

T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



**KASTAMONU İLİNDE BULUNAN BİR ÇİNKO KAPLAMA
TESİSİ ATIKSUYUNUN ELEKTROKOAGÜLASYON YÖNTEMİ
İLE ARITIMININ İNCELENMESİ**

VEFA AYVAOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DR. ÖĞR. ÜYESİ GÖKÇE DİDAR DEĞERMENCİ

TEMMUZ - 2024

KASTAMONU

TEZ ONAYI

Vefa AYVAOĞLU tarafından hazırlanan “KASTAMONU İLİNDE BULUNAN BİR ÇİNKÖ KAPLAMA TESİSİ ATIKSUYUNUN ELEKTROKOAGÜLASYON YÖNTEMİ İLE ARITIMININ İNCELENMESİ” adlı tez çalışmasının savunma sınavı **04.07.2024** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Dr. Öğr. Üyesi Gökçe Didar DEĞERMENCİ Kastamonu Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Erdi ALADAĞ Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Nejdet DEĞERMENCİ Kastamonu Üniversitesi	

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

Enstitü Müdürü	Doç. Dr. Selçuk MEMİŞ	
----------------	-----------------------	-------

TAAHHÜTNAME

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.

Vefa AYVAOĞLU

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KASTAMONU İLİNDE BULUNAN BİR ÇİNKO KAPLAMA TESİSİ ATIKSUYUNUN ELEKTROKOAGÜLASYON YÖNTEMİ İLE ARITIMININ İNCELENMESİ

VEFA AYVAOĞLU

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ GÖKÇE DİDAR DEĞERMENCİ

Bu çalışmanın amacı, elektrokoagülasyon tekniği kullanarak metal kaplama atık suyundan kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ve çinkoyu gidermektir. Bu amaçla, demir anot ve katot içeren bir reaktör kullanılmıştır. Sonuçlar, elektrokoagülasyon prosesi ile KOİ ve çinko giderim verimliliğinin deney süresi ve akım yoğunluğu arttıkça arttığını göstermiştir. Optimum koşullar, deney 7 için başlangıç pH değeri 3, akım yoğunluğu 1,5 A, deney süresi 56,32 dakika ve güç tüketimi 7,1 kWh/m³ olarak belirlenmiştir. Bu koşullar altında maksimum KOİ ve çinko giderim oranları sırasıyla %63,38 ve %99,99 olarak bulunmuştur. Elektrokoagülasyon prosesinde başlangıç pH, akım ve zamanın etkilerini incelemek için merkezi kompozit tasarım kullanılarak üç seviyeli faktörlerle istatistiksel bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen modelin R² değerleri, güç tüketimi için 0,9900, KOİ giderimi için 0,9714 ve çinko giderimi için 0,8896 olup, polinom matematiksel ikinci dereceden denklemlere iyi uyum sağlamıştır. Varyans analizi (ANOVA), başlangıç pH, akım ve zamanın önemli etkileri olduğunu ve bu parametrelerin p-değerinin 0,05'ten küçük olması nedeniyle önemli olduğunu ortaya koymuştur. Genel olarak metal kaplama atık suyunun kirletici giderimleri için elektrokoagülasyon prosesinin kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

ANAHTAR KELİMELELER: Metal Kaplama Atıksuyu, Cevap Yüzey Metodu, KOİ Giderimi, Çinko Giderimi, Güç Tüketimi, Elektrokoagülasyon.

Temmuz 2024, 50 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

INVESTIGATION INTO THE ELECTROCOAGULATION TREATMENT OF WASTEWATER FROM A ZINC PLATING PLANT IN KASTAMONU PROVINCE

VEFA AYVAOĞLU

**KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING
SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. GÖKÇE DİDAR DEĞERMENÇİ**

The aim of this study was to remove chemical oxygen demand (COD) and zinc from metal plating wastewater using electrocoagulation technique. For this purpose, a reactor with two anodes and cathodes made of iron was used. The results showed that the removal efficiency of COD and zinc increased with increasing electrocoagulation (EC) experiment duration and current density. The optimum conditions for experiment 7 were determined as initial pH value 3, current density 1.5 A, experiment duration 56.32 minutes and power consumption 7.1 kWh/m³. Under these conditions, the maximum COD and zinc removal rates were found to be 63.38% and 99.99%, respectively. In order to examine the effects of initial pH, current and time in the EC process, a statistical model was developed with three-level factors using a central composite design. The R² values of the developed model were 0.9900 for power consumption, 0.9714 for COD removal and 0.8896 for zinc removal, which were well fitted to polynomial mathematical second order equations. Analysis of variance (ANOVA) revealed that pH, current and time had significant effects and these parameters were significant because the p-value was less than 0.05. In general, it was concluded that electrocoagulation process can be used for pollutant removal of metal plating wastewater.

KEYWORDS: Metal Plating Wastewater, Response Surface Method, COD Removal, Zinc Removal, Power Consumption, Electrocoagulation

July 2024, 50 Page

TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans eğitimim süresince her konuda bana desteği ve deneyimleriyle yardımcı olan çok değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Gökçe Didar DEĞERMENCİ'ye ve bu süreçte desteğini esirgemeyen Doç. Dr. Nejdett DEĞERMENCİ'ye teşekkür ederim. Akademik hayatımın yanı sıra, özel yaşantımda da onlardan hayata dair birçok konuda fikir aldım. Bu yolda bana verdikleri destekler için ikisine de sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Şahsımın bugün olduğu ve yarın olacağı kişiliğe ulaşabilmesi için ve beni iyi bir insan olma yolunda yetiştiren, bugün maalesef aramızda olmayan biricik annem Seher AYVAOĞLU ve canım babam Sefa AYVAOĞLU'nu saygı, sevgi ve rahmetle anmak istiyorum.

Zor yollarda genç yaşımızda yürümeye çalışırken birbirimize omuz olduğumuz ve kimi zaman kolay kimi zaman da yorucu olayları birlikte atlatabildiğimiz ablam Goncagül TEKLER'e sevgilerimi sunar, teşekkür ederim. Değerli eşi Hasan TEKLER ve dünyalar tatlısı yeğenim Gülce TEKLER'e de iyi ki benimle oldukları için sevgiler dilerim.

VEFA AYVAOĞLU

Kastamonu, 2024

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI	ii
TAAHHÜTNAME	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLolar DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. METAL KAPLAMA SANAYİ	3
2.1 Kaplama Türleri	4
2.1.1 Elektro-Deposit/Elektrokaplama	4
2.1.2 Elektriksiz Kaplama.....	5
2.1.3 Eloksal Kaplama	6
2.1.4 Karbonlama.....	6
2.1.5 PVD/CVD	6
2.1.6 Plazma Sprey Kaplama	7
2.2 Metal Kaplama Tipleri	8
2.2.1 Krom Kaplama.....	8
2.2.2 Nikel Kaplama	8
2.2.3 Çok Katmanlı Kaplamalar	8
2.2.4 Alaşımli Kaplamalar	9
2.2.5 Çinko Kaplamalar	9
2.3 Metal Kaplama Sanayi Atıksularının Karakterizasyonu.....	10
2.4 Metal Kaplama Atıksularının Arıtımı	12
2.5 Elektrokoagülasyon Prosesi	13
2.6 Elektrokoagülasyon Prosesine Etki Eden Parametreler	15
2.6.1 Elektrot Tipi	16
2.6.2 Akım Yoğunluğu	17
2.6.3 Elektrotlar Arası Mesafe	17
2.6.4 Başlangıç pH Değeri ve İletkenlik.....	18
2.6.5 Reaksiyon Zamanı	19
2.6.6 Sıcaklık	19
2.6.7 Elektrot Pasivasyonu.....	20
2.7 Cevap Yüzey Metodu (CYM).....	20
3. MATERYAL VE YÖNTEM	25
3.1 Atıksuyun Özellikleri ve Analitik Metot	25
3.2 Deneysel Prosedür	25
3.3 Enerji Tüketiminin Hesaplanması.....	27
3.4 Cevap Yüzey Metodu Kullanarak (CYM) Deney Tasarımı	27
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	30
4.1 Bağımsız Değişkenlerin Güç Tüketimi, KOİ ve Çinko Giderimi Üzerindeki Etkisi ve Bunların Etkileşimi	30

4.2	Uygulanan MKT Modelinin EK Prosesinde Değerlendirilmesi.....	32
4.3	EK Prosesinde MKT Modelinin ANOVA Sonuçları.....	33
4.4	EK Prosesinde MKT Modelinin Regrasyon ve Korelasyon Katsayıları	35
4.5	Bağımsız Değişkenlerin Etkilerinin Değerlendirilmesi	38
4.6	Ekonomik Analiz	41
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER	43
5.1	Öneriler	43
	KAYNAKLAR	44
	ÖZGEÇMİŞ.....	50



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Metal kaplama iş akım şeması	4
Şekil 2.2 Elektrokoagülasyon işleminin mekanizmasını etkileyen parametreler.....	16
Şekil 3.1 Elektrokoagülasyon deney sistemi (1: Soğutmalı sirkülatör, 2: DC güç kaynağı, 3: Manyetik karıştırıcı, 4: Reaktör, 5: Kullanılan hücre).....	27
Şekil 4.1 a: KOİ giderimi verimi (%), b: çinko giderim verimi (%) ve c: güç tüketimi için gerçek ve tahmin edilen değerler arasındaki korelasyon	37
Şekil 4.2 a: KOİ giderimi verimi (%), b: çinko giderim verimi (%) ve c: güç tüketimi için dıştan öğrenilmiş kalıntılar	38
Şekil 4.3 Akım, başlangıç pH'sı ve zamanın KOİ giderim verimi üzerindeki etkilerinin 3B yüzey grafiklerle incelenmesi	39
Şekil 4.4 Akım, başlangıç pH'sı ve zamanın çinko giderim verimi üzerindeki etkilerinin 3B yüzey grafiklerle incelenmesi	40
Şekil 4.5 Akım, başlangıç pH'sı ve zamanın güç tüketimi üzerindeki etkilerinin 3B yüzey grafiklerle incelenmesi.....	41

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1 Metal (elektrolitik kaplama, elektroliz usulüyle kaplama) sanayi atık sularının alıcı ortama deşarj edilmesi ile ilgili parametreler ve standartları.....	11
Tablo 2.2 EK prosesinin avantaj ve dezavantajları.....	15
Tablo 2.3 Doğrulama sürecinde kullanılan terimler	23
Tablo 3.1 Metal sanayi atıksularının karakterizasyonu.....	25
Tablo 3.2 EK prosesi için kullanılan değişken seviyeleri.....	28
Tablo 4.1 EK prosesi kullanılarak güç tüketimi, KOİ ve çinko giderim modellerinin MKT tasarımında deneysel, tahmini ve kalıntı değerleri.....	31
Tablo 4.2 EK prosesinde güç tüketimi, KOİ ve çinko giderim veriminin optimizasyonu için MKT ANOVA sonuçları	34
Tablo 4.3 EK prosesinin MKT modelinin regresyon ve korelasyon katsayıları.....	36
Tablo 4.4 Elektrokoagülasyon prosesinin maliyet analizi	42

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

%	: Yüzde oranı
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
Fe	: Demir
L	: Litre
mg	: Miligram
Ni	: Nikel
°C	: Santigrat derece
Zn	: Çinko

Kisaltmalar

ANOVA	: Varyans analizi
CVD	: Kimyasal buhar biriktirme
CYM	: Cevap yüzey metodu
EK	: Elektrokoagülasyon
KOİ	: Kimyasal oksijen ihtiyacı
MKT	: Merkezi kompozit tasarıma
PRESS	: Karelerin tahmin hatası toplamı
PVD	: Fiziksel buhar biriktirme
SKKY	: Su kirliliği kontrolü yönetmeliği
THKT	: Tahmin hatasının kareleri toplamı
WHO	: Dünya sağlık örgütü

1. GİRİŞ

Küresel nüfusun artışı ve hızlı ekonomik kalkınma nedeniyle artan su tüketimi, dünyanın birçok yerinde su talebinin giderek artmasına ve dolayısıyla su kaynakları üzerinde baskı oluşmasına neden olmuştur (Liu vd., 2017). Bununla birlikte, arıtılmadan çevreye deşarj edilen atık sular, artan su kıtlığı ve erişilebilirlik sorunlarıyla doğrudan ilişkili olan küresel bir sorun haline gelmiştir (Thomas vd., 2024). Dolayısıyla hem artan su talebini karşılamak hem de tatlı su kaynaklarının kalitesini korumak için atıksuyun arıtılarak yeniden kullanılması bir çözüm olarak önerilmektedir. Aynı zamanda endüstriyel faaliyetlerin olumsuz etkisinin azaltılması açısından da atık su arıtımı oldukça önemlidir.

Su kirleticileri sadece insanlar üzerinde değil, farklı ekosistemler üzerinde de zararlı etkiler yaratmaktadır. Yüzey ve yeraltı suları olmak üzere başlıca iki tür tatlı su kaynağı endüstriyel atık sular, kanalizasyon atık suları, tarımsal faaliyetler vb. nedenlerle kirlenmektedir. Bunların dışında, su kirliliğinin yaklaşık %40-60'ı farklı endüstriyel prosesler tarafından üretilmektedir. Bu atık sular toksik kimyasallar ve kirleticiler içermekte ve verimsiz atık yönetim sistemi nedeniyle herhangi bir arıtma işlemine tabi tutulmadan açık denizlere, göletlere, nehirlere, denizlere ve akarsulara boşaltılmaktadır (Patel, 2024). Çevre kirliliğine sebep olan endüstriyel faaliyetler sonucunda oluşan kirleticilerin türü, konsantrasyonu ve kirleticilerin kendi arasındaki etkileşiminin sonucu olarak ortaya çıkan problemlerin çözümünde çeşitli zorluklar ortaya çıkmaktadır. Bundan dolayı, kirliliğinin çevreye zarar vermeyecek veya en az zarar verecek şekilde kaynağında etkili arıtım teknolojileri kullanılarak bertaraf edilmesi gerekmektedir.

Endüstriyel faaliyetler sonucu çevreye yayılan toksik ağır metaller, çevrede ve canlılarda birikme özelliği göstermeleri ve çeşitli sağlık sorunlarına sebep olmaları dolayısı ile ayrı bir öneme sahiptir ve mutlaka sulardan giderilmeleri gerekmektedir (Özgel vd., 2020). Ağır metaller metal kaplama endüstrisinde yaygın olarak kullanılmakta ve bu endüstrilerden gelen atık sular kalıcı toksik etkiye sahip ağır metal iyonlarını önemli miktarlarda içermektedirler. Metal kaplama işlemi genellikle

korozyona karşı koruma rolü oynayabilir veya mekanik veya kimyasal stabilite gibi temel özellikleri geliştirmeye yönelik olabilir. Kaplama bazen nesneleri güzelleştirmek amacıyla da kullanılır (Hosseini vd., 2016).

Metal kaplama endüstrileri ağır metaller, siyanür ve yağ gibi önemli miktarda toksik kimyasal tüketmekte ve yaymaktadır. Bu nedenle, bu kimyasalların çevresel etkisinin azaltılması için bertaraf edilmesi gerekmektedir. Çinko ve krom gibi ağır metaller çevreye ve insan vücuduna zararlıdır; bu nedenle, bu metallerin atık sulardaki konsantrasyonları sıkı bir şekilde düzenlenmektedir. Kaplama atık suyunun arıtılmasındaki zorluğun nedenlerinden biri, atık suda bulunan çok çeşitli kimyasallardır. Kaplama gibi metal yüzey işlemlerinde, işlem öncesi metal yüzeyin durumu ürün kalitesini önemli ölçüde etkiler. Bu nedenle, yağ giderme, asitle temizleme, elektrolitik yağ giderme ve aktivasyon işlemi gibi çeşitli kimyasallar kullanılarak ön işlem temizliği yapılır. Bu nedenle, çinko kaplama tesislerinden kaynaklanan atık su, kaplama banyosunda bulunan metallere ek olarak ön işlem temizliğinde kullanılan yağ giderici maddeler ve organik çözücüler gibi çeşitli maddeler içerir.

