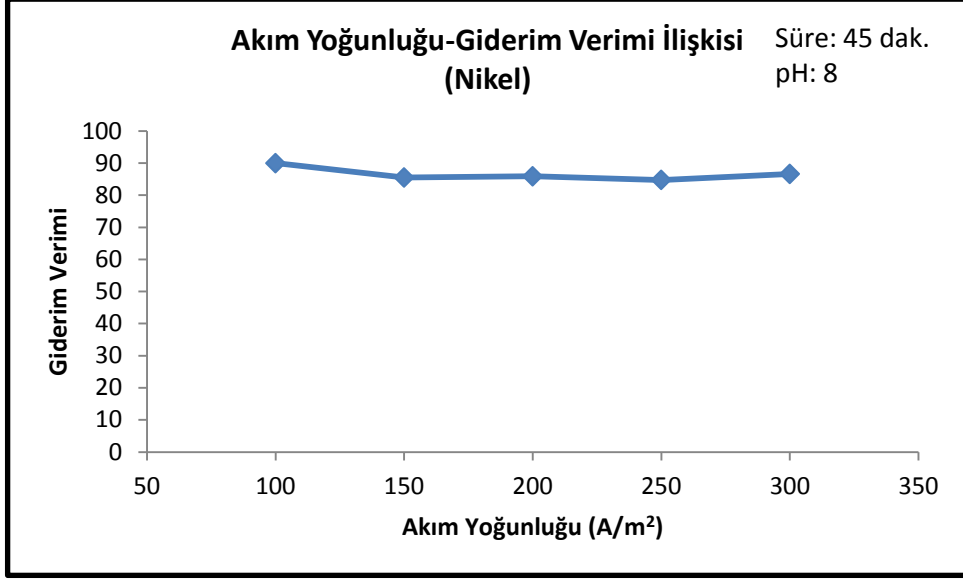


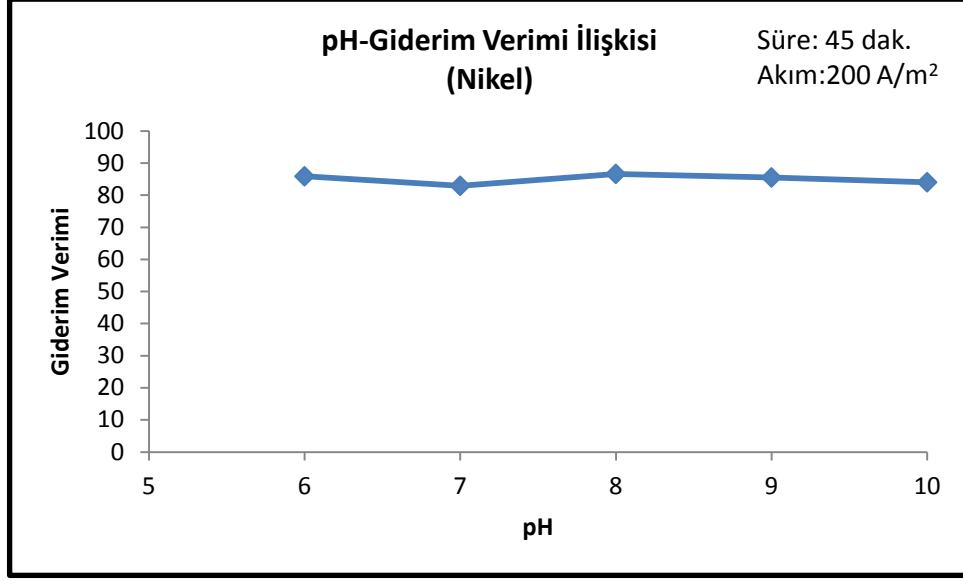
Şekil 4.3 500 ml EC prosesinde değişken parametrelere bağlı Fe giderim verimi

Metal endüstrisi atıksuyunda demir (Fe) parametresi için; 100, 150, 200, 250, 300 (A/m²) farklı akım yoğunluklarında, 6, 7, 8, 9, 10 farklı pH ve 15, 30, 45, 60, 75 (dakika) farklı sürelerde yapılan 500 ml'lik elektrokoagülasyon çalışmasında çalışma şartlarına bağlı olarak farklı verimler elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.3'e bakıldığında, Fe giderim veriminin uygulanan akım yoğunluğu ve pH değerlerine bağlı olarak neredeyse stabil olduğu görülmektedir. Bununla birlikte farklı pH, farklı süreler ve farklı akım yoğunluklarında giderim veriminin % 100'lere yaklaştığı görülmektedir. Bütün bu çalışmalar neticesinde optimum demir giderim verimi pH:8, akım yoğunluğu 100 A/m² ve EC süresi 45 dk çalışma şartlarında %100 mertebelerinde gerçekleşmiştir. Bütün bu çalışmalar sonucu ortaya çıkan demir giderim sonuçları Çizelge 4.4'te yer almaktadır. Ancak İSKİ Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği deşarj standartlarında Fe ile ilgili limit değer yer almamaktadır.

Çizelge 4.4 500 ml EC prosesi çalışması demir giderimi sonuçları

DEMİR GİDERİMİ					
Akım yoğunluğu (A/m ²)	Amper (A)	pH	Süre (Dakika)	Giderim yüzdeleri (%)	Çıkış konsantrasyonu (mg/l)
100	0,8	8	45	100	0
150	0,98	8	45	100	0
200	1,6	8	45	100	0
250	1,63	8	45	100	0
300	2,4	8	45	100	0
200	1,3	8	15	100	0
200	1,6	8	30	100	0
200	1,3	8	45	100	0
200	1,6	8	60	100	0
200	1,3	8	75	100	0
200	1,6	6	45	100	0
200	1,3	7	45	100	0
200	1,6	8	45	100	0
200	1,3	9	45	100	0
200	1,6	10	45	100	0
					HAM ATIKSU= 134 mg/l



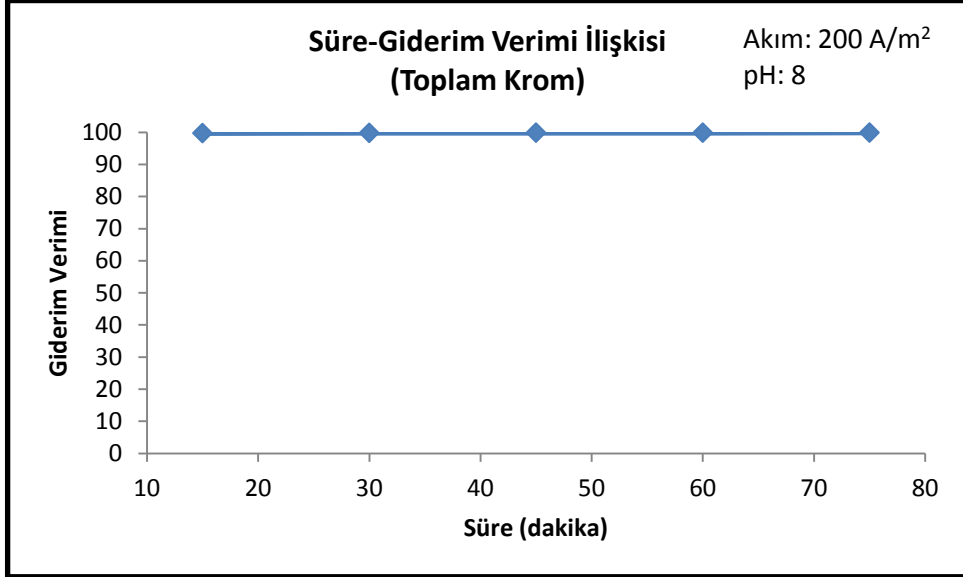
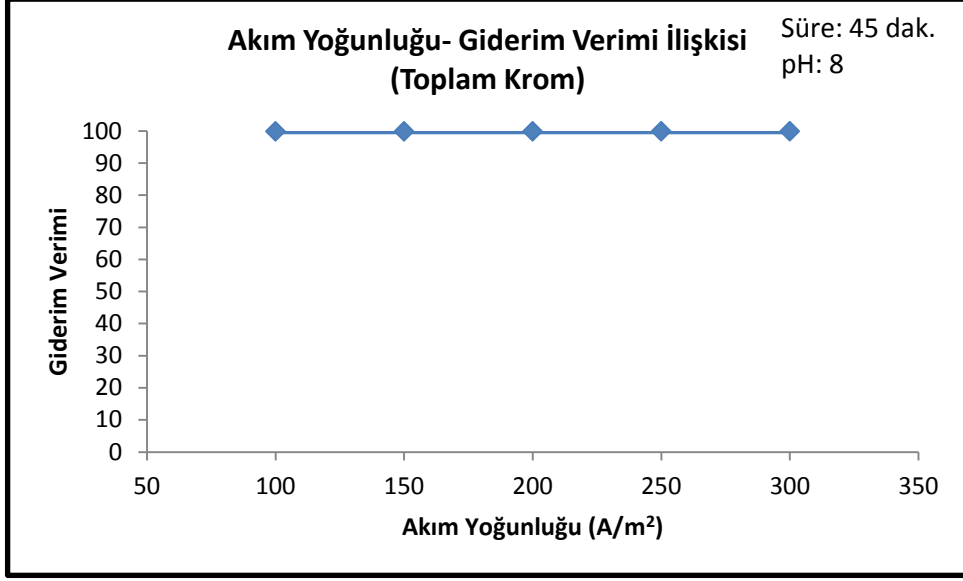


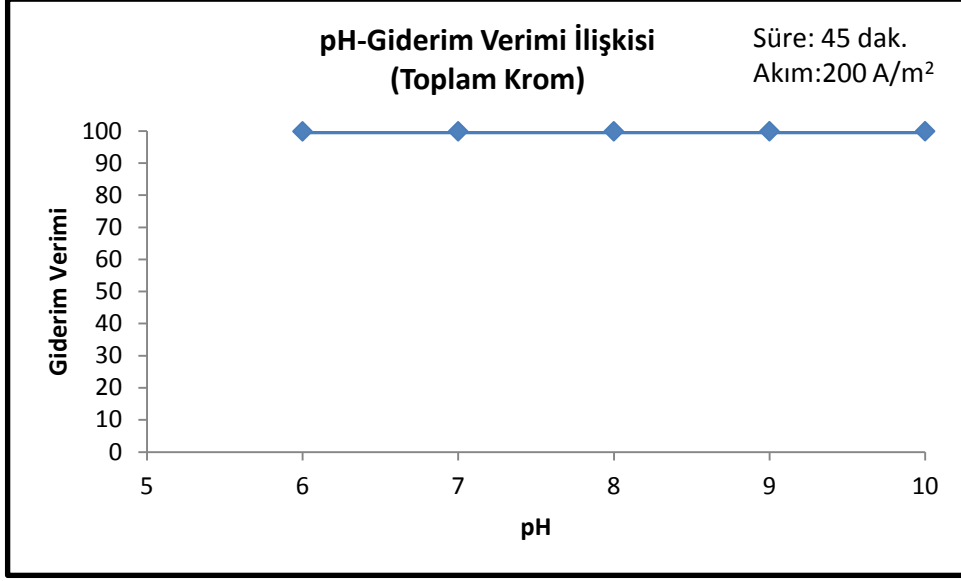
Şekil 4.4 500 ml EC prosesinde değişken parametrelere bağlı Ni giderim verimi

Metal endüstrisi atıksuyunda nikel (Ni) parametresi için; 100, 150, 200, 250, 300 (A/m²) farklı akım yoğunluklarında, 6, 7, 8, 9, 10 farklı pH ve 15, 30, 45, 60, 75 (dakika) farklı sürelerde yapılan 500 ml'lik elektrokoagülasyon çalışmasında çalışma şartlarına bağlı olarak farklı verimler elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.4'e bakıldığında, Ni giderim veriminin uygulanan akım yoğunluğu ve pH değerlerine bağlı olarak hafif dalgalanmalar gösterdiği görülmektedir. Bununla birlikte artan süre ile giderim veriminin arttığı görülmektedir. Nikel metalinin giderim verimi için optimum şartlara bakacak olursak, pH parametresi için bu değer pH:8.0 olduğu görülmektedir. Akım yoğunluğu parametresi için incelendiğinde ise optimum akım yoğunluğu değerinin 100 A/m² olduğu görülmektedir. Diğer çalışma parametresi olan süre için ise optimum değer 60 dk olduğu görülmektedir. Bütün bu çalışmalar neticesinde en yüksek nikel giderim verimi pH:8, akım yoğunluğu 200 A/m² ve EC süresi 60 dk çalışma şartlarında %90 mertebelerinde gerçekleşmiştir. Ancak, elde edilen bu yüksek giderim verim değerlerine rağmen Çizelge 4.5'te verilen nikel giderim sonuçlarına da bakıldığında, çıkış konsantrasyon değerleri Çizelge 3.2'de verilen İSKİ Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği standartlarını sağlamamaktadır. Bu çalışma sonucunda nikel metalinin standartları sağlayacak şekilde giderilebilmesi için EC sonrasında ilave bir arıtma prosesine tabi tutulması gerektiği görülmüştür.

Çizelge 4.5 500 ml EC prosesi çalışması nikel giderimi sonuçları

NİKEL GİDERİMİ					
Akım yoğunluğu (A/m²)	Amper (A)	pH	Süre (Dakika)	Giderim yüzdeleri (%)	Çıkış konsantrasyonu (mg/l)
100	0,8	8	45	90	13,5
150	0,98	8	45	86	19,5
200	1,6	8	45	86	19
250	1,63	8	45	85	20,5
300	2,4	8	45	87	18
200	1,3	8	15	86	19,5
200	1,6	8	30	88	15,5
200	1,3	8	45	90	14
200	1,6	8	60	91	12,5
200	1,3	8	75	90	13,5
200	1,6	6	45	86	19
200	1,3	7	45	83	23
200	1,6	8	45	87	18
200	1,3	9	45	86	19,5
200	1,6	10	45	84	21,5
					HAM ATIKSU= 134,5 mg/l



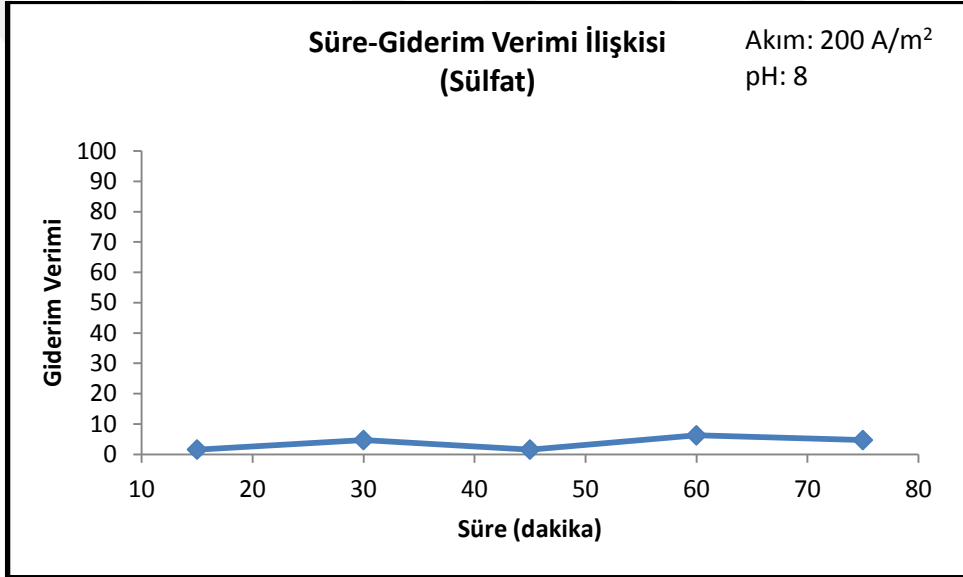
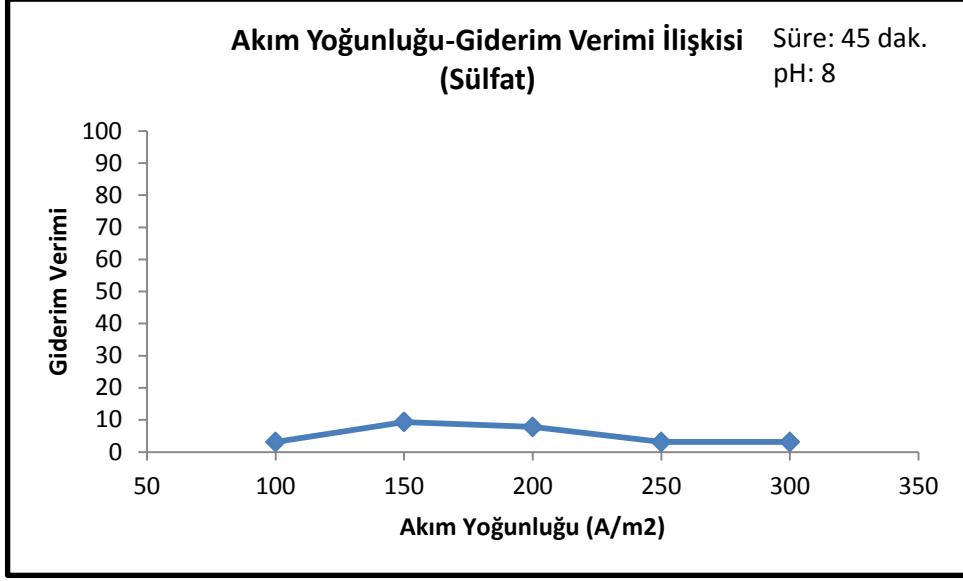


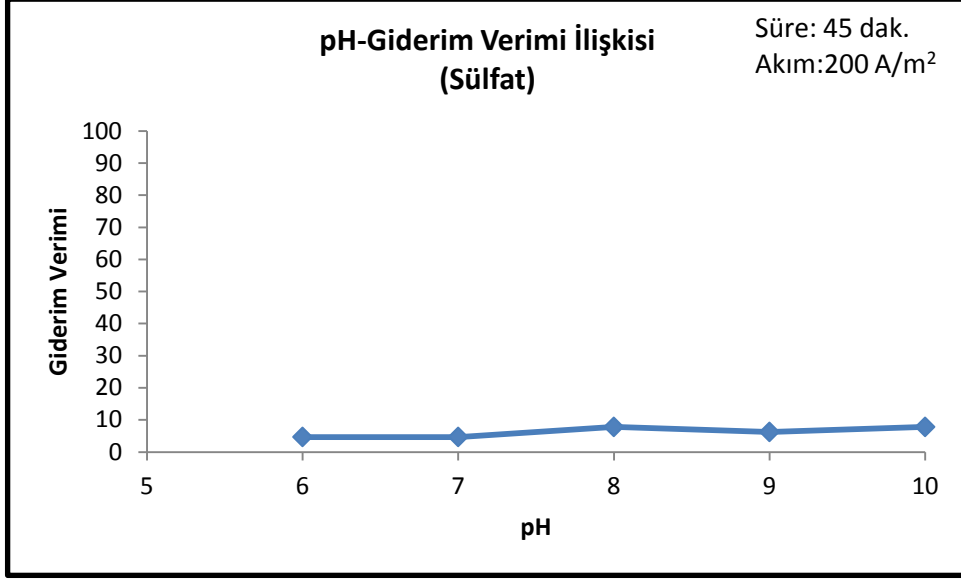
Şekil 4.5 500 ml EC prosesinde değişken parametrelere bağlı Cr giderim verimi

Metal endüstrisi atıksuyunda toplam krom (Cr) parametresi için; 100, 150, 200, 250, 300 (A/m²) farklı akım yoğunluklarında, 6, 7, 8, 9, 10 farklı pH ve 15, 30, 45, 60, 75 (dakika) farklı sürelerde yapılan 500 ml'lik elektrokoagülasyon çalışmasında çalışma şartlarına bağlı olarak farklı verimler elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.5'e bakıldığında, toplam Cr giderim veriminin uygulanan akım yoğunluğu ve pH değerlerine bağlı olarak neredeyse stabil olduğu görülmektedir. Bununla birlikte farklı pH, farklı süreler ve farklı akım yoğunluklarında giderim veriminin % 100'lere yaklaştığı görülmektedir. Bütün bu çalışmalar neticesinde Çizelge 4.6'da verilen krom giderim sonuçlarına bakıldığında da; optimum toplam krom giderim verimi pH:8, akım yoğunluğu 100 A/m² ve EC süresi 45 dk çalışma şartlarında % 100 mertebelerinde gerçekleşmiştir. Elde edilen bu yüksek giderim verimleriyle birlikte krom metali için çıkış konsantrasyon değerleri Çizelge 3.2'de verilen İSKİ Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği standartlarını sağlamaktadır.

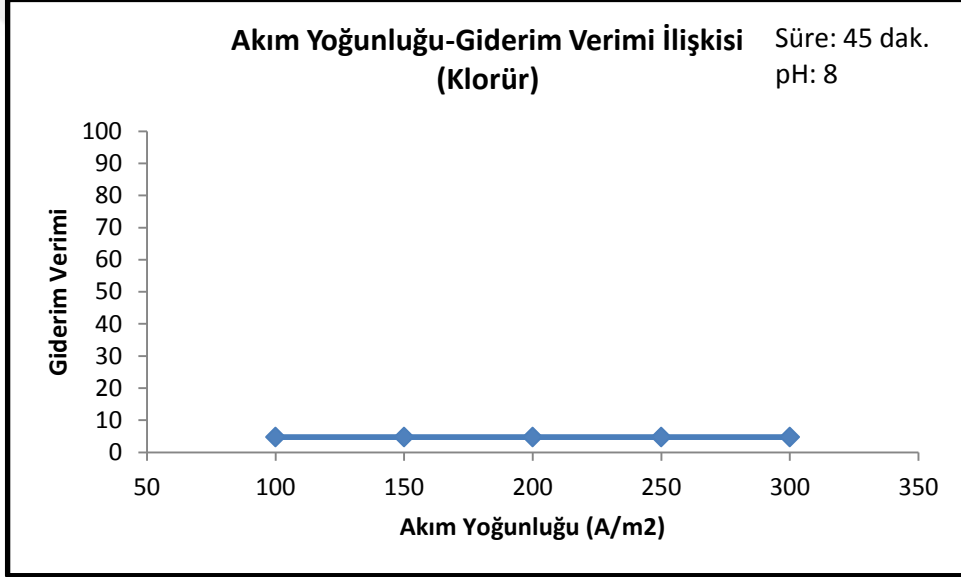
Çizelge 4.6 500 ml EC prosesi çalışması krom giderim sonuçları

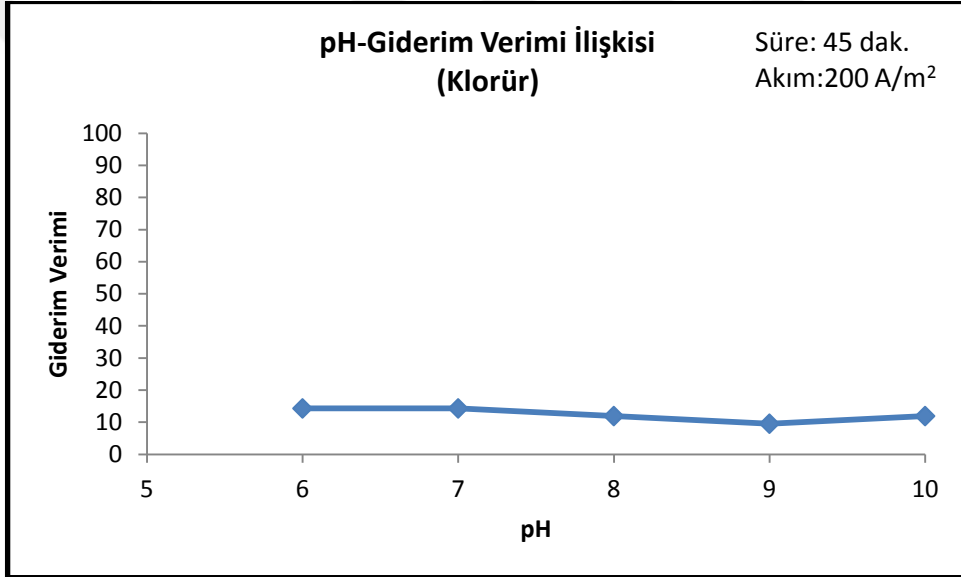
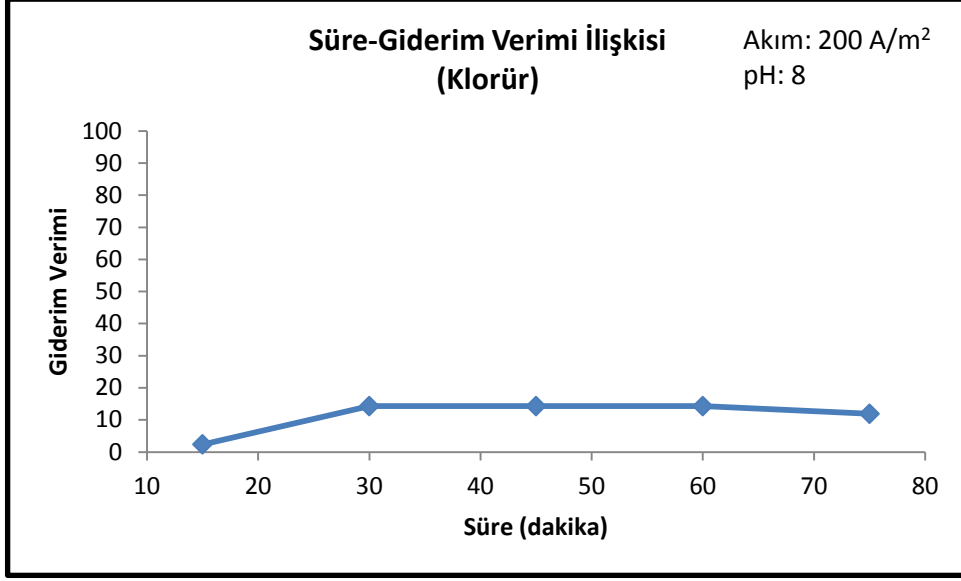
KROM GİDERİMİ					
Akım yoğunluğu (A/m²)	Amper (A)	pH	Süre (Dakika)	Giderim yüzdeleri (%)	Çıkış konsantrasyonu (mg/l)
100	0,8	8	45	99,9	0,27
150	0,98	8	45	99,9	0,27
200	1,6	8	45	99,9	0,25
250	1,63	8	45	99,9	0,2
300	2,4	8	45	99,9	0,19
200	1,3	8	15	99,8	0,49
200	1,6	8	30	99,8	0,35
200	1,3	8	45	99,9	0,21
200	1,6	8	60	99,9	0,2
200	1,3	8	75	99,9	0,15
200	1,6	6	45	99,9	0,28
200	1,3	7	45	99,9	0,26
200	1,6	8	45	99,9	0,25
200	1,3	9	45	99,9	0,2
200	1,6	10	45	99,9	0,2
					HAM ATIKSU= 220,5 mg/l





Şekil 4.6 500 ml EC prosesinde değişken parametrelere bağlı SO_4^{-2} giderim verimi





Şekil 4.7 500 ml EC prosesinde değişken parametrelere bağlı Cl⁻ giderim verimi

Metal endüstrisi atıksuyunda sülfat (SO₄²⁻) ve klorür (Cl⁻) parametresi için; 100, 150, 200, 250, 300 (A/m²) farklı akım yoğunluklarında, 6, 7, 8, 9, 10 farklı pH ve 15, 30, 45, 60, 75 (dakika) farklı sürelerde yapılan 500 ml'lik elektrokoagülasyon çalışmasında çalışma şartlarına bağlı olarak farklı verimler elde edildiği görülmektedir. Sırasıyla Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'ye bakıldığında, (SO₄²⁻) ve Cl⁻ giderim veriminin uygulanan akım yoğunluğu, süre ve pH değerlerine bağlı olarak dalgalanma gösterdiği görülmektedir. Sırasıyla sülfat ve klorürün giderim verimleri için optimum şartlara bakacak olursak, pH parametresi için bu değerlerin pH:8.0 ve pH:6.0 olduğu görülmektedir. Akım yoğunluğu parametresi için incelendiğinde ise optimum akım yoğunluğu değerlerinin sülfat için

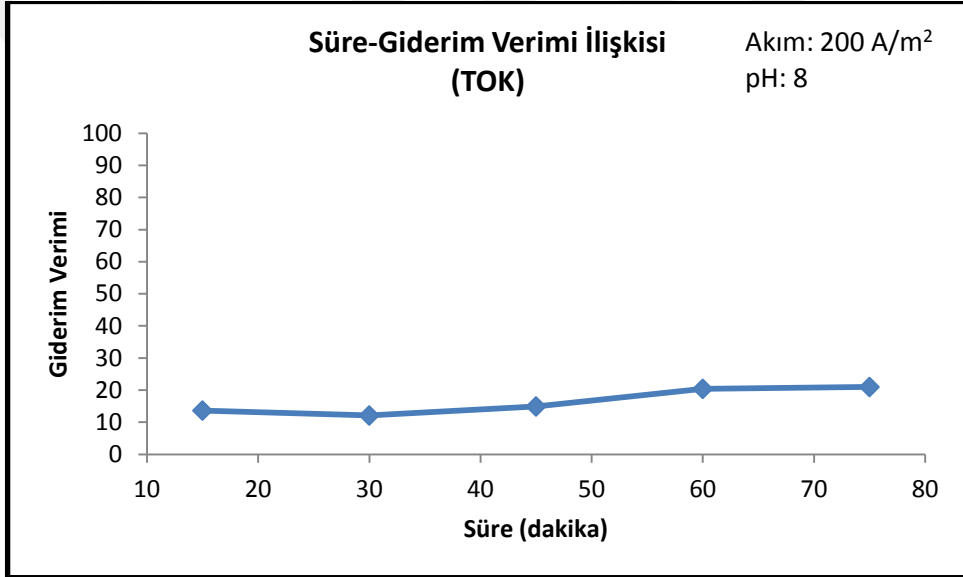
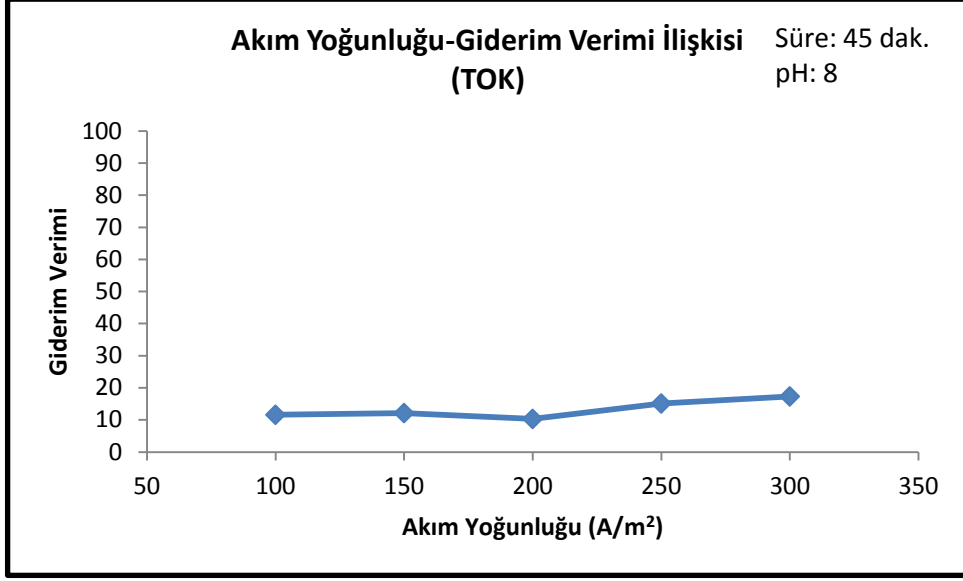
150 A/m², klorür için ise 100 A/m² olduğu görülmektedir. Diğer çalışma parametresi olan süre için ise optimum değerlerin sülfat ve klorür için sırasıyla 60 dk, 30 dk olduğu görülmektedir. Bütün bu çalışmalar neticesinde sırasıyla Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8'de verilen sülfat ve klorür sonuçlarına bakıldığında da; en yüksek sülfat giderim veriminin pH:8, akım yoğunluğu 150 A/m² ve EC süresi 45 dk çalışma şartlarında çok düşük olduğu görülürken; klorür için ise bu değerler pH:8, akım yoğunluğu 200 A/m² ve EC süresi 30 dk çalışma şartlarında da % 15'in altında kalmıştır. Ham atıksuyun klorür konsantrasyonu çıkış değerini sağlıyor olsa da klorür için % giderim verimini görmek amaçlı araştırma yapılmıştır. Sülfat için ise; elde edilen bu düşük giderim verimi sonucunda, çıkış konsantrasyon değerleri Çizelge 3.2'de verilmiş olan İSKİ deşarj standartlarını sağlayamamaktadır. Bu çalışma sonucunda sülfatın standartları sağlayacak şekilde giderilebilmesi için EC sonrasında ilave bir arıtma prosesine tabi tutulması gerektiği görülmüştür. İyonların gideriminde elektrodializ, ters osmoz gibi deiyonizasyon sistemleri kullanılmaktadır [63]. Sülfat ve klorür gibi iyonların gideriminde bu sistemlere ihtiyaç duyulmakta olup EC sistemlerinde emülsifiye maddeler, askıda katı maddeler ve koloidal maddeler kararlı hale getirilmektedir. Dolayısıyla iyonların giderilebilmesi için EC sonrasında deiyonizasyon sistemlerinden (elektrodializ, ters osmoz gibi) biri kullanılarak giderim verimlerinin arttırılacağı öngörülmektedir [64].