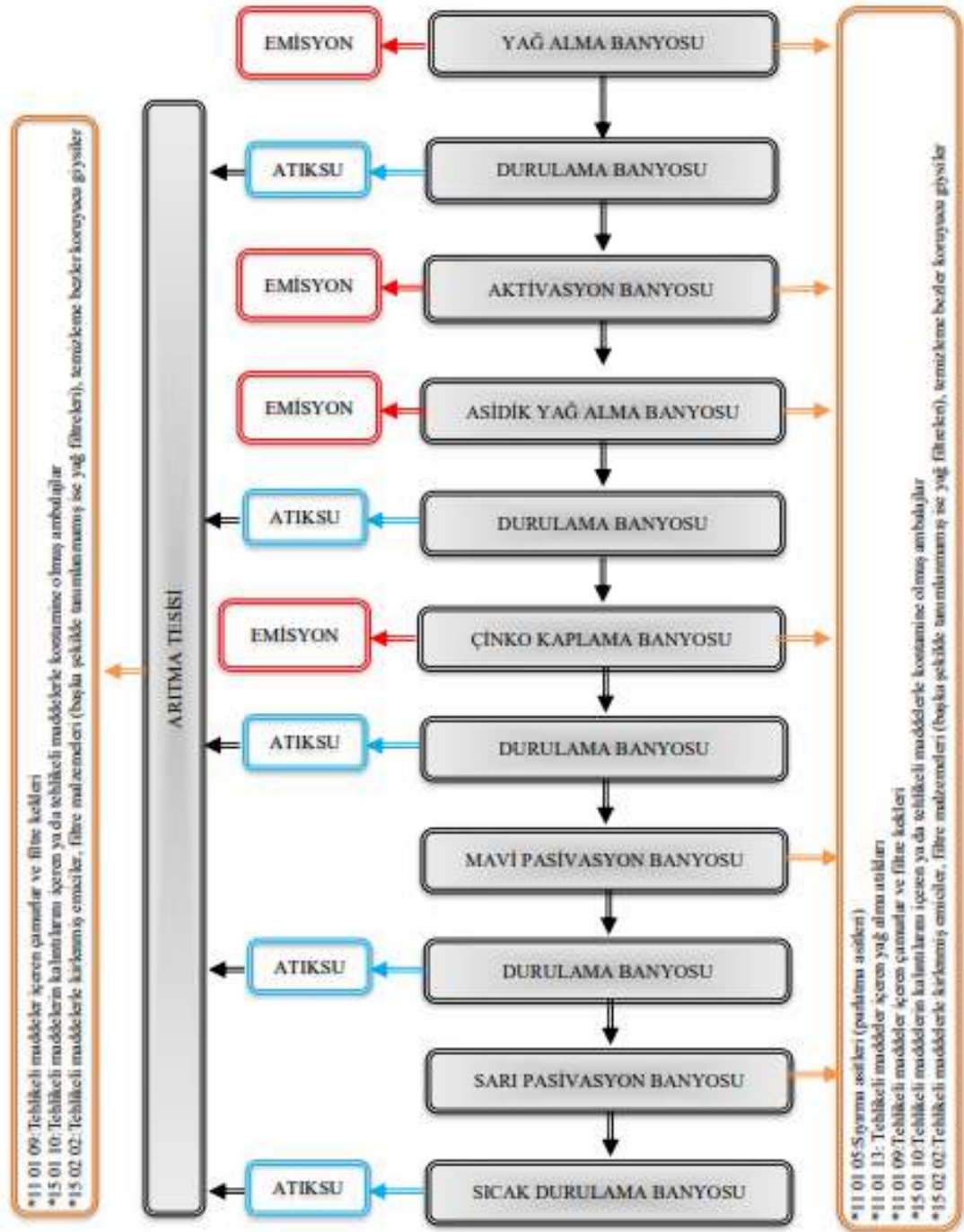
Atık sudaki ağır metallerin arıtılması için bildirilen teknolojiler arasında kimyasal çökeltme, koagülasyon-flokülasyon, elektrokoagülasyon, flotasyon, iyon değişimi ve membran filtrasyonu gibi çeşitli arıtma teknikleri yer almaktadır. Bu yöntemler atık sulardan ağır metalleri uzaklaştırmak için kullanılabilir de uygulamada kendilerine özgü avantajları ve dezavantajları vardır (Morikubo vd., 2023).

Bu çalışmada, metal kaplama sanayi atıksularının elektrokoagülasyon prosesiyle arıtılabilirliği araştırılmış ve cevap yüzey yöntemi kullanılarak proses optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Akım şiddeti, başlangıç çözelti pH'sı ve reaksiyon süresine bağlı olarak kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), çinko (Zn) ve güç tüketimi değerlerindeki değişim takip edilmiştir. Bununla birlikte, elde edilen sonuçların Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği'nde metal kaplama sanayi atıksuları için belirlenen deşarj limitlerini sağlanması amaçlanmıştır.

2. METAL KAPLAMA SANAYİ

Metal kaplama, çeşitli parçaların kaplanması için en yaygın kullanılan tekniklerden biridir. Bu işlemde yüzey, belirli metallerin biriktirilmesi yoluyla kaplanmaktadır. Bu işlem tipik olarak bir elektrik alanının varlığında gerçekleştirilir ve bu nedenle süreç “elektrokaplama” olarak bilinir. “Akımsız kaplama” ise biriktirme için elektrik akımı gerektirmeyen oto-katalitik bir kimyasal indirgeme işlemidir. Biriktirme, reaksiyonu teşvik etmek için metal iyonları, indirgeyici maddeler, katalizörler ve diğer katkı maddelerini içeren sulu bir çözelti içinde gerçekleşmektedir. Bu teknik genellikle korozyon ve aşınmayı önlemek için kullanılmaktadır.

Kaplama için kullanılan prosesin türü ne olursa olsun, tipik bir metal kaplama prosesi genellikle belirli metallerin önceden yıkanmış maddelerin yüzeyine biriktirilmesini ve ardından bir dizi ters akımlı durulama banyosunda durulamayı içermektedir. Durulama sıvısının tekrarlanan devridaimi nedeniyle metal iyonlarının konsantrasyonu zamanla artar. Bu da durulama işleminin etkinliğinin azalmasına neden olur. Bu nedenle, maksimum kirlilik seviyesine ulaşan durulama sıvısının genellikle taze bir çözelti ile değiştirilmesi gerekir. Üretilen önemli miktarda sıvı atık nedeniyle, bu durum çevresel riskleri en aza indirmek için işleme ve uygun yönetim için özel dikkat ve hususlar gerektirir. Aslında, metal kaplama, prosesin çeşitli aşamalarında suyun yer alması nedeniyle çeşitli endüstriler arasında sıvı atıkların başlıca kaynaklarından biri olarak kabul edilmektedir (Hosseini vd., 2016). Metal kaplama ve ilgili üretim endüstrilerinde kullanılan işlemler, çeşitli prosesler içermektedir. Bu prosesler, farklı metal kaplama işletmeleri tarafından kullanılan genel adımlar ve işlemlerle tanımlanmaktadır. Metal kaplama proseslerinde genel adımlar Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Metal kaplama iş akım şeması

2.1 Kaplama Türleri

2.1.1 Elektro-Deposit/Elektrokaplama

Elektrokaplama, elektrik akımının etkisiyle metal bir kaplama ekleyerek metal bir parçanın yüzey özelliklerini değiştirmek için kullanılır; buna “elektrodepozisyon” da

denir. Kaplanacak nesne negatif bir yük alır ve kaplanacak metalin tuzunu içeren bir çözeltiye daldırılır. Tuzun metalik iyonları pozitif yük taşır ve nesneye çekilir. Yüzey kaplamasının başarılı bir şekilde yapışması, kirletici maddelerin ve filmlerin alt tabakadan çıkarılmasına bağlı olduğundan, elektrokaplama için kimyasal veya mekanik yollarla yüzey ön işlemleri önemlidir. Ayrıca nesnenin geometrik şekli ve konturu, biriktirilen katmanın kalınlığını etkiler. Keskin köşelere ve özelliklere sahip nesnelerin dış köşelerinde daha kalın, girintili alanlarında ise daha ince birikintiler olacaktır, çünkü akım daha az erişilebilir alanlara göre belirgin noktalara daha yoğun akar. Elektrokaplamanın bu özelliği, pürüzlü yüzeylere sahip veya çöküntülere veya gizli deliklere sahip uygulamaları sınırlar. Elektrokaplama kullanılan metallerden bazıları alüminyum, pirinç, bronz, kadmiyum, bakır, krom, demir, kurşun, nikel, kalay ve çinkonun yanı sıra altın, platin ve gümüş gibi değerli metallerdir. Banyo çözeltilerinin voltajı, amperajı, sıcaklığı, kalış süreleri ve saflığı gibi parametrelerin kontrolü sayesinde farklı kaplama türleri elde edilebilir. Ucuz ve basit bir yöntem olduğundan elektrokaplamanın uygulamaları çoktur; metal parçaların korozyon direncini arttırmak için krom kaplamanın kullanıldığı elektronik, optik ve otomobil endüstrisinin her alanında kullanılır (URL-1, 2024).

2.1.2 Elektrijsiz Kaplama

Elektrijsiz kaplama işlemleri, kimyasal indirgeme yoluyla parçalar üzerine eşit kalınlıkta bir metal biriktirir (elektrik akımı gerekmez). Bu, karmaşık parçaların keskin kenarlar ve derin girintiler üzerinde bile eşit ve tamamen kaplanmasına olanak tanır. Yüzeylerdeki akım yoğunluğu değişikliklerinden dolayı bunların elektrolitik işlemlerle kaplanması zor olacaktır. Akımsız nikel alaşımları ve akımsız bakır en yaygın kullanılan işlemlerdir. Bu sistemler “oto-katalitiktir” (kendi kendini katalize eder), yani alt tabaka tamamen kaplandıktan sonra kendi birikintileri üzerine kaplama yapmaya devam edeceklerdir. Önemli kalınlıklara kadar kaplanabilirler. Bazı akımsız altın, gümüş ve paladyum işlemleri de oto-katalitik olarak kabul edilir. Oto-katalitik işlemler, malzemelerin uygun katalitik çözeltilerle işlenmesinden sonra plastik gibi iletken olmayan malzemeler üzerine kaplanabilir. Daldırma metal kaplama bazen elektrijsiz kaplama olarak da adlandırılır, ancak mekanizma kimyasal yer değiştirmedir; alt tabaka metali, metal iyonlarını çözeltilerinden çıkarmak ve yüzeyi

kaplamak için bir indirgeyici madde görevi görür. Kaplama yalnızca alt tabaka metali çözeltideki metalden daha düşük bir oksidasyon potansiyeline sahip olduğunda meydana gelir ve yalnızca alt tabaka metali açığa çıktığı sürece devam eder (Baudrand, 1998).

2.1.3 Eloksal Kaplama

Eloksal kaplama işlemi hem yüzeyde hem de metalin içinde bir kaplama oluşturur; genellikle koruma ve kozmetik amaçlı olarak alüminyum üzerine yapılır. Çoğu alüminyum üzerine 2 ila 25 µm arasındaki ince kaplamalar kaplanabilir. Eloksal kaplama, bir metalin sülfürik asit gibi uygun bir elektrolit içerisinde çeşitli konsantrasyonlarda elektrokimyasal oksidasyonunu ifade eder. Sıcaklık ve akım yoğunluğu kontrol edildiğinde alüminyum oksit hem yüzeyde hem de alüminyumun içinde gelişir. Kaplama, dışta biriktiği kadar ana malzemeye de nüfuz eder. “Kalınlık” terimi hem birikimi hem de nüfuz etmeyi içerir (URL-1, 2024).

2.1.4 Karbonlama

Karbürleme, karbonun çelik tane yapısını değiştirecek kadar yüksek bir sıcaklıkta bir çelik parçanın yüzey katmanına yayıldığı bir sertleştirme işlemidir. Bu değişim çeliğin karbonu emmesini sağlar. Sonuç, karbürlemeyi güçlü, güvenli metallerin üretiminde ideal bir süreç haline getiren aşınmaya dayanıklı bir tabakadır. Bu ısı işlem doğru şekilde yapılırsa, karbon çeliği bir parçanın yüzey metali aşınmaya karşı daha dirençli olur ve yorulma mukavemeti artar. Karbürleme genellikle çelik rulmanlarda ve dişlilerde kullanılır. Karbürleme ısı işlemi kontrolü, endüstri spesifikasyonlarına göre ölçülür ve partiden partiye tutarlı proses kontrolü sağlar. Bazı durumlarda, atmosferde karbürleme hızını hızlandırabilecek ve verimliliği artıracak değişiklikler yapılabilir (Linde, 2020).

2.1.5 PVD/CVD

Fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve kimyasal buhar biriktirme (CVD), çeşitli alt tabakalar üzerinde ince filmler üretmek için yaygın olarak kullanılan iki proses ailesidir. Bu filmler kaplanan malzemeye mekanik, optik, kimyasal ve/veya elektronik

özellikler katabilir. Bu nedenle, otomotiv, kesici aletler, hassas bileşenler, ev donanımı, tıbbi cihazlar, kalıplar ve kalıplar, ateşli silahlar ve bıçaklar gibi farklı endüstrilerde kullanılırlar.

Hem PVD hem de CVD, bir maddenin buharını bir substratın (alet veya parça) yüzeyinde katı bir kaplamaya dönüştürür. Ancak, sürecin nasıl gerçekleştiği konusunda farklılık gösterirler. PVD, atomların, moleküllerin ve iyonların katı bir kaynaktan (hedef) çıkarılmasını ve bunların alt tabaka üzerinde yoğunlaştırılmasını içerir. CVD, katı bir film oluşturmak için alt tabakanın yüzeyinde veya yakınında kimyasal olarak reaksiyona giren kaynaklar olarak buharlaştırılmış sıvılar veya gazlar kullanır. PVD işlemleri her zaman vakumda gerçekleşirken, CVD yüksek vakumdan atmosferik basınca kadar gerçekleşebilir (VaporTech, 2024).

2.1.6 Plazma Sprey Kaplama

Plazma sprej, yoğun, yüksek kaliteli, işlenebilir bir kaplama üreten yüksek hızlı bir alev püskürtme işlemidir. Plazma sprej kaplamada, malzemeyi eritmek için tozlar plazma akışına enjekte edilir. Erimiş malzeme itilir ve alt tabakaya bağlanır. Kaplama kalınlığı, tozlar için besleme stoğunun boyutuna, ark püskürtme için damlacıkların boyutuna ve sıvı püskürtme işlemiyle oluşturulan atomize damlacıkların boyutuna göre belirlenir. Kaplamalar tipik olarak 0,003 ila 0,010 inç (0,076 ila 0,25 mm) kalınlığında uygulanır, ancak kaplama özelliklerine zarar vermeden 0,020 inç (0,51 mm) kalınlığa kadar da uygulanabilir. Plazma sprej kaplama, boyut restorasyonu, termal bariyerler, iletkenlik, aşınma direnci ve kimyasal direnç dahil olmak üzere birçok amaç için yüzey özelliklerini geliştirir, korur ve değiştirir. Plazma sprej kaplama, uzun ömürlü, aşınmaya dayanıklı bir kaplamanın gerekli olduğu elyaf ve tekstil benzeri uygulamalar için kullanılır. Plazma püskürtme işlemleri, elektronik bileşenleri, otomotiv alt gruplarını, tıbbi aletleri, jet motorlarını ve diğer yapısal parçaların yanı sıra ortopedik implantları ve tüketici ürünlerini kaplamak için kullanılır (URL-1, 2024).

2.2 Metal Kaplama Tipleri

Metal kaplama terimi, metallerin ve metal olmayan malzemelerin yüzey işlemlerini ve son işlemelerini kapsayan bir terimdir. Bu kaplamalar, sulu bir çözeltiden veya erimiş bir tuzdan elektrokimyasal reaksiyon yoluyla oluşur. Kaplamaların özellikleri, ön işlem, son işlem ve biriktirme işlemi ile belirlenir. Bu işlemde kullanılan malzemeler arasında pirinç, kadmiyum, krom, bakır, altın, demir, nikel, gümüş, titanyum ve çinko bulunmaktadır.

2.2.1 Krom Kaplama

Elektrolizle kaplanmış krom kaplamalar, kararma direnci, yüksek sertlik, aşınma direnci ve düşük sürtünme katsayısı gibi avantajlar sunar. Dekoratif amaçlar için parlak gümüşten mat görünüme kadar çeşitli yüzeyler sağlarlar. Altı ve üç değerlikli krom banyolarından elde edilen kaplamalar farklı renk tonlarına sahiptir. Sert krom kaplamalar daha kalın (10-500 mikron) ve silindir delikleri, motor valfleri gibi endüstriyel uygulamalarda tercih edilirler. Madencilik, uçak endüstrisi ve tıbbi ekipmanlar gibi alanlarda kullanımı yaygındır.

2.2.2 Nikel Kaplama

Nikel kaplamalar, estetik bir görünüm sağlamanın yanı sıra yüksek korozyon direnci sunarlar. Musluklar, sıhhi tesisatlar, otomotiv bileşenleri ve aydınlatma armatürleri gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılırlar. Plastiklerin metalleştirilmesiyle bu kaplamalar, bileşenlere metalik bir görünüm kazandırırken, yüksek yansıtma özelliği ve düşük ağırlık kombinasyonu ile değerli bir seçenek oluşturur. Elektrolizle kaplanan nikel kaplamalar, yüksek sertlik, aşınma direnci ve korozyon direnci için tercih edilirler.

2.2.3 Çok Katmanlı Kaplamalar

Çok katmanlı kaplamalar, bakır, nikel, krom gibi metallerin veya plastik bileşenler üzerine uygulanan kaplamalardır. Bu kaplamalar, estetik görünümün yanı sıra mükemmel korozyon ve aşınma direnci sağlarlar ve otomotiv tasarımında önemli bir

rol oynarlar. Ayrıca, plastik bileşenlere masif metallerin yüzey özelliklerini verirken, ağırlık tasarrufu avantajlarını korur. Metalik kaplamaların diğer avantajları arasında artırılmış çizilme direnci, sertlik, sağlamlık, ısı direnci, elektriksel iletkenlik ve çekici bir görünüm yer alır. Metalize plastiklerin elektromanyetik tarama alanındaki önemli işlevi ise elektromanyetik radyasyona karşı koruma sağlamaktır. Bazı durumlarda, gerekli taramayı sağlamak için yalnızca kısmi metalleştirme yapılması yeterlidir.