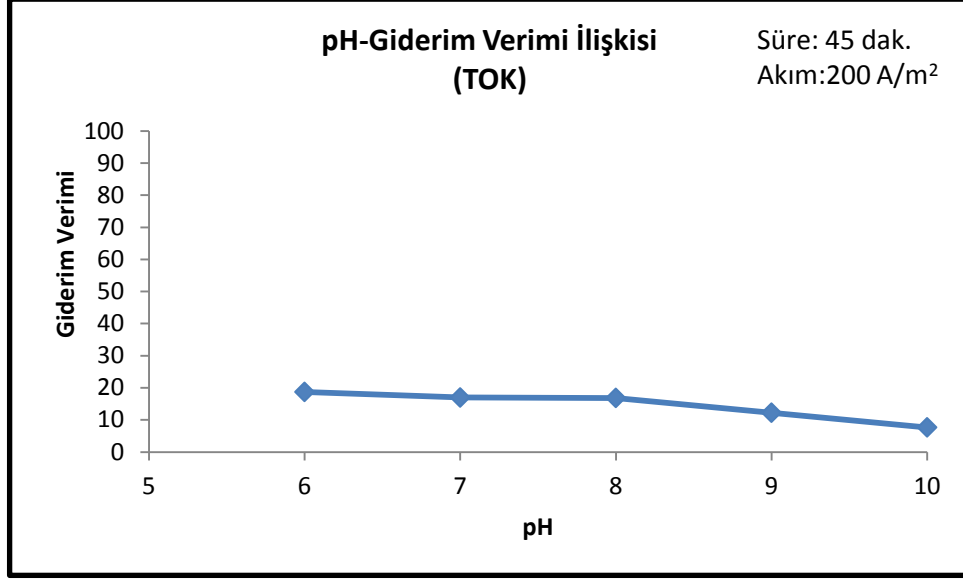
Çizelge 4.7 500 ml EC prosesi çalışması sülfat giderim sonuçları

SÜLFAT GİDERİMİ					
Akım yoğunluğu (A/m ²)	Amper (A)	pH	Süre (Dakika)	Giderim yüzdeleri (%)	Çıkış konsantrasyonu (mg/l)
100	0,8	8	45	3	3100
150	0,98	8	45	9	2900
200	1,6	8	45	8	2950
250	1,63	8	45	3	3100
300	2,4	8	45	3	3100
200	1,3	8	15	2	3150
200	1,6	8	30	5	3050
200	1,3	8	45	2	3150
200	1,6	8	60	6	3000
200	1,3	8	75	5	3050
200	1,6	6	45	5	3050
200	1,3	7	45	5	3050
200	1,6	8	45	8	2950
200	1,3	9	45	6	3000
200	1,6	10	45	8	2950
					HAM ATIKSU= 3200 mg/l

Çizelge 4.8 500 ml EC prosesi çalışması klorür giderim sonuçları

KLORÜR GİDERİMİ					
Akım yoğunluğu (A/m²)	Amper (A)	pH	Süre (Dakika)	Giderim yüzdeleri (%)	Çıkış konsantrasyonu (mg/l)
100	0,8	8	45	5	1000
150	0,98	8	45	5	1000
200	1,6	8	45	5	1000
250	1,63	8	45	5	1000
300	2,4	8	45	5	1000
200	1,3	8	15	2	1025
200	1,6	8	30	14	900
200	1,3	8	45	14	900
200	1,6	8	60	14	900
200	1,3	8	75	12	925
200	1,6	6	45	14	900
200	1,3	7	45	14	900
200	1,6	8	45	12	925
200	1,3	9	45	10	950
200	1,6	10	45	12	925
					HAM ATIKSU= 1050 mg/l





Şekil 4.8 500 ml EC prosesinde değişken parametrelere bağlı TOK giderim verimi

Metal endüstrisi atıksuyunda TOK parametresi için; 100, 150, 200, 250, 300 (A/m²) farklı akım yoğunluklarında, 6, 7, 8, 9, 10 farklı pH ve 15, 30, 45, 60, 75 (dakika) farklı sürelerde yapılan 500 ml'lik elektrokoagülasyon çalışmasında çalışma şartlarına bağlı olarak farklı verimler elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.8'e bakıldığında, TOK giderim veriminin uygulanan akım yoğunluğu, süre ve pH değerlerine bağlı olarak dalgalanma gösterdiği görülmektedir. TOK giderim verimleri için optimum şartlara bakacak olursak, pH parametresi için bu değer pH:6.0 olduğu görülmektedir. Akım yoğunluğu parametresi için incelendiğinde ise optimum akım yoğunluğu değerinin 300 A/m² olduğu görülmektedir. Diğer çalışma parametresi olan süre için ise optimum değer 75 dk olduğu görülmektedir. Bütün bu çalışmalar neticesinde Çizelge 4.9'da verilen TOK giderim sonuçlarına bakıldığında da; en yüksek TOK giderim veriminin pH:8.0, akım yoğunluğu 200 A/m² ve EC süresi 75 dk çalışma şartlarında % 21'lerde kaldığı ve çok düşük olduğu görülmektedir. TOK giderim verimleri ise değişken parametrelere bağlı olarak % 8 - % 21 aralarında kaldığı görülmüştür. EC prosesi bilindiği üzere metallerin, koloidal katıların, partiküllerin, çözülmüş inorganik kirleticilerin giderimini sağlar. Bunun yanında çözünebilir yada koloidal kirletici formları oluşan floklar üzerinde kısmen de olsa adsorblanarak giderilebilmektedir. TOK giderim verimliliği atıksuda bulunan güçlü oksitleyici ajanların (Cl⁻, O₃, OH⁻ gibi) bulunmasıyla daha iyi sağlanmaktadır. EC sonrası ozonlama yöntemi ile organik kirleticilerin giderim verimini önemli oranda arttırmak mümkündür.

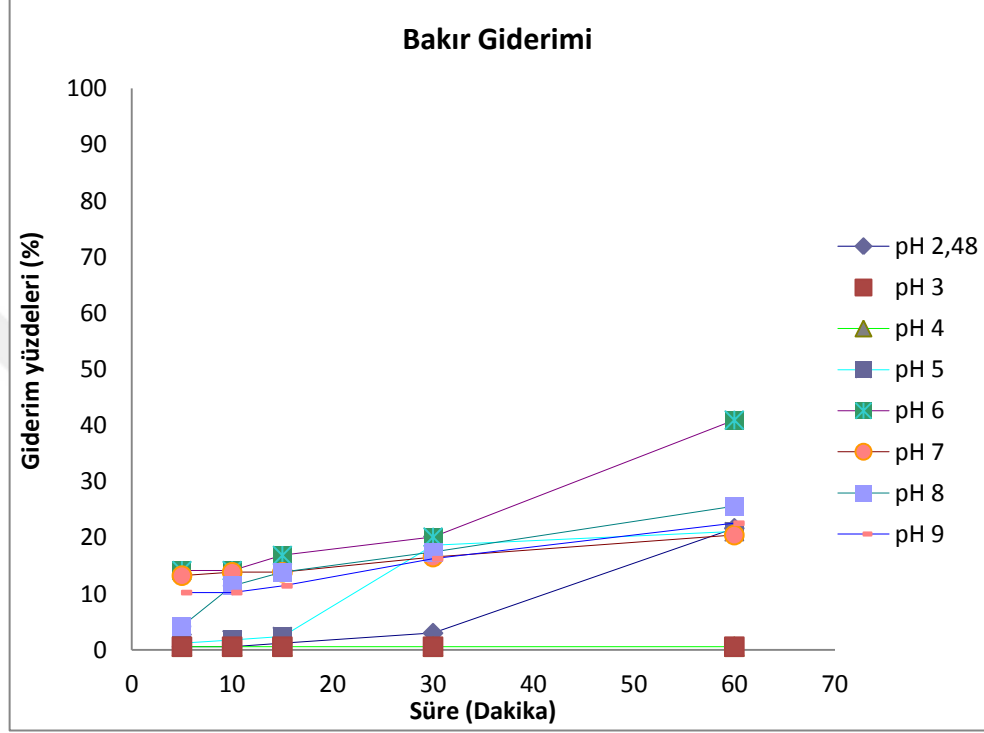
Elektrokoagülasyon prosesinin küçük bir bölümünde gerçekleşen elektrooksidasyon olayında; ortamda bulunan klor güçlü oksidant yapısı nedeniyle bazı organik bileşikler okside edebilir ve bu sebeple atıksu içerisinde bulunan klorür sayesinde bazı organik bileşiklerin giderilebildiği düşünülebilir. Ayrıca elektrokoagülasyon prosesi esnasında doğal olarak oluşan gaz çıkışı ile kısmen bir elektroflotasyon da gerçekleşmektedir. Gaz kabarcıklarının kirleticileri adsorbe ederek yüzeye çıkarması sonucu atıksuda partiküler halde bulunabilen KOI'nin bir kısmının giderildiği düşünülmektedir.



Çizelge 4.9 500 ml EC prosesi çalışması TOK giderim sonuçları

TOK GİDERİMİ					
Akım yoğunluğu (A/m ²)	Amper (A)	pH	Süre (Dakika)	Giderim yüzdeleri (%)	Çıkış konsantrasyonu (mg/l)
100	0,8	8	45	12	213,1
150	0,98	8	45	12	211,8
200	1,6	8	45	10	216,2
250	1,63	8	45	15	204,6
300	2,4	8	45	17	199,3
200	1,3	8	15	14	208,2
200	1,6	8	30	12	211,9
200	1,3	8	45	15	205,1
200	1,6	8	60	20	191,9
200	1,3	8	75	21	190,5
200	1,6	6	45	19	195,9
200	1,3	7	45	17	200,1
200	1,6	8	45	17	200,4
200	1,3	9	45	12	211,5
200	1,6	10	45	8	222,5
					HAM ATIKSU= 241 mg/l

Elektrokoagülasyon prosesinde Çizelge 3.4'te verilen 1 L'lik çalışmada 100 A/m^2 sabit akım yoğunluğunda, farklı sürelerde (dakika) ve farklı pH değerlerinde; bakır (Cu), çinko (Zn), demir (Fe), nikel (Ni), krom (Cr), klorür (Cl^-), sülfat (SO_4) ve TOK parametreleri için farklı giderim verimleri elde edilmiştir. Şekil 4.9'da bakır (Cu) için değişken parametrelere göre elde edilen verimler verilmiştir.

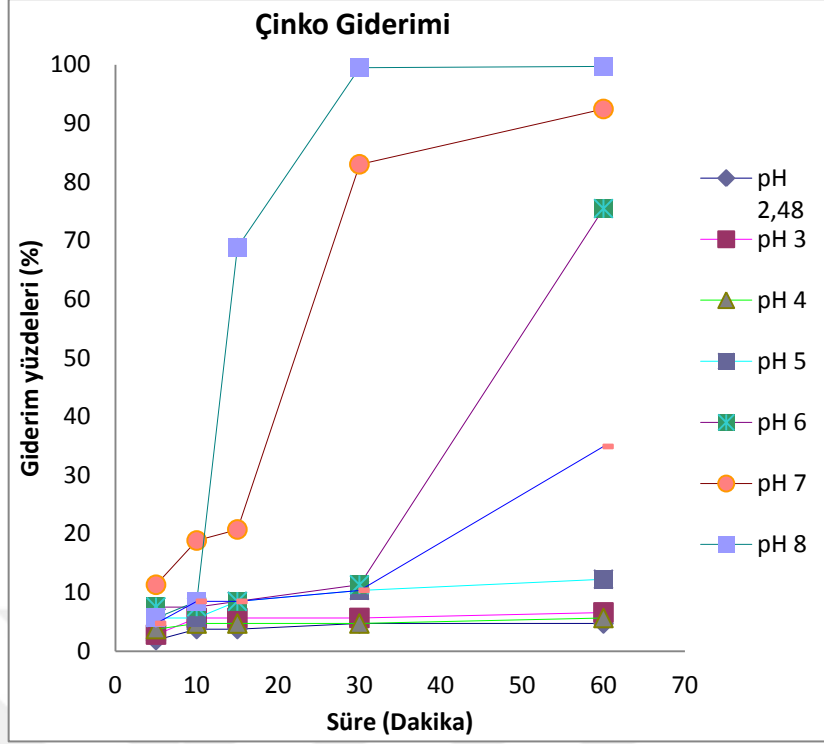


Şekil 4.9 1 L EC prosesinde değişken parametrelere bağlı Cu giderim verimi

Metal endüstrisi atıksuyunda bakır (Cu) parametresi için; 100 A/m^2 sabit akım yoğunluğunda, 2,48, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 farklı pH ve 5., 10., 15., 30., 60. dakikalarda alınan 40'ar ml'lik numunelerde yapılan 1 L'lik elektrokoagülasyon çalışmasında çalışma şartlarına bağlı olarak farklı verimler elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.9'a bakıldığında, Cu giderim verimi için optimum şarta bakılacak olursa sabit akım yoğunluğunda (100 A/m^2), pH:6.0 ve 60.dakikada % 40'a varan bir verim elde edilmiştir. Ancak, Çizelge 4.10'da da görüldüğü üzere elde edilen çıkış konsantrasyon değerleri Çizelge 3.2'de verilen İSKİ deşarj standartlarını sağlamamaktadır. Bu çalışma sonucunda bakır metalinin standartları sağlayacak şekilde giderilebilmesi için EC sonrasında ilave bir arıtma prosesine tabi tutulması gerektiği görülmüştür.

Çizelge 4.10 1 L EC prosesi çalışması Bakır giderim sonuçları

AMPER	pH	SÜRE (Dakika)	Cu GİDERİM YÜZDELERİ	ÇIKIŞ KONSANTRASYONU (mg/l)
1,2 Amper	2,48	5	0,60	16,5
	2,48	10	0,60	16,5
	2,48	15	1,20	16,4
	2,48	30	3,01	16,1
	2,48	60	21,69	13
1,2 Amper	3	5	0,60	16,5
	3	10	0,60	16,5
	3	15	0,60	16,5
	3	30	0,60	16,5
	3	60	0,60	16,5
1,1 Amper	4	5	0,60	16,5
	4	10	0,60	16,5
	4	15	0,60	16,5
	4	30	0,60	16,5
	4	60	0,60	16,5
1,2 Amper	5	5	1,20	16,4
	5	10	1,81	16,3
	5	15	2,41	16,2
	5	30	18,67	13,5
	5	60	21,08	13,1
1,1 Amper	6	5	14,16	14,25
	6	10	14,16	14,25
	6	15	16,87	13,8
	6	30	20,12	13,26
	6	60	40,96	9,8
1,2 Amper	7	5	13,25	14,4
	7	10	13,86	14,3
	7	15	13,86	14,3
	7	30	16,57	13,85
	7	60	20,48	13,2
1,1 Amper	8	5	4,22	15,9
	8	10	11,45	14,7
	8	15	13,86	14,3
	8	30	17,47	13,7
	8	60	25,60	12,35
1,2 Amper	9	5	10,24	14,9
	9	10	10,24	14,9
	9	15	11,45	14,7
	9	30	16,27	13,9
	9	60	22,59	12,85
				HAM ATIKSU= 16,6

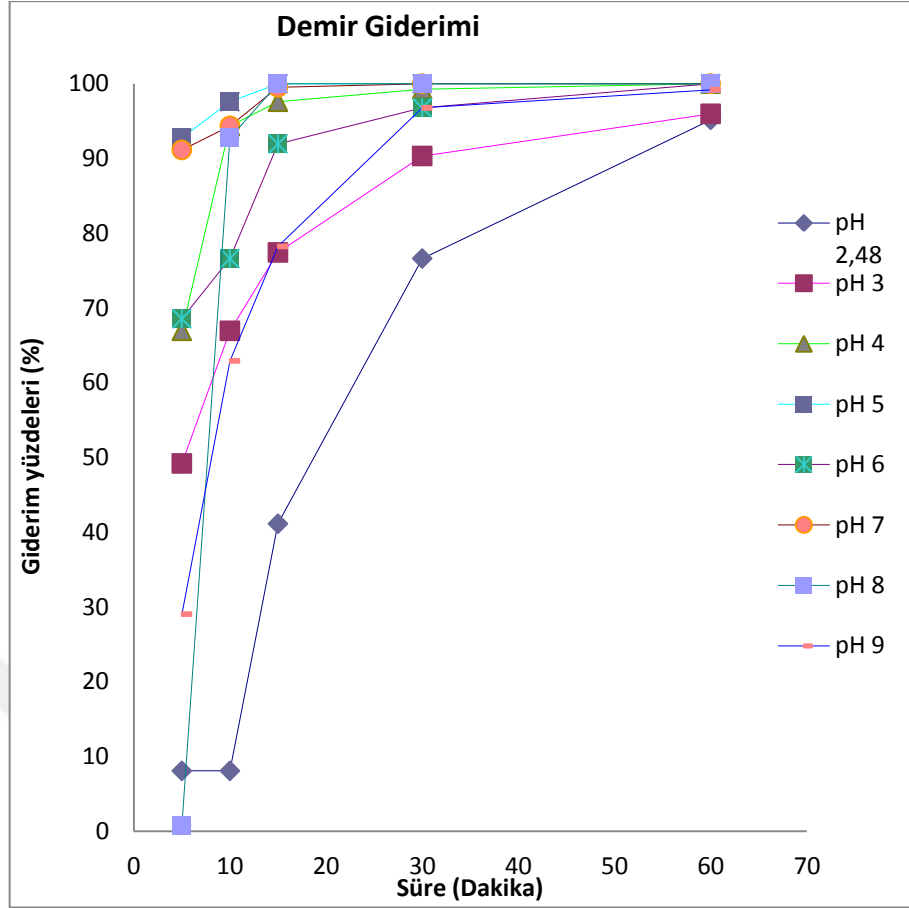


Şekil 4.10 1 L EC prosesinde değişken parametrelere bağlı Zn giderim verimi

Metal endüstrisi atıksuyunda çinko (Zn) parametresi için; 100 A/m² sabit akım yoğunluğunda, 2,48, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 farklı pH ve 5., 10., 15., 30., 60. dakikalarda alınan 40'ar ml'lik numunelerde yapılan 1 L'lik elektrokoagülasyon çalışmasında çalışma şartlarına bağlı olarak farklı verimler elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.10'a bakıldığında, Zn giderim verimi için optimum şarta bakılacak olursa sabit akım yoğunluğunda (100 A/m²), pH:8.0 ve 60.dakikada % 99'a varan bir verim elde edilmiştir. İSKİ deşarj standartlarına göre pH:3 10.dakikada Zn çıkış konsantrasyon değerlerini sağladığı görülmüş olup Çizelge 4.11'de görüldüğü üzere elde edilen bu giderim verim değerine bağlı çıkış konsantrasyon değerleri Çizelge 3.2'de verilen İSKİ Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği standartlarını sağlamaktadır.

Çizelge 4.11 1 L EC prosesi çalışması Çinko giderim sonuçları

AMPER	pH	SÜRE (Dakika)	Zn GİDERİM YÜZDELERİ	ÇIKIŞ KONSANTRASYONU (mg/l)
1,2 Amper	2,48	5	1,89	10,4
	2,48	10	3,77	10,2
	2,48	15	3,77	10,2
	2,48	30	4,72	10,1
	2,48	60	4,72	10,1
1,2 Amper	3	5	2,83	10,3
	3	10	5,66	10
	3	15	5,66	10
	3	30	5,66	10
	3	60	6,60	9,9
1,1 Amper	4	5	3,77	10,2
	4	10	4,72	10,1
	4	15	4,72	10,1
	4	30	4,72	10,1
	4	60	5,66	10
1,2 Amper	5	5	5,66	10
	5	10	5,66	10
	5	15	8,49	9,7
	5	30	10,38	9,5
	5	60	12,26	9,3
1,1 Amper	6	5	7,55	9,8
	6	10	7,55	9,8
	6	15	8,49	9,7
	6	30	11,32	9,4
	6	60	75,47	2,6
1,2 Amper	7	5	11,32	9,4
	7	10	18,87	8,6
	7	15	20,75	8,4
	7	30	83,02	1,8
	7	60	92,45	0,8
1,1 Amper	8	5	5,66	10
	8	10	8,49	9,7
	8	15	68,87	3,3
	8	30	99,53	0,05
	8	60	99,72	0,03
1,2 Amper	9	5	4,72	10,1
	9	10	8,49	9,7
	9	15	8,49	9,7
	9	30	10,38	9,5
	9	60	34,91	6,9
				HAM ATIKSU= 10,6

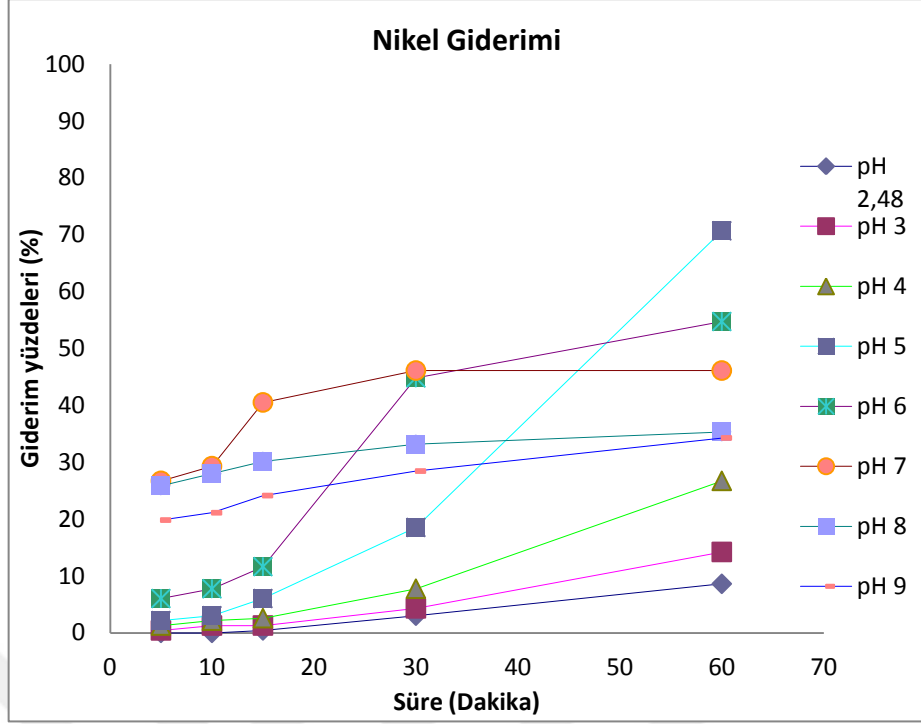


Şekil 4.11 1 L EC prosesinde değişken parametrelere bağlı Fe giderim verimi

Metal endüstrisi atıksuyunda demir (Fe) parametresi için; 100 A/m² sabit akım yoğunluğunda, 2,48, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 farklı pH ve 5., 10., 15., 30., 60. dakikalarda alınan 40'ar ml'lik numunelerde yapılan 1 L'lik elektrokoagülasyon çalışmasında çalışma şartlarına bağlı olarak farklı verimler elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.11'e bakıldığında, Fe giderim verimi için optimum şart araştırılacak olursa sabit akım yoğunluğunda (100 A/m²), pH:5.0 ve 15.dakikada % 100'e varan bir verim elde edilmiştir. Elde edilen giderim verim değerlerine bağlı çıkış konsantrasyon değerleri Çizelge 4.12'de verilmiştir. Ancak İSKİ Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği standartlarında Fe ile ilgili limit değer yer almamaktadır.

Çizelge 4.12 1 L EC prosesi çalışması Demir giderim sonuçları

AMPER	pH	SÜRE (Dakika)	Fe GİDERİM YÜZDELERİ	ÇIKIŞ KONSANTRASYONU (mg/l)
1,2 Amper	2,48	5	8,06	11,4
	2,48	10	8,06	11,4
	2,48	15	41,13	7,3
	2,48	30	76,61	2,9
	2,48	60	95,16	0,6
1,2 Amper	3	5	49,19	6,3
	3	10	66,94	4,1
	3	15	77,42	2,8
	3	30	90,32	1,2
	3	60	95,97	0,5
1,1 Amper	4	5	66,94	4,1
	4	10	94,35	0,7
	4	15	97,58	0,3
	4	30	99,27	0,09
	4	60	100,00	<0,03
1,2 Amper	5	5	92,74	0,9
	5	10	97,58	0,3
	5	15	100,00	<0,03
	5	30	100,00	<0,03
	5	60	100,00	<0,03
1,1 Amper	6	5	68,55	3,9
	6	10	76,61	2,9
	6	15	91,94	1
	6	30	96,77	0,4
	6	60	100,00	<0,03
1,2 Amper	7	5	91,13	1,1
	7	10	94,35	0,7
	7	15	99,52	0,06
	7	30	100,00	<0,03
	7	60	100,00	<0,03
1,1 Amper	8	5	0,81	12,3
	8	10	92,74	0,9
	8	15	100,00	<0,03
	8	30	100,00	<0,03
	8	60	100,00	<0,03
1,2 Amper	9	5	29,03	8,8
	9	10	62,90	4,6
	9	15	78,23	2,7
	9	30	96,77	0,4
	9	60	99,19	0,1
				HAM ATIKSU= 12,4

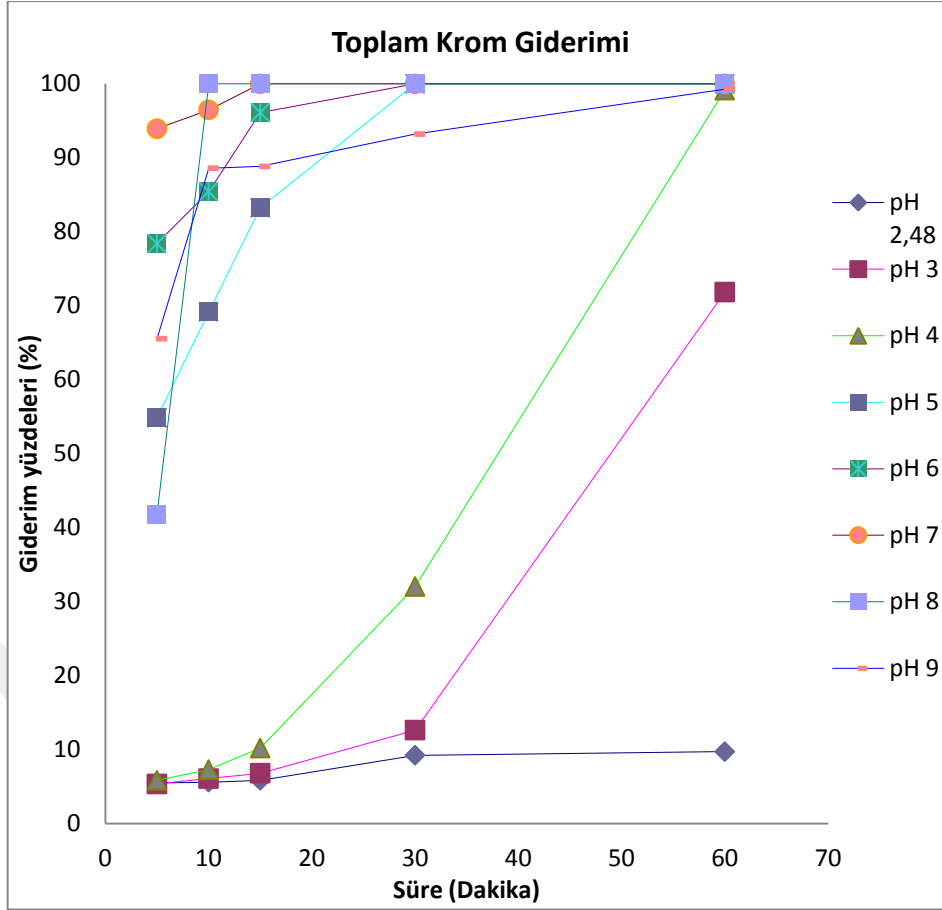


Şekil 4.12 1 L EC prosesinde değişken parametrelere bağlı Ni giderim verimi

Metal endüstrisi atıksuyunda nikel (Ni) parametresi için; 100 A/m² sabit akım yoğunluğunda, 2,48, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 farklı pH ve 5., 10., 15., 30., 60. dakikalarda alınan 40'ar ml'lik numunelerde yapılan 1 L'lik elektrokoagülasyon çalışmasında çalışma şartlarına bağlı olarak farklı verimler elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.12'ye bakıldığında, Ni giderim verimi için optimum şart araştırılacak olursa sabit akım yoğunluğunda (100 A/m²), pH:5.0 ve 60.dakikada % 70'e varan bir verim elde edilmiştir. Ancak, elde edilen bu giderim verim değerine rağmen, Çizelge 4.13'te de görüldüğü üzere, çıkış konsantrasyon değerleri Çizelge 3.2'de verilen İSKİ deşarj standartlarını sağlamamaktadır. Bu çalışma sonucunda nikel metalinin standartları sağlayacak şekilde giderilebilmesi için EC sonrasında ilave bir arıtma prosesine tabi tutulması gerektiği görülmüştür.

Çizelge 4.13 1 L EC prosesi çalışması Nikel giderim sonuçları

AMPER	pH	SÜRE (Dakika)	Ni GİDERİM YÜZDELERİ	ÇIKIŞ KONSANTRASYONU (mg/l)
1,2 Amper	2,48	5	0,00	23,2
	2,48	10	0,00	23,2
	2,48	15	0,43	23,1
	2,48	30	3,02	22,5
	2,48	60	8,62	21,2
1,2 Amper	3	5	0,43	23,1
	3	10	1,29	22,9
	3	15	1,29	22,9
	3	30	4,31	22,2
	3	60	14,22	19,9
1,1 Amper	4	5	1,29	22,9
	4	10	2,16	22,7
	4	15	2,59	22,6
	4	30	7,76	21,4
	4	60	26,72	17
1,2 Amper	5	5	2,16	22,7
	5	10	3,02	22,5
	5	15	6,03	21,8
	5	30	18,53	18,9
	5	60	70,69	6,8
1,1 Amper	6	5	6,03	21,8
	6	10	7,76	21,4
	6	15	11,64	20,5
	6	30	44,83	12,8
	6	60	54,74	10,5
1,2 Amper	7	5	26,72	17
	7	10	29,31	16,4
	7	15	40,52	13,8
	7	30	46,12	12,5
	7	60	46,12	12,5
1,1 Amper	8	5	25,86	17,2
	8	10	28,02	16,7
	8	15	30,17	16,2
	8	30	33,19	15,5
	8	60	35,34	15
1,2 Amper	9	5	19,83	18,6
	9	10	21,12	18,3
	9	15	24,14	17,6
	9	30	28,45	16,6
	9	60	34,27	15,25
				HAM ATIKSU= 23,2

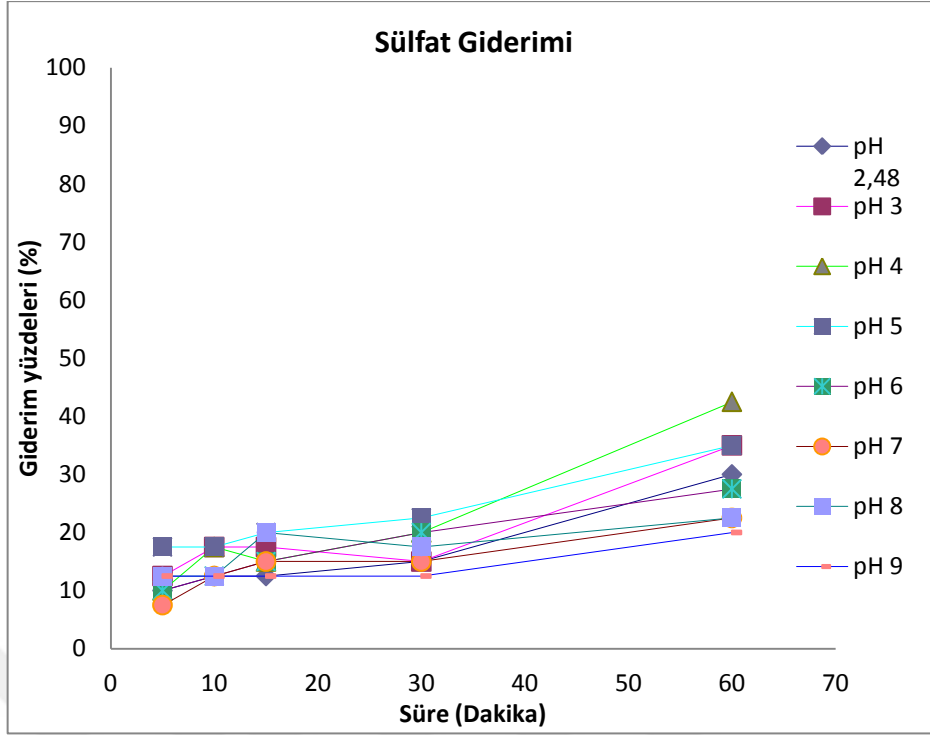


Şekil 4.13 1 L EC prosesinde değişken parametrelere bağlı Toplam Cr giderim verimi

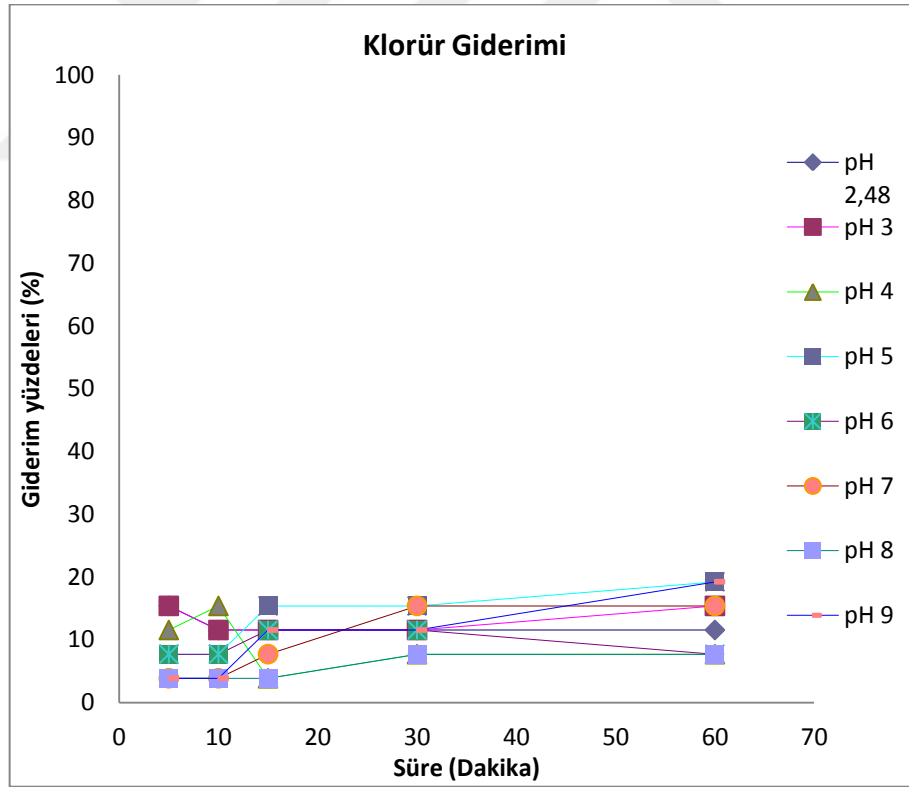
Metal endüstrisi atıksuyunda toplam krom (Cr) parametresi için; 100 A/m^2 sabit akım yoğunluğunda, 2,48, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 farklı pH ve 5., 10., 15., 30., 60. dakikalarda alınan 40'ar ml'lik numunelerde yapılan 1 L'lik elektrokoagülasyon çalışmasında çalışma şartlarına bağlı olarak farklı verimler elde edildiği görülmektedir. pH değişikliklerine bağlı olarak EC süresi uzadıkça Cr giderim veriminin de artış gösterdiği görülmüştür. Şekil 4.13'e bakıldığında, Cr giderim verimi için optimum şart araştırılacak olursa sabit akım yoğunluğunda (100 A/m^2), pH:5.0 ve 15.dakikada % 83'e varan bir verim elde edilmiştir. Elde edilen bu giderim verim değerine bağlı çıkış konsantrasyon değerleri Çizelge 3.2'de verilen İSKİ Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği standartlarını sağlamaktadır. Çizelge 4.14'te krom giderim verimi ile çıkış konsantrasyon değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.14 1 L EC prosesi çalışması Krom giderim sonuçları

AMPER	pH	SÜRE (Dakika)	Cr GİDERİM YÜZDELERİ	ÇIKIŞ KONSANTRASYONU (mg/l)
1,2 Amper	2,48	5	5,46	38,95
	2,48	10	5,58	38,9
	2,48	15	5,83	38,8
	2,48	30	9,22	37,4
	2,48	60	9,71	37,2
1,2 Amper	3	5	5,34	39
	3	10	6,07	38,7
	3	15	6,80	38,4
	3	30	12,62	36
	3	60	71,84	11,6
1,1 Amper	4	5	5,83	38,8
	4	10	7,28	38,2
	4	15	10,19	37
	4	30	32,04	28
	4	60	99,15	0,35
1,2 Amper	5	5	54,85	18,6
	5	10	69,17	12,7
	5	15	83,25	6,9
	5	30	100,00	<0,2
	5	60	100,00	<0,2
1,1 Amper	6	5	78,40	8,9
	6	10	85,44	6
	6	15	96,12	1,6
	6	30	100,00	<0,2
	6	60	100,00	<0,2
1,2 Amper	7	5	93,93	2,5
	7	10	96,48	1,45
	7	15	100,00	<0,2
	7	30	100,00	<0,2
	7	60	100,00	<0,2
1,1 Amper	8	5	41,75	24
	8	10	100,00	<0,2
	8	15	100,00	<0,2
	8	30	100,00	<0,2
	8	60	100,00	<0,2
1,2 Amper	9	5	65,53	14,2
	9	10	88,59	4,7
	9	15	88,83	4,6
	9	30	93,20	2,8
	9	60	99,27	0,3
				HAM ATIKSU= 41,2