2.2.4 Alaşımli Kaplamalar

Alaşım kaplamalar, bir metal kaplamanın gereksinimlerini saf metalle karşılayamadığı durumlarda tercih edilen kaplama türleridir. Özellikle altın, bakır-kadmiyum ve nikel-kobalt alaşımli kaplamalar, mükemmel korozyon direnci ve yüksek mukavemetleri ile öne çıkar. Akımsız nikel kaplamalar, %5-15 fosfor içeriğiyle karmaşık şekilli parçalar üzerinde eşit kalınlıkta kaplamalar sağlar ve lehimlenebilirlik ile kaynaklanabilirlik özellikleri sunar. Kalay-kobalt kaplamalar parlak bir kroma alternatif olarak değerlendirilirken, çinko-kobalt, çinko-demir ve çinko-nikel kaplamalar ise korozyona karşı yüksek direnç gösterir ve otomotiv endüstrisinde sıkça tercih edilir (Kanani, 2004).

2.2.5 Çinko Kaplamalar

Çinko kaplama, demir üzerindeki etkin korozyon önleyici özelliği nedeniyle endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kaplamalar genellikle çinkoat banyoları, yüksek parlaklık sağlayan amonyum klorür banyoları ve yüksek korozyon direnci sağlayan siyanür banyoları gibi çeşitli banyo türleri kullanılarak uygulanır (Morikubo vd., 2021).

Çinko elektrokaplama işleminde üç tip banyo yaygın olarak kullanılır: siyanür içeren alkali banyo, siyanür içermeyen alkali banyo ve asit banyoları. Siyanür banyoları, yüksek toksisiteleri nedeniyle 1970'lerden beri yaygın olarak kullanılmamaktadır. Asidik sülfat banyoları ise çinko elektrometalurjisi çalışmalarında yaygın olsa da alkali ve siyanür içermeyen elektrolitler endüstriyel amaçlar için halen tercih edilmektedir. Günümüzde ise klorür iyonları veya sülfat iyonları içeren asit banyoları

özel bir öneme sahiptir; bu tür banyolar daha az toksiktir, daha hızlıdır ve yüksek akım verimlilikleri sağlayabilirler (Carrijo-Gonçalves vd., 2024).

2.3 Metal Kaplama Sanayi Atıksularının Karakterizasyonu

Hızlı küresel sanayileşme, kentleşme ve nüfus artışı, çeşitli sektörlerde elektrokaplama ve metal kaplama ürünlerinin kullanımında önemli bir artışa yol açmıştır. Otomotiv, beyaz eşya, elektrik, kuyumculuk, ağır ekipman ve telekomünikasyon gibi sektörlerde bu işlemler genellikle katı alt tabakaların görünümünü iyileştirmenin yanı sıra mühendislik, mekanik ve yüzey özelliklerini geliştirmek amacıyla kullanılmaktadır (Kim ve Bae, 2019). Ancak, elektrokaplama ve metal kaplama işlemleri, metal katyonlarının doğru akımla indirgenmesi yoluyla sulu fazdaki katı alt tabakalar üzerine biriktirilmesini içerir. Bu işlemler su yoğun olduğundan büyük miktarda metal içeren atık su üretirler (Benvenuti vd., 2014).

Elektrokaplama ve metal kaplama işlemlerinde genellikle toksik ve tehlikeli metal türleri olan bakır (Cu), çinko (Zn), nikel (Ni) ve krom (Cr) gibi maddeler kullanılmaktadır. Bu metaller, insan sağlığını ve özellikle su ortamını olumsuz etkileyebilirler (Martín-Lara vd., 2014). Atık sular aracılığıyla bu metaller su kaynaklarına karışarak ekosisteme zarar verebilir ve insan sağlığı için potansiyel riskler oluşturabilirler. Bu nedenle, elektrokaplama ve metal kaplama endüstrilerinde atık su yönetimi ve çevresel etkilerin azaltılması büyük önem taşımaktadır. Elektrokaplama ve metal kaplama işlemleri, insan sağlığı üzerinde potansiyel zararlı etkilere sahip olan çeşitli metal türlerinin kullanımını içerir. Bu metallerin insan sağlığı üzerindeki etkileri şu şekildedir:

- Bakır (Cu) ishal, dermatit, anemi, böbrek ve karaciğer hasarına neden olabilir;
- Çinko (Zn) vertigo, duygusal dengesizlik, damar sertliği ve pankreas hasarına yol açabilir;
- Nikel (Ni) göğüs ağrısı, dermatit, cilt alerjileri ve siyanoza (mavi deri) sebep olabilir;

- Krom (Cr) göz tahrişi, böbrek ve karaciğer hasarı, mesleki astım ve solunum tahrişine neden olabilir.

Dünya sağlık örgütü (WHO), içme suyunda kabul edilebilir maksimum Cu, Zn, Ni ve Cr seviyelerini sırasıyla 2; 4; 0,07 ve 0,05 mg/L olarak belirlemiştir. Bu nedenle, elektrokaplama ve metal kaplama işlemlerinden kaynaklanan metal içeren atık suların göllere ve nehir gibi su kaynaklarına deşarj edilmeden önce arıtılması gerekmektedir. Bu önlem, hem çevre hem de insan sağlığı için kritik bir öneme sahiptir (Kim vd., 2022).

25687 sayılı ve 31.12.2004 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, metal (elektrolitik kaplama, elektroliz usulüyle kaplama) sanayi atık sularının alıcı ortama deşarj edilmesi için belirlediği parametreleri ve standartları Tablo 2.1’de belirtmektedir (URL-2, 2024). Bu parametreler, metal kaplama sektörü kaynaklı atık su arıtma tesislerinden çıkabilecek çamur atıklarının bileşimini de açıklamaktadır. Metal kaplama sektörü atık suları, içerdikleri nikel, bakır, çinko, krom gibi riskli maddeler ve bu maddelerin miktarları nedeniyle riskli sektörler arasında yer almaktadır (Somaklı, 2022).

Tablo 2.1 Metal (elektrolitik kaplama, elektroliz usulüyle kaplama) sanayi atık sularının alıcı ortama deşarj edilmesi ile ilgili parametreler ve standartları (SKKY, 2004)

PARAMETRE	BİRİM	2 SAATLİK KOMPOZİT NUMUNE
KİMYASAL OKSİJEN İHTİYACI (KOİ)	(mg/L)	90
ASKIDA KATI MADDE (AKM)	(mg/L)	125
YAĞ VE GRES	(mg/L)	20
NİTRİT AZOTU (NO ₂ -N)	(mg/L)	5
AKTİF KLOR	(mg/L)	0.5
TOPLAM KROM	(mg/L)	1
KROM (Cr ⁺⁶)	(mg/L)	0.5
ALÜMİNYUM (Al)	(mg/L)	3
FLORÜR (F ⁻)	(mg/L)	50
ÇİNKO (Zn)	(mg/L)	3
KADMİYUM (Cd)	(mg/L)	0.2
BALIK BİYODENEYİ (ZSF)	-	2
pH	-	6-9

2.4 Metal Kaplama Atıksularının Arıtımı

Kaplama için kullanılan prosesin türü ne olursa olsun, tipik bir metal kaplama prosesi genellikle belirli metallerin önceden yıkanmış maddelerin yüzeyine biriktirilmesini ve ardından bir dizi ters akımlı durulama banyosunda durulamayı içerir. Durulama sıvısının tekrarlanan devridaimi nedeniyle metal iyonlarının konsantrasyonu zamanla artar. Bu da durulama işleminin etkinliğinin azalmasına neden olur. Bu nedenle, maksimum kirlilik seviyesine ulaşan durulama sıvısının genellikle taze bir çözelti ile değiştirilmesi gerekir. Üretilen önemli miktarda sıvı atık nedeniyle, bu durum çevresel riskleri en aza indirmek için işleme ve uygun yönetim için özel dikkat ve hususlar gerektirir. Aslında, metal kaplama, prosesin çeşitli aşamalarında suyun yer alması nedeniyle çeşitli endüstriler arasında sıvı atıkların başlıca kaynaklarından biri olarak kabul edilmektedir (Hosseini vd., 2016).

Çinko ve alaşımları geleneksel olarak çeşitli metaller için koruyucu ve dekoratif kaplamalar olarak kullanılmaktadır. Çinko kaplamalar, katodik korumanın yanı sıra fiziksel bir bariyer sağlayarak çeliği korozyona karşı korur. Yıllar boyunca çinko kaplamaların uygulanması için farklı süreçler geliştirilmiştir ve kaplama gereksinimleri ve maliyetleri göz önüne alındığında, elektrokaplama fonksiyonel ve dekoratif uygulamalar için en yaygın olanıdır.

Çinko kullanarak elektrokaplama işlemi genellikle birkaç adım içerir:

- (1) Ön işlem: Bu adım, metalik bileşenleri çinko birikimi için hazırlamayı amaçlayan alkali ve asit asitleme ile durulamayı içerir
- (2) Kaplama: İşlem, alkali siyanür bazlı elektrokaplama, siyanürsüz alkali çinko kaplama (siyanürün yerini sodyum glukonat, trietanolamin veya polimerik aminlerin aldığı) ve asit klorür bazlı elektrokaplama gibi farklı şekillerde gerçekleştirilir.
- (3) İşlem sonrası: Bu, krom bazlı pasivasyonu içerebilir

Bu nedenle, elektrokaplama sürecinin farklı adımlarında farklı ve karmaşık bileşimlere sahip atıksular üretilmektedir.

Günümüzde ağır metal atıksularının arıtılması için kimyasal çöktürme (Chen vd., 2018), koagülasyon ve flokülasyon (Nyström vd., 2020), elektrokimyasal arıtma (Lu vd., 2023), iyon değişimi (Bashir vd., 2019), membran filtrasyonu (Xiang vd., 2022), biyolojik yöntemler (Jyoti vd., 2022), adsorpsiyon (Fernández-González vd., 2019; Joshi vd., 2024; Rostami ve Khodaei, 2024), fotokatalitik (Miyah vd., 2024) gibi çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Ancak, her bir tekniğin kendine özgü avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin, adsorpsiyon, kimyasal arıtma, koagülasyon, çökeltme ve iyon değişimi gibi teknikler yaygın olarak kullanılmaktadır. Adsorpsiyon prosesi, uzun bir arıtma süresi ve adsorbent (adsorban) malzemesinin ön arıtımı gerektirebilir. Kimyasal arıtma ve koagülasyon işlemleri sırasında büyük miktarda çamur oluşabilir, bu da çevresel sorunlara neden olabilir. İyon değişim prosesi ise genellikle pahalı olarak kabul edilir ve yüksek bakım maliyetlerine sahiptir. Öte yandan, bu tekniklerin uygulanmasıyla elde edilen çamurun bertarafı ve atık yönetimi önemli bir endişe verici bir sıkıntı oluşturmaktadır. Bu süreçlerin tümü, ağır metal içeren atıksularının arıtılmasında etkili olabilir, ancak her birinin belirli sınırlamaları bulunmaktadır (Bakry vd., 2024).

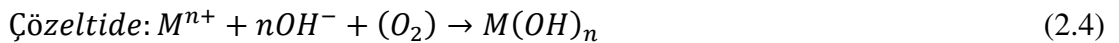
2.5 Elektrokoagülasyon Prosesi

Elektrokoagülasyon (EK), bir elektrokimyasal teknik olup, su bazlı ortamlardaki mevcut kirleticileri çeşitli fizikokimyasal olaylar aracılığıyla elektriksel akım kullanarak gidermeyi amaçlar. En basit EC reaktör tasarımı, her biri anot ve katot olarak işlev gören iki metal elektrot içerir. Elektrotlar harici bir güç kaynağına bağlandığında, anottaki oksidasyon süreci başlar ve metal katyonları oluşturur (Sandoval vd., 2021).

Kimyasal flokülasyonla karşılaştırıldığında EK teknolojisi, yerinde reaksiyon, ikincil kirlilik olmaması, aktif bileşenlerin yüksek içeriği, düşük çamur verimi, basit cihaz ve kolay kullanım dahil olmak üzere birçok avantaj sergilemektedir. Kimyasal flokülasyon ile karşılaştırıldığında, EK teknolojisi önemli avantajlar sunmaktadır. EK teknolojisi, in-situ (yerinde) reaksiyon özelliği ile işlemin doğrudan atıksu içinde gerçekleşmesine imkân tanır ve böylece ikincil kirlilik riskini ortadan kaldırır. Ayrıca, yüksek aktif bileşen içeriği sayesinde etkili bir şekilde kirleticileri çökebilir, düşük

çamur üretimi sağlar ve basit cihazlarla kolayca işletilebilir. Bu özellikler, EK teknolojisini endüstriyel ve kentsel atıksulardan kirleticilerin arıtılmasında önemli bir alternatif haline getirmiştir (Zhang vd., 2024).

EK prosesinde, ana reaksiyonlar aşağıdaki Eşitlik (2.1), (2.2), (2.3), (2.4) ile tanımlanabilir: oksidasyon Eşitlik (2.1), (2.2)'ye göre anotta gerçekleşirken, indirgeme Eşitlik (2.3) ile gösterildiği gibi katotta gerçekleşir. Metal hidroksit ($M(OH)_n$, koagülant görevi görür), Eşitlik (2.1)'deki M^{n+} metal iyonunun Eşitlik (2.4)'e göre kendiliğinden hidrolizi ile çözeltide oluşabilir. Ağır metali gidermek için EK prosesi kullanıldığında, mekanizma Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Gösterildiği gibi, ağır metali pıhtılaştırıcılar ($M(OH)_n$) tarafından adsorbe edilerek floklar oluşturabilir. Daha sonra floklar çökeltme veya yüzdürme yoluyla (Eşitlik (2.3) ile katotta üretilen H_2 veya Eşitlik (2.2) ile anotta üretilen O_2 ile birlikte) uzaklaştırılabilir. Bu durumda, oksijen evrimi (Eşitlik 2.2) önemli bir ikincil reaksiyondur ve genellikle anot potansiyeli yeterince yüksek olduğunda meydana gelir (Yan vd., 2024).



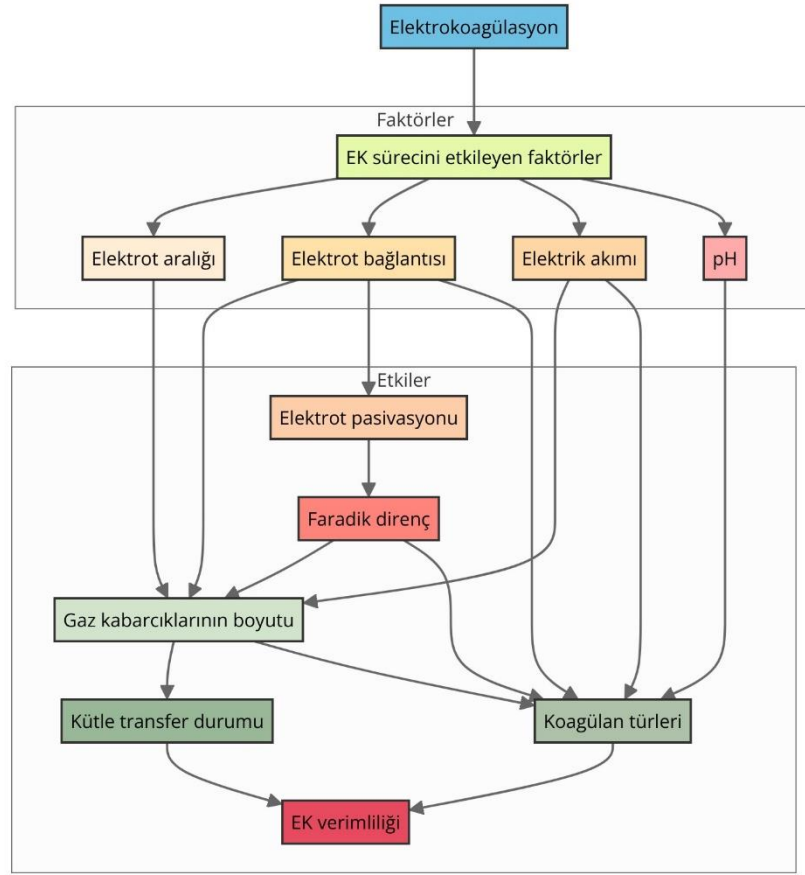
EK prosesinin avantaj ve dezavantajları aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 2.2 EK prosesinin avantaj ve dezavantajları

Avantajları	Dezavantajları
EK, çeşitli kirleticileri etkin bir şekilde uzaklaştırabilir. Metal iyonları, organik bileşikler ve diğer çözünmüş maddeler EK prosesi ile çökelti haline getirilerek giderilebilir.	EK işlemi elektrik enerjisi gerektirir ve bu nedenle işletme maliyetleri yüksek olabilir.
EK işlemi, kirleticilerin su içinde doğrudan çökmesini sağlar, böylece ikincil kirlilik riskini minimize eder.	EK sistemlerinde kullanılan elektrotlar zamanla aşınabilir veya paslanabilir, bu da periyodik olarak elektrotların bakım veya değişimini gerektirebilir.
EK işlemi, geleneksel koagülasyon işlemlerine göre daha az miktarda çamur oluşturur. Bu, atık çamurun yönetimi ve bertarafı açısından avantaj sağlar.	Yüksek anot potansiyellerinde, EK işlemi sırasında oksijen gazı üretimi meydana gelebilir, bu da işlem verimliliğini etkileyebilir.
EK işlemi genellikle kimyasal kullanımını sınırlı tutar. Sadece pH stabilizasyonu için bazı durumlarda kimyasal kullanımı gerekebilir.	EK sistemlerinin bazı uygulamalarda karmaşık olabileceği ve uzmanlık gerektirebileceği bilinmektedir.
EK sistemleri genellikle basit tasarımıdır ve kolayca işletilebilir.	EK sistemlerinin kurulum maliyeti diğer arıtma teknolojilerine göre başlangıçta yüksek olabilir.
EK işlemi, düşük ve toksik olmayan yan ürünler ve çamur oluşturur, bu da çevresel etkiyi minimize eder.	