Şekil 4.14 1 L EC prosesinde değişken parametrelere bağlı SO_4^{-2} giderim verimi



Şekil 4.15 1 L EC prosesinde değişken parametrelere bağlı Cl^- giderim verimi

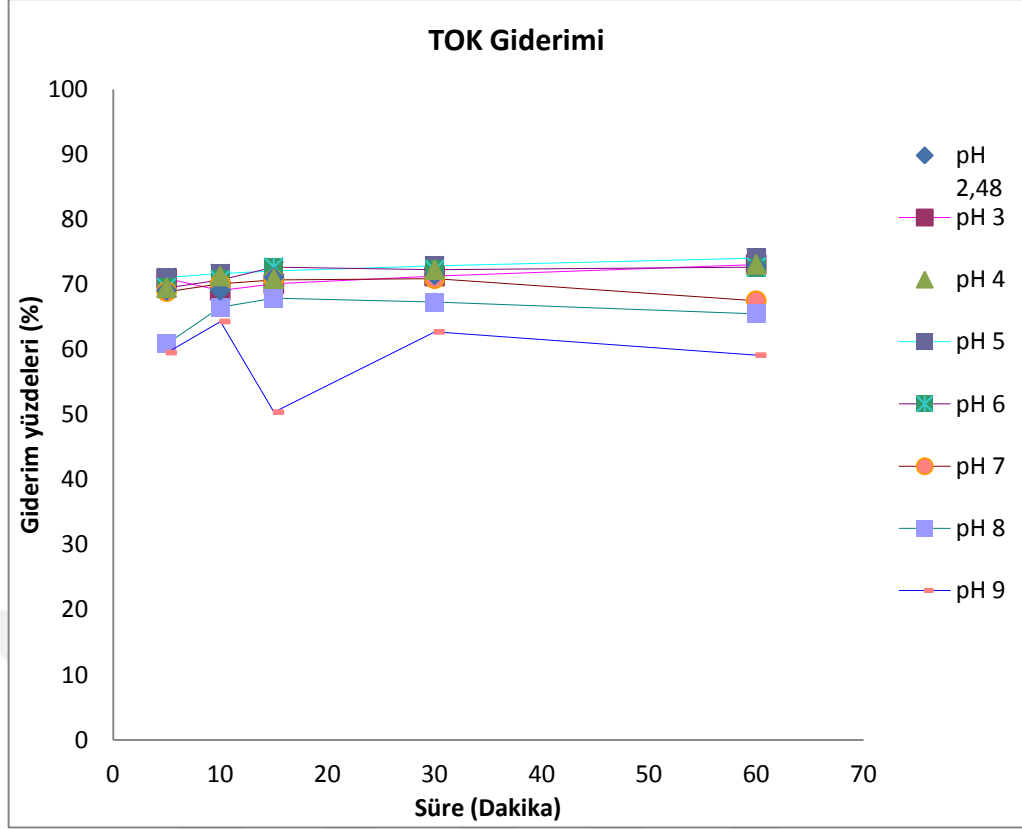
Metal endüstrisi atıksuyunda sülfat ve klorür (SO_4^{2-} ve Cl^-) parametreleri için; 100 A/m^2 sabit akım yoğunluğunda, 2,48, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 farklı pH ve 5., 10., 15., 30., 60. dakikalarda alınan 40'ar ml'lik numunelerde yapılan 1 L'lik elektrokoagülasyon çalışmasında çalışma şartlarına bağlı olarak farklı verimler elde edildiği görülmektedir. Bunun yanı sıra; Şekil 4.14'e bakıldığında, SO_4^{2-} giderim verimi için optimum şart araştırılacak olursa sabit akım yoğunluğunda (100 A/m^2) pH:3 ve 10.dakikada % 18'e varan bir verim elde edilmiştir. SO_4^{2-} için elde edilen bu giderim verim değeri ve ham atıksuda bulunan SO_4^{2-} konsantrasyonunun İSKİ deşarj standartları konsantrasyonuna yakın olması neticesinde, Çizelge 4.15'te de görüldüğü üzere SO_4^{2-} için çıkış konsantrasyon değeri Çizelge 3.2'de verilmiş olan İSKİ deşarj standartını sağlamaktadır. Şekil 4.15'e bakıldığında, Cl^- giderim verimi için optimum şart araştırılacak olursa sabit akım yoğunluğunda en fazla giderimin (100 A/m^2) pH:5 ve 60.dakikada % 19'larda olduğu gözlenmiştir. Ham atıksuyun klorür konsantrasyonu çıkış değerini sağlıyor olsa da klorür için % giderim verimini görmek amaçlı araştırma yapılmıştır. Çizelge 4.16'da klorür için çıkış konsantrasyon değerleri ve giderim verimleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.15 1 L EC prosesi çalışması Sülfat giderim sonuçları

AMPER	pH	SÜRE (Dakika)	So ₄ ²⁻ GİDERİM YÜZDELERİ	ÇIKIŞ KONSANTRASYONU (mg/l)
1,2 Amper	2,48	5	10	1800
	2,48	10	12,5	1750
	2,48	15	12,5	1750
	2,48	30	15	1700
	2,48	60	30	1400
1,2 Amper	3	5	12,5	1750
	3	10	17,5	1650
	3	15	17,5	1650
	3	30	15	1700
	3	60	35	1300
1,1 Amper	4	5	10	1800
	4	10	17,5	1650
	4	15	15	1700
	4	30	20	1600
	4	60	42,5	1150
1,2 Amper	5	5	17,5	1650
	5	10	17,5	1650
	5	15	20	1600
	5	30	22,5	1550
	5	60	35	1300
1,1 Amper	6	5	10	1800
	6	10	12,5	1750
	6	15	15	1700
	6	30	20	1600
	6	60	27,5	1450
1,2 Amper	7	5	7,5	1850
	7	10	12,5	1750
	7	15	15	1700
	7	30	15	1700
	7	60	22,5	1550
1,1 Amper	8	5	12,5	1750
	8	10	12,5	1750
	8	15	20	1600
	8	30	17,5	1650
	8	60	22,5	1550
1,2 Amper	9	5	12,5	1750
	9	10	12,5	1750
	9	15	12,5	1750
	9	30	12,5	1750
	9	60	20	1600
				HAM ATIKSU= 2000

Çizelge 4.16 1 L EC prosesi çalışması Klorür giderim sonuçları

AMPER	pH	SÜRE (Dakika)	Cl ⁻ GİDERİM YÜZDELERİ	ÇIKIŞ KONSANTRASYONU (mg/l)
1,2 Amper	2,48	5	15,38	733,11
	2,48	10	11,54	766,43
	2,48	15	11,54	766,43
	2,48	30	11,54	766,43
	2,48	60	11,54	766,43
1,2 Amper	3	5	15,38	733,11
	3	10	11,54	766,43
	3	15	11,54	766,43
	3	30	11,54	766,43
	3	60	15,38	733,11
1,1 Amper	4	5	11,54	766,43
	4	10	15,38	733,11
	4	15	3,85	833,08
	4	30	7,69	799,75
	4	60	7,69	799,75
1,2 Amper	5	5	7,69	799,75
	5	10	7,69	799,75
	5	15	15,38	733,11
	5	30	15,38	733,11
	5	60	19,23	699,78
1,1 Amper	6	5	7,69	799,75
	6	10	7,69	799,75
	6	15	11,54	766,43
	6	30	11,54	766,43
	6	60	7,69	799,75
1,2 Amper	7	5	3,85	833,08
	7	10	3,85	833,08
	7	15	7,69	799,75
	7	30	15,38	733,11
	7	60	15,38	733,11
1,1 Amper	8	5	3,85	833,08
	8	10	3,85	833,08
	8	15	3,85	833,08
	8	30	7,69	799,75
	8	60	7,69	799,75
1,2 Amper	9	5	3,85	833,08
	9	10	3,85	833,08
	9	15	11,54	766,43
	9	30	11,54	766,43
	9	60	19,23	699,78
				HAM ATIKSU= 866,40



Şekil 4.16 1 L EC prosesinde değişken parametrelere bağlı TOK giderim verimi

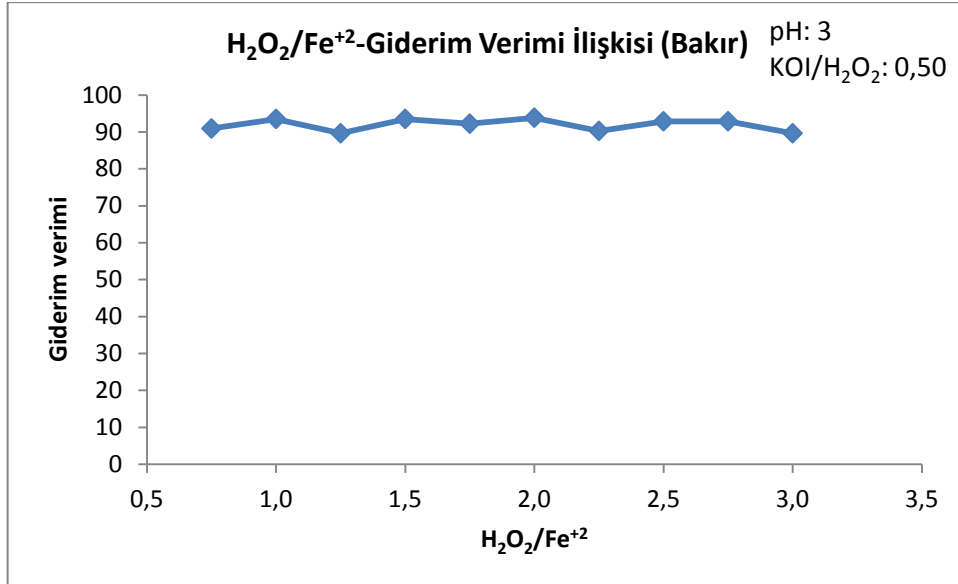
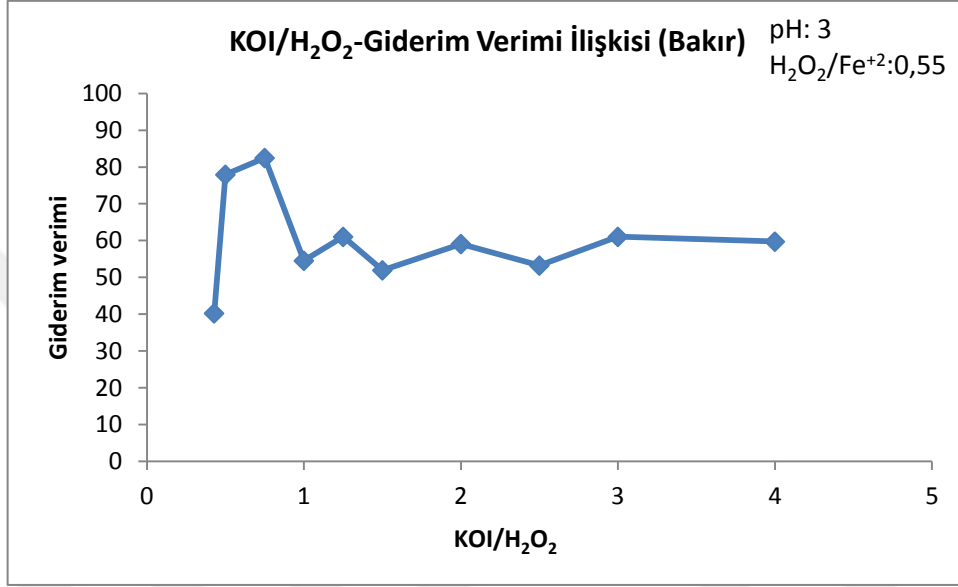
Metal endüstrisi atıksuyunda TOK parametresi için; 100 A/m^2 sabit akım yoğunluğunda, 2,48, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 farklı pH ve 5., 10., 15., 30., 60. dakikalarda alınan 40'ar ml'lik numunelerde yapılan 1 L'lik elektrokoagülasyon çalışmasında çalışma şartlarına bağlı olarak farklı verimler elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.16'ya bakıldığında, TOK giderim verimi için optimum şarta bakılacak olursa sabit akım yoğunluğunda (100 A/m^2) pH:5.0 ve 60.dakikada % 74'e varan bir verim elde edilmiştir. Genel itibariyle süre arttıkça TOK giderim veriminin de arttığı gözlenmiş olup giderim veriminin değişken parametrelere bağlı olarak % 59 - % 74 aralarında kaldığı görülmüştür. TOK giderim sonuçları ayrıntılı olarak Çizelge 4.17'de verilmiştir.

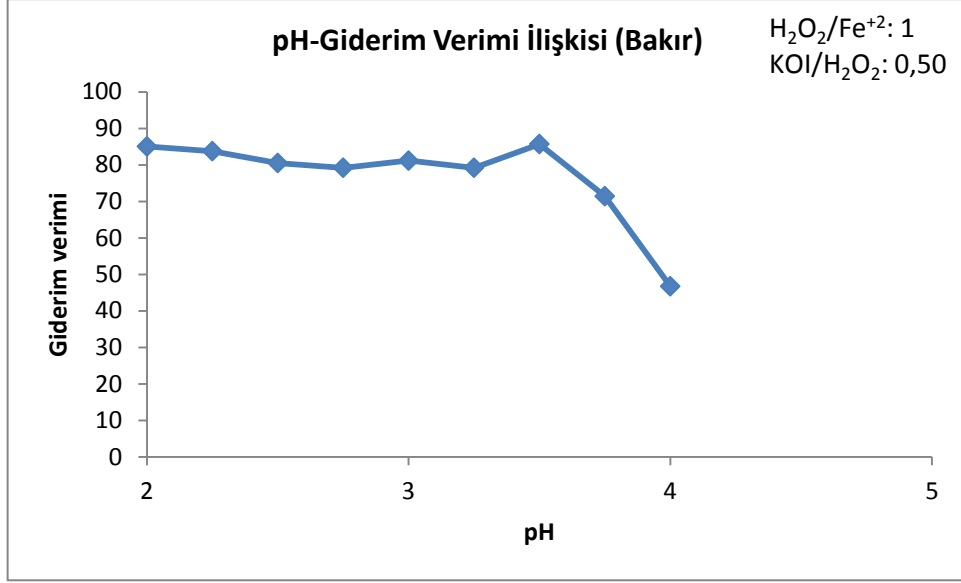
Çizelge 4.17 1 L EC prosesi çalışması TOK giderim sonuçları

AMPER	pH	SÜRE (Dakika)	TOK GİDERİM YÜZDELERİ	ÇIKIŞ KONSANTRASYONU (mg/l)
1,2 Amper	2,48	5	69,12	155
	2,48	10	69,12	155
	2,48	15	71,12	145
	2,48	30	71,51	143
	2,48	60	72,91	136
1,2 Amper	3	5	70,92	146
	3	10	69,12	155
	3	15	70,12	150
	3	30	71,31	144
	3	60	73,11	135
1,1 Amper	4	5	69,52	153
	4	10	71,31	144
	4	15	70,92	146
	4	30	72,31	139
	4	60	73,11	135
1,2 Amper	5	5	71,12	145
	5	10	71,71	142
	5	15	72,11	140
	5	30	72,91	136
	5	60	74,10	130
1,1 Amper	6	5	69,52	153
	6	10	70,72	147
	6	15	72,71	137
	6	30	72,31	139
	6	60	72,71	137
1,2 Amper	7	5	68,92	156
	7	10	70,12	150
	7	15	70,72	147
	7	30	70,92	146
	7	60	67,53	163
1,1 Amper	8	5	60,96	196
	8	10	66,53	168
	8	15	67,93	161
	8	30	67,33	164
	8	60	65,54	173
1,2 Amper	9	5	59,56	203
	9	10	64,34	179
	9	15	50,40	249
	9	30	62,75	187
	9	60	59,16	205
				HAM ATIKSU= 502

4.2 Fenton için Bulgular

Fenton prosesinde Çizelge 3.5'te verilen 500 ml'lik çalışmada farklı akımlarda (A), farklı pH değerlerinde, farklı H_2O_2 ve Fe^{+2} miktarlarında (ml); bakır (Cu), çinko (Zn), demir (Fe), nikel (Ni), krom (Cr), klorür (Cl^-), sülfat (SO_4) ve TOK parametreleri için farklı giderim verimleri elde edilmiştir. Şekil 4.17'de bakır (Cu) için değişken parametrelere göre elde edilen verimler verilmiştir.



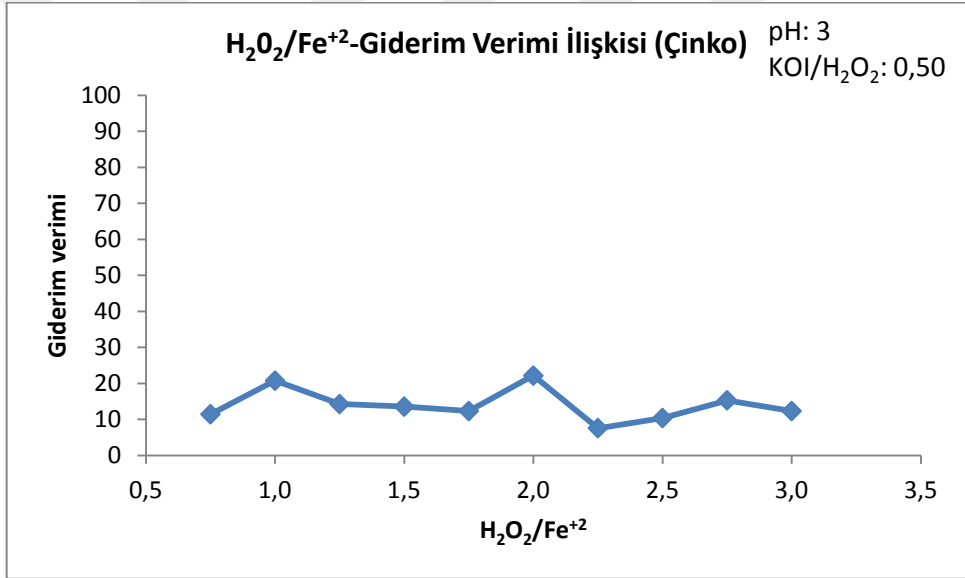
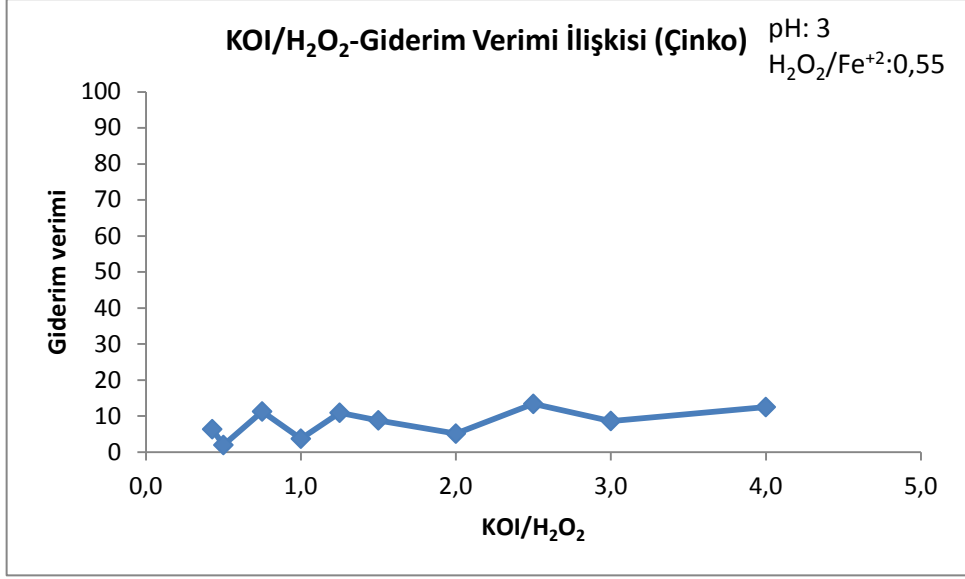


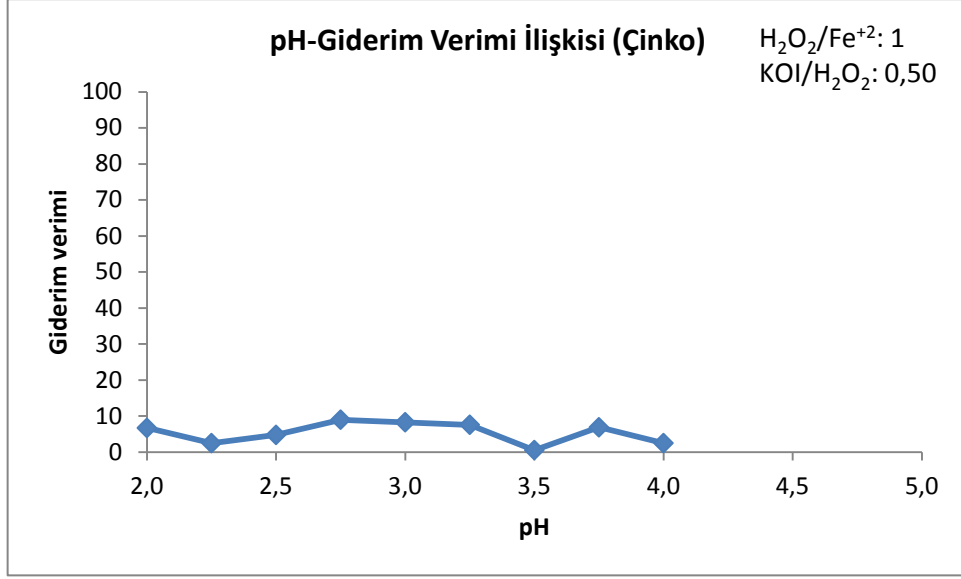
Şekil 4.17 500 ml Fenton prosesinde değişken parametrelere bağlı Cu giderim verimi

Metal endüstrisi atıksuyunda Fenton prosesi çalışmalarında bakır (Cu) parametresi için; Çizelge 3.5'te verildiği gibi 0,43, 0,50, 0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 2,00, 2,50, 3,00 ve 4,00 farklı COD/ H_2O_2 oranlarında, farklı H_2O_2/Fe^{2+} :0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 1,75, 2,00, 2,25, 2,50, 2,75 ve 3,00 oranlarında ve farklı pH:2,00, 2,25, 2,50, 2,75, 3,00, 3,25, 3,50 ve 3,75 değerlerinde 500 ml'lik Fenton çalışmasında çalışma şartlarına bağlı olarak farklı verimler elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.17'ye bakıldığında, Cu giderim veriminin KOI/ H_2O_2 oranına bağlı olarak dalgalanma gösterdiği ve optimum şartın 0,75 değeri için % 80'lerde giderim verimi elde edildiği görülmüştür. Diğer değişken parametreler için ise optimum şartlar; H_2O_2/Fe^{2+} :1.00 için % 94'lerde ve pH:3,50 için % 86'larda sağlandığı görülmektedir. Bununla birlikte KOI/ H_2O_2 : 0,50, H_2O_2/Fe^{2+} :2,00 ve pH: 3 değerlerinde optimum şart sağlanmış olup çıkış konsantrasyon değerleri Çizelge 3.2'de verilen İSKİ Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği standartlarını sağladığı görülmüştür. Çizelge 4.18'de fenton prosesinde bakır için elde edilen çıkış konsantrasyonları ve giderim verimleri detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 4.18 Fenton prosesi çalışması Bakır giderim sonuçları

Çalışmalar	KOI/H ₂ O ₂	H ₂ O ₂ / Fe ⁺²	pH	KOI sample	H ₂ O ₂ (ml)	Fe ⁺² (ml)	Cu (mg/L)	Cu (%)
0	-	-	-	-	-	-	-	-
1	0,43	0,55	3,00	300	2,10	16,14	46,00	40
2	0,50	0,55	3,00	300	1,80	13,82	17,00	78
3	0,75	0,55	3,00	300	1,20	9,21	13,50	82
4	1,00	0,55	3,00	300	0,90	6,91	35,00	55
5	1,25	0,55	3,00	300	0,72	5,53	30,00	61
6	1,50	0,55	3,00	300	0,60	4,61	37,00	52
7	2,00	0,55	3,00	300	0,45	3,45	31,50	59
8	2,50	0,55	3,00	300	0,36	2,76	36,00	53
9	3,00	0,55	3,00	300	0,30	2,30	30,00	61
10	4,00	0,55	3,00	300	0,23	1,73	31,00	60
11	0,50	0,75	3,00	300	1,80	10,13	7,00	91
12	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	5,00	94
13	0,50	1,25	3,00	300	1,80	6,08	8,00	90
14	0,50	1,50	3,00	300	1,80	5,07	5,00	94
15	0,50	1,75	3,00	300	1,80	4,34	6,00	92
16	0,50	2,00	3,00	300	1,80	3,80	4,75	94
17	0,50	2,25	3,00	300	1,80	3,38	7,50	90
18	0,50	2,50	3,00	300	1,80	3,04	5,50	93
19	0,50	2,75	3,00	300	1,80	2,76	5,50	93
20	0,50	3,00	3,00	300	1,80	2,53	8,00	90
21	0,50	1,00	2,00	300	1,80	7,60	11,50	85
22	0,50	1,00	2,25	300	1,80	7,60	12,50	84
23	0,50	1,00	2,50	300	1,80	7,60	15,00	81
24	0,50	1,00	2,75	300	1,80	7,60	16,00	79
25	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	14,50	81
26	0,50	1,00	3,25	300	1,80	7,60	16,00	79
27	0,50	1,00	3,50	300	1,80	7,60	11,00	86
28	0,50	1,00	3,75	300	1,80	7,60	22,00	71
29	0,50	1,00	4,00	300	1,80	7,60	41,00	47
30	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	22,50	71
31	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	13,00	83
32	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	12,00	84
						HAM ATIKSU	77 mg/l	



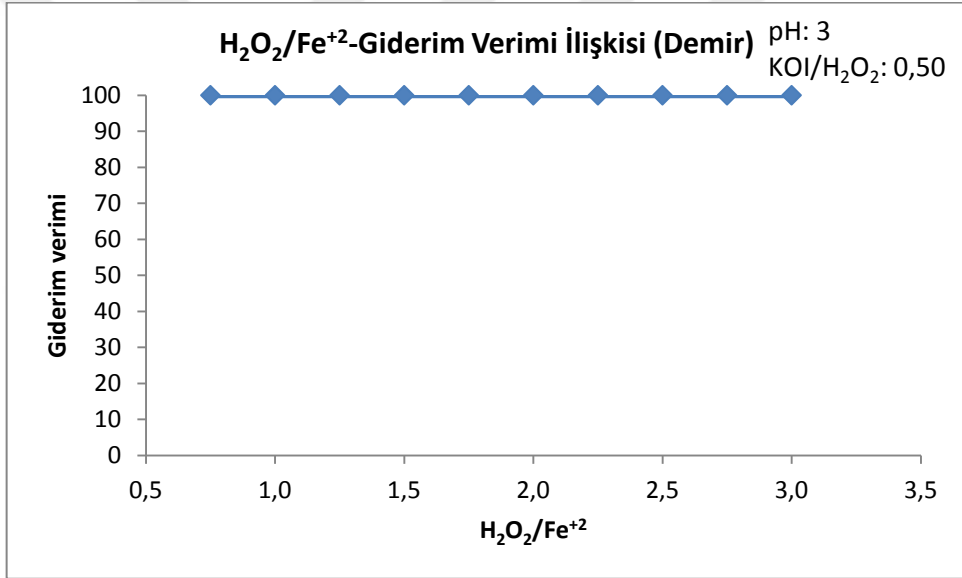
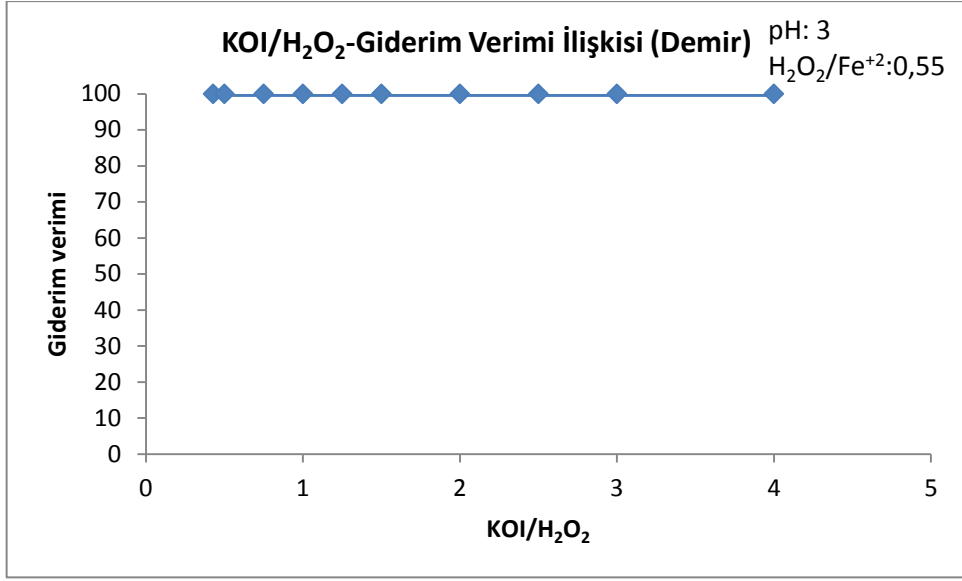


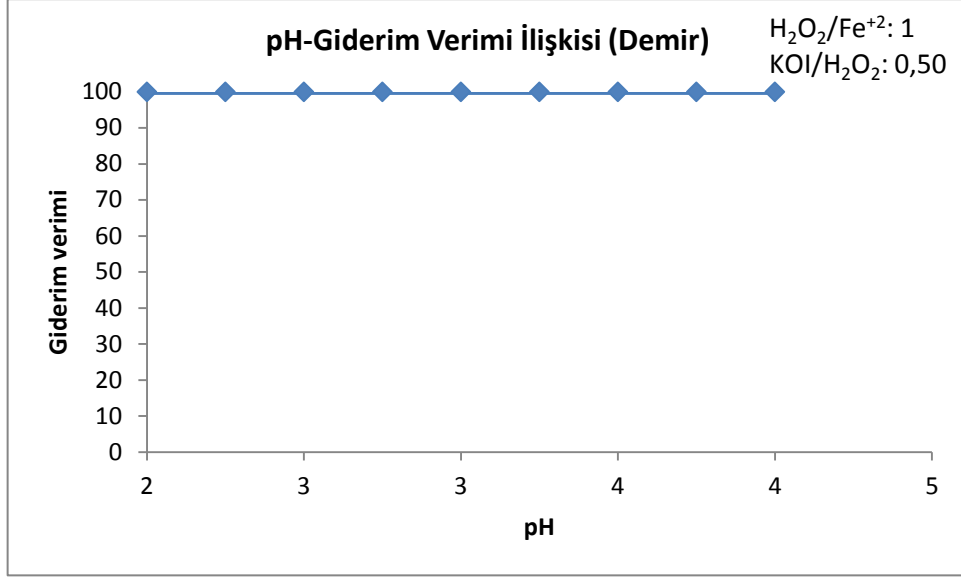
Şekil 4.18 500 ml Fenton prosesinde değişken parametrelere bağlı Zn giderim verimi

Metal endüstrisi atıksuyunda Fenton prosesi çalışmalarında çinko (Zn) parametresi için; Çizelge 3.5'te verildiği gibi 0,43, 0,50, 0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 2,00, 2,50, 3,00 ve 4,00 farklı COD/ H_2O_2 oranlarında, farklı H_2O_2/Fe^{2+} :0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 1,75, 2,00, 2,25, 2,50, 2,75 ve 3,00 oranlarında ve farklı pH:2,00, 2,25, 2,50, 2,75, 3,00, 3,25, 3,50 ve 3,75 değerlerinde 500 ml'lik Fenton çalışmasında çalışma şartlarına bağlı olarak farklı verimler elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.18'e bakıldığında, Zn giderim veriminin KOI/ H_2O_2 oranına bağlı olarak keskin dalgalanmalar gösterdiği ve optimum şartın 2,50 değeri için % 13'lerde giderim verimi elde edildiği görülmüştür. Diğer değişken parametreler için ise optimum şartlar; H_2O_2/Fe^{2+} :2,00 için % 22'lerde ve pH:2,75 için % 9'larda sağlandığı görülmektedir. Bununla birlikte KOI/ H_2O_2 : 0,50, H_2O_2/Fe^{2+} :2,00 ve pH: 3 değerlerinde optimum şart sağlanmış olup çıkış konsantrasyon değerleri Çizelge 3.2'de verilen İSKİ Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği standartlarını sağlamadığı görülmektedir. Çizelge 4.19'da fenton prosesinde çinko için elde edilen çıkış konsantrasyonları ve giderim verimleri detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 4.19 Fenton prosesi çalışması Çinko giderim sonuçları

Çalışmalar	KOI/H ₂ O ₂	H ₂ O ₂ / Fe ⁺²	pH	KOI sample	H ₂ O ₂ (ml)	Fe ⁺² (ml)	Zn (mg/L)	Zn (%)
0	-	-	-	-	-	-	-	-
1	0,43	0,55	3,00	300	2,10	16,14	266,50	6
2	0,50	0,55	3,00	300	1,80	13,82	279,00	2
3	0,75	0,55	3,00	300	1,20	9,21	252,50	11
4	1,00	0,55	3,00	300	0,90	6,91	274,00	4
5	1,25	0,55	3,00	300	0,72	5,53	253,50	11
6	1,50	0,55	3,00	300	0,60	4,61	259,50	9
7	2,00	0,55	3,00	300	0,45	3,45	270,00	5
8	2,50	0,55	3,00	300	0,36	2,76	246,50	13
9	3,00	0,55	3,00	300	0,30	2,30	260,00	9
10	4,00	0,55	3,00	300	0,23	1,73	249,00	12
11	0,50	0,75	3,00	300	1,80	10,13	252,00	11
12	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	225,50	21
13	0,50	1,25	3,00	300	1,80	6,08	244,00	14
14	0,50	1,50	3,00	300	1,80	5,07	246,00	14
15	0,50	1,75	3,00	300	1,80	4,34	249,50	12
16	0,50	2,00	3,00	300	1,80	3,80	221,50	22
17	0,50	2,25	3,00	300	1,80	3,38	263,00	8
18	0,50	2,50	3,00	300	1,80	3,04	255,00	10
19	0,50	2,75	3,00	300	1,80	2,76	241,00	15
20	0,50	3,00	3,00	300	1,80	2,53	249,50	12
21	0,50	1,00	2,00	300	1,80	7,60	265,50	7
22	0,50	1,00	2,25	300	1,80	7,60	277,50	2
23	0,50	1,00	2,50	300	1,80	7,60	271,00	5
24	0,50	1,00	2,75	300	1,80	7,60	259,00	9
25	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	261,00	8
26	0,50	1,00	3,25	300	1,80	7,60	263,00	8
27	0,50	1,00	3,50	300	1,80	7,60	283,00	1
28	0,50	1,00	3,75	300	1,80	7,60	265,00	7
29	0,50	1,00	4,00	300	1,80	7,60	277,50	2
30	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	275,50	3
31	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	263,00	8
32	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	253,50	11
						HAM ATIKSU	284,5 mg/l	



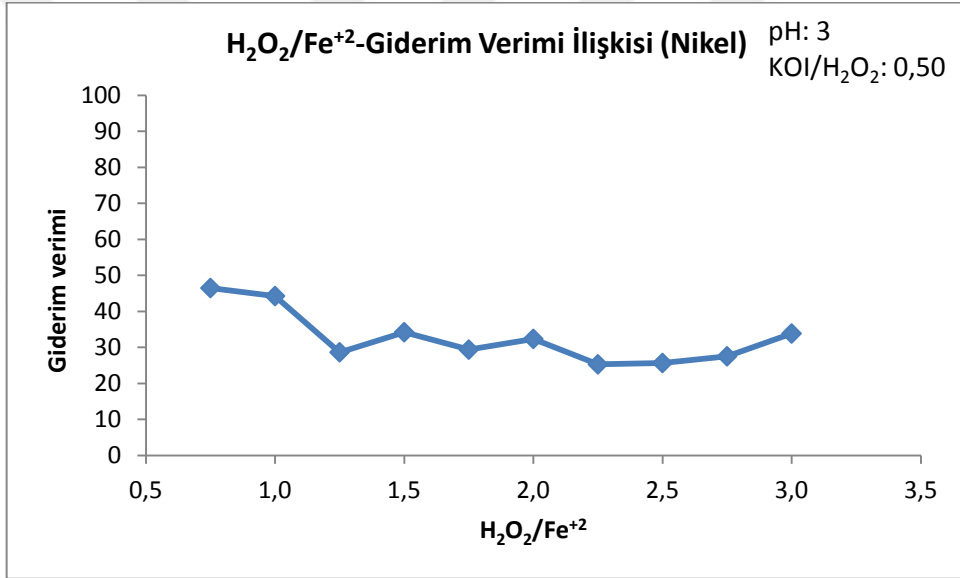
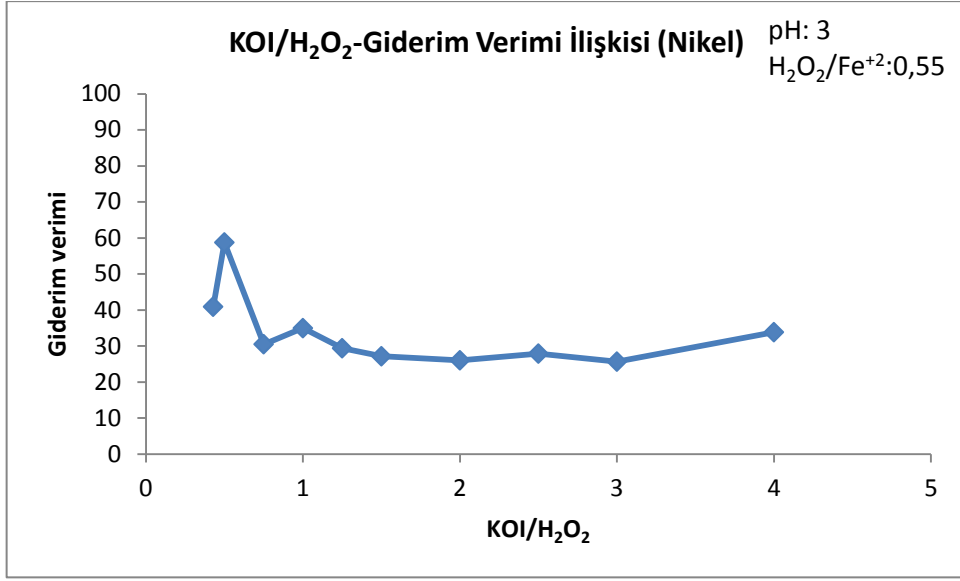


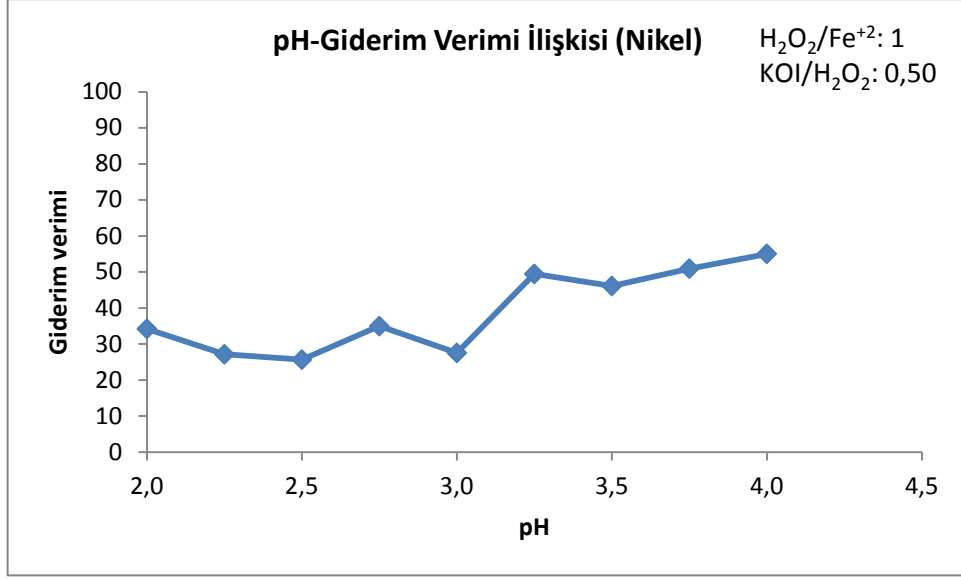
Şekil 4.19 500 ml Fenton prosesinde değişken parametrelere bağlı Fe giderim verimi

Metal endüstrisi atıksuyunda Fenton prosesi çalışmalarında bakır (Fe) parametresi için; Çizelge 3.5'te verildiği gibi 0,43, 0,50, 0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 2,00, 2,50, 3,00 ve 4,00 farklı COD/ H_2O_2 oranlarında, farklı H_2O_2/Fe^{2+} :0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 1,75, 2,00, 2,25 2,50, 2,75 ve 3,00 oranlarında ve farklı pH:2,00, 2,25, 2,50, 2,75, 3,00, 3,25, 3,50 ve 3,75 değerlerinde 500 ml'lik Fenton çalışmasında çalışma şartlarına bağlı olarak yaklaşık aynı verimler elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.19'a bakıldığında, Fe giderim veriminin KOI/ H_2O_2 oranına, H_2O_2/Fe^{2+} oranına ve pH'ya bağlı değişkenlik göstermediği ve optimum şartların ise sırasıyla; 0,43, 0,55 ve pH:3,00 değerlerinde %100'e varan verimler elde edildiği saptanmıştır. İSKİ Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği standartlarında Fe için limit değer yer almamaktadır. Çizelge 4.20'de ise; fenton prosesinde demir için elde edilen çıkış konsantrasyonları ve giderim verimleri detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 4.20 Fenton prosesi çalışması Demir giderim sonuçları

Çalışmalar	KOI/H ₂ O ₂	H ₂ O ₂ / Fe ⁺²	pH	KOI sample	H ₂ O ₂ (ml)	Fe ⁺² (ml)	Fe (mg/L)	Fe (%)
0	-	-	-	-	-	-	-	-
1	0,43	0,55	3,00	300	2,10	16,14	0,00	100
2	0,50	0,55	3,00	300	1,80	13,82	0,00	100
3	0,75	0,55	3,00	300	1,20	9,21	0,00	100
4	1,00	0,55	3,00	300	0,90	6,91	0,00	100
5	1,25	0,55	3,00	300	0,72	5,53	0,00	100
6	1,50	0,55	3,00	300	0,60	4,61	0,00	100
7	2,00	0,55	3,00	300	0,45	3,45	0,00	100
8	2,50	0,55	3,00	300	0,36	2,76	0,00	100
9	3,00	0,55	3,00	300	0,30	2,30	0,00	100
10	4,00	0,55	3,00	300	0,23	1,73	0,00	100
11	0,50	0,75	3,00	300	1,80	10,13	0,00	100
12	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	0,00	100
13	0,50	1,25	3,00	300	1,80	6,08	0,00	100
14	0,50	1,50	3,00	300	1,80	5,07	0,00	100
15	0,50	1,75	3,00	300	1,80	4,34	0,00	100
16	0,50	2,00	3,00	300	1,80	3,80	0,00	100
17	0,50	2,25	3,00	300	1,80	3,38	0,00	100
18	0,50	2,50	3,00	300	1,80	3,04	0,00	100
19	0,50	2,75	3,00	300	1,80	2,76	0,00	100
20	0,50	3,00	3,00	300	1,80	2,53	0,00	100
21	0,50	1,00	2,00	300	1,80	7,60	0,00	100
22	0,50	1,00	2,25	300	1,80	7,60	0,00	100
23	0,50	1,00	2,50	300	1,80	7,60	0,00	100
24	0,50	1,00	2,75	300	1,80	7,60	0,00	100
25	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	0,00	100
26	0,50	1,00	3,25	300	1,80	7,60	0,00	100
27	0,50	1,00	3,50	300	1,80	7,60	0,00	100
28	0,50	1,00	3,75	300	1,80	7,60	0,00	100
29	0,50	1,00	4,00	300	1,80	7,60	0,00	100
30	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	0,00	100
31	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	0,00	100
32	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	0,00	100
						HAM ATIKSU	134 mg/l	



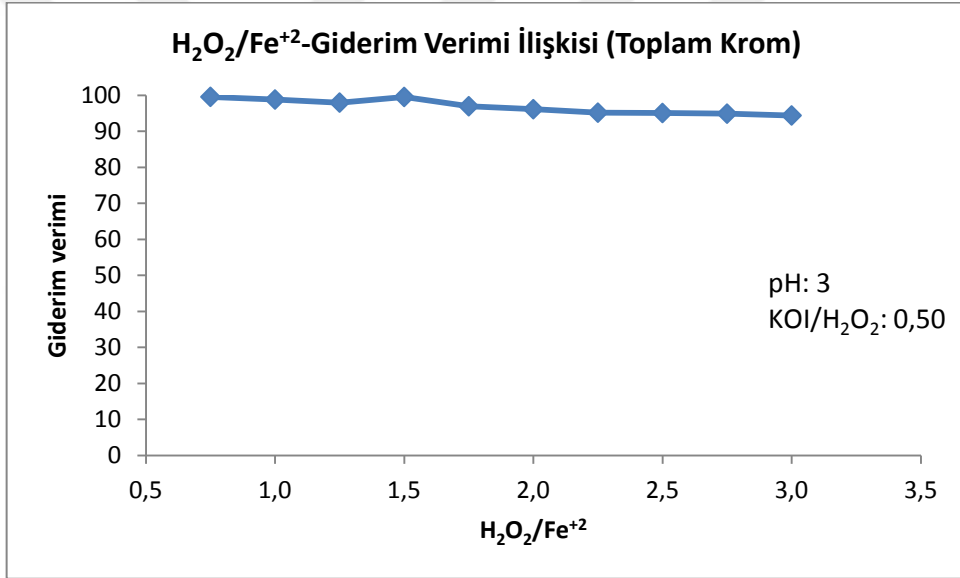
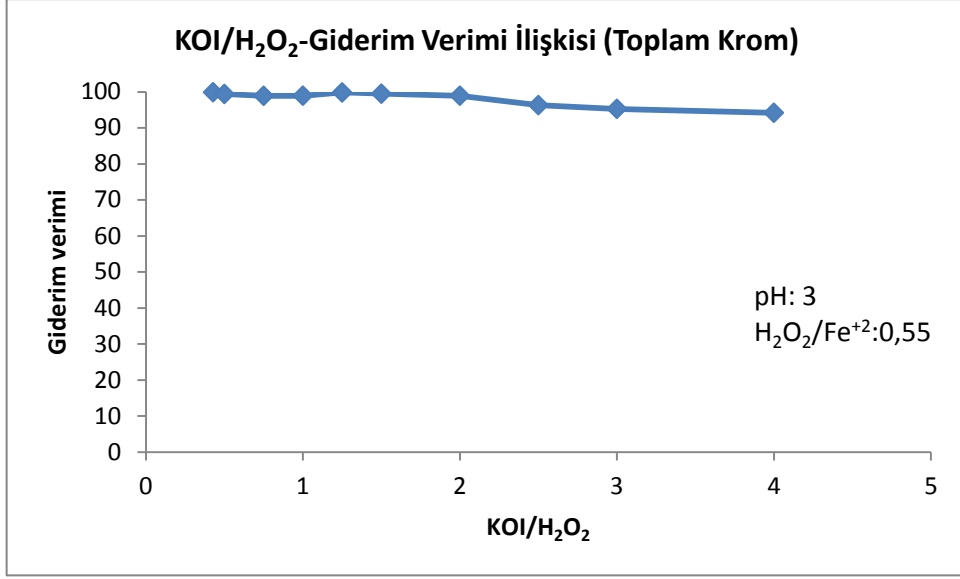


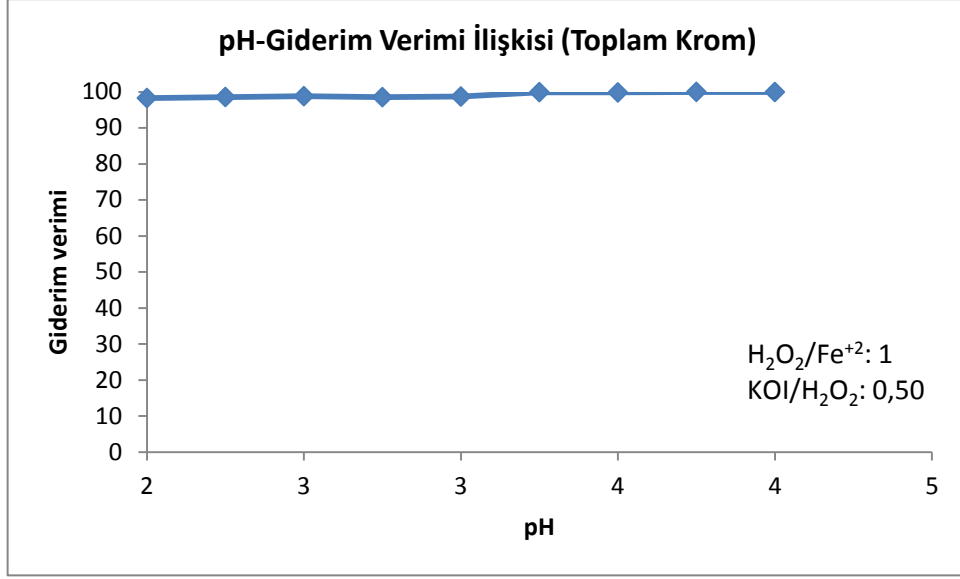
Şekil 4.20 500 ml Fenton prosesinde değişken parametrelere bağlı Ni giderim verimi

Metal endüstrisi atıksuyunda Fenton prosesi çalışmalarında nikel (Ni) parametresi için; Çizelge 3.5'te verildiği gibi 0,43, 0,50, 0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 2,00, 2,50, 3,00 ve 4,00 farklı COD/H₂O₂ oranlarında, farklı H₂O₂/Fe²⁺:0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 1,75, 2,00, 2,25 2,50, 2,75 ve 3,00 oranlarında ve farklı pH:2,00, 2,25, 2,50, 2,75, 3,00, 3,25, 3,50 ve 3,75 değerlerinde 500 ml'lik Fenton çalışmasında çalışma şartlarına bağlı olarak farklı verimler elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.20'ye bakıldığında, Ni giderim veriminin KOI/H₂O₂ oranına bağlı olarak dalgalanma gösterdiği ve optimum şartın 0,50 değerinde giderim veriminin % 59'lara ulaştığı görülmüştür. Diğer değişken parametreler için ise optimum şartlar; H₂O₂/Fe²⁺:0,75 için % 46'larda ve pH:4,00 için % 55'lerde sağlandığı görülmektedir. KOI/H₂O₂: 0,50, H₂O₂/Fe²⁺:0,55 ve pH: 3 değerlerinde giderim verimi % 59'lara ulaşmış olmasına rağmen çıkış konsantrasyon değerleri Çizelge 3.2'de verilen İSKİ Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği standartlarını sağlamamaktadır. Bu çalışma sonucunda nikel metalinin standartları sağlayacak şekilde giderilebilmesi için Fenton sonrasında ilave bir arıtma prosesine tabi tutulması gerektiği görülmüştür. Çizelge 4.21'de fenton prosesinde nikel için elde edilen çıkış konsantrasyonları ve giderim verimleri detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 4.21 Fenton prosesi çalışması Nikel giderim sonuçları

Çalışmalar	KOI/H ₂ O ₂	H ₂ O ₂ / Fe ⁺²	pH	KOI sample	H ₂ O ₂ (ml)	Fe ⁺² (ml)	Ni (mg/L)	Ni (%)
0	-	-	-	-	-	-	-	-
1	0,43	0,55	3,00	300	2,10	16,14	79,50	41
2	0,50	0,55	3,00	300	1,80	13,82	55,50	59
3	0,75	0,55	3,00	300	1,20	9,21	93,50	30
4	1,00	0,55	3,00	300	0,90	6,91	87,50	35
5	1,25	0,55	3,00	300	0,72	5,53	95,00	29
6	1,50	0,55	3,00	300	0,60	4,61	98,00	27
7	2,00	0,55	3,00	300	0,45	3,45	99,50	26
8	2,50	0,55	3,00	300	0,36	2,76	97,00	28
9	3,00	0,55	3,00	300	0,30	2,30	100,00	26
10	4,00	0,55	3,00	300	0,23	1,73	89,00	34
11	0,50	0,75	3,00	300	1,80	10,13	72,00	46
12	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	75,00	44
13	0,50	1,25	3,00	300	1,80	6,08	96,00	29
14	0,50	1,50	3,00	300	1,80	5,07	88,50	34
15	0,50	1,75	3,00	300	1,80	4,34	95,00	29
16	0,50	2,00	3,00	300	1,80	3,80	91,00	32
17	0,50	2,25	3,00	300	1,80	3,38	100,50	25
18	0,50	2,50	3,00	300	1,80	3,04	100,00	26
19	0,50	2,75	3,00	300	1,80	2,76	97,50	28
20	0,50	3,00	3,00	300	1,80	2,53	89,00	34
21	0,50	1,00	2,00	300	1,80	7,60	88,50	34
22	0,50	1,00	2,25	300	1,80	7,60	98,00	27
23	0,50	1,00	2,50	300	1,80	7,60	100,00	26
24	0,50	1,00	2,75	300	1,80	7,60	87,50	35
25	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	97,50	28
26	0,50	1,00	3,25	300	1,80	7,60	68,00	49
27	0,50	1,00	3,50	300	1,80	7,60	72,50	46
28	0,50	1,00	3,75	300	1,80	7,60	66,00	51
29	0,50	1,00	4,00	300	1,80	7,60	60,50	55
30	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	65,00	52
31	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	55,00	59
32	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	50,00	63
						HAM ATIKSU	134,5 mg/l	



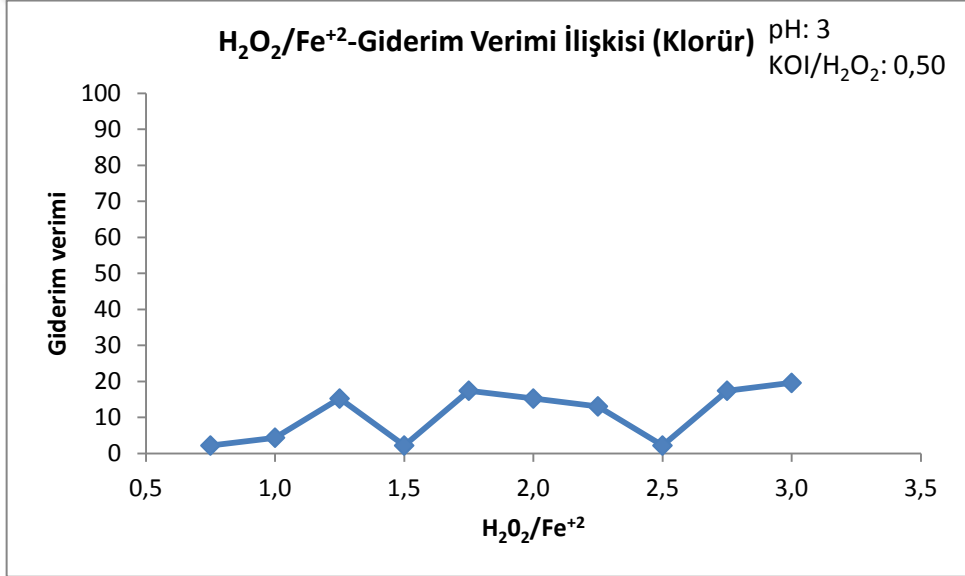
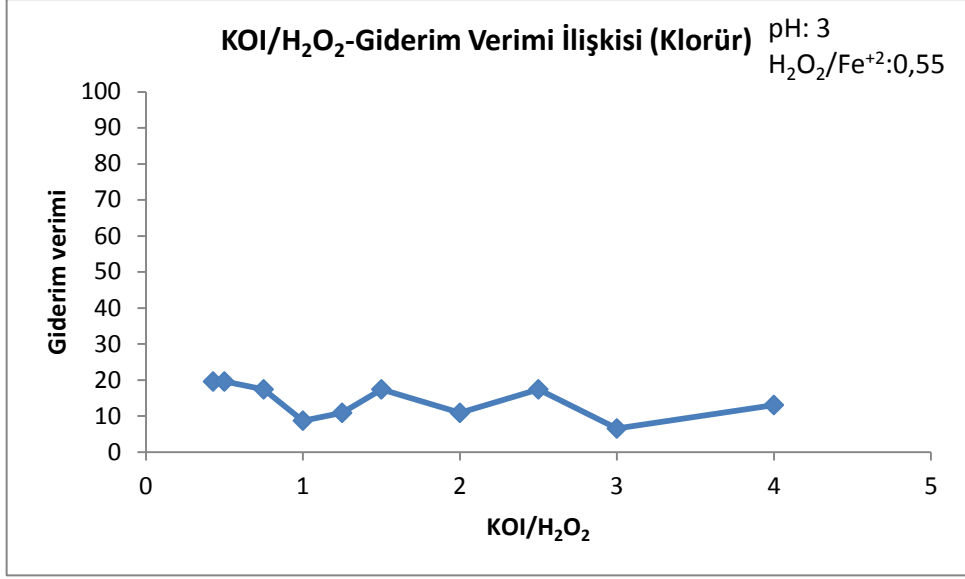


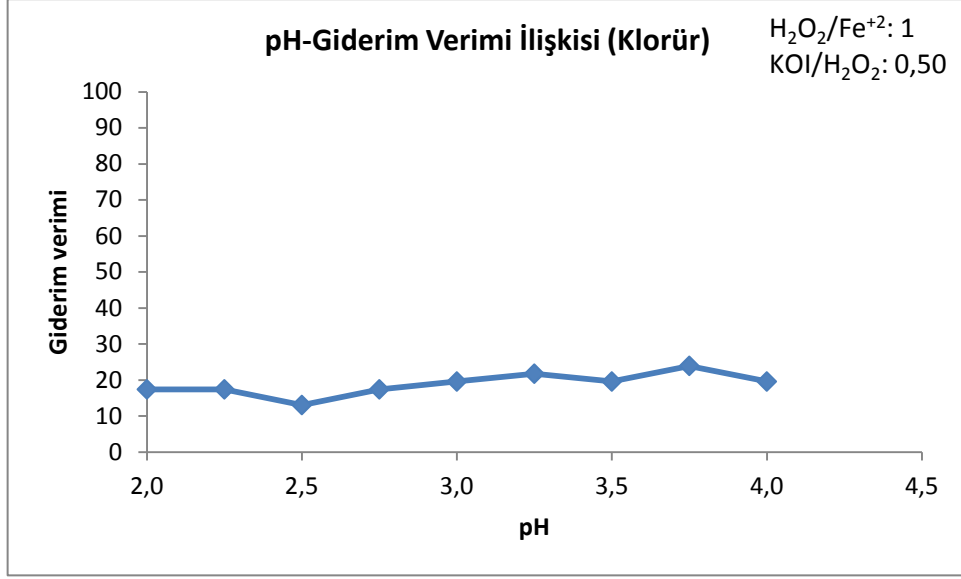
Şekil 4.21 500 ml Fenton prosesinde değişken parametrelere bağlı toplam Cr giderim verimi

Metal endüstrisi atıksuyunda Fenton prosesi çalışmalarında toplam krom (Cr) parametresi için; Çizelge 3.5'te verildiği gibi 0,43, 0,50, 0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 2,00, 2,50, 3,00 ve 4,00 farklı KOl/H₂O₂ oranlarında, farklı H₂O₂/Fe²⁺:0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 1,75, 2,00, 2,25, 2,50, 2,75 ve 3,00 oranlarında ve farklı pH:2,00, 2,25, 2,50, 2,75, 3,00, 3,25, 3,50 ve 3,75 değerlerinde 500 ml'lik Fenton çalışmasında çalışma şartlarına bağlı olarak farklı verimler elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.21'e bakıldığında, toplam Cr giderim veriminin KOl/H₂O₂ oranına bağlı olarak bariz bir değişiklik göstermediği ve optimum şartın 0,43 değerinde giderim veriminin % 99'lara ulaştığı görülmüştür. Diğer değişken parametreler için ise optimum şartlar; H₂O₂/Fe²⁺:0,75 için % 99'larda ve pH:3,25 için % 100'lerde sağlandığı görülmektedir. KOl/H₂O₂: 0,50, H₂O₂/Fe²⁺:1,00 ve pH: 2 değerlerinde giderim verimi % 98'lere ulaşmış olup çıkış konsantrasyon değerleri Çizelge 3.2'de verilen İSKİ Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği standartlarını sağlamaktadır. Çizelge 4.22'de fenton prosesinde toplam krom için elde edilen çıkış konsantrasyonları ve giderim verimleri detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 4.22 Fenton prosesi çalışması Toplam krom giderim sonuçları

Çalışmalar	KOI/H ₂ O ₂	H ₂ O ₂ / Fe ⁺²	pH	KOI sample	H ₂ O ₂ (ml)	Fe ⁺² (ml)	Cr (mg/L)	Cr (%)
0	-	-	-	-	-	-	-	-
1	0,43	0,55	3,00	300	2,10	16,14	0,23	100
2	0,50	0,55	3,00	300	1,80	13,82	1,28	99
3	0,75	0,55	3,00	300	1,20	9,21	2,42	99
4	1,00	0,55	3,00	300	0,90	6,91	2,34	99
5	1,25	0,55	3,00	300	0,72	5,53	0,35	100
6	1,50	0,55	3,00	300	0,60	4,61	1,10	100
7	2,00	0,55	3,00	300	0,45	3,45	2,35	99
8	2,50	0,55	3,00	300	0,36	2,76	8,11	96
9	3,00	0,55	3,00	300	0,30	2,30	10,38	95
10	4,00	0,55	3,00	300	0,23	1,73	12,81	94
11	0,50	0,75	3,00	300	1,80	10,13	0,98	100
12	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	2,61	99
13	0,50	1,25	3,00	300	1,80	6,08	4,50	98
14	0,50	1,50	3,00	300	1,80	5,07	1,04	100
15	0,50	1,75	3,00	300	1,80	4,34	6,73	97
16	0,50	2,00	3,00	300	1,80	3,80	8,55	96
17	0,50	2,25	3,00	300	1,80	3,38	10,66	95
18	0,50	2,50	3,00	300	1,80	3,04	10,87	95
19	0,50	2,75	3,00	300	1,80	2,76	11,28	95
20	0,50	3,00	3,00	300	1,80	2,53	12,39	94
21	0,50	1,00	2,00	300	1,80	7,60	3,77	98
22	0,50	1,00	2,25	300	1,80	7,60	3,14	99
23	0,50	1,00	2,50	300	1,80	7,60	2,65	99
24	0,50	1,00	2,75	300	1,80	7,60	3,23	99
25	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	2,86	99
26	0,50	1,00	3,25	300	1,80	7,60	0,18	100
27	0,50	1,00	3,50	300	1,80	7,60	0,35	100
28	0,50	1,00	3,75	300	1,80	7,60	0,03	100
29	0,50	1,00	4,00	300	1,80	7,60	0,10	100
30	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	0,27	100
31	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	0,12	100
32	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	0,10	100
						HAM ATIKSU	220,5 mg/l	



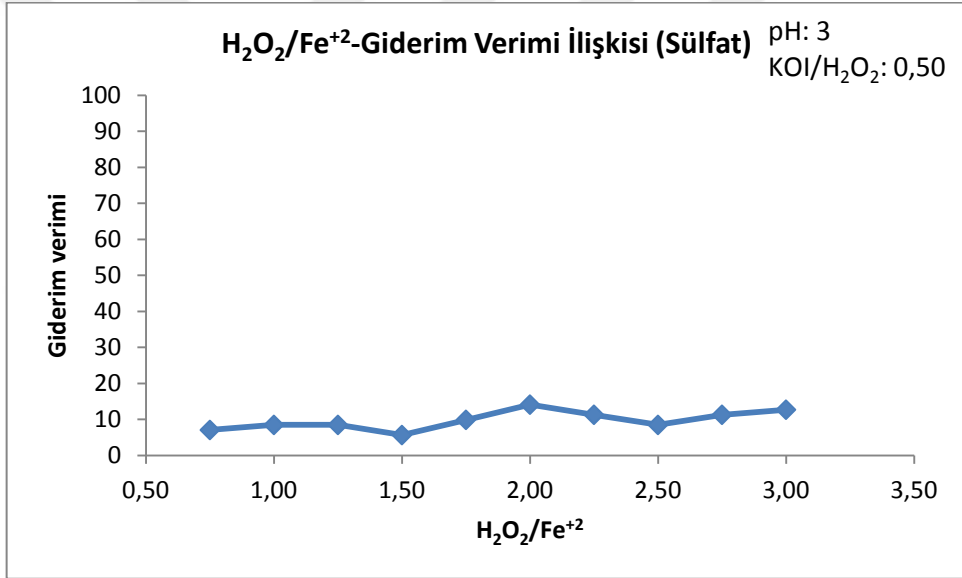
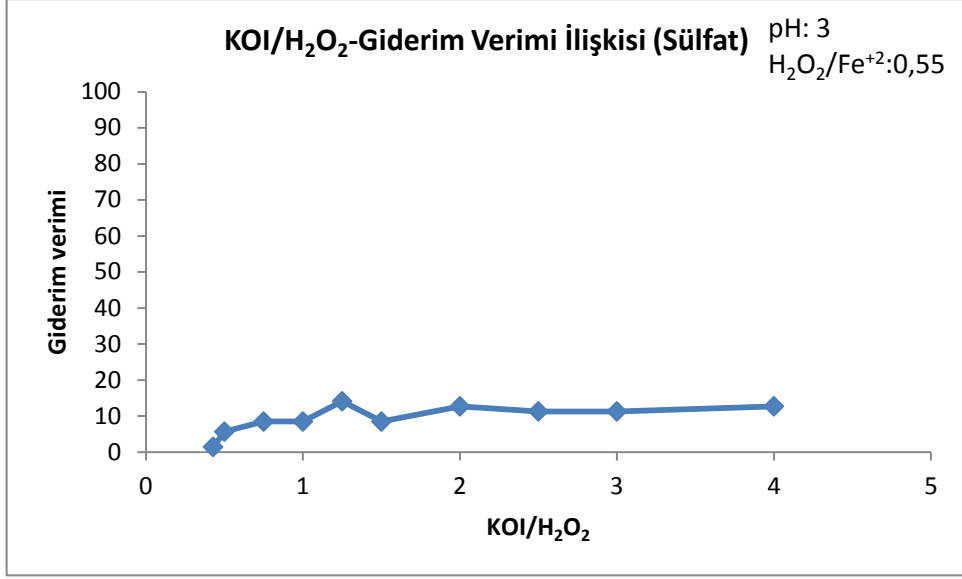


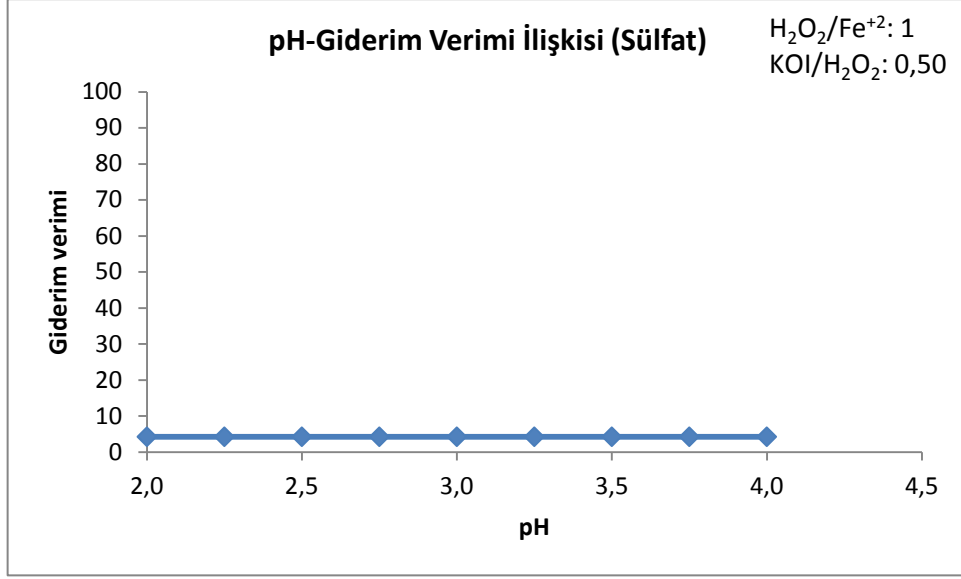
Şekil 4.22 500 ml Fenton prosesinde değişken parametrelere bağlı Cl^- giderim verimi

Metal endüstrisi atıksuyunda Fenton prosesi çalışmalarında klorür (Cl^-) parametresi için; Çizelge 3.5'te verildiği gibi 0,43, 0,50, 0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 2,00, 2,50, 3,00 ve 4,00 farklı KOI/H_2O_2 oranlarında, farklı H_2O_2/Fe^{2+} :0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 1,75, 2,00, 2,25, 2,50, 2,75 ve 3,00 oranlarında ve farklı pH:2,00, 2,25, 2,50, 2,75, 3,00, 3,25, 3,50 ve 3,75 değerlerinde 500 ml'lik Fenton çalışmasında çalışma şartlarına bağlı olarak farklı verimler elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.22'ye bakıldığında, Cl^- giderim veriminin KOI/H_2O_2 oranına bağlı olarak dalgalanma gösterdiği ve optimum şartın 0,43 değerinde giderim veriminin % 20'lerde kaldığı görülmüştür. Diğer değişken parametreler için ise optimum şartlar; H_2O_2/Fe^{2+} :1,75 için % 17'lerde ve pH:3,75 için % 24'lerde kaldığı görülmektedir. $KOI/H_2O_2: 0,50$, $H_2O_2/Fe^{2+}:1,00$ ve pH: 3,75 değerlerinde Cl^- için giderim veriminin % 24'lerde kaldığı görülmektedir. Ham atıksuyun klorür konsantrasyonu çıkış değerini sağlıyor olsa da klorür için % giderim verimini görmek amaçlı araştırma yapılmıştır. Ayrıca Çizelge 4.23'te fenton prosesinde klorür için elde edilen çıkış konsantrasyonları ve giderim verimleri detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 4.23 Fenton prosesi çalışması Klorür giderim sonuçları