2.6 Elektrokoagülasyon Prosesine Etki Eden Parametreler

EK sürecini etkileyen başlıca faktörler elektrot tipi, elektrotlar arasındaki mesafe, uygulanan akım yoğunluğu, başlangıç pH'sı, elektrolitin iletkenliği ve işlem süresidir. Bu nedenle, her EK çalışmasında operasyonel değişkenlerin optimize edilmesi gerekmektedir. Elektrokoagülasyon mekanizmasını ve bunun ardından gelen proses verimliliğini etkileyen operasyonel değişkenler Şekil 2.2'de gösterilmektedir.



Şekil 2.2 Elektrokoagülasyon işleminin mekanizmasını etkileyen parametreler

2.6.1 Elektrot Tipi

EK prosesinde genellikle farklı elektrokoagülasyon süreçleri ve uygulamaları gösteren elektrot malzemelerine dayalı alüminyum (Al) elektrokoagülasyonu ve demir (Fe) elektrokoagülasyonu içerir. Al elektrokoagülasyon prosesine gelince, çözelti pH'sına bağlı olarak karmaşık bir denge sonrasında $\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$, $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$, $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$, $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$ ve $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$ dahil olmak üzere çeşitli Al hidroksit türleri üretilebilir. Karmaşık çökeltme mekanizmaları nedeniyle, Al-EK prosesi sırasında oluşan flokülatlar ve agregatlar $\text{Al}(\text{OH})_3$ 'tür.

Fe elektrokoagülasyon prosesi açısından, düşük pH ve oksijenli su koşulları altında Fe^{2+} 'nin Fe^{3+} 'e dönüştürülmesi karmaşık değildir. Fe, maliyet etkinliği ve ikincil kirlenici madde üretmemesi nedeniyle EK'da en çok kullanılan kurban anotlardan biridir. Demirin çözünme ve pasifleşme hızı büyük ölçüde elektrot voltajına, elektrolit

bileşimine ve pH'ya bağlıdır. Bu iyonlar, katotta üretilen OH⁻ iyonlarıyla reaksiyona girerek çözünmeyen Fe(OH)₂ pıhtılaştırıcıları oluşturmaktadır (Sadaf vd., 2024). Monomerik ve polimerik türler pH'ya bağlıdır ve geniş bir Fe(OH)₃, Fe(OH)₄, Fe(H₂O)₄(OH)²⁺, Fe(H₂O)₅OH²⁺, Fe₂(H₂O)₆(OH)₄²⁺, Fe(H₂O)₆³⁺ ve Fe₂(H₂O)₈(OH)₂⁴⁺ aralığı göstermektedir. Kompleksler 3-7 pH değerinde güçlü bir şekilde polimerize olur ve su çözeltilerinde jelatinimsi bir şekilde askıda kalır. Böylece, kirleticiler elektrostatik etkileşim, pıhtılaştırıcı sedimantasyon ve kompleks oluşturma eylemleri yoluyla uzaklaştırılabilir (Zhang vd., 2024). Sonraki aşamalarda floklar, flotasyon, çökeltme ve filtrasyon gibi fiziksel ayırma işlemleriyle sudan uzaklaştırılır.

2.6.2 Akım Yoğunluğu

Akım yoğunluğu veya etkin elektrot yüzey alanı başına düşen akım, elektrokoagülasyon performansının belirleyici bir parametresi olarak kabul edilir. Elektrokoagülasyon (EK) işlemi sırasında, akım yoğunluğu, elektrotlardan metal iyonları ayrıştığında ortaya çıkan elektron salınım oranını düzenler. Uygulanan akım yoğunluğu, atık suyun özelliklerine bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Bu değişim genellikle, atık suda bulunan kirleticilerin türlerinin iyonik etkileşimlerindeki farklılıklardan kaynaklanmaktadır (Hakizimana vd., 2017). Genellikle, elektrokoagülasyon prosesinde uygulanan akım yoğunluğu 0,01 ila 880 A m⁻² arasında değişmektedir Uygulanan akım yoğunluğunun çözeltilde metal iyonlarının serbest bırakılması ve ayrışması ile yakından ilişkili olduğu gerçeğine rağmen, aşırı akım, koagülanların fazla dozlanması nedeniyle in-situ (yerinde) ikincil reaksiyonlara izin vererek EK prosesinin performansını önemli ölçüde azaltabilir ve kolloidal yük tersine çevrilmesine yol açabilir. Bu parametre, elektrot ömrünü kısaltabilir ve işlem verimliliğini düşürebilir. Bu nedenle, akım yoğunluğu, istenen arıtma performansını elde etmek için optimize edilmesi gereken EK prosesi için kritik bir parametredir (Tahreen vd., 2020).

2.6.3 Elektrotlar Arası Mesafe

EK prosesinde, elektrotlar arası mesafe, katotlar ve anotlar arasındaki elektrostatik alanı yönettiği için kritik bir parametre olarak kabul edilir. Elektrotlar arası mesafenin

azalması, elektrostatik alanı artırır ve böylece koagülasyonu teşvik etmek için flok oluşumuna yardımcı olan metal hidroksitler, yüksek elektrostatik çekimin neden olduğu yoğun çarpışmalar nedeniyle bozulmaktadır. Sonuç olarak, daha kısa elektrotlar arası mesafe, EK sürecinin verimliliğini önemli ölçüde artırır (Khandegar ve Saroha, 2013). Ancak, elektrotlar arasındaki mesafenin artması, düşük elektrostatik kuvvetler nedeniyle metal hidroksit bazlı flokların oluşumunu geciktirir. Aşırı elektrot mesafesi, proses verimliliğini düşürmekte ve katotlar ile anotlar arasında metal iyonlarının daha yavaş salınmasını telafi etmek için yüksek enerji tüketimine yol açmaktadır. Bu nedenle, elektrokoagülasyon sürecinin optimum elektrot mesafesinde gerçekleştirilmesi kritik öneme sahiptir (Verma vd., 2013). Çeşitli çalışmalar, elektrotlar arası optimum mesafenin farklı atıksular için 0,5-1 cm olduğunu öngörmüştür. 10 mm'den az olan dar aralık, düşük enerji tüketimine eşlik eder. Elektrotlar arası mesafenin artmasıyla hücre voltajında bir artış meydana gelir ve bu da güç tüketiminde bir artışa neden olur (Guo vd., 2022; Sahu vd., 2014).

2.6.4 Başlangıç pH Değeri ve İletkenlik

Çözelti pH'sı, EK prosesi performansının belirlenmesinde kritik bir rol oynamaktadır. pH'nın etkisi, çözeltide çeşitli türler sergileyen pıhtılaştırıcıların oluşumuyla doğrudan ilişkilidir. Bu pıhtılaştırıcılar, metal iyonik kompleksler ve monomerik/polimerik hidroksit kompleksleri gibi çeşitli formlar alabilmektedir. Bu tür komplekslerin çeşitliliği ve miktarı önemlidir, çünkü atık su kirleticileriyle farklı etkileşimler sergileyerek değişen pıhtılaştırıcı performanslar sağlarlar. Örneğin, Fe ve Al elektrotları için oldukça alkali koşullarda oluşan türler, yani $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ ve $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, adsorpsiyon verimliliği açısından çok zayıf performans sergiler (Kim vd., 2002). Ancak, nötr ve hafif alkali/asidik koşullar altında oluşan $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ ve $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ türleri, pıhtılaştırıcıların adsorpsiyon kapasitesini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu nedenle, çözelti pH'sının pıhtılaştırıcıların fizikokimyasal özellikleri üzerinde önemli bir etkisi vardır. Bu etki, (i) pıhtılaştırıcı türlerin parçacık boyutu ve (ii) metal hidroksitlerin çözünürlüğü ve elektriksel iletkenliği üzerinde gözlemlenmektedir. Ayrıca, kirleticilerin net yükleri ve elektrostatik etkileşimleri, fonksiyonel gruplarının protonasyonu/deprotonasyonundan (pKa değerlerine dayalı olarak) doğrudan etkilenir. Bu şekilde çift katman değişimi gerçekleşir ve bu da pıhtılaşma oluşumunu

etkiler. Bu nedenle, çözelti pH'sının, hedeflenen kirleticilerin farklı fiziko-kimyasal yapısına ve atık su özelliklerine göre optimize edilmesi gerekmektedir (Das vd., 2022).

Çözeltinin iletkenliği EK'nın verimliliğini ve güç tüketimini etkileyen önemli bir faktördür, iletkenlik ne kadar yüksek olursa, artan kirletici giderme verimliliği nedeniyle EK'nın güç tüketimi o kadar düşük olur (Moussa vd., 2017). Çözelti iletkenliğini artırmak için genellikle NaCl ve NH₄Cl gibi elektrolitler eklenir. Ancak, optimum EK verimi için elektrolit konsantrasyonunu optimize etmeye yönelik çok fazla çalışma yapılmamıştır (Tahreen vd., 2020).

2.6.5 Reaksiyon Zamanı

Kirletici giderim verimliliği büyük ölçüde EK süresine bağlıdır. Daha uzun sürelerde, sabit bir akım yoğunluğunda daha fazla metal koagülant ve flok oluşumu nedeniyle daha yüksek oranda kirletici giderimi elde edilir (Naje vd., 2017). Ancak, belirli zaman dilimlerinde EK verimliliği EK süresi uzadıkça başlangıçta kirletici giderimi artar, ancak belirli bir noktadan sonra bu artış durur ve verimlilik aynı seviyede kalır. Bu durum, koagülantların kirleticileri floklar halinde toplaması ve aktif bölgelerin dolması nedeniyle meydana gelir. Kirletici giderim oranı elektroliz süresinden etkilendiğinden, enerji ve kaynak kaybını önlemek için EK süresinin optimizasyonu gereklidir (Tahreen vd., 2020).

2.6.6 Sıcaklık

Başlangıç sıcaklığı, EK sürecini etkileyen ve diğer parametrelerden bağımsız bir faktördür. Sediği ve arkadaşları, sıcaklık arttıkça moleküler hareketliliğin arttığını, bu durumun daha fazla parçacık çarpışmasına, dolayısıyla daha iyi flok oluşumuna ve daha yüksek kirletici giderimine neden olduğunu öne sürmüşlerdir (Sediği vd., 2021). EK sırasında, sisteme akım verildiğinde sistemin sıcaklığı yükselir. Ancak, sıcaklık arttıkça flokların dağılabileceği bir üst sınır vardır. Bu etki, akım yoğunluğunun artırılmasıyla da gözlemlenmiş ve çözeltinin sıcaklığının artması ve koagülasyon sürecindeki değişkenlik nedeniyle giderim verimliliği sınırlanmıştır. Ayrıca, sıcaklık arttıkça suyun iletkenliği artar ve bu da giderim verimliliğini artırmaktadır (Boinpally vd., 2023).

2.6.7 Elektrot Pasivasyonu

Elektrot pasivasyonu, elektrot yüzeyinde genellikle bir oksit tabakasının birikmesiyle oluşan engelleyici bir durumdur. Bu durum, anot çözünmesi ve elektrokoagülasyon işlemi için istenmeyen bir durumdur ve genellikle galvanostatik çalışma modu ile kontrol edilir. Pasivasyon, sistemin genel direncini artırarak hücre potansiyelini yükseltir ancak koagülant veya kabarcık üretim oranlarını etkilemez. Deiyonize su kullanımı, elektrotların pasifleşmesine neden olabilecek karbonatlar gibi kirleticilerin varlığını en aza indirir. Elektrotlar, pasifleştirici maddeleri uzaklaştırmak için periyodik olarak mekanik temizlemeye tabi tutulmalıdır. Bu, elektrotların bütünlüğünü koruyarak sabit bir anodik çözünme oranı sağlar ve anot ile katot arasındaki akım taşınmasını engelleyen geçirimsiz tabakaların oluşumunu önler. Elektrot üzerindeki korozyon oluşumu, DC yerine AC kullanılarak elektrokoagülasyonda giderilebilir (Khandegar ve Saroha, 2013).

2.7 Cevap Yüzey Metodu (CYM)

Cevap Yüzey Metodu (CYM), bir prosesin optimizasyonunda gerekli olan deneysel testlerin sayısını azaltmada etkili bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Bu yöntem, incelenen farklı değişkenlerin ve bunlar arasındaki etkileşimlerin istatistiksel önemini belirlemek ve bu ilişkileri modellemek amacıyla kullanılmaktadır (Jiménez vd., 2016). CYM'nin uygulama adımları şu şekildedir: (1) süreç veya sistem üzerinde önemli etkileri olan bağımsız değişkenlerin seçilmesi (tarama tasarımı); (2) deneysel tasarımın seçilmesi; (3) deneysel verilerin bir polinom fonksiyonuna uydurulması; (4) modelin uygunluğunun değerlendirilmesi; (5) değişkenlerin optimum değerlerinin bulunması (Joshi vd., 2024).

Çok sayıda değişken, incelenen sistemin tepkisini etkileyebilir ve her birinin küçük katkılarını belirlemek ve kontrol etmek pratikte imkansızdır. Bu nedenle, önemli etkileri olan değişkenleri seçmek gerekir. Çeşitli deneysel değişkenler ve bunların etkileşimlerinin hangilerinin daha önemli etkilere sahip olduğunu belirlemek için tarama tasarımları yapılmalıdır. Bu amaçla, tam veya kesirli iki seviyeli faktöriyel

tasarımlar kullanılabilir, çünkü bu tasarımlar verimli ve ekonomiktir (Box ve Draper, 1988).

CYM'de kullanılabilecek en basit model doğrusal bir fonksiyona dayanmaktadır. CYM, genellikle polinom denklemleri kullanarak yanıt yüzeylerini modellemeye dayanmaktadır. En yaygın kullanılan polinom modelleri, doğrusal, ikinci dereceden (kuadratik) ve etkileşim modelleridir. Doğrusal model aşağıdaki eşitlikte verilmiştir:

$$y = \beta_0 \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (2.5)$$

burada y yanıt değişken sayısını, β_0 sabit terimi, β_i bağımsız değişkenlerin katsayılarını, x_i bağımsız değişkenleri ve ε deneylere bağlı kalan hatayı temsil etmektedir. Dolayısıyla, yanıtlar herhangi bir eğrilik göstermemelidir. Eğriliği değerlendirmek için ikinci dereceden bir model kullanılmalıdır. İkinci dereceden (Kuadratik) model aşağıdaki Eşitlik 2.6'da verilmiştir:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{1 \leq i < j \leq k} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.6)$$

burada β_{ii} ikinci dereceden parametrelerin katsayılarını, β_{ij} Etkileşim parametrelerinin katsayılarını temsil etmektedir. İkinci dereceden etkileşim modeli ise Eşitlik 2.7'de verilmiştir (Bezerra vd., 2008).

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.7)$$

Deneysel tasarımdan elde edilen her deneysel noktaya ilişkin veriler toplandıktan sonra, incelenen değer seviyelerine göre yanıtın davranışını tanımlamak için matematiksel bir denklemin uyarlanması gereklidir. Başka bir ifade ile, Eşitlikler (2.5-2.7)'deki b parametrelerinin tahmin edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, matris notasyonunda, Eşitlikler (2.5-2.7) aşağıdaki şekilde temsil edilebilir:

$$y_m x_i = X_{m \times n} b_{n \times 1} + e_{m \times 1} \quad (2.8)$$

burada y yanıt vektörünü, X seçilen deneysel tasarımın matrisini, b modelin parametrelerinden oluşan vektörü, e kalanı, ve m ve n sırasıyla matrislerin satır ve sütun sayılarını temsil eder.

Eşitlik (2.8), en küçük kareler yöntemi olarak adlandırılan istatistiksel bir yaklaşım kullanılarak çözülmektedir. En küçük kareler, deneysel verilere en küçük kalanı üretmek için matematiksel bir model uyarlamak amacıyla kullanılan bir çoklu regresyon tekniğidir. Eşitlik (2.8)'in matematiksel dönüşümlerinden sonra, parametreleri içeren bir b vektörü aşağıdaki denklemle elde edilebilir:

$$b_{n,1} = (X_{n,m}^T X_{m,n})^{-1} (X_{n,m}^T y_{m,i}) \quad (2.9)$$

Eşitlik (2.9) deneysel alandaki cevabın davranışını tanımlayan cevap yüzeyinin yapımında kullanılır. Eşitlik (2.9)'un büyük avantajı, b katsayılarını belirlemek için gereken düşük hesaplama maliyetidir.