Çalışmalar	KOI/H ₂ O ₂	H ₂ O ₂ / Fe ⁺²	pH	KOI sample	H ₂ O ₂ (ml)	Fe ⁺² (ml)	Cl ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (%)
0	-	-	-	-	-	-	-	-
1	0,43	0,55	3,00	300	2,10	16,14	925	20
2	0,50	0,55	3,00	300	1,80	13,82	925	20
3	0,75	0,55	3,00	300	1,20	9,21	950	17
4	1,00	0,55	3,00	300	0,90	6,91	1050	9
5	1,25	0,55	3,00	300	0,72	5,53	1025	11
6	1,50	0,55	3,00	300	0,60	4,61	950	17
7	2,00	0,55	3,00	300	0,45	3,45	1025	11
8	2,50	0,55	3,00	300	0,36	2,76	950	17
9	3,00	0,55	3,00	300	0,30	2,30	1075	7
10	4,00	0,55	3,00	300	0,23	1,73	1000	13
11	0,50	0,75	3,00	300	1,80	10,13	1125	2
12	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1100	4
13	0,50	1,25	3,00	300	1,80	6,08	975	15
14	0,50	1,50	3,00	300	1,80	5,07	1125	2
15	0,50	1,75	3,00	300	1,80	4,34	950	17
16	0,50	2,00	3,00	300	1,80	3,80	975	15
17	0,50	2,25	3,00	300	1,80	3,38	1000	13
18	0,50	2,50	3,00	300	1,80	3,04	1125	2
19	0,50	2,75	3,00	300	1,80	2,76	950	17
20	0,50	3,00	3,00	300	1,80	2,53	925	20
21	0,50	1,00	2,00	300	1,80	7,60	950	17
22	0,50	1,00	2,25	300	1,80	7,60	950	17
23	0,50	1,00	2,50	300	1,80	7,60	1000	13
24	0,50	1,00	2,75	300	1,80	7,60	950	17
25	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	925	20
26	0,50	1,00	3,25	300	1,80	7,60	900	22
27	0,50	1,00	3,50	300	1,80	7,60	925	20
28	0,50	1,00	3,75	300	1,80	7,60	875	24
29	0,50	1,00	4,00	300	1,80	7,60	925	20
30	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	875	24
31	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	925	20
32	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	925	20
						HAM ATIKSU	1150 mg/l	

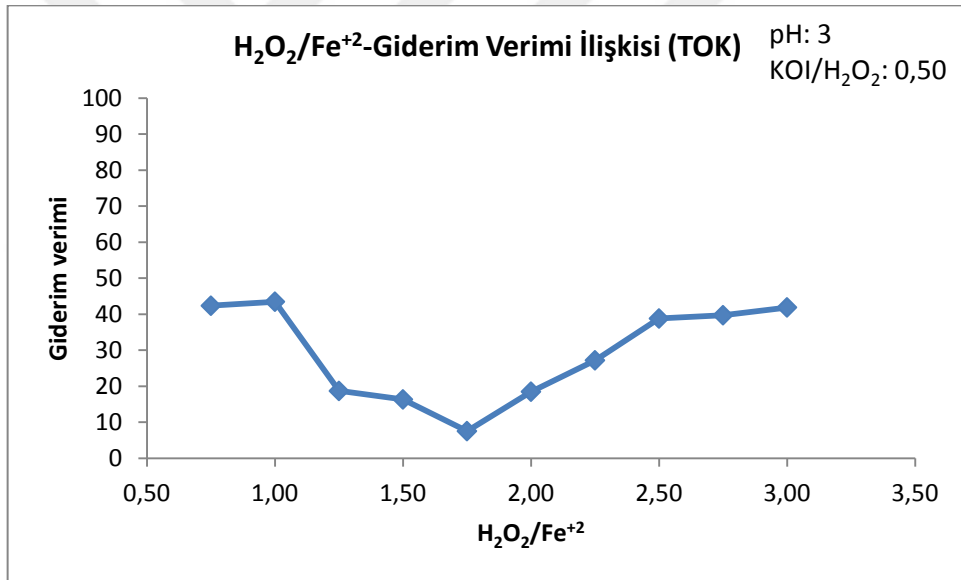
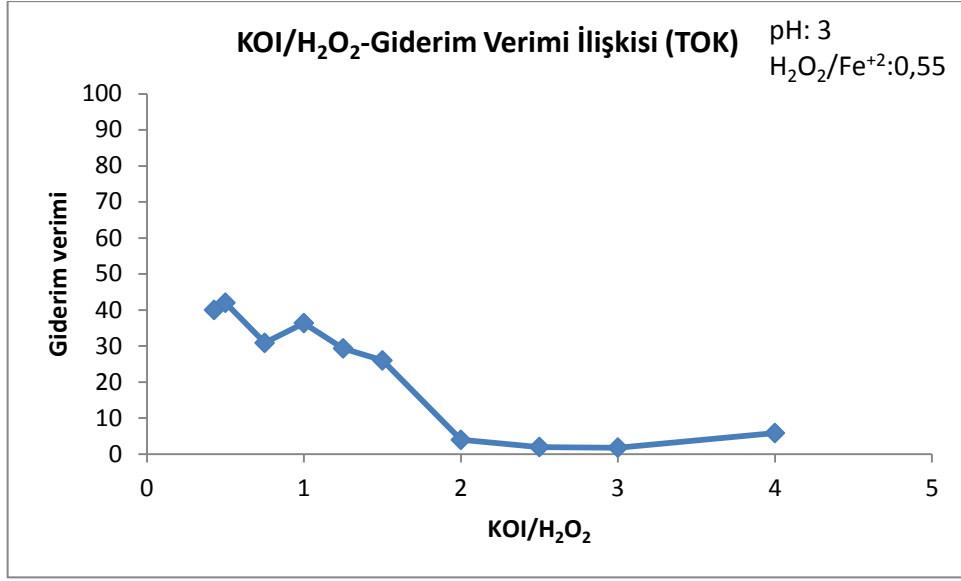


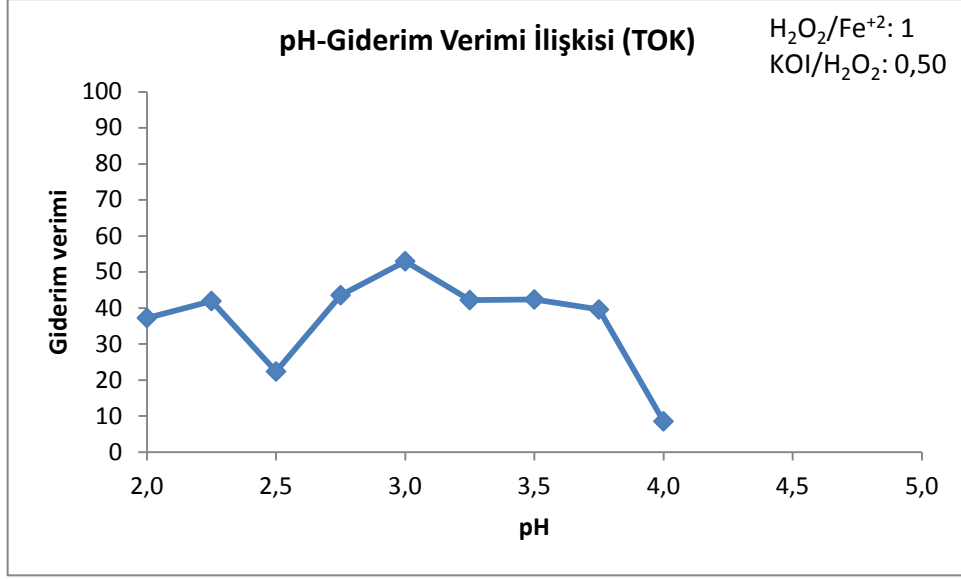


Şekil 4.23 500 ml Fenton prosesinde değişken parametrelere bağlı SO_4^{2-} giderim verimi Metal endüstrisi atıksuyunda Fenton prosesi çalışmalarında sülfat (SO_4^{2-}) parametresi için; Çizelge 3.5' verildiği gibi 0,43, 0,50, 0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 2,00, 2,50, 3,00 ve 4,00 farklı KOI/H_2O_2 oranlarında, farklı H_2O_2/Fe^{2+} :0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 1,75, 2,00, 2,25 2,50, 2,75 ve 3,00 oranlarında ve farklı pH:2,00, 2,25, 2,50, 2,75, 3,00, 3,25, 3,50 ve 3,75 değerlerinde 500 ml'lik Fenton çalışmasında çalışma şartlarına bağlı olarak farklı verimler elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.23'e bakıldığında, SO_4^{2-} giderim veriminin KOI/H_2O_2 oranına bağlı olarak hafif dalgalanmalar gösterdiği ve optimum şartın 1,25 değerinde giderim veriminin % 14'lerde kaldığı görülmüştür. Diğer değişken parametreler için ise optimum şartlar; H_2O_2/Fe^{2+} :2,00 için % 14'lerde ve pH:2,00 için %4'lerde kaldığı görülmektedir. $KOI/H_2O_2: 0,50$, H_2O_2/Fe^{2+} :2,00 ve pH: 3,00 değerlerinde giderim verimi % 14'lere ulaşmakta ve çıkış konsantrasyon değerleri Çizelge 3.2'de verilmiş olan İSKİ Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği standartlarını sağlamamaktadır. Bu çalışma sonucunda sülfat parametresinin standartları sağlayacak şekilde giderilebilmesi için fenton sonrasında ilave bir arıtma prosesine tabi tutulması gerektiği görülmüştür. Çizelge 4.24'te fenton prosesinde sülfat için elde edilen çıkış konsantrasyonları ve giderim verimleri detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 4.24 Fenton prosesi çalışması Sülfat giderim sonuçları

Çalışmalar	KOI/H ₂ O ₂	H ₂ O ₂ / Fe ⁺²	pH	KOI sample	H ₂ O ₂ (ml)	Fe ⁺² (ml)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (%)
0	-	-	-	-	-	-	-	-
1	0,43	0,55	3,00	300	2,10	16,14	3500	1
2	0,50	0,55	3,00	300	1,80	13,82	3350	6
3	0,75	0,55	3,00	300	1,20	9,21	3250	8
4	1,00	0,55	3,00	300	0,90	6,91	3250	8
5	1,25	0,55	3,00	300	0,72	5,53	3050	14
6	1,50	0,55	3,00	300	0,60	4,61	3250	8
7	2,00	0,55	3,00	300	0,45	3,45	3100	13
8	2,50	0,55	3,00	300	0,36	2,76	3150	11
9	3,00	0,55	3,00	300	0,30	2,30	3150	11
10	4,00	0,55	3,00	300	0,23	1,73	3100	13
11	0,50	0,75	3,00	300	1,80	10,13	3300	7
12	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	3250	8
13	0,50	1,25	3,00	300	1,80	6,08	3250	8
14	0,50	1,50	3,00	300	1,80	5,07	3350	6
15	0,50	1,75	3,00	300	1,80	4,34	3200	10
16	0,50	2,00	3,00	300	1,80	3,80	3050	14
17	0,50	2,25	3,00	300	1,80	3,38	3150	11
18	0,50	2,50	3,00	300	1,80	3,04	3250	8
19	0,50	2,75	3,00	300	1,80	2,76	3150	11
20	0,50	3,00	3,00	300	1,80	2,53	3100	13
21	0,50	1,00	2,00	300	1,80	7,60	3400	4
22	0,50	1,00	2,25	300	1,80	7,60	3400	4
23	0,50	1,00	2,50	300	1,80	7,60	3400	4
24	0,50	1,00	2,75	300	1,80	7,60	3400	4
25	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	3400	4
26	0,50	1,00	3,25	300	1,80	7,60	3400	4
27	0,50	1,00	3,50	300	1,80	7,60	3400	4
28	0,50	1,00	3,75	300	1,80	7,60	3400	4
29	0,50	1,00	4,00	300	1,80	7,60	3400	4
30	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	3400	4
31	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	3400	4
32	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	3400	4
						HAM ATIKSU	3550 mg/l	





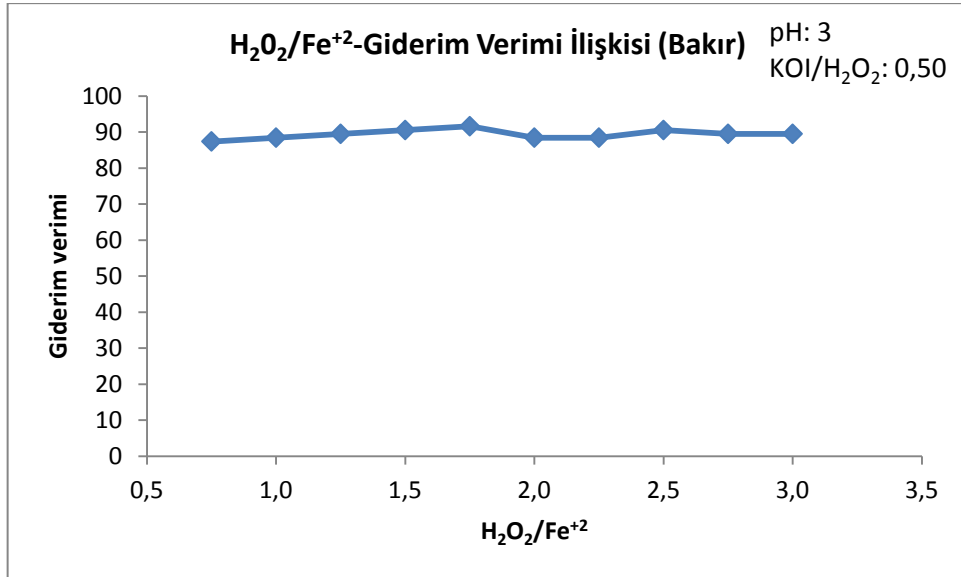
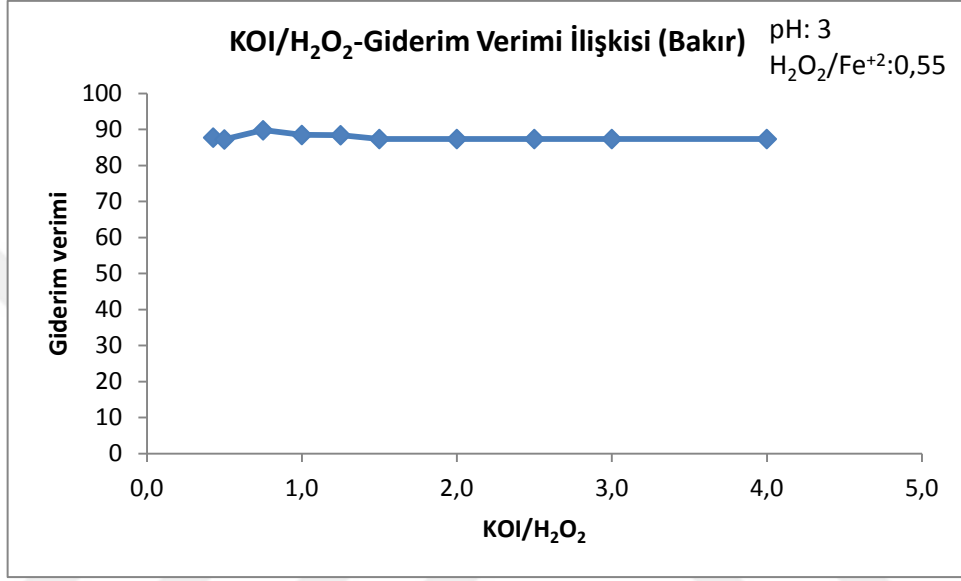
Şekil 4.24 500 ml Fenton prosesinde değişken parametrelere bağlı TOK giderim verimi Metal endüstrisi atıksuyunda Fenton prosesi çalışmalarında Toplam Organik Karbon (TOK) parametresi için; Çizelge 3.5'te verildiği gibi 0,43, 0,50, 0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 2,00, 2,50, 3,00 ve 4,00 farklı KOI/H₂O₂ oranlarında, farklı H₂O₂/Fe²⁺:0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 1,75, 2,00, 2,25, 2,50, 2,75 ve 3,00 oranlarında ve farklı pH:2,00, 2,25, 2,50, 2,75, 3,00, 3,25, 3,50 ve 3,75 değerlerinde 500 ml'lik Fenton çalışmasında çalışma şartlarına bağlı olarak farklı verimler elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.24'e bakıldığında, TOK giderim veriminin KOI/H₂O₂ oranına bağlı olarak dalgalanma gösterdiği ve optimum şartın 0,50 değerinde giderim veriminin %42'lere ulaştığı görülmüştür. Diğer değişken parametreler için ise optimum şartlar; H₂O₂/Fe²⁺:1,00 için % 43'lerde ve pH:3,00 için %53'lerde kaldığı görülmektedir. KOI/H₂O₂: 0,50, H₂O₂/Fe²⁺:1,00 ve pH: 3,00 değerlerinde giderim veriminin % 53'lere ulaştığı görülmüştür. Çizelge 4.25'te fenton prosesinde TOK için elde edilen çıkış konsantrasyonları ve giderim verimleri detaylı olarak verilmiştir.

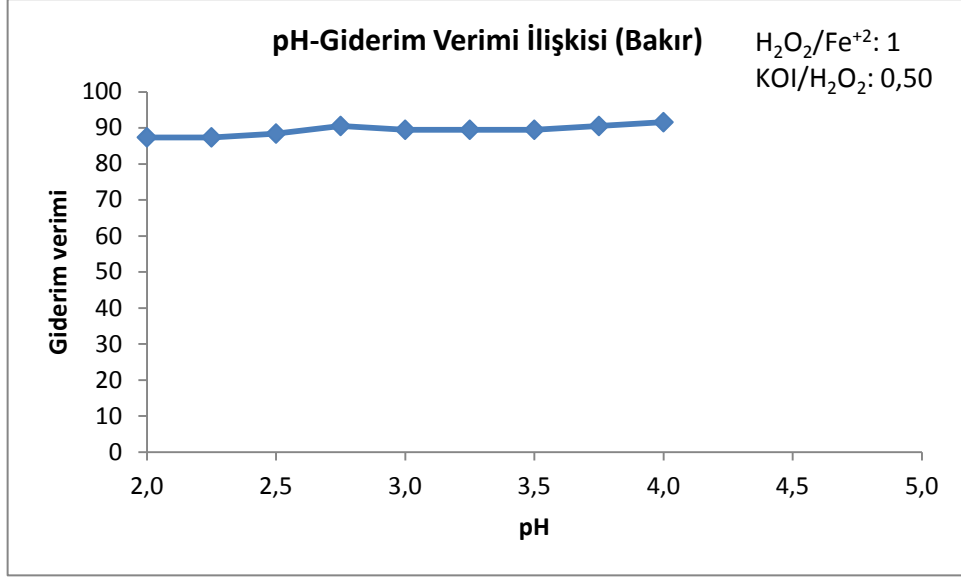
Çizelge 4.25 Fenton prosesi çalışması TOK giderim sonuçları

Çalışmalar	KOI/H ₂ O ₂	H ₂ O ₂ / Fe ⁺²	pH	KOI sample	H ₂ O ₂ (ml)	Fe ⁺² (ml)	TOK (mg/L)	TOK (%)
0	-	-	-	-	-	-	-	-
1	0,43	0,55	3,00	300	2,10	16,14	137,6	40
2	0,50	0,55	3,00	300	1,80	13,82	133,5	42
3	0,75	0,55	3,00	300	1,20	9,21	159,0	31
4	1,00	0,55	3,00	300	0,90	6,91	146,4	36
5	1,25	0,55	3,00	300	0,72	5,53	162,5	29
6	1,50	0,55	3,00	300	0,60	4,61	170,2	26
7	2,00	0,55	3,00	300	0,45	3,45	221,0	4
8	2,50	0,55	3,00	300	0,36	2,76	225,5	2
9	3,00	0,55	3,00	300	0,30	2,30	225,9	2
10	4,00	0,55	3,00	300	0,23	1,73	216,6	6
11	0,50	0,75	3,00	300	1,80	10,13	132,6	42
12	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	130,1	43
13	0,50	1,25	3,00	300	1,80	6,08	187,1	19
14	0,50	1,50	3,00	300	1,80	5,07	192,5	16
15	0,50	1,75	3,00	300	1,80	4,34	212,7	8
16	0,50	2,00	3,00	300	1,80	3,80	187,5	18
17	0,50	2,25	3,00	300	1,80	3,38	167,5	27
18	0,50	2,50	3,00	300	1,80	3,04	140,8	39
19	0,50	2,75	3,00	300	1,80	2,76	138,7	40
20	0,50	3,00	3,00	300	1,80	2,53	133,7	42
21	0,50	1,00	2,00	300	1,80	7,60	144,4	37
22	0,50	1,00	2,25	300	1,80	7,60	133,6	42
23	0,50	1,00	2,50	300	1,80	7,60	178,6	22
24	0,50	1,00	2,75	300	1,80	7,60	129,9	44
25	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	108,2	53
26	0,50	1,00	3,25	300	1,80	7,60	133,0	42
27	0,50	1,00	3,50	300	1,80	7,60	132,6	42
28	0,50	1,00	3,75	300	1,80	7,60	139,0	40
29	0,50	1,00	4,00	300	1,80	7,60	210,4	9
30	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	156,0	32
31	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	137,6	40
32	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	133,1	42
						HAM ATIKSU	230 mg/l	

4.3 Elektro-Fenton için Bulgular

Elektrofenton prosesinde Çizelge 3.6'da verilen 500 ml'lik çalışmada farklı akımlarda (A), farklı pH değerlerinde, farklı H_2O_2 ve Fe^{+2} miktarlarında (ml); bakır (Cu), çinko (Zn), demir (Fe), nikel (Ni), krom (Cr), klorür (Cl^-), sülfat (SO_4) ve TOK parametreleri için farklı giderim verimleri elde edilmiştir. Şekil 4.24'de bakır (Cu) için değişken parametrelere göre elde edilen verimler verilmiştir.



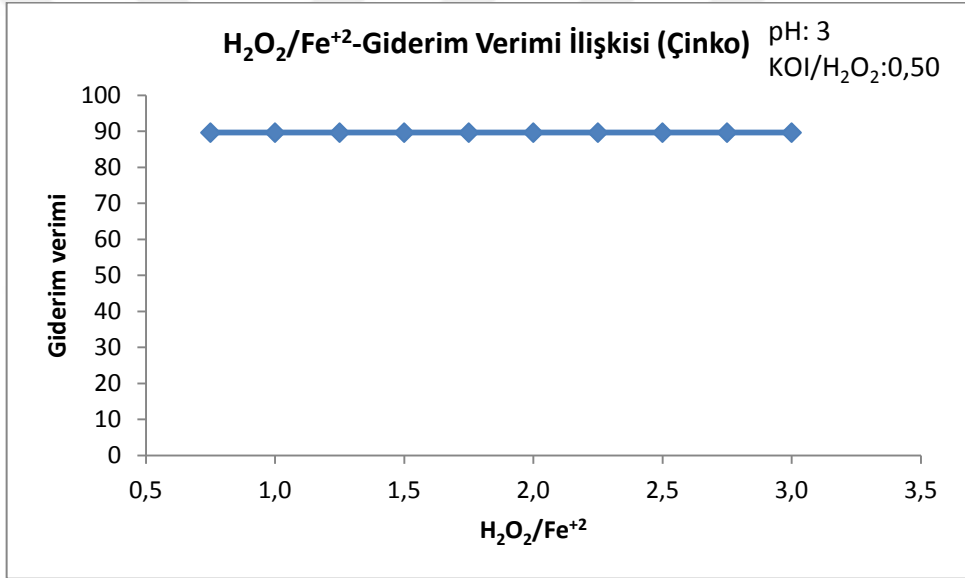
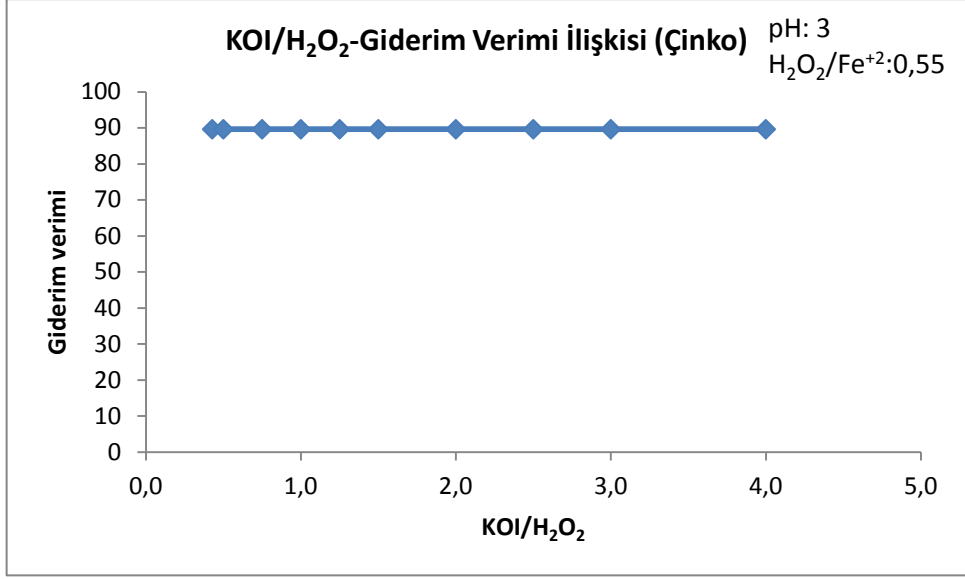


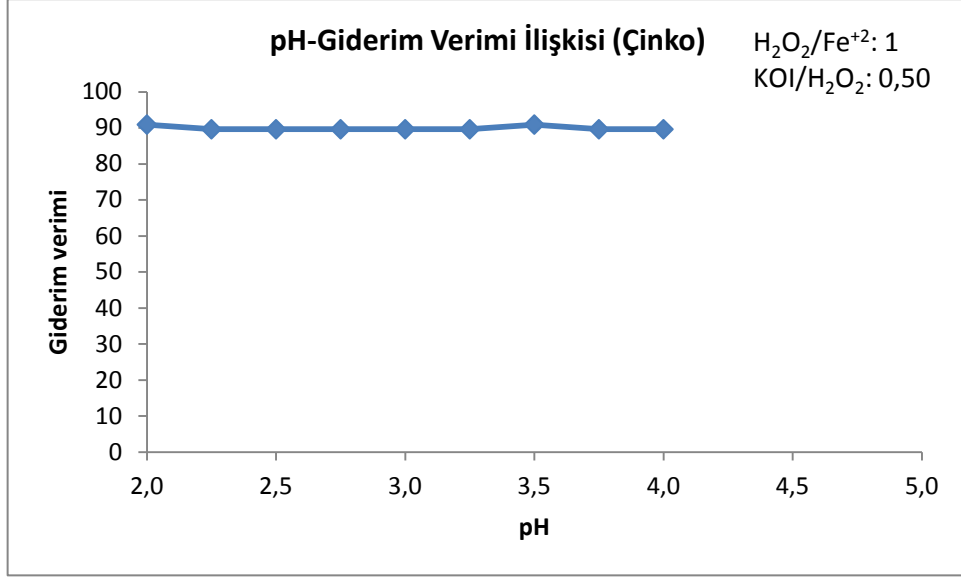
Şekil 4.25 500 ml Elektrofenton prosesinde değişken parametrelere bağlı Cu giderim verimi

Metal endüstrisi atıksuyunda elektrofenton prosesi çalışmalarında bakır (Cu) parametresi için; Çizelge 3.6'da verildiği gibi 0,43, 0,50, 0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 2,00, 2,50, 3,00 ve 4,00 farklı KOI/ H_2O_2 oranlarında, farklı H_2O_2/Fe^{2+} :0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 1,75, 2,00, 2,25, 2,50, 2,75 ve 3,00 oranlarında ve farklı pH:2,00, 2,25, 2,50, 2,75, 3,00, 3,25, 3,50 ve 3,75 değerlerinde 500 ml'lik elektrofenton çalışmasında çalışma şartlarına bağlı olarak farklı verimler elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.25'e bakıldığında, Cu giderim veriminin KOI/ H_2O_2 oranına bağlı olarak fazla bir değişiklik göstermediği ve optimum şartın 0,75 değeri için % 90'larda giderim verimi elde edildiği görülmüştür. Diğer değişken parametreler için ise optimum şartların; H_2O_2/Fe^{2+} :1.75 için % 92'lerde ve pH:4,00 için % 92'lerde sağlandığı görülmektedir. Ancak, elde edilen bu yüksek giderim verim değerlerine rağmen, çıkış konsantrasyon değerleri Çizelge 3.2'de verilen İSKİ Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği standartlarını sağlamamaktadır. Bu çalışma sonucunda bakır metalinin standartları sağlayacak şekilde giderilebilmesi için elektrofenton sonrasında ilave bir arıtma prosesine tabi tutulması gerektiği görülmüştür. Çizelge 4.26'da Elektrofenton prosesinde bakır için elde edilen çıkış konsantrasyonları ve giderim verimleri detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 4.26 Elektrofenton prosesi çalışması Bakır giderim sonuçları

Deney no	KOI/H ₂ O ₂	H ₂ O ₂ / Fe ⁺²	pH	KOIsample	H ₂ O ₂ (ml)	Fe ⁺² (ml)	I (A)	Cu (mg/l)	Cu (%)
1	0,43	0,55	3,00	300	2,10	16,14	3,33	12	88
2	0,50	0,55	3,00	300	1,80	13,82	2,85	12	87
3	0,75	0,55	3,00	300	1,20	9,21	1,90	10	90
4	1,00	0,55	3,00	300	0,90	6,91	1,43	11	88
5	1,25	0,55	3,00	300	0,72	5,53	1,14	11	88
6	1,50	0,55	3,00	300	0,60	4,61	0,95	12	87
7	2,00	0,55	3,00	300	0,45	3,45	0,71	12	87
8	2,50	0,55	3,00	300	0,36	2,76	0,57	12	87
9	3,00	0,55	3,00	300	0,30	2,30	0,48	12	87
10	4,00	0,55	3,00	300	0,23	1,73	0,36	12	87
11	0,50	0,75	3,00	300	1,80	10,13	2,09	12	87
12	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	11	88
13	0,50	1,25	3,00	300	1,80	6,08	1,26	10	89
14	0,50	1,50	3,00	300	1,80	5,07	1,26	9	91
15	0,50	1,75	3,00	300	1,80	4,34	0,90	8	92
16	0,50	2,00	3,00	300	1,80	3,80	0,79	11	88
17	0,50	2,25	3,00	300	1,80	3,38	0,70	11	88
18	0,50	2,50	3,00	300	1,80	3,04	0,63	9	91
19	0,50	2,75	3,00	300	1,80	2,76	0,57	10	89
20	0,50	3,00	3,00	300	1,80	2,53	0,53	10	89
21	0,50	1,00	2,00	300	1,80	7,60	1,57	12	87
22	0,50	1,00	2,25	300	1,80	7,60	1,57	12	87
23	0,50	1,00	2,50	300	1,80	7,60	1,57	11	88
24	0,50	1,00	2,75	300	1,80	7,60	1,57	9	91
25	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	10	89
26	0,50	1,00	3,25	300	1,80	7,60	1,57	10	89
27	0,50	1,00	3,50	300	1,80	7,60	1,57	10	89
28	0,50	1,00	3,75	300	1,80	7,60	1,57	9	91
29	0,50	1,00	4,00	300	1,80	7,60	1,57	8	92
30	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	9	91
31	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	9	91
32	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	9	91
							HAM ATIKSU	95 mg/l	



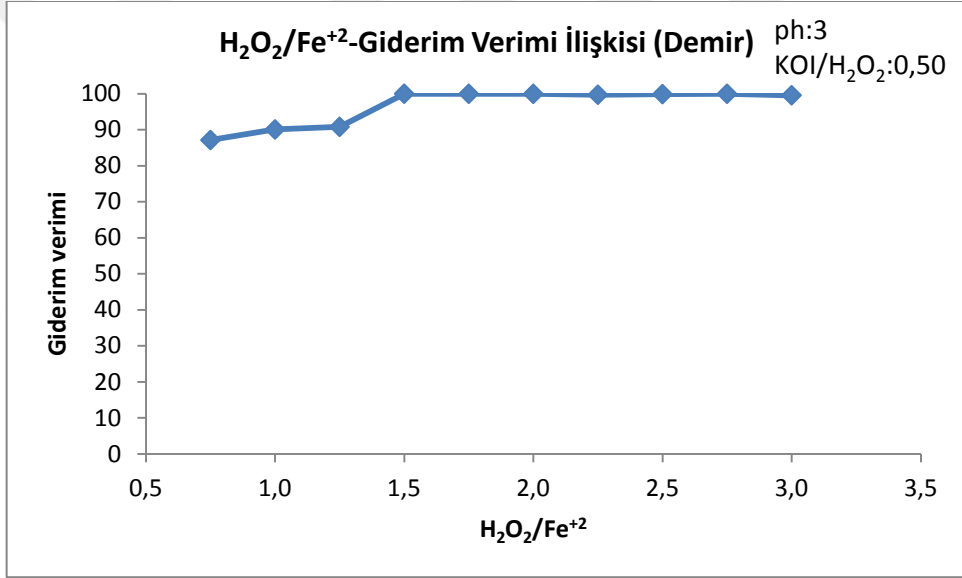
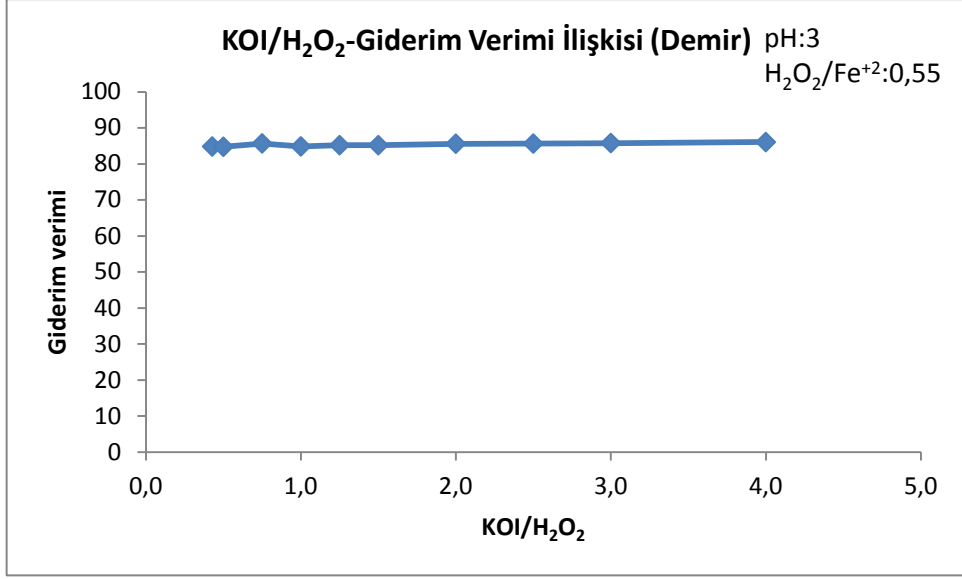