CYM'de hataların sıfır ortalama ve ortak bir bilinmeyen varyansa sahip rastgele bir dağılım profili sunduğu ve bu hataların birbirinden bağımsız olduğu varsayılmaktadır. Bu nedenle, b vektörünün her bir bileşenine ilişkin varyans tahmini genellikle Eşitlik (2.10)'a göre merkezi noktanın özgün tekrarları ile elde edilmektedir:

$$\hat{V}(b)_{n,n} = (X_{n,m}^T X_{m,n})^{-1} s^2 \quad (2.10)$$

Denklemler ile $\hat{V}(b)$ 'nin her bir bileşeninin karekökünün çıkarılması, cevap yüzeyinin denklemini oluşturan b katsayısının standart hatalarının elde edilmesine ve anlamlılığının değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Uygun bir matematiksel model seçildikten sonra, modelin tahmin doğruluğunu doğrulamak son derece önemlidir. Bu kritik doğrulama aşaması, modelin gerçek sistemi güvenilir bir şekilde yaklaştırdığından emin olmak için gereklidir. Varyans Analizi (ANOVA), uyarlanmış modelin kalitesini değerlendirmek için güvenilir bir yöntemdir. ANOVA, değişken seviyelerindeki değişikliklerden kaynaklanan varyasyonlarla, üretilen sonuçların ölçümlerindeki rastgele hatalardan kaynaklanan varyasyonları karşılaştırmak için kullanılır. Bu karşılaştırma aracılığıyla, deneysel

varyansın kaynaklarına dayanarak tahmin tepkileri için kullanılan regresyonun anlamlılığını değerlendirmek mümkündür. Bu doğrulama sürecinde kullanılan çeşitli terimler Tablo 2.3’de listelenmiştir (Myers vd., 2016).

Tablo 2.3 Doğrulama sürecinde kullanılan terimler

Varyasyon Kaynağı	İfade	Açıklamaları
R^2	$R^2 = \frac{TK_{Reg}}{TK_{Top}}$	R^2 1,0’a yakın olmalı
R^2 düzeltilmiş	$R^2_{düzeltilmiş} = 1 - \frac{TK_{Reg}/(n-p)}{TK_{Top}/(n-1)}$	R^2 düzeltilmiş 1,0’a yakın olmalı
R^2 tahmin	$R^2_{tahmin} = 1 - \frac{THKT}{TK_{Top}}$	R^2_{tahmin} ile R^2 düzeltilmiş arasında 0,2’den fazla fark olmamalıdır
Tahmin hatasının kareleri toplamı (THKT)	$THKT = \sum_{i=1}^n [y_i - \hat{y}_i]^2$	THKT küçük bir değere sahip olmalıdır
Regrasyonun Önemi	$F_0 = \frac{\text{Modelin kareler ortalaması}}{\text{Kalıntı kareler ortalaması}}$	İyi bir model için bu oranın tablodaki F değerinden büyük olması gerekir
Uyum eksikliği	$F_{UE} = \frac{TK_{UE}/(f-p)}{TK_{SH}/(n-p)}$	İyi bir model için bu oranın tablodaki F değerinden düşük olması gerekir

Bir veri setindeki sapma, ANOVA aracılığıyla dağılımının incelenmesiyle değerlendirilmektedir. Tahmine dayalı bir modelin genel etkinliğini tanımlamak için kullanılan yaygın bir ölçüt, regresyon kareler toplamının (KT_{Reg}) toplam kareler toplamına (KT_T) oranını temsil eden belirleme katsayısıdır (R^2). Bu oran, modelin tahmin edilen değerlerinin ortalamadan ne kadar farklı olduğunu göstermektedir. Etkili bir tahmin modeli 1’e yaklaşan bir R^2 değeri kabul edilmelidir.

Bununla birlikte, model tahmininin etkinliğini değerlendirmek için yalnızca R^2 değerine güvenilmemelidir, çünkü bu değer istatistiksel önemlerine bakılmaksızın ek model terimleriyle artabilmektedir. R^2 ’yi, deneysel faktörlerin sayısını dikkate alan düzeltilmiş R^2 ile karşılaştırmak önemlidir. İstatistiksel olarak önemsiz parametrelerin dahil edilmesi tipik olarak düzeltilmiş R^2 değerinin azalmasına neden olmaktadır. R^2 ve düzeltilmiş R^2 arasındaki önemli bir tutarsızlık, modele anlamlı olmayan terimlerin

dahil edilebileceğini göstermektedir. “Kalıntı” terimi, bir modelin yeterliliğinin değerlendirilmesinde çok önemlidir ve gerçek ve tahmin edilen değerler arasındaki farkı temsil etmektedir. Ayrıca, tahmin hatası kareler toplamı (THKT) tahmin kabiliyetini değerlendirmek için kullanılan bir başka önemli istatistiktir ve modelin gelecekteki yanıtları tahmin etmede beklenen doğruluğunu göstermektedir. Daha düşük bir THKT değeri tercih edilmektedir. Modelin yeni yanıtlar için tahmin doğruluğu, THKT’den hesaplanan R^2_{tahmin} ile temsil edilmektedir. R^2 ve R^2_{tahmin} ’i arasında yakın bir uyum olması arzu edilmektedir (Myers vd., 2016).

Fisher testi, bireysel faktörlerin ve bunların etkileşimlerinin önemini doğrulamak için kullanılır. Daha yüksek bir F değeri ve daha düşük bir “ $p > F$ ” değeri, ilgili modelin ve katsayılarının daha önemli olduğunu gösterir. “ $p > F$ ” değerinin 0,05’in altında olması modelin %95 güven aralığında anlamlı olduğunu göstermektedir. Uyum eksikliği testi, modelin önemini değerlendirmek için bir başka yöntemdir ve bir modelin deneysel alan içindeki veri noktalarını temsil edememesini, kalıntı hatayı tekrarlanan deneysel tasarım noktalarından gelen saf hatayla karşılaştırarak değerlendirmektedir. Bu test ideal olarak önemsiz olmalıdır; grafikteki F değerini aşan bir oran uyum eksikliğine işaret eder ve modelin iyileştirilmesini gerektirmektedir (Myers vd., 2016).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Atıksuyun Özellikleri ve Analitik Metot

Bu çalışmada kullanılan metal kaplama atıksuyu örnekleri Kastamonu İline bağlı merkez ilçe sanayi bölgesinde bulunan günde yaklaşık 50 m³ atıksu üreten bir metal kaplama sanayi şirketin'den temin edilmiştir. Metal kaplama atıksularının karakterizasyonunun sonuçları Tablo 3.1'de verilmektedir.

Tablo 3.1 Metal sanayi atıksularının karakterizasyonu

Parametre	Değer
pH	1,78
İletkenlik (mS/cm)	9
KOİ (mg/L)	218,04
Zn ²⁺ (mg/L)	107,2

Atıksuyun ve alınan örneklerin pH ve elektriksel iletkenlik değişimleri taşınabilir ölçüm cihazı WTW MultiLine® Multi 3620 IDS (Xylem Analytics) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. KOİ analizleri standart metotlarda belirtilen yöntem (SM 5220D) göre spektrofotometre (Hach Lange DR6000) kullanılarak yapılmıştır (Lipps vd., y.y.). Çinko (Zn) analizleri ise standart metotlarda belirtilen yöntem (SM 3111B) göre atomik absorpsiyon spektroskopisi kullanılarak ölçülmüştür.

Atık suyun pH'sını değiştirmek için hidroklorik asit (HCl, 5 M, 0,01 M) ve sodyum hidroksit (NaOH, 5 M, 0,01 M) kullanılmıştır.

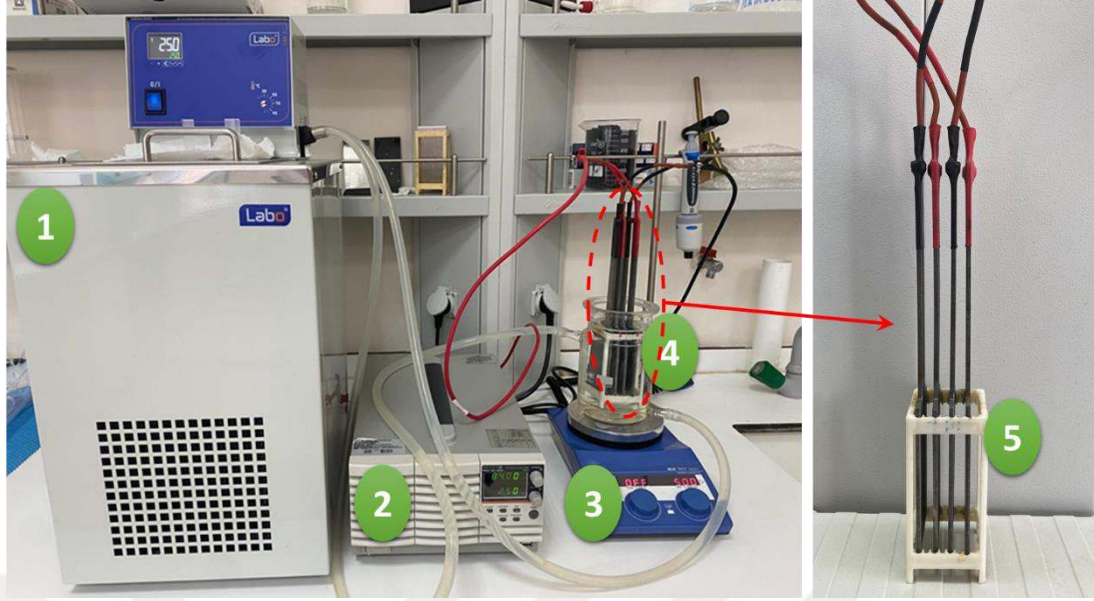
3.2 Deneyel Prosedür

Elektrokoagülasyon deneyleri Şekil 3.1'de gösterilen sistemde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde iç çapı 8 cm ve yüksekliği 15 cm olan silindirik ceketli reaktör kullanılmıştır. Reaktör kullanılan atıksu hacmi 500 mL'dir. Deneylerde anot (2 adet) ve katot (2 adet) olarak demir elektrotlar kullanılmış olup sistem kesikli modda işletilmiştir. Kullanılan elektrotlar 5×10 cm ebatlarında olup birbirine paralel olarak

bağlanmıştır. Elektrotlar arası mesafe 0,5 cm olarak ayarlanmıştır. Kullanılan anotların toplam yüzey alanı yaklaşık 200 cm²'dir. Reaktördeki çözeltinin sıcaklığı sabit sıcaklık kontrollü ısıtmalı-soğutmalı sirkülatör (LABO, C200-H13) kullanılarak 25°C'de sabit tutulmuştur. Çözelti homojenliğini sağlamak için manyetik karıştırıcı (IKA, RCT basic) kullanılmış ve reaksiyon süresince 500 rpm'de karıştırma uygulanmıştır. Atıksuyun başlangıç pH değerini ayarlamak için derişik HCl veya 1 M NaOH çözeltisi kullanılmıştır. Akım ve voltaj kontrolü ise bir doğru akım güç kaynağı (GW Instek, PSW 80-40,5) kullanılarak sisteme sağlanmıştır. Sistem sabit akımda işletilmiş olup doğru akım güç kaynağından (DC) voltaj değeri okunarak kaydedilmiştir. Atıksu belirtilen proses koşullarında arıtıldıktan sonra (reaksiyon süresi sonunda) alınan numune 3000 rpm'de santrifüjlendi ve daha sonra gerekli analizler (KOİ ve Zn) yapılmıştır. Her deney sonrasında, elektrotlar reaktöre yerleştirilmeden önce demir elektrotların yüzeyindeki kirlilikler (kalıntılar), 200 mL HCl çözeltisi (%35) ve 400 mL hekzametilentetramin sulu çözeltisi (%2,8) karıştırılarak taze olarak hazırlanan yıkama çözeltisine 10 dakika daldırılarak temizlenmiş ve saf su ile iyice yıkandıktan sonra kurutulmuştur (Do ve Chen, 1994; Kobya vd., 2003). Daha sonra kurutulan elektrotlar tartılarak demir tüketimleri saptanmıştır. Elektrokoagülasyon deneylerinde giderim verimleri aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

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

Burada, C₀ başlangıçta atık sudaki kirletici (KOİ ya da Zn) konsantrasyonunu (mg/L), C_e deney süresi sonunda kalan kirletici (KOİ ya da Zn) konsantrasyonunu (mg/L) göstermektedir.



Şekil 3.1 Elektrokoagülasyon deney sistemi (1: Soğutmalı sirkülatör, 2: DC güç kaynağı, 3: Manyetik karıştırıcı, 4: Reaktör, 5: Kullanılan hücre)

3.3 Enerji Tüketiminin Hesaplanması

Elektrokoagülasyon deneylerinde enerji tüketimi kaydedilen voltaj değerleri yardımı ile Eşitlik 3.2 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$E \left(\frac{kWh}{m^3} \right) = \frac{VIt}{v} \quad (3.2)$$

Burada, V sistemde oluşan potansiyel farkı (volt), I uygulanan akım şiddetini (A), t reaksiyon süresini (saat), v reaktördeki çözelti hacmini (m^3) göstermektedir.

3.4 Cevap Yüzey Metodu Kullanarak (CYM) Deney Tasarımı

CYM metodu, çok değişkenli denklemleri çözmek için yeterli deneylerden elde edilen nicel verileri kullanan istatistiksel bir teknik olarak tanımlanmaktadır. Bu deneysel araştırmada, Design-Expert (Sürüm 13) kullanılarak merkezi kompozit tasarıma (MKT) dayalı CYM uygulanmıştır. Buna göre, seçilen üç değişkenin (akım yoğunluğu (X_1), başlangıç pH (X_2) ve zaman (X_3)) seçilen üç cevap KOİ giderimi (R_1), Çinko giderimi (R_2) ve güç tüketimi (R_3)) üzerindeki etkisi incelenmiştir. Her bir değişken için, gerçek değerleri temsil eden 5 kodlanmış seviye (-1,316; -1; 0; +1; +1,316) deneylerden belirlenmiştir (Tablo 3.2).

Tablo 3.2 EK prosesi için kullanılan değişken seviyeleri

Bağımsız Değişken	Örnek	Kodlanmış Seviyeler				
		$-\alpha$ (-1,316)	-1	0	+1	$+\alpha$ (+1,316)
Başlangıç pH	X ₁	1,684	2	3	4	4,316
Akım yoğunluğu (A)	X ₂	0,184	0,5	1,5	2,5	2,816
Zaman (dak)	X ₃	3,679	10	30	50	56,31

Eşitlik (3.3)'e göre 17 deney tasarlandı. Burada N toplam deney sayısı, K değişken sayısı (K= 3) ve C₀ merkez noktalarının sayısıdır (C₀= 3). CYM'de

$$N = 2^K + 2K + C_0 \quad (3.3)$$

Cevap kısmında güç tüketimi, KOİ ve çinko giderim verimi Eşitlik (3.4 ve 3.5) dayanan doğrusal ve ikinci derece (kuadratik) modele göre hesaplanmıştır.

$$y = \beta_0 \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (3.4)$$

burada y yanıt değişken sayısını, β_0 sabit terimi, β_i bağımsız değişkenlerin katsayılarını, x_i bağımsız değişkenleri ve ε deneylere bağlı kalan hatayı temsil etmektedir. Dolayısıyla, yanıtlar herhangi bir eğrilik göstermemelidir. Eğriliği değerlendirmek için ikinci dereceden bir model kullanılmalıdır.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{1 \leq i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3.5)$$

burada β_{ii} ikinci dereceden parametrelerin katsayılarını, β_{ij} etkileşim parametrelerinin katsayılarını temsil etmektedir.

Bu çalışmada, oluşturulan modellerin istatistiksel anlamlılığı dört yolla değerlendirilmiştir: 1. Varyans analizi (ANOVA), 2. Katsayıların hesaplanması (R^2 , Ayarlanmış R^2 ve Tahmin R^2), 3. Model uyum istatistikleri (varyasyon katsayısı ve yeterli hassasiyet) ve 4. Kalıntı grafikleri. Değişkenlerin çok amaçlı optimizasyonu Derringer'in arzu edilebilirlik fonksiyonu yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, seçilen değişkenlerin istenilen en iyi kombinasyonunu sağlayan koşulları belirlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Derringer ve Suich, 1980). Mevcut

deneysel çalışmada, bu fonksiyon, tanımlanan aralıktaki değişken seviyelerini dikkate alarak seçilen tüm cevapları en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Buna göre, Design Expert'in cevap optimize edicisi aracılığıyla birkaç optimum senaryo bulunmuş; ardından, en yüksek arzu edilebilirlik miktarına sahip en iyi senaryo optimum nokta olarak seçilmiş ve her parametre için deneysel olarak doğrulanmıştır.



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Bağımsız Değişkenlerin Güç Tüketimi, KOİ ve Çinko Giderimi Üzerindeki Etkisi ve Bunların Etkileşimi

Mevcut çalışmada kullanılan CYM tabanlı deney tasarımı, güç tüketimi (kWh/m^3), KOİ giderim verimi (%) ve çinko giderim verimi (%) gibi yanıtları içeren üç seviyeli merkezi kompozit tasarıma (MKT) dayanmaktadır. Deneylerde, üç bağımsız değişkenin güç tüketimi, KOİ ve çinko giderimi üzerindeki etkilerini analiz etmek amacıyla ikinci dereceden polinom ve doğrusal modeller kullanılmıştır. CYM tasarımından türetilen 17 deney (3 merkezi, 6 eksenel ve 8 faktöriyel nokta) gerçekleştirilmiştir. Çalışmada 17 bağımsız değişkenlerin değerleri, deneysel ve tahmin edilen yanıtlar ve bunlar arasındaki kalıntı değerleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

En yüksek KOİ giderim verimi, %63,38 ile deney 7’de elde edilmiştir ve bu deneyin tahmini değeri %58,84 olarak bulunmuştur. En düşük deneysel ve tahmin edilen KOİ giderim verimleri ise sırasıyla %0,55 ve %0,75 olarak tespit edilmiştir. Çinko giderim veriminde en yüksek sonuç, %99,99 ile deney 1, 7 ve 10’da elde edilmiştir. Bu deneylerin tahmini değerleri ise sırasıyla %85,95; %98,92 ve %105,99 olarak belirlenmiştir. En düşük deneysel ve tahmin edilen çinko giderim verimleri ise sırasıyla %2,05 ve %13,61 olarak kaydedilmiştir. Kirleticisi olarak KOİ ve çinko giderim verimlerine bakıldığında, çinko giderim veriminin daha yüksek olduğu görülmektedir. KOİ ve çinko giderim verimlerinde ilişkin kalıntılar sırasıyla 6,02 ve 14,56 olduğunda, en büyük fark 5. ve 12. deneylerde gözlenmiştir. Kalıntılar 0,92 ve 0,28 olduğu için en yakın deneysel ve tahmini değerler 12. ve 3. deneylerde elde edilmiştir.

Güç tüketimi incelendiğinde en yüksek tüketim $15,88 \text{ kWh/m}^3$ ile 1.deney’de, en az güç tüketimi ise $0,18 \text{ kWh/m}^3$ ile 17. deney de elde edilmiştir. En yüksek KOİ ve Çinko giderim verimleri incelendiğinde güç tüketimi ise deney 7’de $7,10 \text{ kWh/m}^3$ olarak tespit edilmiştir.

Tablo 4.1 EK prosesi kullanılarak güç tüketimi, KOİ ve çinko giderim modellerinin MKT tasarımında deneysel, tahmini ve kalıntı değerleri

No	Kodlanmış Değişkenler			KOİ giderimi (%)			Çinko giderimi (%)			Güç Tüketimi (kWh/m ³)		
	X ₁	X ₂	X ₃	DeneySEL	Tahmin	Kalıntı	DeneySEL	Tahmin	Kalıntı	DeneySEL	Tahmin	Kalıntı
1	1	1	1	60,91	62,16	-1,25	99,99	85,95	14,04	15,88	15,50	0,38
2	-1	1	-1	21,95	18,46	3,49	99,63	89,02	10,61	2,68	2,62	0,06
3	0	-α	0	37,60	36,37	1,23	71,08	70,80	0,28	0,20	0,23	-0,03
4	-1	-1	1	24,88	22,98	1,90	99,11	93,15	5,96	1,08	0,63	0,45
5	+α	0	0	52,37	46,35	6,02	99,97	111,97	-12,00	3,95	3,88	0,07
6	-α	0	0	8,58	11,24	-2,66	99,31	93,03	6,28	2,54	2,93	-0,39
7	0	0	+α	63,38	58,84	4,54	99,99	98,92	1,07	7,10	7,97	-0,87
8	0	0	-α	35,36	36,54	-1,18	51,03	57,83	-6,80	0,48	-0,08	0,56
9	0	0	0	49,67	51,71	-2,04	99,81	97,48	2,33	3,77	3,70	0,07
10	0	+α	0	61,92	59,79	2,13	99,99	105,99	-6,00	10,80	11,09	-0,29
11	0	0	0	52,85	51,71	1,14	99,92	97,48	2,44	3,75	3,70	0,05
12	1	-1	-1	33,56	32,63	0,93	82,84	68,28	14,56	0,29	0,47	-0,18
13	1	1	-1	47,15	50,51	-3,36	99,59	103,07	-3,48	3,18	3,49	-0,31
14	1	-1	1	39,33	44,28	-4,95	99,75	107,88	-8,13	1,29	1,21	0,08
15	0	0	0	48,36	51,71	-3,35	99,98	97,48	2,50	3,98	3,70	0,28
16	-1	1	1	38,31	40,69	-2,38	99,77	111,85	-12,08	14,42	14,11	0,31
17	-1	-1	-1	0,55	0,75	-0,20	2,05	13,61	-11,56	0,18	0,42	-0,24

4.2 Uygulanan MKT Modelinin EK Prosesinde Değerlendirilmesi

Regresyon denklemleri kullanılarak çalışma uzayında tahmin edilen değerler elde edilebilir. Böylece deneysel parametreler istenilen yanıt düzeyine göre ayarlanabilmektedir. Metal kaplama atıksuyunun elektrokoagülasyon (EK) prosesi ile arıtımında güç tüketimi, KOİ ve Çinko giderim veriminin Merkezi Kompozit Tasarım (MKT) modeline göre kodlanmış faktörler açısından ikinci dereceden polinom (kuadratik) 4.1 ve 4.2 denklemi şu şekildedir:

$$\text{Güç Tüketimi (kWh/m}^3\text{)} = + 3,70 + 0,3607X_1 + 4,12X_2 + 3,06X_3 - 0,1697X_1^2 + 1,13X_2^2 + 0,1449X_3^2 + 0,2050X_1X_2 + 0,1325X_1X_3 + 2,82X_2X_3 \quad (4.1)$$

Güç Tüketimi modelinin yanıtını gösteren bu çalışmada X_1 , X_2 ve X_3 bağımsız değişkenlerin etkisini, X_1^2 , X_2^2 ve X_3^2 bağımsız değişkenlerin üstel etkisini, X_1X_2 , X_1X_3 ve X_2X_3 değişkenlerinin ise etkileşim (interaksiyon) etkilerini incelemektedir. Her bir faktörün katsayısı, ilgili faktörün yanıt üzerindeki göreceli etkisini göstermektedir. Bu kapsamda, 4,12 katsayısına sahip olan X_2 , yanıt üzerinde en etkili faktör olarak belirlenmiştir. X_2 'yi, 3,06 katsayısına sahip olan X_3 faktörü takip etmektedir. Bu bulgular, X_2 ve X_3 bağımsız değişkenlerinin güç tüketimi üzerinde önemli ölçüde etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

$$\text{KOİ giderim verimi (\%)} = + 51,71 + 13,34X_1 + 8,9X_2 + 8,47X_3 - 13,237X_1^2 - 2,1X_2^2 - 2,32X_3^2 + 0,0425X_1X_2 - 2,65X_1X_3 + 0,0025X_2X_3 \quad (4.2)$$

KOİ giderim verimine göre 13,34 katsayısına sahip olan X_1 , yanıt üzerinde en etkili faktör olarak belirlenmiştir. X_1 'i, 8,9 katsayısına sahip olan X_2 faktörü ve 8,47 katsayısına sahip olan X_3 faktörü takip etmektedir. Bu bulgular, X_1 , X_2 ve X_3 bağımsız değişkenlerinin KOİ giderim verimi üzerinde önemli ölçüde etkilere sahiptir. Ancak, X_1 'in doğrusal etkisi olumlu iken, belirli bir noktadan sonra karesel etkisi nedeniyle olumsuz hale gelebilir.

$$\text{Çinko giderim verimi (\%)} = + 97,48 + 7,19X_1 + 13,37X_2 + 15,61X_3 - 10,167X_1^2 - 9,99X_2^2 - 14,18X_3^2 + 2,90X_1X_2 - 5,25X_1X_3 + 11,03X_2X_3 \quad (4.3)$$

Çinko giderim verimine göre 15,61 katsayısına sahip olan X_3 , yanıt üzerinde en etkili faktör olarak belirlenmiştir. X_3 'i, 13,37 katsayısına sahip olan X_2 faktörü ve 7,19 katsayısına sahip olan X_1 faktörü takip etmektedir. Bu bulgular, X_1 , X_2 ve X_3 bağımsız değişkenlerinin Çinko giderim verimi üzerinde önemli ölçüde etkilere sahiptir. Ayrıca, etkileşim terimlerinin de önemli olduğu belirlenmiştir. Özellikle, X_2 ve X_3 arasındaki etkileşim katsayı 11,03, bu iki faktörün birlikte artmasının çinko giderim verimini olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. X_1 ve X_2 arasındaki etkileşim katsayı 2,90 de olumlu bir etki gösterirken, X_1 ve X_3 arasındaki etkileşim katsayı 5,25 negatif bir etkiye sahiptir. Bu, başlangıç pH ve zamanın birlikte artmasının çinko giderim verimini olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir.

4.3 EK Prosesinde MKT Modelinin ANOVA Sonuçları

Bu çalışmada, EK prosesinde Güç tüketimi, KOİ giderim verimi ve çinko giderim verimi üzerindeki faktörlerin etkilerini belirlemek için MKT kullanılarak ANOVA analizi gerçekleştirilmiştir. ANOVA sonuçları Tablo 4.2'de verilmiştir. Modelin geçerliliği F-değerine, Prob > F'ye, uyum eksikliğine ve korelasyon katsayısına (R^2) bağlıdır (Akkaya, 2022). Güç tüketimi, KOİ giderim verimi ve çinko giderim verimi için model F değeri sırasıyla 41,76; 26,39 ve 6,27'dir. Tablo 4.2 incelendiğinde, KOİ giderim verimi ve güç tüketimi için modelin p-değeri <0,0001'dir. Bu sonuç, her iki modelin de yüksek düzeyde anlamlı olduğunu göstermektedir. Diğer yandan, çinko giderim verimi için modelin p-değeri 0,0123 olarak bulunmuştur. Bu, modelin %95 güven düzeyinde anlamlı olduğunu göstermektedir. Bu, modellerin anlamlı olduğu ve yanıt ile bağımsız değişkenler arasında ideal bir korelasyonu temsil ettiği anlamına gelmektedir (Jaafari vd., 2020). Uyum eksikliğinde p-değeri incelendiğinde KOİ giderim verimi modeli için uyum eksikliği p-değeri 0,1706 olarak bulunmuştur. Bu p-değeri, uyum eksikliğinin anlamlı olmadığını ve modelin KOİ giderim verimini yeterince iyi açıkladığını göstermektedir (Aiyd Jasim ve AlJaberi, 2023). Ancak, çinko giderim verimi ve güç tüketimi modelleri için uyum eksikliği p-değerleri sırasıyla <0,0001 ve 0,0395 olarak bulunmuştur. Bu p-değerleri, her iki modelin de veriyi tam olarak açıklayamadığını ve bu modellerin iyileştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Çinko giderim verimi ve güç tüketimi modellerinin iyileştirilmesi için ek deneyler yapılması ve modelin daha doğru bir şekilde yeniden oluşturulması gerekmektedir.

Tablo 4.2 EK prosesinde güç tüketimi, KOİ ve çinko giderim veriminin optimizasyonu için MKT ANOVA sonuçları

Kaynak	KOİ giderim verimi (%)					Çinko giderim verimi (%)					Güç tüketimi (kWh/m ³)				
	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Karelerin Ortalaması	F-değeri	P-değeri	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Karelerin Ortalaması	F-değeri	P-değeri	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Karelerin Ortalaması	F-değeri	P-değeri
Model	5018,47	9	557,61	26,39	0,0001	9661,36	9	1073,48	6,27	0,0122	375,88	9	41,76	144,07	< 0,0001
X₁	2039,03	1	2039,03	96,51	< 0,0001	593,39	1	593,39	3,46	0,1051	1,49	1	1,49	5,15	0,0576
X₂	907,65	1	907,65	42,96	0,0003	2049,36	1	2049,36	11,96	0,0106	194,91	1	194,91	672,36	< 0,0001
X₃	822,37	1	822,37	38,92	0,0004	2793,18	1	2793,18	16,30	0,0049	107,18	1	107,18	369,71	< 0,0001
X₁ X₂	0,0144	1	0,0144	0,0007	0,9799	825,20	1	825,20	4,82	0,0642	0,3362	1	0,3362	1,16	0,3172
X₁ X₃	55,97	1	55,97	2,65	0,1476	797,80	1	797,80	4,66	0,0678	0,1404	1	0,1404	0,4845	0,5088
X₂ X₃	0,0000	1	0,0000	2,366E-06	0,9988	1608,30	1	1608,30	9,39	0,0182	63,51	1	63,51	219,07	< 0,0001
X₁²	1093,95	1	1093,95	51,78	0,0002	52,46	1	52,46	0,3062	0,5973	0,1799	1	0,1799	0,6207	0,4566
X₂²	27,52	1	27,52	1,30	0,2913	171,91	1	171,91	1,00	0,3499	8,01	1	8,01	27,62	0,0012
X₃²	33,74	1	33,74	1,60	0,2468	760,52	1	760,52	4,44	0,0731	0,1312	1	0,1312	0,4527	0,5226
Kalıntı	147,90	7	21,13			1199,32	7	171,33			2,03	7	0,2899		
Uyum eksikliği	137,24	5	27,45	5,15	0,1706	1199,30	5	239,86	32268,17	< 0,0001	2,00	5	0,3994	24,60	0,0395
Saf hata	10,66	2	5,33			0,0149	2	0,0074			0,0325	2	0,0162		

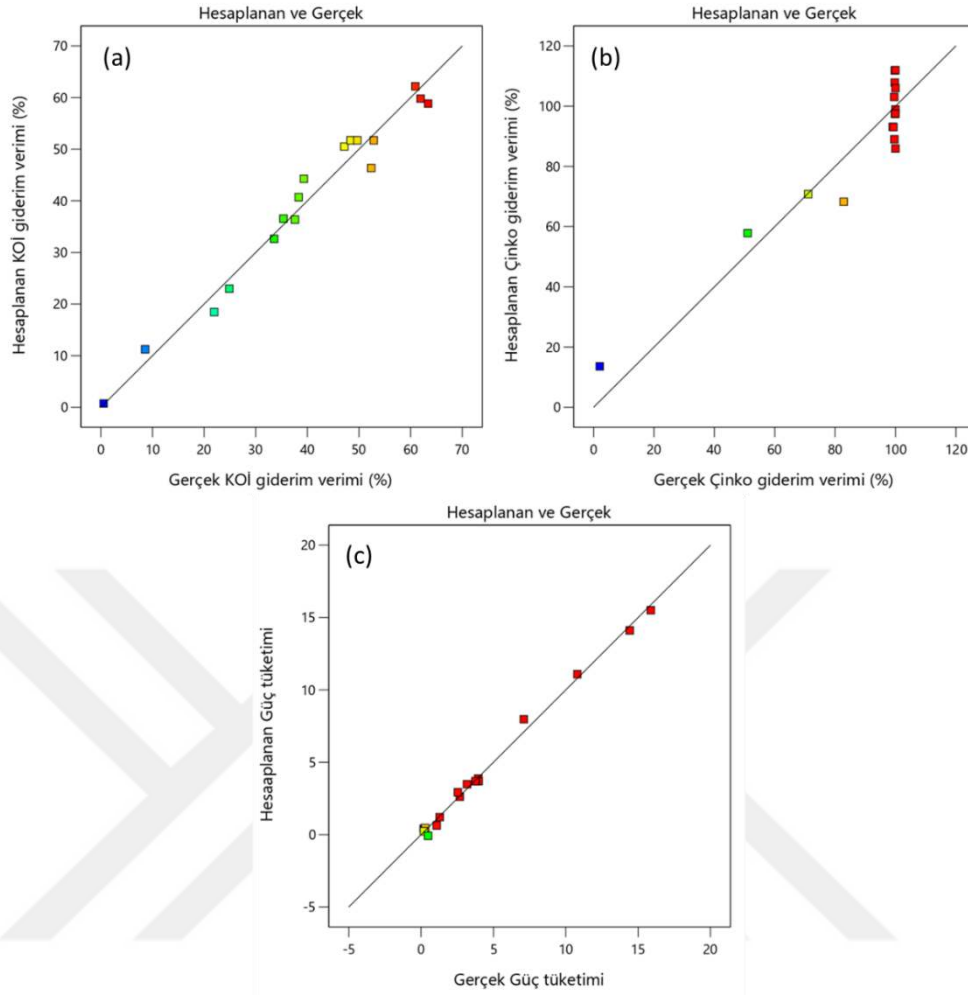
4.4 EK Prosesinde MKT Modelinin Regrasyon ve Korelasyon Katsayıları