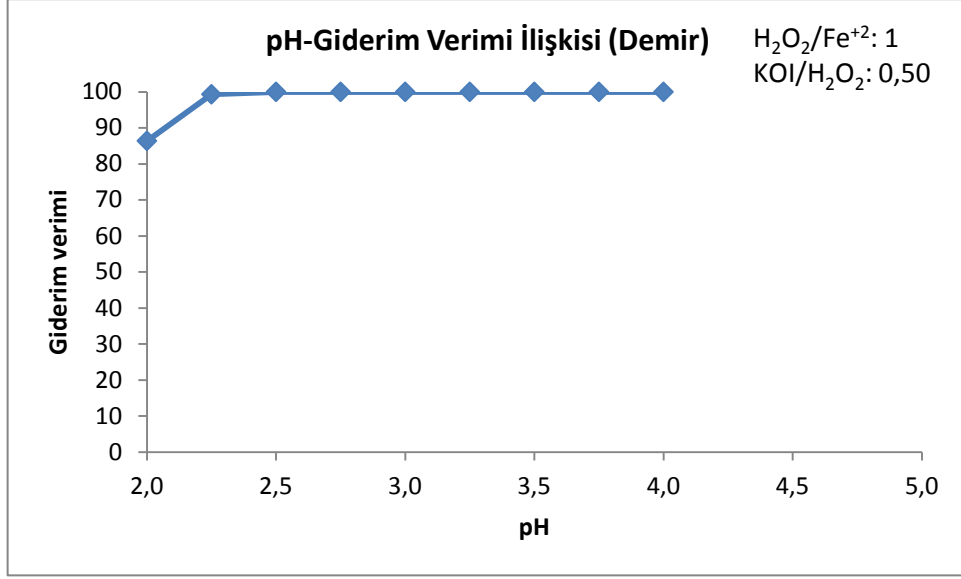
Şekil 4.26 500 ml Elektrofenton prosesinde değişken parametrelere bağlı Zn giderim verimi

Metal endüstrisi atıksuyunda elektrofenton prosesi çalışmalarında çinko (Zn) parametresi için; Çizelge 3.6'da verildiği gibi 0,43, 0,50, 0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 2,00, 2,50, 3,00 ve 4,00 farklı KOI/H_2O_2 oranlarında, farklı H_2O_2/Fe^{2+} :0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 1,75, 2,00, 2,25, 2,50, 2,75 ve 3,00 oranlarında ve farklı pH:2,00, 2,25, 2,50, 2,75, 3,00, 3,25, 3,50 ve 3,75 değerlerinde 500 ml'lik elektrofenton çalışmasında çalışma şartlarına bağlı olarak farklı verimler elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.26'ya bakıldığında, Zn giderim veriminin KOI/H_2O_2 oranına bağlı olarak fazla bir değişiklik göstermediği ve optimum şartın 0,43 değeri için % 90'larda giderim verimi elde edildiği görülmüştür. Diğer değişken parametreler için ise optimum şartların; H_2O_2/Fe^{2+} :0,75 için % 90'larda ve pH:2,00 için % 91'lerde sağlandığı görülmektedir. Optimum şart; KOI/H_2O_2 :0,43, H_2O_2/Fe^{2+} :0,55 ve pH:3 değerlerinde olup çıkış konsantrasyon değerleri Çizelge 3.2'de verilen İSKİ Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği standartlarını sağlamaktadır. Çizelge 4.27'de Elektrofenton prosesinde çinko için elde edilen çıkış konsantrasyonları ve giderim verimleri detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 4.27 Elektrofenton prosesi çalışması Çinko giderim sonuçları

Deney no	KOI/H ₂ O ₂	H ₂ O ₂ / Fe ⁺²	pH	KOIsample	H ₂ O ₂ (ml)	Fe ⁺² (ml)	I (A)	Zn (mg/l)	Zn (%)
1	0,43	0,55	3,00	300	2,10	16,14	3,33	8	90
2	0,50	0,55	3,00	300	1,80	13,82	2,85	8	90
3	0,75	0,55	3,00	300	1,20	9,21	1,90	8	90
4	1,00	0,55	3,00	300	0,90	6,91	1,43	8	90
5	1,25	0,55	3,00	300	0,72	5,53	1,14	8	90
6	1,50	0,55	3,00	300	0,60	4,61	0,95	8	90
7	2,00	0,55	3,00	300	0,45	3,45	0,71	8	90
8	2,50	0,55	3,00	300	0,36	2,76	0,57	8	90
9	3,00	0,55	3,00	300	0,30	2,30	0,48	8	90
10	4,00	0,55	3,00	300	0,23	1,73	0,36	8	90
11	0,50	0,75	3,00	300	1,80	10,13	2,09	8	90
12	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	8	90
13	0,50	1,25	3,00	300	1,80	6,08	1,26	8	90
14	0,50	1,50	3,00	300	1,80	5,07	1,26	8	90
15	0,50	1,75	3,00	300	1,80	4,34	0,90	8	90
16	0,50	2,00	3,00	300	1,80	3,80	0,79	8	90
17	0,50	2,25	3,00	300	1,80	3,38	0,70	8	90
18	0,50	2,50	3,00	300	1,80	3,04	0,63	8	90
19	0,50	2,75	3,00	300	1,80	2,76	0,57	8	90
20	0,50	3,00	3,00	300	1,80	2,53	0,53	8	90
21	0,50	1,00	2,00	300	1,80	7,60	1,57	7	91
22	0,50	1,00	2,25	300	1,80	7,60	1,57	8	90
23	0,50	1,00	2,50	300	1,80	7,60	1,57	8	90
24	0,50	1,00	2,75	300	1,80	7,60	1,57	8	90
25	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	8	90
26	0,50	1,00	3,25	300	1,80	7,60	1,57	8	90
27	0,50	1,00	3,50	300	1,80	7,60	1,57	7	91
28	0,50	1,00	3,75	300	1,80	7,60	1,57	8	90
29	0,50	1,00	4,00	300	1,80	7,60	1,57	8	90
30	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	7	91
31	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	8	90
32	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	8	90
							HAM ATIKSU	77 mg/l	



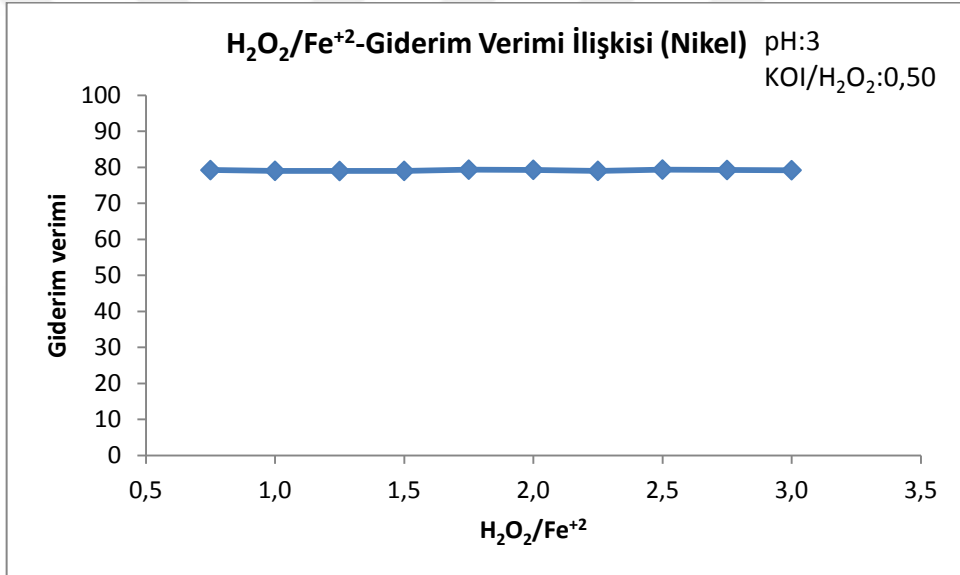
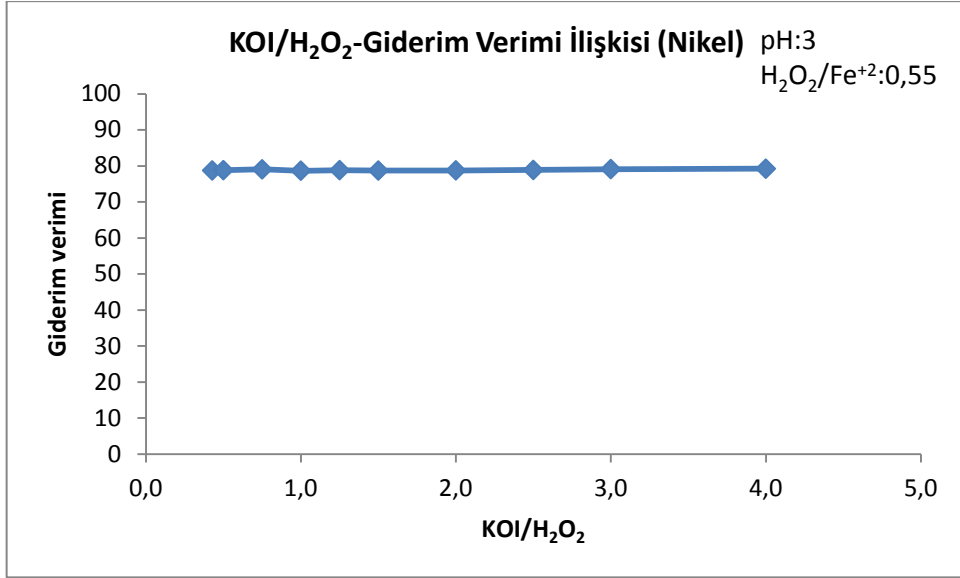


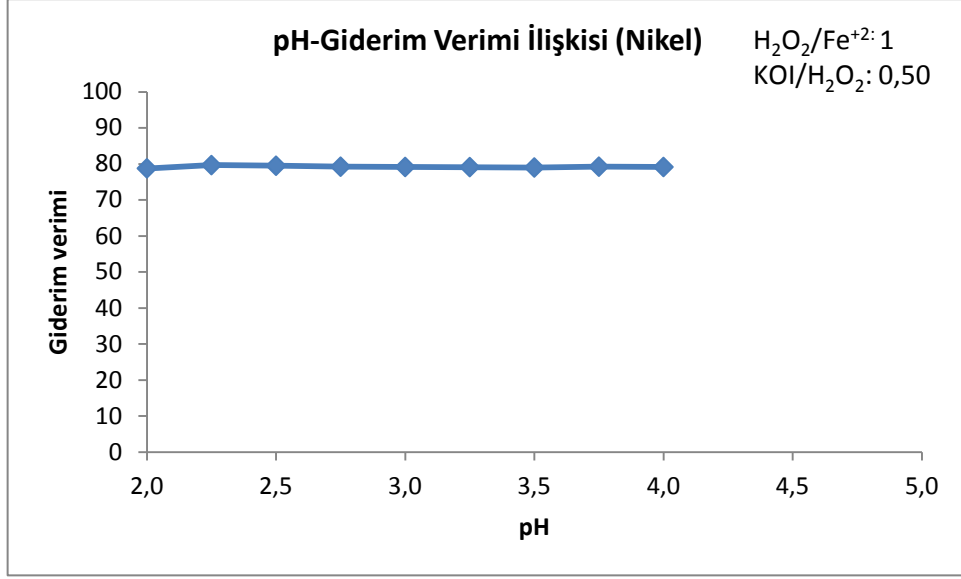
Şekil 4.27 500 ml Elektrofenton prosesinde değişken parametrelere bağlı Fe giderim verimi

Metal endüstrisi atıksuyunda elektrofenton prosesi çalışmalarında demir (Fe) parametresi için; Çizelge 3.6'da verildiği gibi 0,43, 0,50, 0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 2,00, 2,50, 3,00 ve 4,00 farklı KOI/H_2O_2 oranlarında, farklı H_2O_2/Fe^{2+} :0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 1,75, 2,00, 2,25, 2,50, 2,75 ve 3,00 oranlarında ve farklı pH:2,00, 2,25, 2,50, 2,75, 3,00, 3,25, 3,50 ve 3,75 değerlerinde 500 ml'lik elektrofenton çalışmasında çalışma şartlarına bağlı olarak farklı verimler elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.27'ye bakıldığında, Fe giderim veriminin KOI/H_2O_2 oranına bağlı olarak fazla bir değişiklik göstermediği ve optimum şartın 0,75 değeri için % 86'larda giderim verimi elde edildiği görülmüştür. Diğer değişken parametreler için ise optimum şartların; H_2O_2/Fe^{2+} :1,50 için % 100'lerde ve pH:2,50 için % 100'lerde sağlandığı görülmektedir. KOI/H_2O_2 : 0,50, H_2O_2/Fe^{2+} :1,00 ve pH: 2,25 değerlerinde giderim verimi % 100'lerde elde edilmiş ancak İSKİ Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği standartlarında Fe ile ilgili limit değer yer almadığı için değerlendirme yapılamamıştır. Çizelge 4.28'de Elektrofenton prosesinde demir için elde edilen çıkış konsantrasyonları ve giderim verimleri detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 4.28 Elektrofenton prosesi çalışması Demir giderim sonuçları

Deney no	KOI/H ₂ O ₂	H ₂ O ₂ / Fe ⁺²	pH	KOIsample	H ₂ O ₂ (ml)	Fe ⁺² (ml)	I (A)	Fe (mg/l)	Fe (%)
1	0,43	0,55	3,00	300	2,10	16,14	3,33	19	85
2	0,50	0,55	3,00	300	1,80	13,82	2,85	19	85
3	0,75	0,55	3,00	300	1,20	9,21	1,90	18	86
4	1,00	0,55	3,00	300	0,90	6,91	1,43	19	85
5	1,25	0,55	3,00	300	0,72	5,53	1,14	19	85
6	1,50	0,55	3,00	300	0,60	4,61	0,95	19	85
7	2,00	0,55	3,00	300	0,45	3,45	0,71	18	86
8	2,50	0,55	3,00	300	0,36	2,76	0,57	18	86
9	3,00	0,55	3,00	300	0,30	2,30	0,48	18	86
10	4,00	0,55	3,00	300	0,23	1,73	0,36	18	86
11	0,50	0,75	3,00	300	1,80	10,13	2,09	16	87
12	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	13	90
13	0,50	1,25	3,00	300	1,80	6,08	1,26	12	91
14	0,50	1,50	3,00	300	1,80	5,07	1,26	0	100
15	0,50	1,75	3,00	300	1,80	4,34	0,90	0	100
16	0,50	2,00	3,00	300	1,80	3,80	0,79	0	100
17	0,50	2,25	3,00	300	1,80	3,38	0,70	0	100
18	0,50	2,50	3,00	300	1,80	3,04	0,63	0	100
19	0,50	2,75	3,00	300	1,80	2,76	0,57	0	100
20	0,50	3,00	3,00	300	1,80	2,53	0,53	1	100
21	0,50	1,00	2,00	300	1,80	7,60	1,57	17	86
22	0,50	1,00	2,25	300	1,80	7,60	1,57	1	99
23	0,50	1,00	2,50	300	1,80	7,60	1,57	0	100
24	0,50	1,00	2,75	300	1,80	7,60	1,57	0	100
25	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	0	100
26	0,50	1,00	3,25	300	1,80	7,60	1,57	0	100
27	0,50	1,00	3,50	300	1,80	7,60	1,57	0	100
28	0,50	1,00	3,75	300	1,80	7,60	1,57	0	100
29	0,50	1,00	4,00	300	1,80	7,60	1,57	0	100
30	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	0	100
31	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	0	100
32	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	0	100
							HAM ATIKSU	126 mg/l	



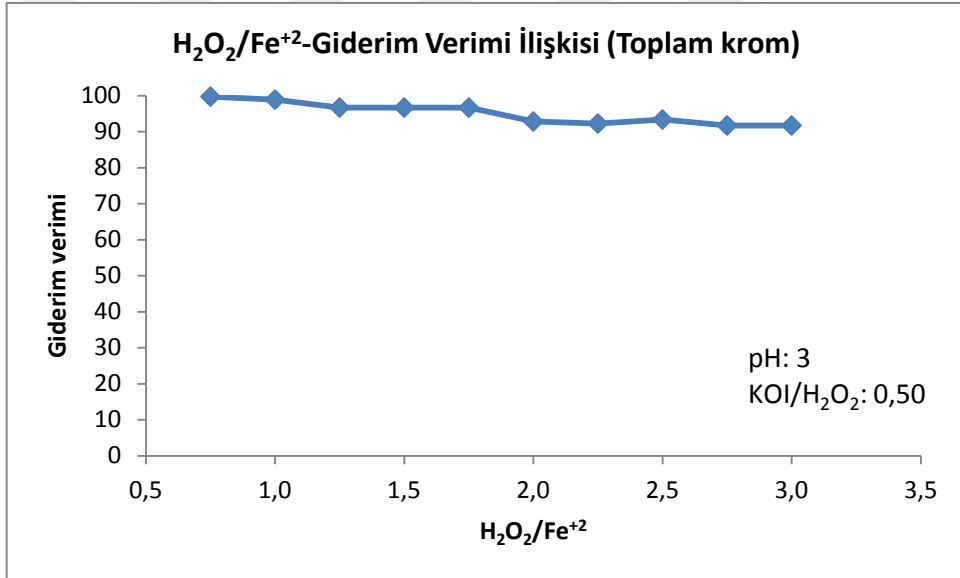
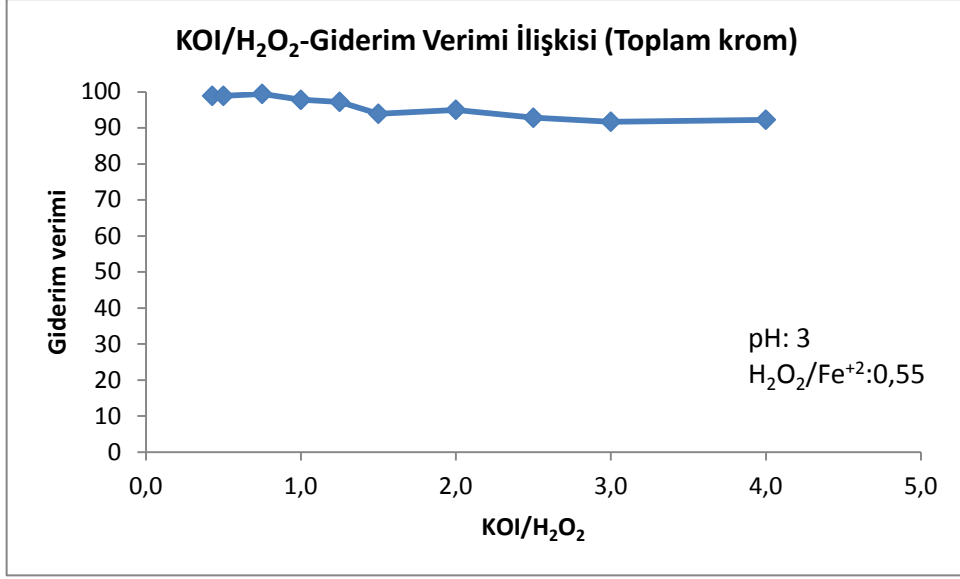


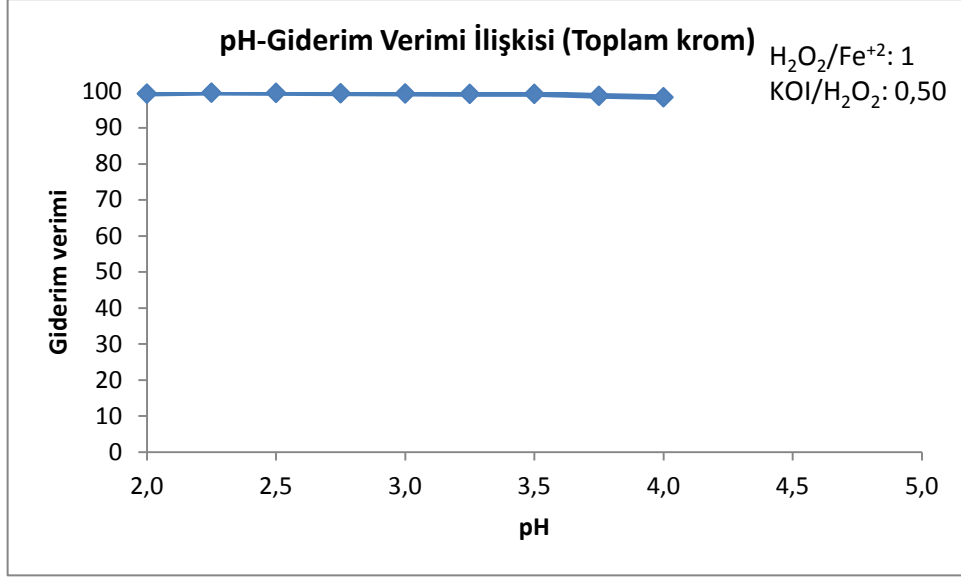
Şekil 4.28 500 ml Elektrofenton prosesinde değişken parametrelere bağlı Ni giderim verimi

Metal endüstrisi atıksuyunda elektrofenton prosesi çalışmalarında nikel (Ni) parametresi için; Çizelge 3.6'da verildiği gibi 0,43, 0,50, 0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 2,00, 2,50, 3,00 ve 4,00 farklı KOI/ H_2O_2 oranlarında, farklı H_2O_2/Fe^{2+} :0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 1,75, 2,00, 2,25, 2,50, 2,75 ve 3,00 oranlarında ve farklı pH:2,00, 2,25, 2,50, 2,75, 3,00, 3,25, 3,50 ve 3,75 değerlerinde 500 ml'lik elektrofenton çalışmasında çalışma şartlarına bağlı olarak verimlerde fazla bir değişiklik meydana gelmediği görülmektedir. Şekil 4.28'e bakıldığında, Ni giderim veriminin KOI/ H_2O_2 oranına bağlı olarak fazla bir değişiklik göstermediği ve optimum şartın 0,43 değeri için % 79'larda giderim verimi elde edildiği görülmüştür. Diğer değişken parametreler için ise optimum şartların; H_2O_2/Fe^{2+} :0.75 için % 79'larda ve pH:2,25 için % 80 olarak sağlandığı görülmektedir. Ancak, elde edilen bu giderim verim değerlerine rağmen, çıkış konsantrasyon değerleri Çizelge 3.2'de verilen İSKİ Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği standartlarını sağlamamaktadır. Bu çalışma sonucunda nikel metalinin standartları sağlayacak şekilde giderilebilmesi için elektrofenton sonrasında ilave bir arıtma prosesine tabi tutulması gerektiği görülmüştür. Çizelge 4.29'da Elektrofenton prosesinde nikel için elde edilen çıkış konsantrasyonları ve giderim verimleri detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 4.29 Elektrofenton prosesi çalışması Nikel giderim sonuçları

Deney no	KOI/H ₂ O ₂	H ₂ O ₂ / Fe ⁺²	pH	KOIsample	H ₂ O ₂ (ml)	Fe ⁺² (ml)	I (A)	Ni (mg/l)	Ni (%)
1	0,43	0,55	3,00	300	2,10	16,14	3,33	21,1	79
2	0,50	0,55	3,00	300	1,80	13,82	2,85	21,0	79
3	0,75	0,55	3,00	300	1,20	9,21	1,90	20,8	79
4	1,00	0,55	3,00	300	0,90	6,91	1,43	21,1	79
5	1,25	0,55	3,00	300	0,72	5,53	1,14	21,0	79
6	1,50	0,55	3,00	300	0,60	4,61	0,95	21,1	79
7	2,00	0,55	3,00	300	0,45	3,45	0,71	21,0	79
8	2,50	0,55	3,00	300	0,36	2,76	0,57	21,0	79
9	3,00	0,55	3,00	300	0,30	2,30	0,48	20,9	79
10	4,00	0,55	3,00	300	0,23	1,73	0,36	20,7	79
11	0,50	0,75	3,00	300	1,80	10,13	2,09	20,6	79
12	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	20,8	79
13	0,50	1,25	3,00	300	1,80	6,08	1,26	20,8	79
14	0,50	1,50	3,00	300	1,80	5,07	1,26	20,8	79
15	0,50	1,75	3,00	300	1,80	4,34	0,90	20,5	79
16	0,50	2,00	3,00	300	1,80	3,80	0,79	20,5	79
17	0,50	2,25	3,00	300	1,80	3,38	0,70	20,8	79
18	0,50	2,50	3,00	300	1,80	3,04	0,63	20,4	79
19	0,50	2,75	3,00	300	1,80	2,76	0,57	20,6	79
20	0,50	3,00	3,00	300	1,80	2,53	0,53	20,6	79
21	0,50	1,00	2,00	300	1,80	7,60	1,57	21,0	79
22	0,50	1,00	2,25	300	1,80	7,60	1,57	20,1	80
23	0,50	1,00	2,50	300	1,80	7,60	1,57	20,3	79
24	0,50	1,00	2,75	300	1,80	7,60	1,57	20,6	79
25	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	20,7	79
26	0,50	1,00	3,25	300	1,80	7,60	1,57	20,7	79
27	0,50	1,00	3,50	300	1,80	7,60	1,57	20,8	79
28	0,50	1,00	3,75	300	1,80	7,60	1,57	20,6	79
29	0,50	1,00	4,00	300	1,80	7,60	1,57	20,7	79
30	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	20,5	79
31	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	20,7	79
32	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	20,8	79
							HAM ATIKSU	99 mg/l	



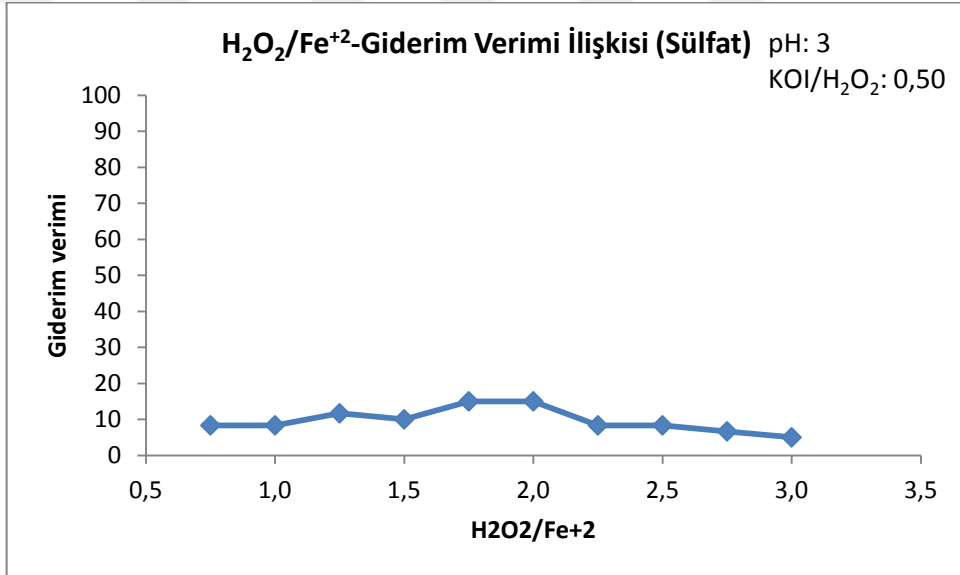
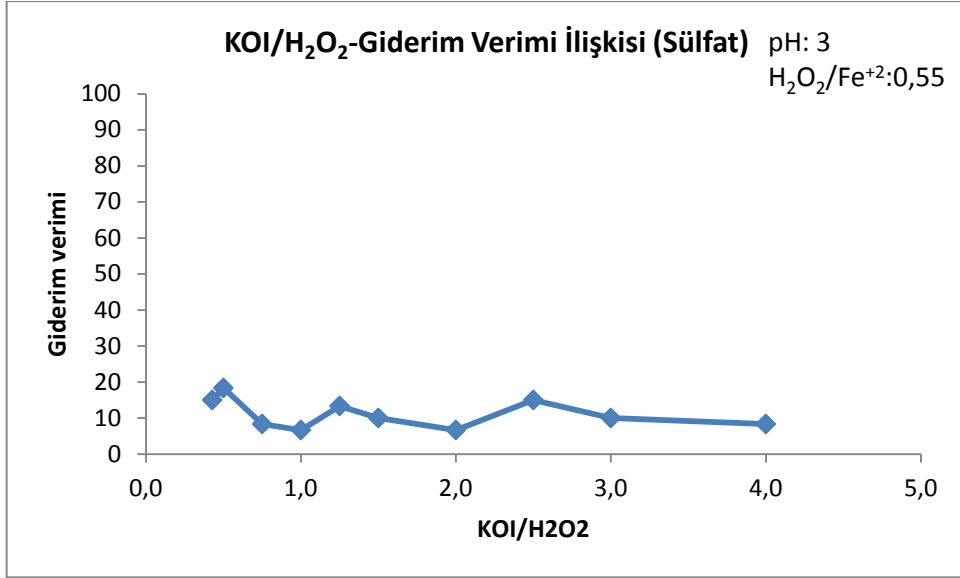


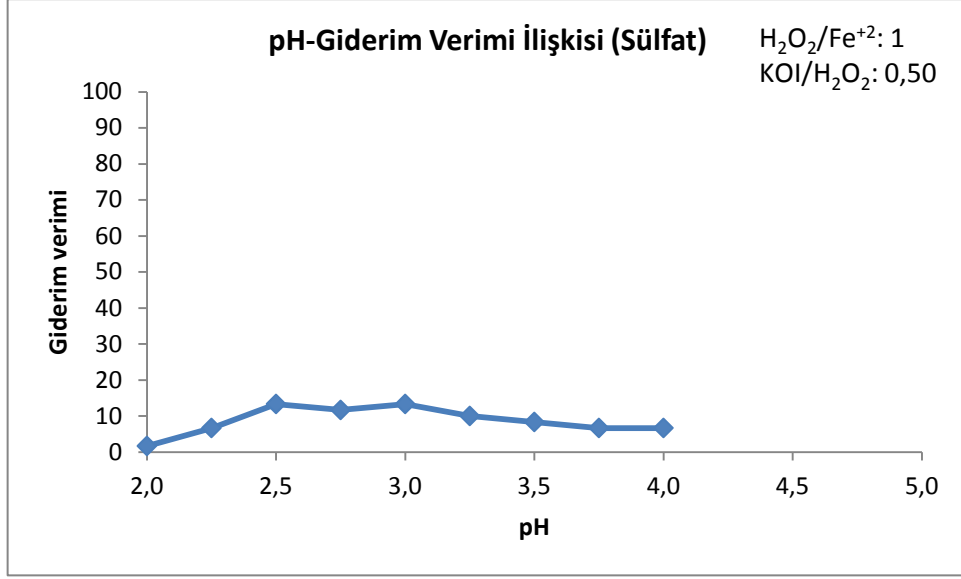
Şekil 4.29 500 ml Elektrofenton prosesinde değişken parametrelere bağlı toplam Cr giderim verimi

Metal endüstrisi atıksuyunda elektrofenton prosesi çalışmalarında krom (Cr) parametresi için; Çizelge 3.6'da verildiği gibi 0,43, 0,50, 0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 2,00, 2,50, 3,00 ve 4,00 farklı COD/ H_2O_2 oranlarında, farklı H_2O_2/Fe^{2+} :0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 1,75, 2,00, 2,25, 2,50, 2,75 ve 3,00 oranlarında ve farklı pH:2,00, 2,25, 2,50, 2,75, 3,00, 3,25, 3,50 ve 3,75 değerlerinde 500 ml'lik elektrofenton çalışmasında çalışma şartlarına bağlı olarak farklı verimler elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.29'a bakıldığında, toplam Cr giderim veriminin KOI/ H_2O_2 oranına bağlı olarak azaldığı ve optimum şartın 0,43 değeri için % 99'larda giderim verimi elde edildiği görülmüştür. Diğer değişken parametreler için ise optimum şartların; H_2O_2/Fe^{2+} ve giderim verimi ilişkisine bakıldığında oranla verimin azaldığı görülmekte olup optimum şartın H_2O_2/Fe^{2+} :0,75 için % 100'lerde ve pH:2,00 için % 100'lerde sağlandığı görülmektedir. KOI/ H_2O_2 : 0,43, H_2O_2/Fe^{2+} :0,55 ve pH: 3,00 değerlerinde giderim verimi % 99'larda elde edilmiş olup bu şartlardaki çıkış konsantrasyon değerlerinin Çizelge 3.2'de verilen İSKİ Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği standartlarına ulaştığı görülmüştür. Çizelge 4.30'da Elektrofenton prosesinde toplam krom için elde edilen çıkış konsantrasyonları ve giderim verimleri detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 4.30 Elektrofenton prosesi çalışması Toplam krom giderim sonuçları

Deney no	KOI/H ₂ O ₂	H ₂ O ₂ / Fe ⁺²	pH	KOIsample	H ₂ O ₂ (ml)	Fe ⁺² (ml)	I (A)	Cr (mg/l)	Cr (%)
1	0,43	0,55	3,00	300	2,10	16,14	3,33	2,0	99
2	0,50	0,55	3,00	300	1,80	13,82	2,85	2,0	99
3	0,75	0,55	3,00	300	1,20	9,21	1,90	1,0	99
4	1,00	0,55	3,00	300	0,90	6,91	1,43	4,0	98
5	1,25	0,55	3,00	300	0,72	5,53	1,14	5,0	97
6	1,50	0,55	3,00	300	0,60	4,61	0,95	11,0	94
7	2,00	0,55	3,00	300	0,45	3,45	0,71	9,0	95
8	2,50	0,55	3,00	300	0,36	2,76	0,57	13,0	93
9	3,00	0,55	3,00	300	0,30	2,30	0,48	15,0	92
10	4,00	0,55	3,00	300	0,23	1,73	0,36	14,0	92
11	0,50	0,75	3,00	300	1,80	10,13	2,09	0,5	100
12	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	2,0	99
13	0,50	1,25	3,00	300	1,80	6,08	1,26	6,0	97
14	0,50	1,50	3,00	300	1,80	5,07	1,26	6,0	97
15	0,50	1,75	3,00	300	1,80	4,34	0,90	6,0	97
16	0,50	2,00	3,00	300	1,80	3,80	0,79	13,0	93
17	0,50	2,25	3,00	300	1,80	3,38	0,70	14,0	92
18	0,50	2,50	3,00	300	1,80	3,04	0,63	12,0	93
19	0,50	2,75	3,00	300	1,80	2,76	0,57	15,0	92
20	0,50	3,00	3,00	300	1,80	2,53	0,53	15,0	92
21	0,50	1,00	2,00	300	1,80	7,60	1,57	0,9	100
22	0,50	1,00	2,25	300	1,80	7,60	1,57	0,4	100
23	0,50	1,00	2,50	300	1,80	7,60	1,57	0,5	100
24	0,50	1,00	2,75	300	1,80	7,60	1,57	0,7	100
25	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	0,8	100
26	0,50	1,00	3,25	300	1,80	7,60	1,57	1,0	99
27	0,50	1,00	3,50	300	1,80	7,60	1,57	1,0	99
28	0,50	1,00	3,75	300	1,80	7,60	1,57	2,0	99
29	0,50	1,00	4,00	300	1,80	7,60	1,57	2,7	99
30	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	1,0	99
31	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	1,0	99
32	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	1,0	99
							HAM ATIKSU	181 mg/l	