MKT modellerinin güvenilirliğini ve performansını değerlendirmede önemli bir kriterdir. Bu değerlendirme, modelin doğruluğunu ve tahmin kabiliyetini anlamak için yapılmaktadır. Modelin kesinliği, sinyal-gürültü oranı (yeterli kesinlik), R^2 , düzeltilmiş R^2 ve hesaplanan R^2 gibi regresyon ve korelasyon katsayıları kullanılarak ölçülmektedir (Myers vd., 2016). MKT modeline göre verilen yanıtların regresyon ve korelasyon katsayıları Tablo 4.3'te verilmiştir. R^2 değerleri incelendiğinde Güç tüketimi, KOİ ve Çinko giderim verimi sırasıyla 0,9900; 0,9714 ve 0,8896 olarak bulunmuştur. Bir matematiksel modelin R^2 değeri 0,75'ten büyükse genellikle optimizasyon için geçerli kabul edilmektedir. Yapılan bir çalışma da, sürekli elektrokoagülasyon arıtma prosesi ile Borneo tropik acı turba suyundaki tuzluluk azaltma verimliliği ($R^2 = 0,84$) ve enerji işletme maliyeti ($R^2 = 0,97$) açısından polinom matematiksel ikinci dereceden denklemlere iyi uyum sağladığını bulmuşlardır (Abdul Rahman vd., 2023). Düzeltilmiş ve hesaplanan R^2 değerleri, matematiksel modellerin karşılaştırmalı açıklayıcı gücü nedeniyle gerçek R^2 değerlerinden daha düşüktür. Bu değerler, deneysel değerlerle ilişkilendirilmesi için çeşitli değişken azaltmalarını gerektirir (Piepho, 2019). Bir model yalnızca R^2 ile değerlendirilemez; yüksek R^2 değerine sahip bir model yine de zayıf tahminler verebilir. Bu nedenle, bir regresyon modelinin tahmin edilebilirliği, karelerin tahmin hatası toplamından (PRESS) türetilen R^2 tahmini ile değerlendirilebilir. KOİ giderim verimi için PRESS değeri 1277,89 olup, modelin tahmin performansının uygun olduğunu göstermektedir. Çinko giderim verimi için PRESS değeri 15104,35 olup modelin tahmin doğruluğunun düşük olduğunu ve iyileştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Güç tüketimi için ise PRESS değeri 16,07 olup modelin tahmin performansının oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Yeterli kesinlik, modelin yanıtını tahmin etmek için kullanılan sinyalin gürültüye oranını ölçer ve genellikle modelin güvenilirliğini değerlendirirken kullanılmaktadır. Yeterli kesinlik değerlerinin 4'ten büyük olması, modelin yeterince güvenilir olduğunu göstermektedir (Roudi vd., 2021). KOİ giderim verimi için yeterli kesinlik 17,4187 olup modelin oldukça güvenilir olduğunu, çinko giderim verimi için yeterli kesinlik 9,7982 olup modelin yeterli güvenilirlikte olduğunu ve güç tüketimi için yeterli kesinlik 37,7217 olup modelin tahmin performansının çok yüksek olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.3 EK prosesinin MKT modelinin regresyon ve korelasyon katsayıları

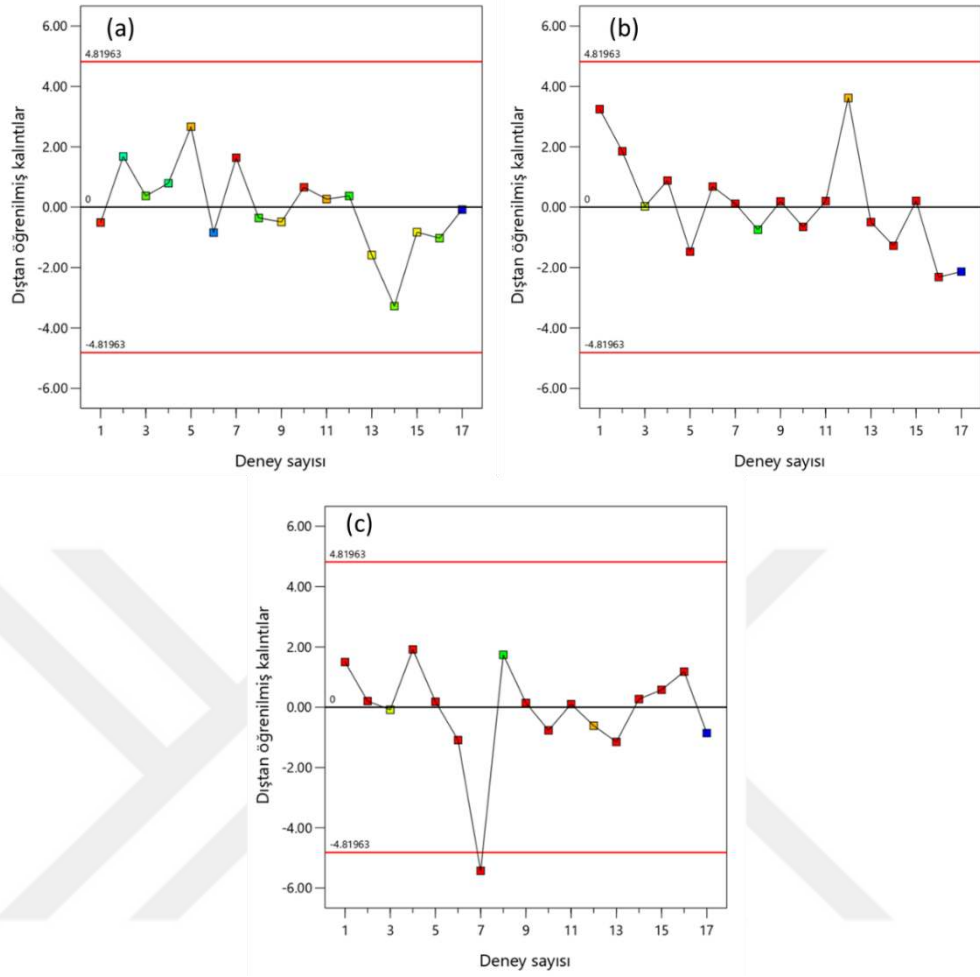
Regrasyon ve korelasyon katsayıları	KOI giderim verimi (%)	Çinko giderim verimi (%)	Güç tüketimi
Standart sapma	4,6	13,09	0,5384
Ortalama	39,81	88,46	4,45
Varyasyon katsayısı (%)	11,55	14,80	12,11
PRESS	1277,89	15104,35	16,07
R²	0,9714	0,8896	0,9946
Düzeltilmiş R²	0,9346	0,7476	0,9877
Hesaplanan R²	0,7527	-0,3907	0,9575
Yeterli kesinlik	17,4187	9,7982	37,7217

Şekil 4.1 incelendiğinde, KOİ giderim verimi ve güç tüketimi için modeller, yüksek doğrulukla tahminler yaparak gerçek değerlerle iyi bir uyum göstermiştir. Ancak, çinko giderim verimi yüksek olmasına rağmen model bazı sapmalar göstermiş ve tahmin doğruluğunun iyileştirilmesi için ek deneyler yapılması daha uygundur.



Şekil 4.1 a: KOİ giderimi verimi (%), b: çinko giderim verimi (%) ve c: güç tüketimi için gerçek ve tahmin edilen değerler arasındaki korelasyon

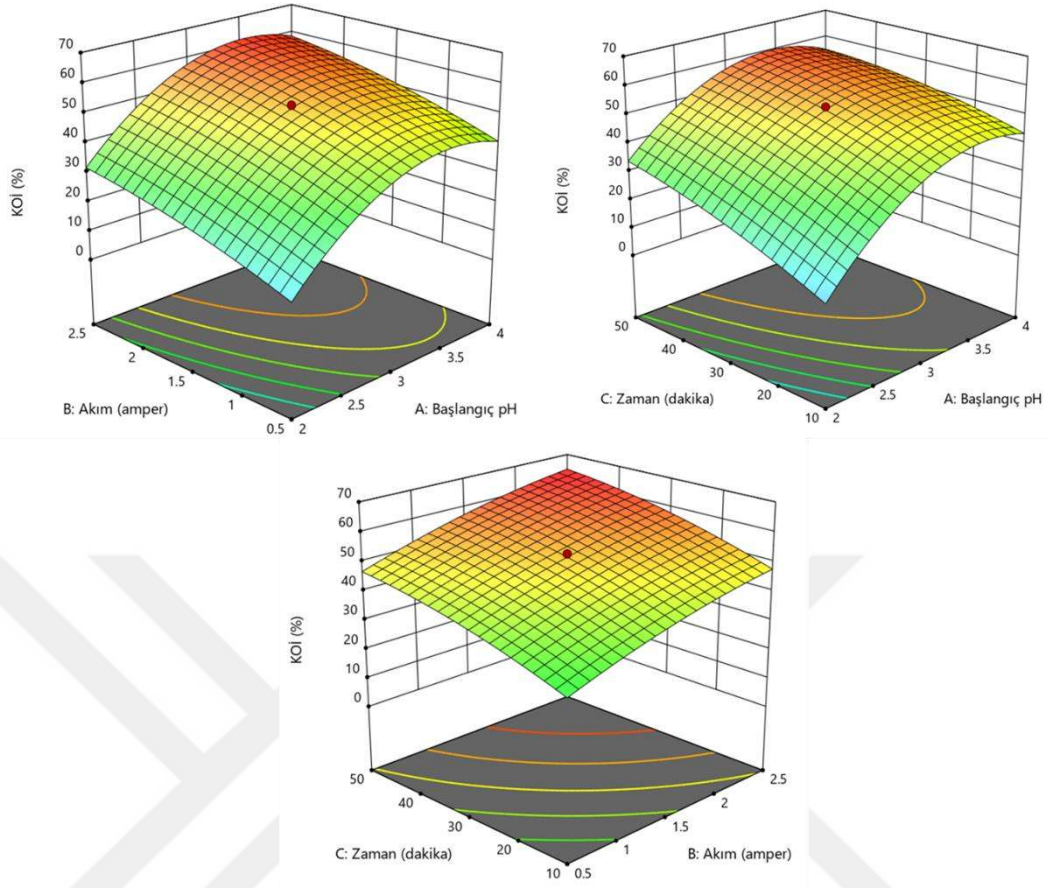
Şekil 4.2’de, kalıntı analizleri incelendiğinde, KOİ giderim verimi, çinko giderim verimi ve güç tüketimi modellerinin tahmin performanslarının yüksek olduğu görülmektedir. Her üç modelde de dıştan öğretilmiş kalıntılar, belirlenen sınırlar içinde kalmakta olup, bu durum modellerin veriyi iyi açıkladığını ve tahmin hatalarının minimum düzeyde olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.2 a: KOİ giderimi verimi (%), b: çinko giderim verimi (%) ve c: güç tüketimi için dıştan öğrenilmiş kalıntılar

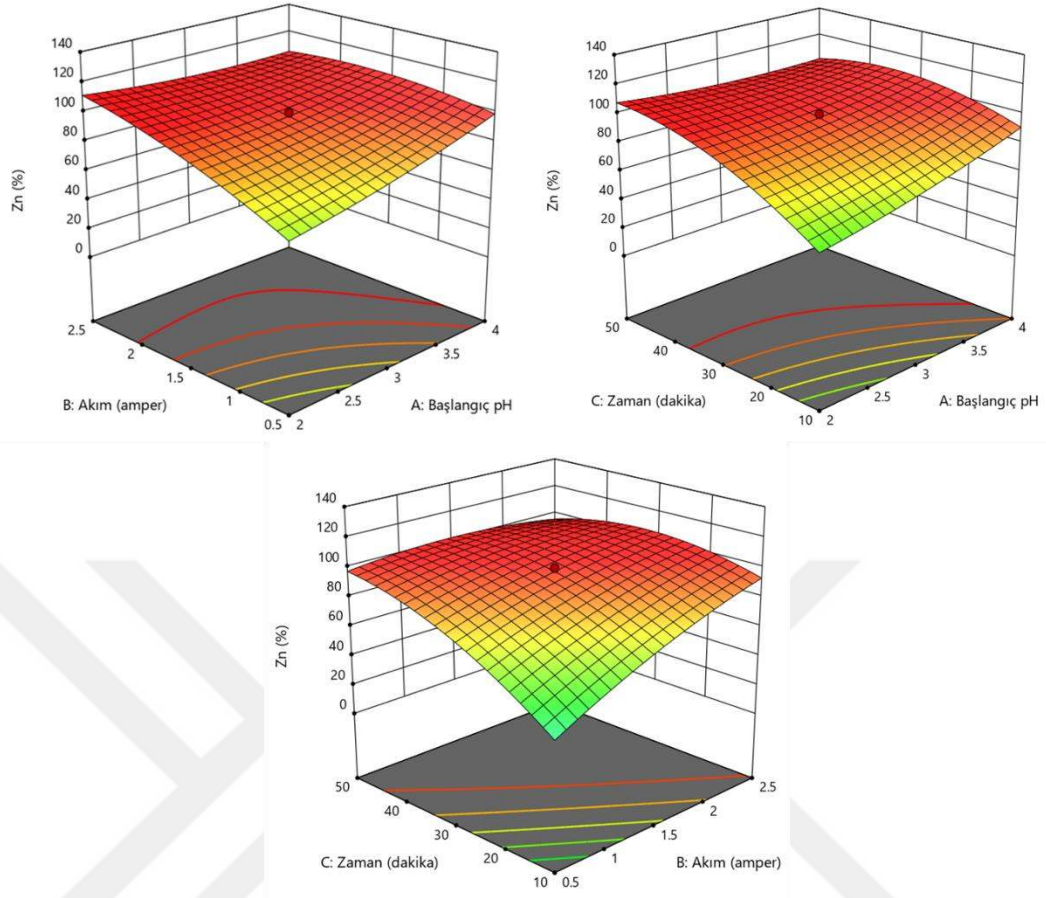
4.5 Bağımsız Değişkenlerin Etkilerinin Değerlendirilmesi

Şekil 4.3'deki 3B yüzey grafikleri, KOİ giderim verimi üzerinde etkili olan faktörlerin (akım, başlangıç pH ve zaman) etkilerini ve etkileşimlerini göstermektedir. Her bir grafik, iki faktörün etkileşimini ve KOİ giderim verimi üzerindeki etkisini görsel olarak temsil etmektedir. Her iki faktörün artışıyla KOİ giderim veriminin arttığını ortaya koymaktadır. Optimal KOİ giderim verimi, yüksek akım, yüksek pH ve uzun zaman koşullarında elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, bu faktörlerin KOİ giderim verimi üzerindeki olumlu etkilerini ve bu etkileşimlerin önemini vurgulamaktadır. Yüksek akım (2,5 A) ve yüksek pH (3,5) seviyelerinde KOİ giderim verimi %60'ın üzerine çıkmakta; aynı şekilde, uzun zaman ve yüksek başlangıç pH'sı ile uzun zaman ve yüksek akım seviyelerinde de benzer artışlar gözlemlenmektedir.



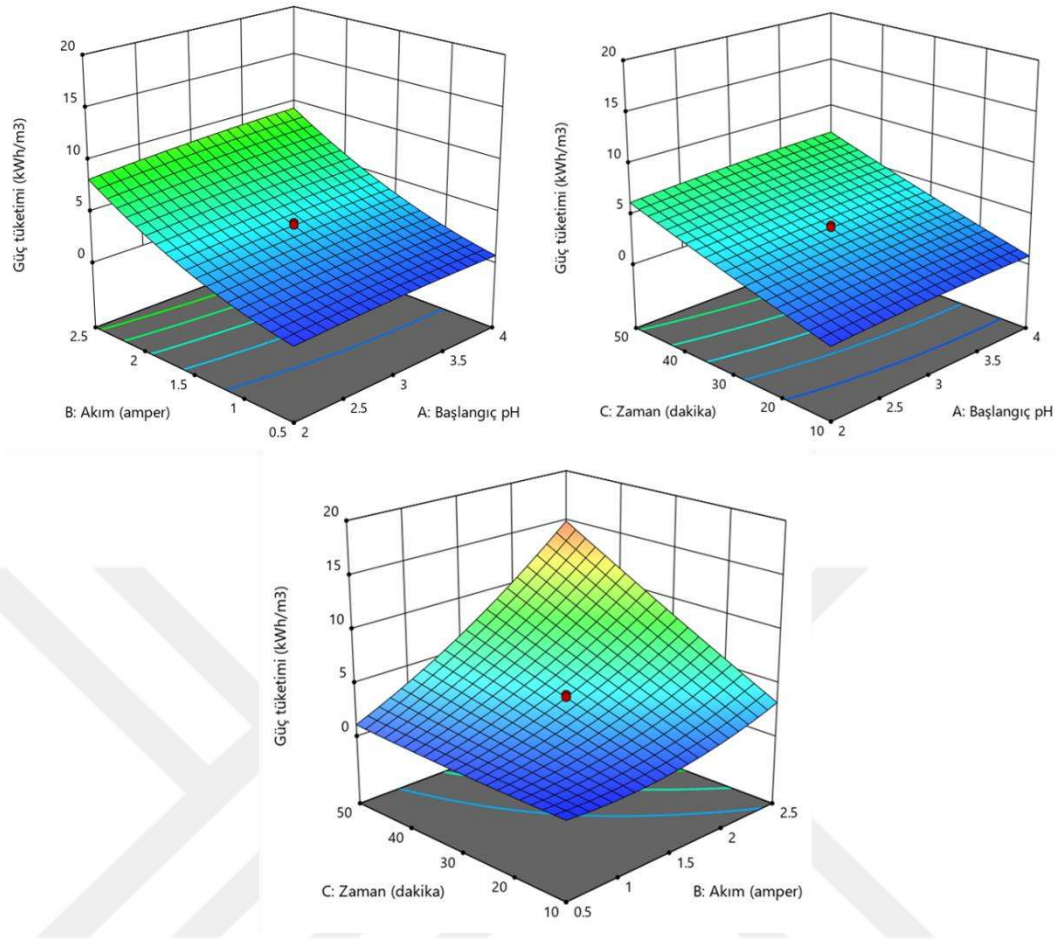
Şekil 4.3 Akım, başlangıç pH'sı ve zamanın KOİ giderim verimi üzerindeki etkilerinin 3B yüzey grafiklerle incelenmesi