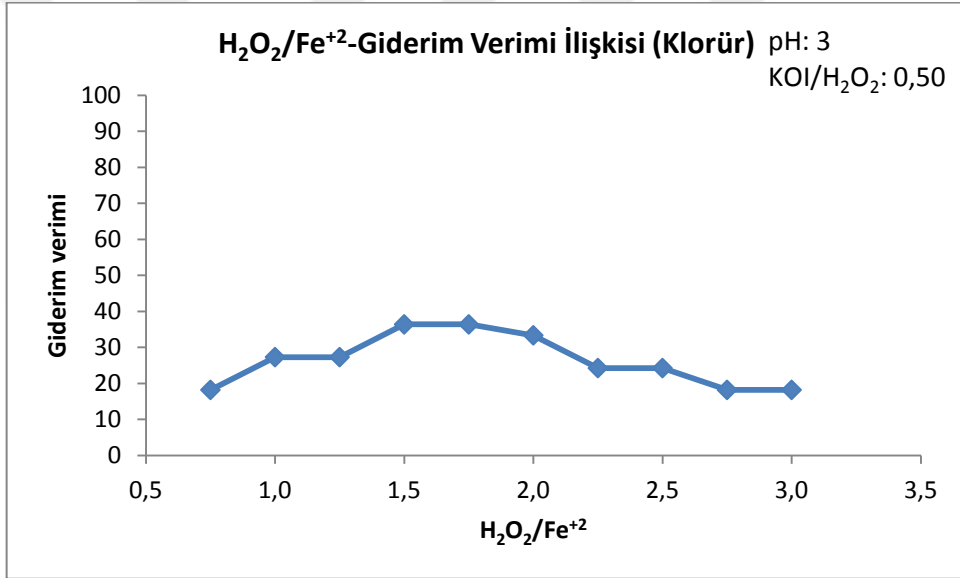
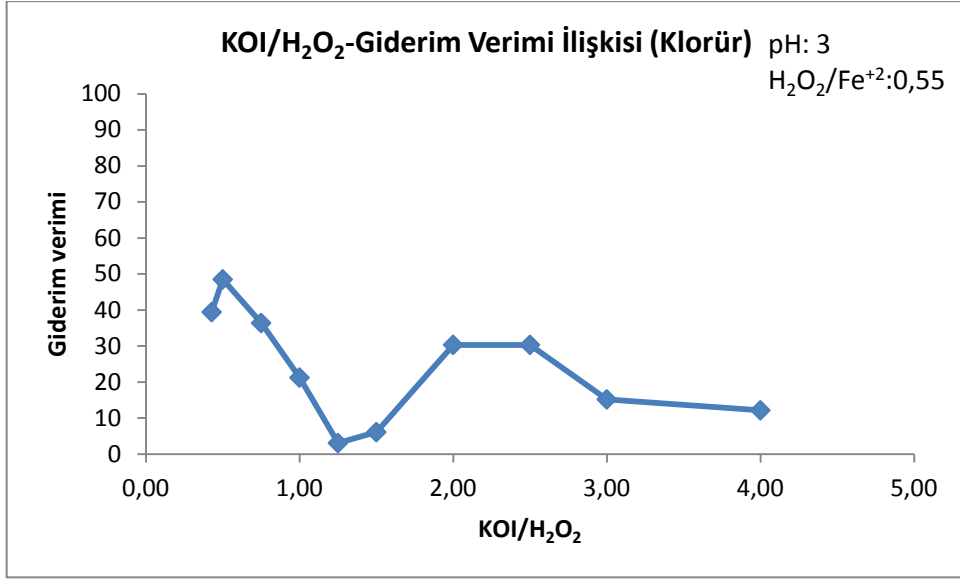


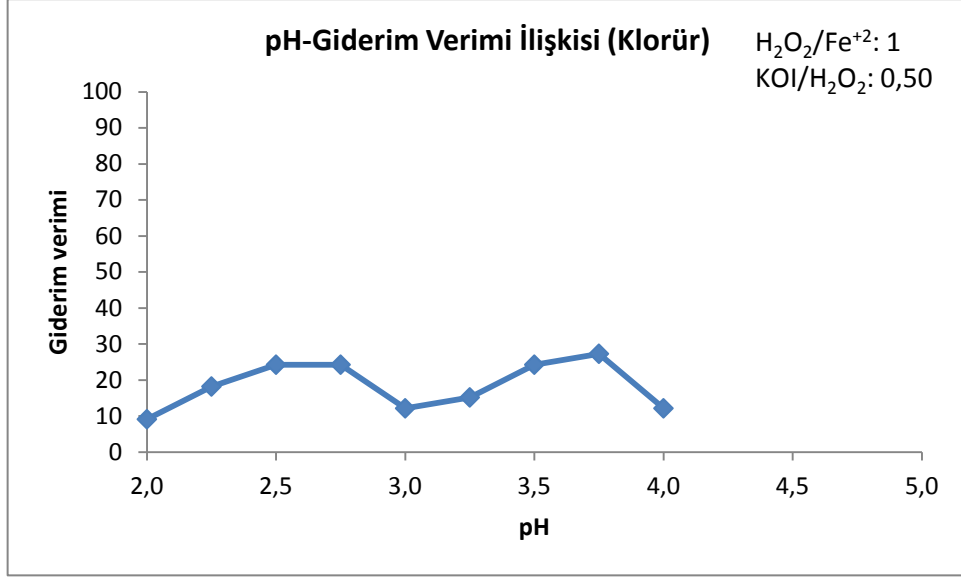
Şekil 4.30 500 ml Elektrofenton prosesinde değişken parametrelere bağlı SO_4^{2-} giderim verimi

Metal endüstrisi atıksuyunda elektrofenton prosesi çalışmalarında sülfat (SO_4^{2-}) parametresi için; Çizelge 3.6'da verildiği gibi 0,43, 0,50, 0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 2,00, 2,50, 3,00 ve 4,00 farklı KOI/ H_2O_2 oranlarında, farklı H_2O_2/Fe^{2+} :0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 1,75, 2,00, 2,25, 2,50, 2,75 ve 3,00 oranlarında ve farklı pH:2,00, 2,25, 2,50, 2,75, 3,00, 3,25, 3,50 ve 3,75 değerlerinde 500 ml'lik elektrofenton çalışmasında çalışma şartlarına bağlı olarak farklı verimler elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.30'a bakıldığında, SO_4^{2-} giderim veriminin KOI/ H_2O_2 oranına bağlı olarak değişiklikler gösterdiği ve optimum şartın 0,50 değerinde giderim veriminin % 18'lerde kaldığı görülmüştür. Diğer değişken parametreler için ise optimum şartlar; H_2O_2/Fe^{2+} :1,75 için %15'lerde ve pH:2,50 için %13'lerde kaldığı görülmektedir. KOI/ H_2O_2 : 0,50, H_2O_2/Fe^{2+} :0,55 ve pH: 3,00 değerlerinde giderim verimi % 18'lerde kalmakta ve çıkış konsantrasyon değerleri Çizelge 3.2'de verilmiş olan İSKİ Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği standartlarını sağlamamaktadır. Bu çalışma sonucunda sülfat parametresinin standartları sağlayacak şekilde giderilebilmesi için elektrofenton sonrasında ilave bir arıtma prosesine tabi tutulması gerektiği görülmüştür. Çizelge 4.31'de Elektrofenton prosesinde sülfat için elde edilen çıkış konsantrasyonları ve giderim verimleri detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 4.31 Elektrofenton prosesi çalışması Sülfat giderim sonuçları

Deney no	KOI/H ₂ O ₂	H ₂ O ₂ / Fe ⁺²	pH	KOIsample	H ₂ O ₂ (ml)	Fe ⁺² (ml)	I (A)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (%)
1	0,43	0,55	3,00	300	2,10	16,14	3,33	2550	15
2	0,50	0,55	3,00	300	1,80	13,82	2,85	2450	18
3	0,75	0,55	3,00	300	1,20	9,21	1,90	2750	8
4	1,00	0,55	3,00	300	0,90	6,91	1,43	2800	7
5	1,25	0,55	3,00	300	0,72	5,53	1,14	2600	13
6	1,50	0,55	3,00	300	0,60	4,61	0,95	2700	10
7	2,00	0,55	3,00	300	0,45	3,45	0,71	2800	7
8	2,50	0,55	3,00	300	0,36	2,76	0,57	2550	15
9	3,00	0,55	3,00	300	0,30	2,30	0,48	2700	10
10	4,00	0,55	3,00	300	0,23	1,73	0,36	2750	8
11	0,50	0,75	3,00	300	1,80	10,13	2,09	2750	8
12	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	2750	8
13	0,50	1,25	3,00	300	1,80	6,08	1,26	2650	12
14	0,50	1,50	3,00	300	1,80	5,07	1,26	2700	10
15	0,50	1,75	3,00	300	1,80	4,34	0,90	2550	15
16	0,50	2,00	3,00	300	1,80	3,80	0,79	2550	15
17	0,50	2,25	3,00	300	1,80	3,38	0,70	2750	8
18	0,50	2,50	3,00	300	1,80	3,04	0,63	2750	8
19	0,50	2,75	3,00	300	1,80	2,76	0,57	2800	7
20	0,50	3,00	3,00	300	1,80	2,53	0,53	2850	5
21	0,50	1,00	2,00	300	1,80	7,60	1,57	2950	2
22	0,50	1,00	2,25	300	1,80	7,60	1,57	2800	7
23	0,50	1,00	2,50	300	1,80	7,60	1,57	2600	13
24	0,50	1,00	2,75	300	1,80	7,60	1,57	2650	12
25	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	2600	13
26	0,50	1,00	3,25	300	1,80	7,60	1,57	2700	10
27	0,50	1,00	3,50	300	1,80	7,60	1,57	2750	8
28	0,50	1,00	3,75	300	1,80	7,60	1,57	2800	7
29	0,50	1,00	4,00	300	1,80	7,60	1,57	2800	7
30	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	2800	7
31	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	2700	10
32	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	2700	10
							HAM ATIKSU	3000 mg/l	



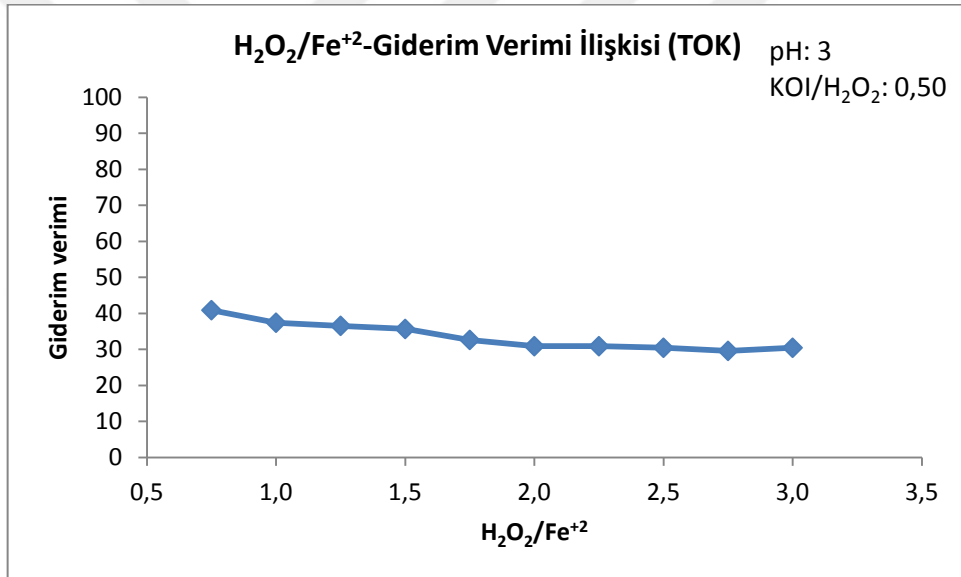
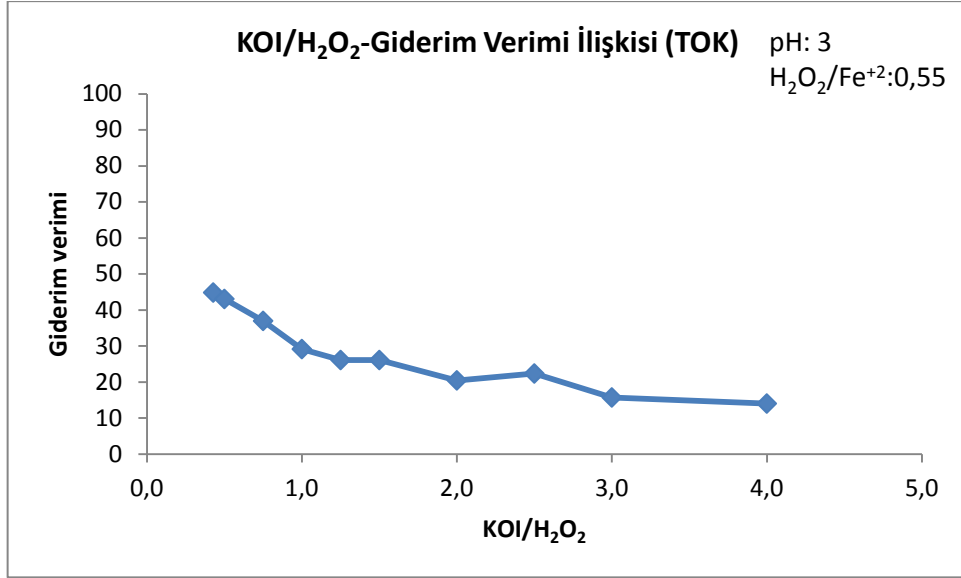


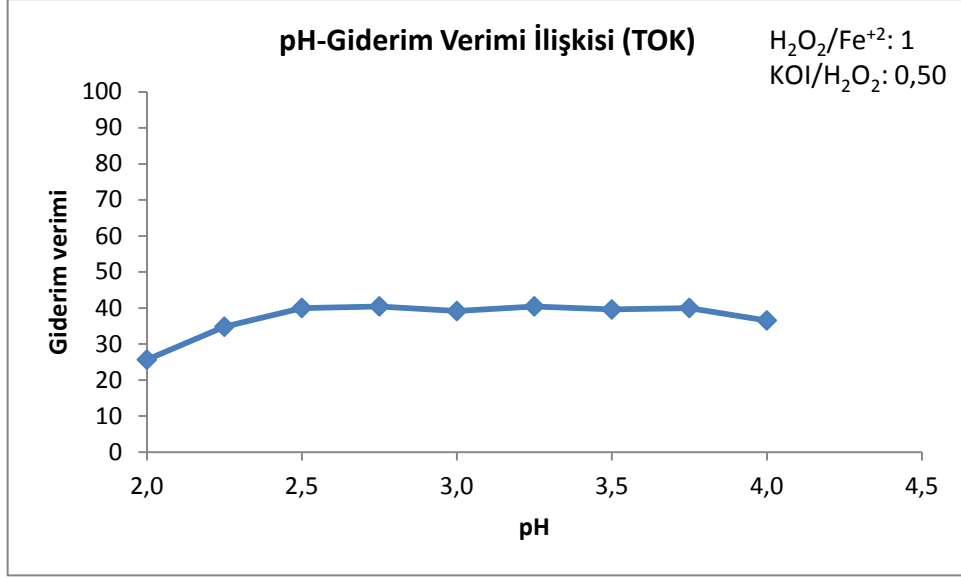
Şekil 4.31 500 ml Elektrofenton prosesinde değişken parametrelere bağlı Cl^- giderim verimi

Metal endüstrisi atıksuyunda elektrofenton prosesi çalışmalarında klorür (Cl^-) parametresi için; Çizelge 3.6'da verildiği gibi 0,43, 0,50, 0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 2,00, 2,50, 3,00 ve 4,00 farklı KOI/H_2O_2 oranlarında, farklı H_2O_2/Fe^{2+} :0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 1,75, 2,00, 2,25, 2,50, 2,75 ve 3,00 oranlarında ve farklı pH:2,00, 2,25, 2,50, 2,75, 3,00, 3,25, 3,50 ve 3,75 değerlerinde 500 ml'lik elektrofenton çalışmasında çalışma şartlarına bağlı olarak farklı verimler elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.31'e bakıldığında, Cl^- giderim veriminin KOI/H_2O_2 oranına bağlı olarak değişkenlik gösterdiği ve optimum şartın 0,50 değerinde giderim veriminin % 48'lerde kaldığı görülmüştür. Diğer değişken parametreler için ise optimum şartlar; H_2O_2/Fe^{2+} :1,50 için % 36'larda ve pH:3,75 için %27'lerde kaldığı görülmektedir. Cl^- parametresi için; KOI/H_2O_2 : 0,50, H_2O_2/Fe^{2+} :0,55 ve pH: 3,00 değerlerinde giderim veriminin % 48'lere ulaştığı görülmüştür. Ham atıksuyun klorür konsantrasyonu çıkış değerini sağlıyor olsa da klorür için % giderim verimini görmek amaçlı araştırma yapılmıştır. Çizelge 4.32'de Elektrofenton prosesinde klorür için elde edilen çıkış konsantrasyonları ve giderim verimleri detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 4.32 Elektrofenton prosesi çalışması Klorür giderim sonuçları

Deney no	KOI/H ₂ O ₂	H ₂ O ₂ / Fe ⁺²	pH	KOIsample	H ₂ O ₂ (ml)	Fe ⁺² (ml)	I (A)	Cl ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (%)
1	0,43	0,55	3,00	300	2,10	16,14	3,33	666	39
2	0,50	0,55	3,00	300	1,80	13,82	2,85	566	48
3	0,75	0,55	3,00	300	1,20	9,21	1,90	700	36
4	1,00	0,55	3,00	300	0,90	6,91	1,43	866	21
5	1,25	0,55	3,00	300	0,72	5,53	1,14	1066	3
6	1,50	0,55	3,00	300	0,60	4,61	0,95	1033	6
7	2,00	0,55	3,00	300	0,45	3,45	0,71	766	30
8	2,50	0,55	3,00	300	0,36	2,76	0,57	766	30
9	3,00	0,55	3,00	300	0,30	2,30	0,48	933	15
10	4,00	0,55	3,00	300	0,23	1,73	0,36	966	12
11	0,50	0,75	3,00	300	1,80	10,13	2,09	900	18
12	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	800	27
13	0,50	1,25	3,00	300	1,80	6,08	1,26	800	27
14	0,50	1,50	3,00	300	1,80	5,07	1,26	700	36
15	0,50	1,75	3,00	300	1,80	4,34	0,90	700	36
16	0,50	2,00	3,00	300	1,80	3,80	0,79	733	33
17	0,50	2,25	3,00	300	1,80	3,38	0,70	833	24
18	0,50	2,50	3,00	300	1,80	3,04	0,63	833	24
19	0,50	2,75	3,00	300	1,80	2,76	0,57	900	18
20	0,50	3,00	3,00	300	1,80	2,53	0,53	900	18
21	0,50	1,00	2,00	300	1,80	7,60	1,57	1000	9
22	0,50	1,00	2,25	300	1,80	7,60	1,57	900	18
23	0,50	1,00	2,50	300	1,80	7,60	1,57	833	24
24	0,50	1,00	2,75	300	1,80	7,60	1,57	833	24
25	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	966	12
26	0,50	1,00	3,25	300	1,80	7,60	1,57	933	15
27	0,50	1,00	3,50	300	1,80	7,60	1,57	833	24
28	0,50	1,00	3,75	300	1,80	7,60	1,57	800	27
29	0,50	1,00	4,00	300	1,80	7,60	1,57	966	12
30	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	1033	6
31	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	966	12
32	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	966	12
							HAM ATIKSU	1100 mg/l	





Şekil 4.32 500 ml Elektrofenton prosesinde değişken parametrelere bağlı TOK giderim verimi

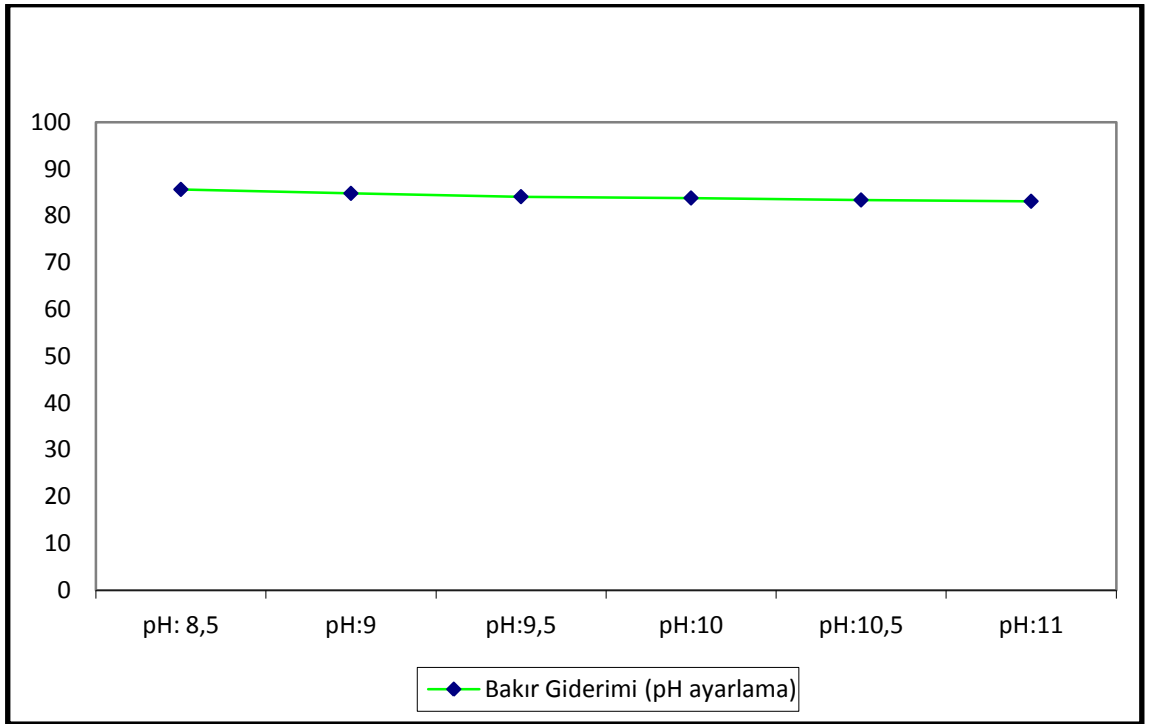
Metal endüstrisi atıksuyunda elektrofenton prosesi çalışmalarında Toplam Organik Karbon (TOK) parametresi için; Çizelge 3.6'da verildiği gibi 0,43, 0,50, 0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 2,00, 2,50, 3,00 ve 4,00 farklı KOI/ H_2O_2 oranlarında, farklı H_2O_2/Fe^{2+} :0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 1,75, 2,00, 2,25, 2,50, 2,75 ve 3,00 oranlarında ve farklı pH:2,00, 2,25, 2,50, 2,75, 3,00, 3,25, 3,50 ve 3,75 değerlerinde 500 ml'lik elektrofenton çalışmasında çalışma şartlarına bağlı olarak farklı verimler elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.32'ye bakıldığında, TOK giderim veriminin KOI/ H_2O_2 oranıyla azalma gösterdiği ve optimum şartın 0,43 değerinde giderim veriminin % 45'lere ulaştığı görülmüştür. Diğer değişken parametreler için ise optimum şartlar; H_2O_2/Fe^{2+} ve giderim verimi ilişkisine bakıldığında oranla verimin azaldığı görülmekte olup optimum şartın H_2O_2/Fe^{2+} :0,75 için % 41'lerde iken diğer bir değişken parametre olan pH için ise; pH:2,50 için % 40'larda kaldığı görülmektedir. KOI/ H_2O_2 : 0,43, H_2O_2/Fe^{2+} :0,55 ve pH: 3,00 değerlerinde giderim veriminin %45'lere ulaştığı görülmüştür. Çizelge 4.33'de Elektrofenton prosesinde TOK için elde edilen çıkış konsantrasyonları ve giderim verimleri detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 4.33 Elektrofenton prosesi çalışması TOK giderim sonuçları

Deney no	KOI/H ₂ O ₂	H ₂ O ₂ / Fe ⁺²	pH	KOIsample	H ₂ O ₂ (ml)	Fe ⁺² (ml)	I (A)	TOK (mg/l)	TOK (%)
1	0,43	0,55	3,00	300	2,10	16,14	3,33	127	45
2	0,50	0,55	3,00	300	1,80	13,82	2,85	131	43
3	0,75	0,55	3,00	300	1,20	9,21	1,90	145	37
4	1,00	0,55	3,00	300	0,90	6,91	1,43	163	29
5	1,25	0,55	3,00	300	0,72	5,53	1,14	170	26
6	1,50	0,55	3,00	300	0,60	4,61	0,95	170	26
7	2,00	0,55	3,00	300	0,45	3,45	0,71	183	20
8	2,50	0,55	3,00	300	0,36	2,76	0,57	179	22
9	3,00	0,55	3,00	300	0,30	2,30	0,48	194	16
10	4,00	0,55	3,00	300	0,23	1,73	0,36	198	14
11	0,50	0,75	3,00	300	1,80	10,13	2,09	136	41
12	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	144	37
13	0,50	1,25	3,00	300	1,80	6,08	1,26	146	37
14	0,50	1,50	3,00	300	1,80	5,07	1,26	148	36
15	0,50	1,75	3,00	300	1,80	4,34	0,90	155	33
16	0,50	2,00	3,00	300	1,80	3,80	0,79	159	31
17	0,50	2,25	3,00	300	1,80	3,38	0,70	159	31
18	0,50	2,50	3,00	300	1,80	3,04	0,63	160	30
19	0,50	2,75	3,00	300	1,80	2,76	0,57	162	30
20	0,50	3,00	3,00	300	1,80	2,53	0,53	160	30
21	0,50	1,00	2,00	300	1,80	7,60	1,57	171	26
22	0,50	1,00	2,25	300	1,80	7,60	1,57	150	35
23	0,50	1,00	2,50	300	1,80	7,60	1,57	138	40
24	0,50	1,00	2,75	300	1,80	7,60	1,57	137	40
25	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	140	39
26	0,50	1,00	3,25	300	1,80	7,60	1,57	137	40
27	0,50	1,00	3,50	300	1,80	7,60	1,57	139	40
28	0,50	1,00	3,75	300	1,80	7,60	1,57	138	40
29	0,50	1,00	4,00	300	1,80	7,60	1,57	146	37
30	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	139	40
31	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	139	40
32	0,50	1,00	3,00	300	1,80	7,60	1,57	136	41
							HAM ATIKSU	230 mg/l	

4.4 Hidroksit Çöktürmesi için Bulgular

Özellikle literatüre bakıldığında ağır metal gideriminin en yaygın yöntemlerinden birisi hidroksil çöktürmesi şeklinde yapılmaktadır. Bu amaçla laboratuarda yapılan çalışmalarda atıksu üzerinde sadece ağır metal giderimleri için hidroksil çöktürme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Uygulamalara bakıldığında ağır metal gideriminde diğer etkili yöntem olan klasik hidroksit çöktürmesinde pH 8,5 - 9,0 - 9,5 - 10,0 - 10,5 ve 11 seviyelerinde çalışılmıştır. İstenilen pH seviyeleri için NaOH ve H₂SO₄ kullanılmıştır. %1'lik 5 ml polielektrolit ilavesinden sonra 2 saatlik çöktürmeye bırakılan numunelerden daha sonra örnekler alınarak analizler yapılmıştır.



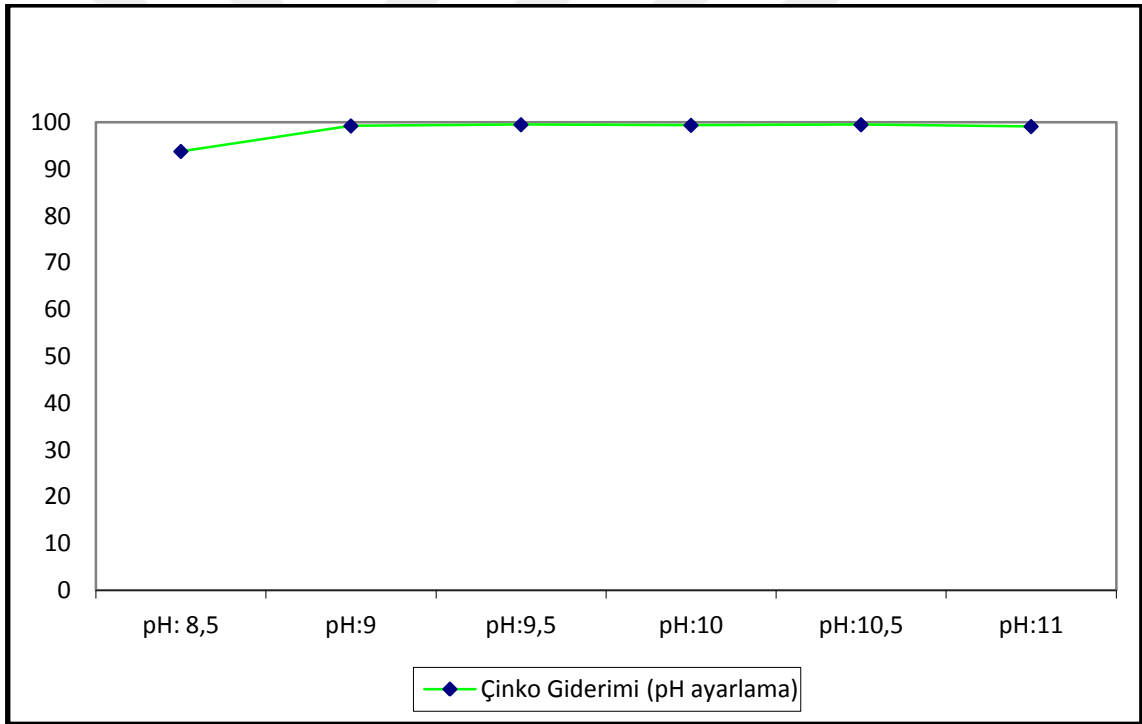
Şekil 4.33 500 ml Hidroksit çöktürme yönteminde değişken parametrelere bağlı Cu giderim verimi

Şekil 4.33 incelendiğinde; hidroksit çöktürme yönteminde bakır giderim veriminin pH'nın artması ile azaldığı görülmektedir. Bakır metali için giderim verimi % 86 civarlarında elde edilmesine rağmen Çizelge 3.2'de verilen İSKİ Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği standartlarında istenilen çıkış konsantrasyonlarına ulaşamamıştır. Bu çalışma sonucunda bakır parametresinin standartları sağlayacak şekilde giderilebilmesi için hidroksit çöktürmesi sonrasında ilave bir arıtma prosesine

tabi tutulması gerektiği görülmüştür. Çizelge 4.34’de hidroksit çöktürmesinde bakır için elde edilen çıkış konsantrasyonları ve giderim verimleri verilmiştir.

Çizelge 4.34 Hidroksit çöktürmesi çalışması Bakır giderim sonuçları

Numune Adı	Bakır Konsantrasyonu (mg/L)	Verim (%)
pH: 8,5	10,2	86
pH:9	10,8	85
pH:9,5	11,3	84
pH:10	11,5	84
pH:10,5	11,8	83
pH:11	12	83
Ham Atıksu Numunesi	71 mg/l	



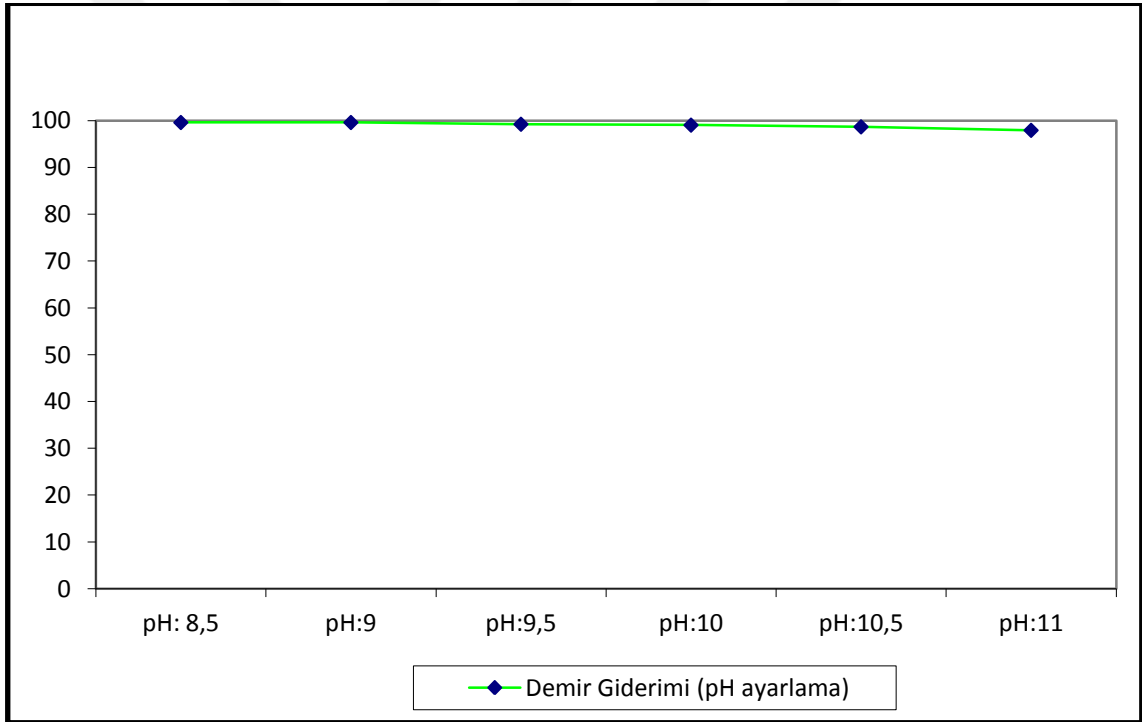
Şekil 4.34 500 ml Hidroksit çöktürme yönteminde değişken parametrelere bağlı Zn giderim verimi

Şekil 4.34 incelendiğinde; hidroksit çöktürme yönteminde çinko giderim veriminin pH'nın artması ile arttığı görülmektedir. pH:8,5-pH:11 aralığında çinko metali için % 99'lara varan giderim verimleri elde edilmiş, optimum şart pH:8,5'ta sağlanmış olup ve Çizelge 3.2'de verilmiş olan İSKİ Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği

standartını sağlamıştır. Çizelge 4.35’de hidroksit çöktürmesinde çinko için elde edilen çıkış konsantrasyonları ve giderim verimleri verilmiştir.

Çizelge 4.35 Hidroksit çöktürmesi çalışması Çinko giderim sonuçları

Numune Adı	Çinko Konsantrasyonu (mg/L)	Verim (%)
pH: 8,5	4,8	94
pH:9	0,6	99
pH:9,5	0,4	99
pH:10	0,5	99
pH:10,5	0,4	99
pH:11	0,7	99
Ham Atıksu Numunesi	77 mg/l	



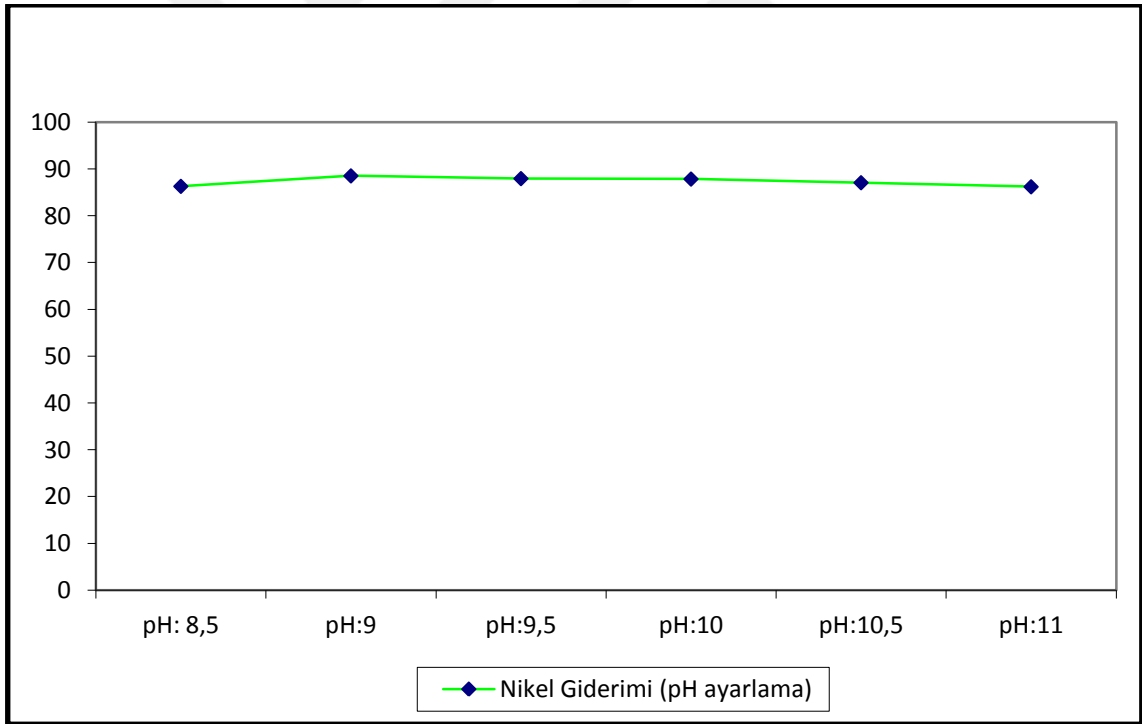
Şekil 4.35 500 ml Hidroksit çöktürme yönteminde değişken parametrelere bağlı Fe giderim verimi

Şekil 4.35 incelendiğinde; hidroksit çöktürme yönteminde demir giderim veriminin pH:9.00’a kadar arttığı, bu pH’dan sonra azalışa geçtiği görülmektedir. Fe için yapılan hidroksit çöktürmesi çalışmasında çıkış konsantrasyon değerlerinde % 100’e yakın verimler elde edilmiştir. İSKİ Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği’nde Fe ile

ilgili limit değeri yer almamaktadır. Çizelge 4.36'da hidroksit çöktürmesinde demir için elde edilen çöküş konsantrasyonları ve giderim verimleri verilmiştir.

Çizelge 4.36 Hidroksit çöktürmesi çalışması Demir giderim sonuçları

Numune Adı	Demir Konsantrasyonu (mg/L)	Verim (%)
pH: 8,5	0,2	100
pH:9	0,2	100
pH:9,5	0,4	99
pH:10	0,5	99
pH:10,5	0,7	99
pH:11	1,1	98
Ham Atıksu Numunesi	54 mg/l	



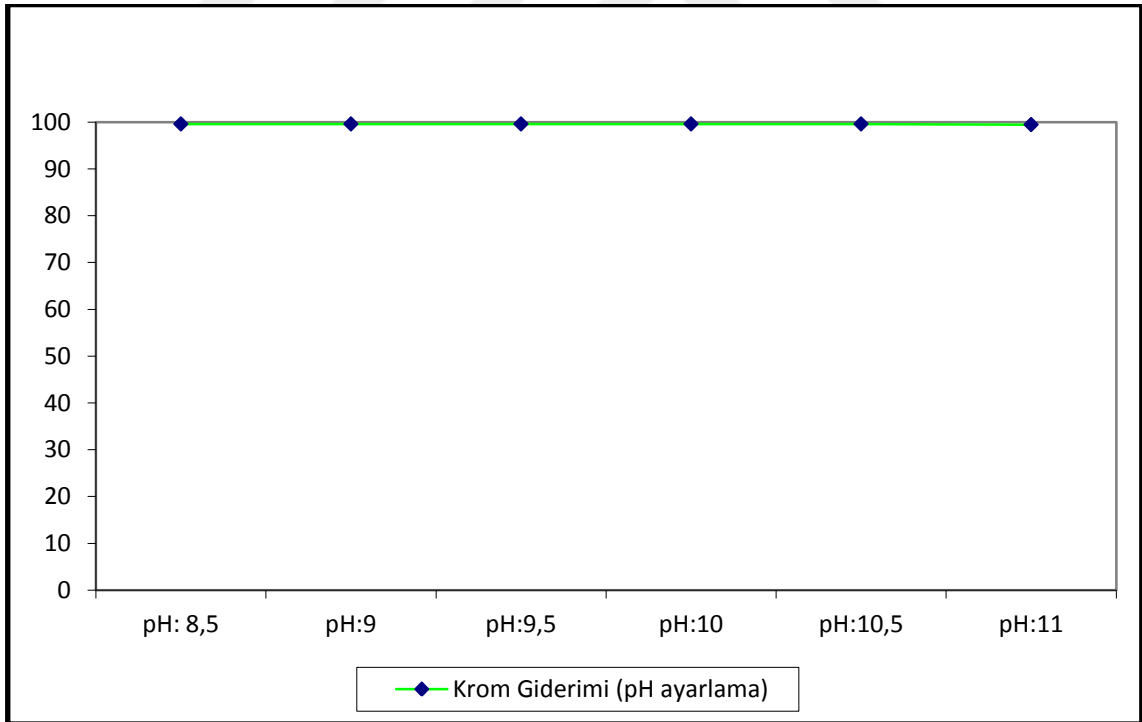
Şekil 4.36 500 ml Hidroksit çöktürme yönteminde değişken parametrelere bağlı Ni giderim verimi

Şekil 4.36 incelendiğinde; hidroksit çöktürme yönteminde nikel giderim veriminin farklı pH değerlerinde dalgalanma gösterdiği görülmektedir. Ni için yapılan çalışmada Çizelge 3.2'de verilen İSKİ Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği standartlarının

sağlanamadığı ve giderim verimlerinin % 86 - % 89 'larda olduğu gözlenmiştir. Bu çalışma sonucunda nikel parametresinin standartları sağlayacak şekilde giderilebilmesi için hidroksit çöktürmesi sonrasında ilave bir arıtma prosesine tabi tutulması gerektiği görülmüştür. Çizelge 4.37'de hidroksit çöktürmesinde nikel için elde edilen çıkış konsantrasyonları ve giderim verimleri verilmiştir.

Çizelge 4.37 Hidroksit çöktürmesi çalışması Nikel giderim sonuçları

Numune Adı	Nikel Konsantrasyonu (mg/L)	Verim (%)
pH: 8,5	14,1	86
pH:9	11,8	89
pH:9,5	12,4	88
pH:10	12,5	88
pH:10,5	13,3	87
pH:11	14,2	86
Ham Atıksu Numunesi	103 mg/l	



Şekil 4.37 500 ml Hidroksit çöktürme yönteminde değişken parametrelere bağlı toplam Cr giderim verimi

Şekil 4.37 incelendiğinde; hidroksit çöktürme yönteminde krom giderim veriminin değişik pH değerlerinde çok iyi seviyelerde kaldığı görülmektedir. Toplam Cr için

yapılan hidroksit çöktürmesi çalışmasında çıkış konsantrasyon değerlerinin % 100'e yakın verimlerde İSKİ Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği standartlarını sağladığı görölmüştür. Çizelge 4.38'de hidroksit çöktürmesinde krom için elde edilen çıkış konsantrasyonları ve giderim verimleri verilmiştir.

Çizelge 4.38 Hidroksit çöktürmesi çalışması Krom giderim sonuçları

Numune Adı	Krom Konsantrasyonu (mg/L)	Verim (%)
pH: 8,5	0,3	100
pH:9	0,3	100
pH:9,5	0,3	100
pH:10	0,3	100
pH:10,5	0,3	100
pH:11	0,4	99
Ham Atıksu Numunesi	75 mg/l	

SONUÇ VE ÖNERİLER

İstanbul ili Küçükçekmece İlçesi İkitelli Organize Sanayi Bölgesinde yer alan Galvanoteknik Metal Kaplamacıları Sanayi Sitesinden alınan metal endüstri atıksularına; (Cu), çinko (Zn), demir (Fe), nikel (Ni), krom (Cr), klorür (Cl⁻), sülfat (SO₄²⁻) ve TOK parametreleri için elektrokoagülasyon, fenton, elektrofenton ve pH ayarlama işlemleri ayrı ayrı uygulanmıştır.

500 ml'lik Elektrokoagülasyon prosesi için parametreler ayrı ayrı değerlendirilecek olursa; en yüksek bakır giderim verimi pH:8, akım yoğunluğu 200 A/m² ve EC süresi 75 dk çalışma şartlarında % 94 mertebelerinde gerçekleşirken; en yüksek çinko giderim verimi pH:8, akım yoğunluğu 200 A/m² ve EC süresi 15 dk çalışma şartlarında % 98 mertebelerinde gerçekleşmiştir. Demir gideriminde optimum demir giderim verimi pH:8, akım yoğunluğu 100 A/m² ve EC süresi 45 dk çalışma şartlarında % 100 mertebelerinde gerçekleşirken en yüksek nikel giderim verimi pH:8, akım yoğunluğu 200 A/m² ve EC süresi 60 dk çalışma şartlarında % 90 mertebelerinde gerçekleşmiştir. Optimum toplam krom giderim verimi pH:8, akım yoğunluğu 100 A/m² ve EC süresi 45 dk çalışma şartlarında % 100'lerde gerçekleşmiştir. En yüksek sülfat giderim veriminin pH:8, akım yoğunluğu 150 A/m² ve EC süresi 45 dk çalışma şartlarında çok düşük olduğu görülürken; klorür için ise bu değerler pH:8, akım yoğunluğu 200 A/m² ve EC süresi 30 dk çalışma şartlarında % 15'in altında kalmıştır. TOK giderim verimleri ise değişken parametrelere bağlı olarak % 8 - % 21 aralarında kaldığı görülmüştür.

Demir, krom, çinko parametreleri deşarj standartlarını sağlarken; bakır, nikel ve sülfat parametrelerinin standartları sağlayacak şekilde giderilebilmesi için EC sonrasında farklı arıtma proseslerinin çalıştırılmasının gerekliliği ortaya çıkmıştır.

1 L'lik Elektrokoagülasyon prosesi için parametreler ayrı ayrı değerlendirilecek olursa; Cu giderim verimi için optimum şarta bakılacak olursa sabit akım yoğunluğunda (100 A/m^2) pH:6.0 ve 60.dakikada % 40'a varan bir verim elde edilirken; Zn için pH:3.0 ve 10.dakikada ham atıksuyun Zn konsantrasyonunun da düşük olması sebebiyle İSKİ Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği standardı sağlanmıştır. Fe giderim verimi için optimum şart; sabit akım yoğunluğunda (100 A/m^2) pH:5.0 ve 15.dakikada % 100'e varan bir verim iken; nikel parametresi için pH:5.0 60. dakikada % 70'e varan bir verim elde edilmiştir. Toplam Cr giderim verimi için optimum şart araştırılacak olursa sabit akım yoğunluğunda (100 A/m^2) pH:5.0 ve 15.dakikada % 83'e varan bir verim elde edilmiştir. SO_4^{2-} giderim verimi için optimum şart sabit akım yoğunluğunda (100 A/m^2) pH:3 ve 10.dakikada % 18'e varan bir verim elde edilirken; Cl^- giderim verimi için pH:5 ve 60.dakikada % 19'larda bir verim elde edilmiştir. TOK için ise; Süre arttıkça TOK giderim veriminin de arttığı gözlenmiş olup giderim veriminin değişken parametrelere bağlı olarak % 59 - % 74 aralarında kaldığı görülmüştür.

Fenton prosesi için ağır metaller ve SO_4^{2-} , Cl^- , TOK parametreleri incelenecek olursa; bakır için $\text{KOl}/\text{H}_2\text{O}_2$: 0,50, $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$:2,00 ve pH: 3 değerlerinde optimum şart sağlanmış iken; çinko için $\text{KOl}/\text{H}_2\text{O}_2$: 0,50, $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$: 2,00, pH:3,00 değerlerinde optimum şart sağlanmış; demir için ise $\text{KOl}/\text{H}_2\text{O}_2$: 0,43, $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$: 0,55, pH:3,00 değerlerinde %100'e varan verim elde edildiği saptanmıştır. Nikel için optimum şart; $\text{KOl}/\text{H}_2\text{O}_2$: 0,50, $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$:0,55 ve pH: 3 değerlerinde giderim verimi % 59'larda elde edilmişken; toplam Cr için $\text{KOl}/\text{H}_2\text{O}_2$: 0,50, $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$:1,00 ve pH: 2 değerlerinde giderim verimi %98'lere ulaşmış ve optimum şartlar sağlanmıştır. Cl^- parametresi için $\text{KOl}/\text{H}_2\text{O}_2$: 0,50, $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$:1,00 ve pH: 3,75 değerlerinde giderim veriminin % 24'lerde kaldığı görülürken; SO_4^{2-} parametresi için $\text{KOl}/\text{H}_2\text{O}_2$: 0,50, $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$:2,00 ve pH: 3,00 değerlerinde giderim verimi % 14'lere ulaşmıştır. TOK için ise; $\text{KOl}/\text{H}_2\text{O}_2$: 0,50, $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$:1,00 ve pH: 3,00 değerlerinde giderim veriminin % 53'lere ulaştığı görülmüştür.

Bir diğer ileri arıtım yöntemi olan elektrofenton prosesi için ağır metaller ve SO_4^{2-} , Cl^- , TOK parametreleri incelenecek olursa; bakır için $\text{KOl}/\text{H}_2\text{O}_2$: 0,50, $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$:1,75 ve pH: 3 değerlerinde optimum şart sağlanmış iken çinko için $\text{KOl}/\text{H}_2\text{O}_2$: 0,43, $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$: 0,55, pH:3,00 değerlerinde % 90'larda verim elde edildiği saptanmıştır. Demir için $\text{KOl}/\text{H}_2\text{O}_2$:

0,50, H_2O_2/Fe^{2+} : 1,00, pH:2,25 değerlerinde % 100'e varan verim elde edilirken Nikel için optimum şart; COD/ H_2O_2 : 0,50, H_2O_2/Fe^{2+} :1,00 ve pH: 2,25 değerlerinde giderim verimi % 80 olarak bulunmuştur. Toplam krom ağır metali için; KOI/ H_2O_2 : 0,43, H_2O_2/Fe^{2+} :0,55 ve pH: 3,00 değerlerinde % 99'lara varan giderim verimi elde edilmiş olup sülfat için giderim verimi optimum şartlar KOI/ H_2O_2 : 0,50, H_2O_2/Fe^{2+} :0,55 ve pH: 3,00 değerlerinde % 18 olarak elde edilmiştir. Klorür parametresi için giderim veriminin; KOI/ H_2O_2 : 0,50, H_2O_2/Fe^{2+} :0,55 ve pH: 3,00 değerlerinde %48'lere; TOK parametresi için ise KOI/ H_2O_2 : 0,43, H_2O_2/Fe^{2+} :0,55 ve pH: 3,00 değerlerinde % 45'lere ulaştığı görülmüştür.

Hidroksit çöktürme yönteminde ise optimum giderim verimleri; bakır için pH:8,5 değerinde %86, çinko için pH:9-pH:11 aralığında % 99, demir için pH:8,5 ve pH:9'da % 100, nikel için pH:9 %89, toplam krom pH:8,5-pH:10,5 aralığında % 100 olarak elde edilmiştir.

Yapılan çalışmalara bakıldığında elektrokoagülasyon ve hidroksit çöktürmesinde daha çok ağır metal giderimleri araştırılmıştır. Akbal ve Camcı yapmış oldukları elektrokoagülasyon yöntemiyle metal kaplama atıksularından bakır, krom ve nikel giderimi çalışmalarında akım yoğunluğu arttıkça nikel ve bakır giderimlerinde de artış olduğunu söylemişlerdir [14]. Literatür çalışmalarında da aynı şekilde yapılmış çalışmalarda genelde akım yoğunluğunun artmasıyla bakır metal gideriminin arttığı gözlenmiştir. Bu çalışmada ise akım yoğunluğunun artmasıyla birlikte Cu ve Ni gideriminde dalgalanmalar gözlenmiş olup bunun sebebinin ise atıksuda bulunan siyanürden (CN^-) ileri geldiği düşünülmektedir. Çünkü atıksuda siyanür gibi kompleks oluşturucu iyonların bulunması, arıtılmış suda düşük bakır seviyelerine ulaşmayı zorlaştırmaktadır [65].

Fenton ve elektrofenton prosesinde ise daha çok KOİ giderimi esas alınmıştır. Ancak atıksuda KOİ yerine TOK parametresi bakılmıştır. Bunun sebebi ise hidrojen peroksit konsantrasyon etkisinin KOİ parametresinde girişkenliğe sebep olmasıdır. Fenton prosesi ile renk ve KOİ giderimi üzerine yapılan bazı çalışmalarda, H_2O_2 'in gerekli miktardan fazla kullandığında renk gideriminde bir artışa sebep olduğu ancak KOİ

değerinin artma eğilimi gösterdiği gözlenmiştir [66]. Bunun sebebi ise arıtılmış suda kalan hidrojen peroksit miktarıdır.

Yapılan çalışmalar neticesinde İSKİ deşarj standartlarına göre bakır, nikel, sülfat gideriminde istenilen çıkış konsantrasyonlarına ulaşamamış olup bu parametreler için sırasıyla en etkili giderim yöntemi Fenton, Hidroksit çöktürmesi ve elektrokoagülasyon olmuştur. Ayrıca atıksular ideal çözeltiler (sonsuz seyreltik çözeltiler) değildirler. Yani atıksuların içindeki safsızlıklar ve toplam çözünmüş madde konsantrasyonları ideal çözelti kabulü için oldukça fazla miktardadır. Bu sebeple çalışmanın yapıldığı söz konusu metal kaplama sanayi atıksuyunun kompleks yapıda olması, iyonik aktivitenin belirlenmesini güçleştirmekte ve atıksuda her bir iyonun aktivitesi bağımsız olarak belirlenmemektedir [67]. Bakır ve nikel ağır metali içeren atıksularda siyanür gibi kompleks oluşturucu iyonların bulunması arıtılmış suda düşük nikel ve bakır seviyelerine sebep olduğundan elektrokoagülasyon, Fenton, elektrofenton veya hidroksit çöktürmesi öncesinde CN^- arıtımı yapılması söz konusu ağır metallerin giderim verimini arttıracaktır. CN^- giderim yöntemleri; biyolojik arıtma prosesleri ile, membran proseslerle, klor oksidasyonu ile, hipoklorit oksidasyon ile, hidrojen peroksit oksidasyonu ile, ozon oksidasyonu ile, kimyasal çöktürme ile ve elektrokimyasal proseslerle gerçekleştirilmektedir [68]. Ayrıca metal kaplama tesisinde nitrik asit kullanımı atıksu içerisinde amonyum oluşumuna sebep olmaktadır. Oluşan amonyum metale bağlanıp ligand oluşturarak metal kompleks oluşumuna sebebiyet [69, 70, 71, 72, 73] vermektedir. Bu durum atıksuda bulunan metal giderimini zorlaştırmaktadır. Dolayısıyla proseslerin (EC, Fenton, EF, hidroksit çöktürmesi) çoklu kullanımı önerilmekle birlikte deşarj standartlarını sağlamayan parametrelerin standartları sağlayacak şekilde giderilebilmesi için elektrokoagülasyon, Fenton, elektrofenton veya hidroksit çöktürmesi öncesinde siyanürü gidermek amaçlı ilave bir ön arıtma prosesine tabi tutulması gerektiği öngörülmektedir. Ayrıca SO_4^{2-} ve Cl^- iyonları elektrodializ yöntemiyle geri kazanılarak metal endüstrisinde HCl ve H_2SO_4 olarak tekrar kullanımı sağlanması öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Uzun Parlak, N., (2008). Metal Kaplama Prosesi Durulama Banyo Atıksularının Elektrokoagülasyon İle Arıtımı, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik Ve Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] Silva, J.E., Soares, D., Paiva, A.P., Labrincha, J.A. ve Castro, F., (2005). "Leaching behaviour of a galvanic sludge in sulphuric acid and ammoniacal media", *Journal of Hazardous Materials B121*:195–202.
- [3] Barakat, M.A., (2010), "New trends in removing heavy metals from industrial wastewater", *Arabian Journal of Chemistry xxx*, xxx-xxx.
- [4] Yılmaz, S., (2008). Metal Kaplama Endüstrisi Atıksularının Fenton Oksidasyonu İle Arıtımı, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [5] Monser, L. ve Adhoum, N., (2002). "Modified activated carbon for the removal of copper, zinc, chromium and cyanide from wastewater", *Separation and Purification Technology 26*:137–146.
- [6] Shih, Y-J., Lin, C-P. ve Huang, Y-H., (2013). "Application of Fered-Fenton and chemical precipitation process for the treatment of electroless nickel plating wastewater", *Seperation and Purification Technology 104*:100-105.
- [7] Pehlivan, E., (2010). "Tabii adsorbanlar ile ağır metallerin sulu çözümlerden sorpsiyonu", *Kimya-1 Çalıştayı*, 3-11 Temmuz, Çanakkale.
- [8] Tünay, O., (1996). "Endüstriyel Kirlenme Kontrolü", 1. Baskı, İ.T.Ü. Yayınları, İstanbul.
- [9] Çakmakçı, M., (2010). "Endüstriyel Atıksuların Geri Kazanım Teknolojileri", *IWES 2010 2.Atık Teknolojileri Sempozyumu ve Sergisi*, 4-5 Kasım 2010, İstanbul.
- [10] Lugo-Lugo, V., Barrera-Díaz, C., Bilyeu, B., Balderas-Hernández, P., Urena-Nunez, F. ve Sánchez-Mendieta, V., (2010). "Cr(VI) reduction in wastewater using a bimetallic galvanic reactor", *Journal of Hazardous Materials 176*:418–425.
- [11] Martins, R.J.E., Pardo, R. ve Boaventura, R.A.R., (2004). "Cadmium(II) and Zinc(II) Adsorption by the Aquatic Moss *Fontinalis antipyretica*: Effect of Temperature, pH and Water Hardness", *Water Research*, 38:693-699.

- [12] Sönmez, S., (2006). Metal Kaplama Sanayi Atıksularından Perlit Minerali ile Toplam Gideriminin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [13] Woodard, F., (2001). "Industrial Waste Treatment Handbook", 219, Butterworth-Heinemann publications, United States of America.
- [14] Akbal, F. ve Camcı, S., (2011). "Copper, chromium and nickel removal from metal plating wastewater by electrocoagulation", Desalination, 269:214-222.
- [15] Denz, W., ve Eminoğlu, S., (2009). Türkiye'de Sanayiden Kaynaklanan Tehlikeli Atıkların Yönetiminin İyileştirilmesi-Metal Kaplama Galvanizasyon Rehber Döküman, Life Hawaman Projesi, Çevre ve Orman Bakanlığı.
- [16] Arslan, T., (2008). Kompleks Olarak Bağlı Ağır Metal İçerikli Atıksuların Elektrokoagülasyon ile Arıtımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [17] Milli Eğitim Bakanlığı, MEGEP (Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi) Kimya Teknolojisi Korozyonu Temizleme ve Boya-Metalik Koruma, <http://www.megep.meb.gov.tr/?page=moduller>, 14 Mart 2013.
- [18] Haveman, M., Profile of the Metal Finishing Industry, Prepared for the Cleveland Advanced Manufacturing Program (CAMP) under contract to the Energy Environment and Manufacturing project of the Technology Reinvestment Program (EEM-TRP), Page 24, Minneapolis.
- [19] Environmental Protection Agency, (1995). Profile of the Fabricated Metal Products Industry, EPA Office of Compliance Sector Notebook Project, Washington.
- [20] Çetinkaya, E., (2006). "Çinko-Nikel Alasım Kaplamalarının Karakteristiklerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [21] Heavy metal removal from electroplating wastewater using HA 216, 2006.
- [22] Okumuş, E., (2007). "Küçükçekmece Gölü Sedimentinde Ağır Metal (Zn^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+}) Adsorpsiyonu", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- [23] Özkan, O., (2010). "Endüstriyel Kirlilik Kontrolü Ders Notları", Erciyes Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü.
- [24] Liptak, B.G., (1974). "Environmental Engineers' Handbook", 1. Baskı, Ontario, Canada.
- [25] Heavy metal toxicity, <http://www2.hcmuaf.edu.vn/data/quoctuan/Heavy%20Metal%20Toxicity%202.pdf>, 8 Temmuz 2013.
- [26] Çokadar, H., İleri, R., Ateş, A. ve İzgi, B., (2003). "Nikel (II) İyonunun Sulu Ortamdan Granül Aktif Karbon (GAK) ile Giderilmesi", Ekoloji Çevre Dergisi, 46: 38-42.

- [27] Şener, Ş., “Çevre İçin Jeoloji; Ağır Metallerin Çevresel Etkileri”, Süleyman Demirel Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Isparta, SDUGEO e-dergi.
- [28] Camcı, S., (2008). “Metal Kaplama Atıksuyunun Elektrokoagülasyon Yöntemi ile Arıtılması”, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- [29] Baral, A. ve Engelken, R.D., (2002). “Chromium-based regulations and greening in metal finishing in the USA”, Environmental Science & Policy 5, 121–133.
- [30] Savlak, Ö., (2008). “Adsorpsiyon yöntemi ile Cr(VI) giderimi ve Aktif Karbonun Elektrokimyasal Rejenerasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [31] Yiğit, S., (2008). “Nikel-Siyanür Metal Kaplama İşlemi Durulama Banyo Atıksularının Elektrokimyasal Arıtımı”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- [32] Renklidağ, T. ve Gökmen Karaman, A., (2003). “Siyanür Zehirlenmesi”, Sted Dergisi, Cilt:12, Sayı:9, 350-353.
- [33] Logsdon, M.J., Hagelstein, K. ve Mudder, T.I., (2001). “The Management of cyanide in gold extraction”, 1. Baskı, International Council on Metals and the Environment, Canada.
- [34] Türkman, A., “Endüstri Atıksularının Arıtılmasında İleri Arıtma Teknikleri”, Dokuz Eylül Üniversitesi, <http://www.erimsever.com/MakMuh/MMO/ArıtmaKongre/10095.pdf>, 13 Eylül 2015.
- [35] T.C. Resmi Gazete, Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (25687), 31.12.2004, 45.
- [36] Sala, M. ve Gutierrez-Bouzan, M.C., (2012). “Electrochemical Techniques in Textile Processes and Wastewater Treatment”, Hindawi Publishing Corporation International Journal of Photoenergy, Volume 2012, Article ID 629103, 12 pages.
- [37] İlhan, F., Kurt, U., Apaydın, Ö., Arslankaya, E. ve Gönüllü, M., (2007). “Elektrokimyasal Arıtım ve Uygulamaları: Katı Atık Sızıntı Suyu Çalışması”, TÜRKAY 2007, AB Sürecinde Türkiye’de Katı Atık Yönetimi Ve Çevre Sorunları Sempozyumu, 28-31 Mayıs 2007, İstanbul.
- [38] Tatar, M., (2006). “Demir Elektrotlar Kullanarak Elektrokoagülasyon Yöntemiyle Sulu Çözeltilerden SCN⁻ İyonlarının Giderimi”, Yüksek Lisans Tezi, Kimya Anabilim Dalı, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- [39] Yalçın, H. ve Koç, T., (1999). “Elektrokimya Kitabı”, 1. Baskı, Palme Yayıncılık, Ankara.
- [40] Kurt, U., (2007). “Fenton ve elektrokimyasal yöntemlerle evsel atıksuların arıtılabilirliğinin araştırılması”, Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [41] İlhan, F., (2006). "Sızıntı sularının elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılması", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [42] Orkun, M.O, (2007). "Katı atık sızıntı sularının elektrokimyasal yöntemlerle arıtımının incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- [43] Chen, G., (2004). "Electrochemical technologies in wastewater treatment", Separation and Purification Technology, 38: 11-41.
- [44] Zongo, I., Maiga, A.H., Wethe, J., Valentin, G., Leclerc, J-P., Paternotte, G. ve Lapique, F., (2009). "Electrocoagulation for the treatment of textile wastewaters with Al or Fe electrodes: Compared variations of COD levels, turbidity and absorbance", Journal of Hazardous Materials, 169: 70-76.
- [45] Arslan, T., Kabdaşlı, I., Arslan-Alaton, İ., Ölmez, T. ve Tünay, O., (2008). "Kompleks olarak bağlı metal içeren atıksuların elektrokoagülasyon prosesi ile arıtımı", İTÜ Dergisi 18 (S.1): 42-52.
- [46] Heidmann, I. ve Calmano, W., (2008). "Removal of Zn(II), Cu(II), Ni(II), Ag(I) and Cr(VI) present in aqueous solutions by aluminium electrocoagulation", Journal of Hazardous Materials, 152: 934-941.
- [47] Adhoum, N., Monser, L., Bellakhal ve N. ve Belgaied, J., (2004). "Treatment of electroplating wastewater containing Cu²⁺, Zn²⁺ and Cr(VI) by electrocoagulation", Journal of Hazardous Materials, B112: 207-213.
- [48] Hanay, Ö. ve Hasar, H., (2011). "Effect of anions on removing Cu²⁺, Mn²⁺ and Zn²⁺ in electrocoagulation process using aluminum electrodes", Journal of Hazardous Materials, 189: 572-576.
- [49] Mollah, M.Y.A., Morkovsky, P., Gomes, J.A.G., Kesmez, M., Parga, J. ve Cocke, D.L, (2004). "Fundamentals, present ve future perspectives of electrocoagulation", Journal of Hazardous Materials, B114, 199-210.
- [50] Emamjomeh, M.M. ve Sivakumar, M., (2006). "An empirical model for defluoridation by batch monopolar electrocoagulation/flotation (ECF) process", Journal of Hazardous Materials, B131: 118-125.
- [51] Solak, M., (2007). "Elektrokoagülasyon Prosesi ile Mermer Atıksularının Arıtılması", Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- [52] Tünay, O., (1996). "Çevre mühendisliğinde kimyasal prosesler", 1. Baskı, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [53] Hanay, Ö. ve Hasar, H., (2007). "Fenton Oksidasyon Prosesi ile Tekstil Endüstrisi Atıksuyunda Renk Giderimi", Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19 (4): 505-509.
- [54] Chamarro, E., Marco, A. ve Esplugas, S., (2001). "Use Of Fenton Reagent To Improve Organic Chemical Biodegradability", Water Research, 35(4):1047-1051.

- [55] Gürtekin, E. ve Şekerdağ, N., (2008). "Bir ileri Oksidasyon Prosesi: Fenton Proses", Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 14(3):229-236.
- [56] Priambodo, R., Shih, Y.J., Huang, Y.J. ve Haung, Y.H, (2011). "Treatment of real wastewater using semi batch (Photo)- Electro-Fenton method", The Sustainable Environment Research, 21 (6):389-393.
- [57] Özkök, T., (2008). "Ağır Metallerin Fosfonik Asit Bazlı Bileşiklerle Giderimini İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [58] New Jersey Institute of Technology, <http://cpe.njit.edu/dlnotes/che685/cls06-2.pdf>, 8 Temmuz 2013.
- [59] Pang, F.M., Teng, S.H., Teng, T.T. ve Omar, A.K.M., (2009). "Heavy Metals Removal by Hydroxide Precipitation and Coagulation-Flocculation Methods from Aqueous Solutions", Water Quality Research Journal of Canada, 44 (2): TBA-TBA.
- [60] Chen, Q.Y., Luo, Z., Hills, C., Xue, G. ve Tyrer, M., (2009)." Precipitation of heavy metals from wastewater using simulated flue gas: sequent additions of fly ash, lime and carbon dioxide" Water Research, 43: 2605-2614.
- [61] İSKİ Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği, [http://www.iski.gov.tr/Web/UserFiles/File/mevzuat/pdf/ISKI Atıksularin Kanализasyona Desarj Yonetmeliği.pdf](http://www.iski.gov.tr/Web/UserFiles/File/mevzuat/pdf/ISKI_Atıksularin_Kanализasyona_Desarj_Yonetmeliği.pdf), 6 Haziran 2013.
- [62] İlhan, F., Yetilmezsoy, K., Kabuk, H.A., Ulucan, K., Coşkun, T. ve Akoğlu, B., (2016). "Evaluation of operational parameters and its relation on the stoichiometry of Fenton's oxidation to textile wastewater", Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly, pages:48-48, doi: 10.2298/CICEQ150907048I.
- [63] Jande, Y.A.C. ve Kim, W.S., (2013). "Desalination using capacitive deionization at constant current", Desalination 329, 29–34.
- [64] Khandegar Khandegar, V. ve Saroha, A.K., (2013). "Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent e A review", Journal of Environmental Management 128, 949-963.
- [65] Dokuz Eylül Üniversitesi, Endüstriyel Kirlenme Kontrolü, <http://web.deu.edu.tr/atiksu/ana58/bolum14.pdf>, 27 Ekim 2015.
- [66] Sert, D.,N., (2006). "İlaç Endüstrisi Atıksularında Fenton Prosesi İle Renk Giderimi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [67] Duranoğlu, D., (2012). "Sulfate Removal From Wastewater By Chemical Precipitation Method", Journal of Engineering and Natural Sciences Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, Sigma 30, 39-55.
- [68] Tokcan, S., Atıksu Arıtımı, https://prezi.com/b_mc3osijpmv/atiksu-aritimi/, 27 Ekim 2015.

- [69] Yang, G.X. ve Jiang, H., (2014). "Amino modification of biochar for enhanced adsorption of copper ions from synthetic wastewater", *Water Research* 48 (2014) 396- 405.
- [70] Da'na, E. ve Sayari, A., (2012). "Adsorption of heavy metals on amine-functionalized SBA-15 prepared by co-condensation: Applications to real water samples", *Desalination* 285 (2012) 62–67.
- [71] Da'na, E. ve Sayari, A., (2011). "Adsorption of copper on amine-functionalized SBA-15 prepared by co-condensation: Equilibrium properties", *Chemical Engineering Journal* 166 (2011) 445–453.
- [72] Nguyen, M-V. ve Lee, B-K., (2014). " Cu²⁺ ion adsorption from aqueous solutions by amine activated poultry manure biochar", *Digital Proceeding Of The ICOEST'2014 - , SIDE*.
- [73] Aguado, J., Arsuaga, J.M., Arencibia, A., Lindo, M. ve Gascon, V., (2009). " Aqueous heavy metals removal by adsorption on amine-functionalized mesoporous silica" , *Journal of Hazardous Materials* 163 (2009) 213–221.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ebru BUDAK
Doğum Tarihi ve Yeri : 18.03.1987 / Kayseri
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : budak.ebru@csb.gov.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Çevre Mühendisliği	Erciyes Üniversitesi	2011
Lise	Sayısal	Nevzat Ayaz Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi	2006

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2013-2014	Acıbadem Genel Müdürlük	Çevre Mühendisi
2014-	Karabük Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü	Çevre Mühendisi