Şekil 4.4, çinko giderim verimi üzerinde etkili olan faktörlerin (akım, başlangıç pH ve zaman) ve bu faktörlerin etkileşimlerinin çinko giderim verimini nasıl etkilediğini açıkça ortaya koymaktadır. Her üç grafikte ilgili faktörlerin artmasıyla çinko giderim veriminin arttığını göstermektedir. Yüksek akım (2,5 A) ve yüksek başlangıç pH (3,5) seviyelerinde çinkonun neredeyse tamamen giderildiği; aynı şekilde, uzun zaman (40 dakika) ve yüksek başlangıç pH (3,5) ile uzun zaman (40 dakika) ve yüksek akım (2,5 A) seviyelerinde de benzer artışlar gözlemlenmektedir. Bu bulgular, akım, başlangıç pH ve zaman parametrelerinin optimize edilmesinin çinko giderim verimini artırmak için kritik öneme sahip olduğunu vurgulamaktadır. Bu nedenle, bu parametrelerin optimum seviyelerde ayarlanması, çinko giderim süreçlerinin verimliliğini önemli ölçüde iyileştirebileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.4 Akım, başlangıç pH'sı ve zamanın çinko giderim verimi üzerindeki etkilerinin 3B yüzey grafiklerle incelenmesi

Şekil 4.5 güç tüketimi üzerinde etkili olan faktörlerin (akım, başlangıç pH ve zaman) ve bu faktörlerin etkileşimlerinin güç tüketimini nasıl etkilediğini açıkça ortaya koymaktadır. Şekil 4.5 incelendiğinde akım ve zamanın artmasıyla güç tüketiminde belirgin bir artış olduğu görülmektedir. Başlangıç pH değerinin ise güç tüketimi üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı söylenebilir. Yüksek akım (2,5 A) ve uzun zaman (50 dakika) seviyelerinde güç tüketimi 15 kWh/m³'a kadar çıkmaktadır. Bu bulgular, akım ve zaman parametrelerinin optimize edilmesinin enerji verimliliği ve güç tüketimini minimize etmek için kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.5 Akım, başlangıç pH'sı ve zamanın güç tüketimi üzerindeki etkilerinin 3B yüzey grafiklerle incelenmesi

4.6 Ekonomik Analiz

50 m³/gün atıksu kapasiteli tesis için maliyet analizi yapılmıştır. İşletme maliyetinin değerlendirilmesinde kullanılan ekonomik veriler Tablo 4.4'te verilmiştir. İşletme maliyeti aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır (Sridhar vd., 2011).

$$Maliyet \left(\frac{TL}{m^3} \right) = aC_{enerji} + bC_{elektrot} + cC_{kimyasal} \quad (4.4)$$

Burada C_{enerji} enerji tüketimi (kWh/m³), $C_{elektrot}$ elektrot tüketimi (kg/m³) ve $C_{kimyasal}$ arıtılan atık suyun kimyasal tüketimidir (kg/m³). Türkiye pazarı için verilen a, b ve c birim fiyatları aşağıdaki gibidir: (a) elektrik enerjisi fiyatı 2,83 TL/kWh, (b) elektrot malzemesi ince demir plaka (Fe) fiyatı 25 TL/kg ve (c) için herhangi bir kullanım olmadığı için hesaba dahil edilmemiştir.

Tablo 4.4 Elektrokoagülasyon prosesinin maliyet analizi

Std	Sıra	Başlangıç pH (-)	Akım (amper)	Zaman (dakika)	KOİ giderim verimi (%)	Çinko giderim verimi (%)	Tüketilen Demir (g)	Güç tüketimi (kWh/m ³)	Maliyet (TL/m ³)
8	1	4	2,5	50	60,91	99,99	2,54	15,88	171,93
7	11	2	2,5	50	38,31	99,77	2,00	14,42	140,80
14	7	3	1,5	56,32	63,38	99,99	1,22	7,10	81,08
11	9	3	0,18	30	37,60	71,08	1,55	0,20	78,07
10	3	4,32	1,5	30	52,37	99,97	1,16	3,95	69,16
16	13	3	1,5	30	49,67	99,80	0,80	3,77	50,65
15	5	3	1,5	30	48,36	99,98	0,64	3,98	43,25
12	14	3	2,82	30	61,92	99,99	0,23	10,80	42,07
9	12	1,68	1,5	30	8,58	99,31	0,65	2,54	39,67
5	17	2	0,5	50	24,88	99,11	0,72	1,08	39,04
4	6	4	2,5	10	47,15	99,59	0,42	3,18	29,99
17	15	3	1,5	30	52,85	99,92	0,29	3,75	25,11
3	4	2	2,5	10	21,95	99,63	0,32	2,68	23,57
6	8	4	0,5	50	39,33	99,75	0,25	1,29	16,16
13	2	3	1,5	3,68	35,36	51,03	0,29	0,48	15,85
1	10	2	0,5	10	0,55	2,05	0,25	0,18	13,01
2	16	4	0,5	10	33,56	82,84	0,11	0,29	6,31

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Kastamonu'daki metal kaplama sanayi atık sularının, Fe anot ve katot elektrotlarının kullanıldığı elektrokoagülasyon prosesi ile arıtımı araştırılmıştır. Reaksiyon süresi (3,6786-56,3214 dak), akım yoğunluğu (0,18393-2,81607 A) ve pH (1,68393-4,31607) parametrelerin Güç tüketimi, KOİ ve Çinko giderim verimi üzerindeki etkileri CYM kullanılarak optimize edilmiştir. ANOVA sonuçları, bu modellerin ampirik ve tahmin edilen veriler arasında iyi bir korelasyon ile yanıtları tahmin edebildiğini göstermiştir. Güç tüketimi, KOİ giderimi ve çinko giderimi için R^2 değerleri sırasıyla 0,9900; 0,9714 ve 0,8896'dır. EK prosesinde KOİ giderim verimliliğini etkileyen başlıca işletim faktörleri pH, akım yoğunluğu ve zaman iken Çinko giderimi ve güç tüketimi için ise akım ve zaman olduğu ortaya çıkmıştır. Bu sonuçlar yüzey grafikleri ile gösterilmiştir. Optimum koşullar deney 7 için, başlangıç pH değeri 3, akım yoğunluğu 1,5 A, deney süresi 56,3214 dakika ve güç tüketimi ise 7,1 kWh/m³ bulunmuştur. Optimum koşullar altında maksimum KOİ ve Çinko verimi oranları sırasıyla %63,38 ve %99,99 bulunmuştur.

5.1 Öneriler

Ölçek Büyütme: Laboratuvar ölçekli deneylerin yanı sıra, endüstriyel ölçekli uygulamaların da değerlendirilmesi ve prosesin büyük ölçeklerde de etkinliğinin test edilmesi gerekmektedir.

Çevresel Etkiler: Proses sırasında oluşan atık çamurun bertarafı ve çevresel etkilerinin minimize edilmesi için ileri arıtım yöntemlerinin araştırılması gerekmektedir.

Teknolojik İyileştirmeler: Elektrot malzemelerinin dayanıklılığının artırılması ve proses verimliliğini artıracak teknolojik iyileştirmelerin yapılması önerilmektedir.

Bu öneriler doğrultusunda, elektrokoagülasyon yönteminin metal kaplama sanayi atık sularının arıtımında daha geniş bir uygulama alanı bulacağı öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- Abdul Rahman, N., Jose Jol, C., Albania Linus, A., Wan Borhan, W. W. S., Abdul Jalal, N. S., Baharuddin, N., ... & Abdul Mutalip, N. (2023). Statistical analysis of salinity reduction in Borneo tropical brackish peat water with continuous electrocoagulation treatment system. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 10, 100265. doi:10.1016/j.hazadv.2023.100265
- Aiyd Jasim, M., & AlJaberi, F. Y. (2023). Investigation of oil content removal performance in real oily wastewater treatment by electrocoagulation technology: RSM design approach. *Results in Engineering*, 18, 101082. doi:10.1016/j.rineng.2023.101082
- Akkaya, G. K. (2022). Treatment of petroleum wastewater by electrocoagulation using scrap perforated (Fe-anode) and plate (Al and Fe-cathode) metals: Optimization of operating parameters by RSM. *Chemical Engineering Research and Design*, 187, 261–275. doi:10.1016/j.cherd.2022.08.048
- Bakry, S. A., Matta, M. E., Noureldin, A. M., & Zaher, K. (2024). Performance evaluation of electrocoagulation process for removal of heavy metals from wastewater using aluminum electrodes under variable operating conditions. *Desalination and Water Treatment*, 318, 100396. doi:10.1016/j.dwt.2024.100396
- Bashir, A., Malik, L. A., Ahad, S., Manzoor, T., Bhat, M. A., Dar, G. N., & Pandith, A. H. (2019, 5 Aralık). Removal of heavy metal ions from aqueous system by ion-exchange and biosorption methods. *Environmental Chemistry Letters*, doi:10.1007/s10311-018-00828-y
- Baudrand, D. (1998). Electroless Processes. Erişim adresi: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://www.nmfrc.org/pdf/9811050.pdf.
- Benvenuti, T., Krapf, R. S., Rodrigues, M. A. S., Bernardes, A. M., & Zoppas-Ferreira, J. (2014). Recovery of nickel and water from nickel electroplating wastewater by electrodialysis. *Separation and Purification Technology*, 129, 106–112. doi:10.1016/j.seppur.2014.04.002
- Bezerra, M. A., Santelli, R. E., Oliveira, E. P., Villar, L. S., & Escaleira, L. A. (2008). Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta*, 76(5), 965–977. doi:10.1016/j.talanta.2008.05.019
- Boinpally, S., Kolla, A., Kainthola, J., Kodali, R., & Vemuri, J. (2023). A state-of-the-art review of the electrocoagulation technology for wastewater treatment. *Water Cycle*, 4, 26–36. doi:10.1016/j.watcyc.2023.01.001
- Box, G. E. P., & Draper, N. R. (1988). Empirical Model-Building and Response Surfaces. *Journal of the American Statistical Association*, 83(402), 569.

doi:10.2307/2288890

- Carrijo-Gonçalves, G. A., da Silva, B. P., Aoki, I. V., Veloso, T. C., & Capelossi, V. R. (2024). Co-deposition of natural particles in the acidic zinc electroplating process. *Surface and Coatings Technology*, 482, 130703. doi:10.1016/j.surfcoat.2024.130703
- Chen, Q., Yao, Y., Li, X., Lu, J., Zhou, J., & Huang, Z. (2018). Comparison of heavy metal removals from aqueous solutions by chemical precipitation and characteristics of precipitates. *Journal of Water Process Engineering*, 26, 289–300. doi:10.1016/j.jwpe.2018.11.003
- Das, P. P., Sharma, M., & Purkait, M. K. (2022). Recent progress on electrocoagulation process for wastewater treatment: A review. *Separation and Purification Technology*, 292, 121058. doi:10.1016/j.seppur.2022.121058
- Derringer, G., & Suich, R. (1980). Simultaneous Optimization of Several Response Variables. *Journal of Quality Technology*, 12(4), 214–219. doi:10.1080/00224065.1980.11980968
- Do, J. S., & Chen, M. L. (1994). Decolourization of dye-containing solutions by electrocoagulation. *Journal of Applied Electrochemistry*, 24(8), 785–790. doi:10.1007/bf00578095/metrics
- Fernández-González, R., Martín-Lara, M. A., Moreno, J. A., Blázquez, G., & Calero, M. (2019). Effective removal of zinc from industrial plating wastewater using hydrolyzed olive cake: Scale-up and preparation of zinc-Based biochar. *Journal of Cleaner Production*, 227, 634–644. doi:10.1016/j.jclepro.2019.04.195
- Guo, Z., Zhang, Y., Jia, H., Guo, J., Meng, X., & Wang, J. (2022). Electrochemical methods for landfill leachate treatment: A review on electrocoagulation and electrooxidation. *Science of The Total Environment*, 806, 150529. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.150529
- Hakizimana, J. N., Gourich, B., Chafi, M., Stiriba, Y., Vial, C., Drogui, P., & Naja, J. (2017). Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. *Desalination*, 404, 1–21. doi:10.1016/j.desal.2016.10.011
- Hosseini, S. S., Bringas, E., Tan, N. R., Ortiz, I., Ghahramani, M., & Alaei Shahmirzadi, M. A. (2016). Recent progress in development of high performance polymeric membranes and materials for metal plating wastewater treatment: A review. *Journal of Water Process Engineering*, doi:10.1016/j.jwpe.2015.11.005
- Jaafari, J., Barzanouni, H., Mazloomi, S., Amir Abadi Farahani, N., Sharafi, K., Soleimani, P., & Haghighat, G. A. (2020). Effective adsorptive removal of reactive dyes by magnetic chitosan nanoparticles: Kinetic, isothermal studies and response surface methodology. *International Journal of Biological Macromolecules*, 164, 344–355. doi:10.1016/j.ijbiomac.2020.07.042

- Jiménez, C., Sáez, C., Cañizares, P., & Rodrigo, M. A. (2016). Optimization of a combined electrocoagulation-electroflotation reactor. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(10), 9700–9711. doi: 10.1007/s11356-016-6199-y
- Joshi, N. C., Joshi, A., Mitra, D., Gururani, P., Kumar, N., & Joshi, H. K. (2024). Removal of heavy metals using cellulose-based materials: A mini-review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 21, 100942. doi:10.1016/j.enmm.2024.100942
- Jyoti, D., Sinha, R., & Faggio, C. (2022). Advances in biological methods for the sequestration of heavy metals from water bodies: A review. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 94, 103927. doi:10.1016/j.etap.2022.103927
- Kanani, N. (2004). *Electroplating: Basic Principles, Processes and Practice*. Berlin, Elsevier.
- Khandegar, V., & Saroha, A. K. (2013). Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent – A review. *Journal of Environmental Management*, 128, 949–963. doi:10.1016/j.jenvman.2013.06.043
- Kim, J., & Bae, S. (2019). Fabrication of Ti/Ir-Ru electrode by spin coating method for electrochemical removal of copper. *Environmental Engineering Research*, 24(4), 646–653. doi:10.4491/eer.2018.229
- Kim, J., Yoon, S., Choi, M., Min, K. J., Park, K. Y., Chon, K., & Bae, S. (2022). Metal ion recovery from electrodialysis-concentrated plating wastewater via pilot-scale sequential electrowinning/chemical precipitation. *Journal of Cleaner Production*, 330, 129879. doi:10.1016/j.jclepro.2021.129879
- Kim, T. H., Park, C., Shin, E. B., & Kim, S. (2002). Decolorization of disperse and reactive dyes by continuous electrocoagulation process. *Desalination*, 150(2), 165–175. doi:10.1016/s0011-9164(02)00941-4
- Kobya, M., Can, O. T., & Bayramoglu, M. (2003). Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 100(1–3), 163–178. doi:10.1016/s0304-3894(03)00102-x
- Linde. (2020). Carburizing and Hardening. Erişim tarihi: 24 Mayıs 2024. Erişim adresi: <https://www.lindeus.com/industries/manufacturing-and-materials-processing/carburizing-vacuum-carburizing-hardening>.
- Lipps, W. C., Braun-Howland, E. B., & Baxter, T. E. (y.y.). Standard methods for the examination of water and wastewater., 1536.
- Liu, J., Yang, H., Gosling, S. N., Kummu, M., Flörke, M., Pfister, S., ... & Oki, T. (2017, 1 Haziran). Water scarcity assessments in the past, present, and future. *Earth's Future* John Wiley & Sons, Ltd. doi:10.1002/2016ef000518
- Lu, L., Xie, Y., Yang, Z., & Chen, B. (2023). Sustainable decontamination of heavy metal in wastewater and soil with novel rectangular wave asymmetrical alternative current electrochemistry. *Journal of Hazardous Materials*, 442,

130021. doi:10.1016/j.jhazmat.2022.130021

- Martín-Lara, M. A., Blázquez, G., Trujillo, M. C., Pérez, A., & Calero, M. (2014). New treatment of real electroplating wastewater containing heavy metal ions by adsorption onto olive stone. *Journal of Cleaner Production*, 81, 120–129. doi:10.1016/j.jclepro.2014.06.036
- Miyah, Y., El Messaoudi, N., Benjelloun, M., Acikbas, Y., Şenol, Z. M., Cigeroğlu, Z., & Lopez-Maldonado, E. A. (2024, 1 Haziran). Advanced applications of hydroxyapatite nanocomposite materials for heavy metals and organic pollutants removal by adsorption and photocatalytic degradation: A review. *Chemosphere*, doi:10.1016/j.chemosphere.2024.142236
- Morikubo, S., Kosaka, Y., Enomoto, D., Nishida, A., & Takuma, Y. (2021). Effect of ammonia stripping and influence of contaminants in zinc plating wastewater. *Journal of Environmental Management*, 298, 113459. doi:10.1016/j.jenvman.2021.113459
- Morikubo, S., Nishida, A., Enomoto, D., Narita, T., & Takuma, Y. (2023). Pretreatment with fine bubbles for effective zinc ion precipitation and removal from zinc electroplating wastewater. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 101(12), 6755–6763. doi:10.1002/cjce.24963
- Moussa, D. T., El-Naas, M. H., Nasser, M., & Al-Marri, M. J. (2017). A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges. *Journal of Environmental Management*, 186, 24–41. doi:10.1016/j.jenvman.2016.10.032
- Myers, R. H, Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, John Wiley & Sons.
- Naje, A. S., Chelliapan, S., Zakaria, Z., Ajeel, M. A., & Alaba, P. A. (2017). A review of electrocoagulation technology for the treatment of textile wastewater. *Reviews in Chemical Engineering*, 33(3), 263–292. doi: 10.1515/revce-2016-0019
- Nyström, F., Nordqvist, K., Herrmann, I., Hedström, A., & Viklander, M. (2020). Removal of metals and hydrocarbons from stormwater using coagulation and flocculation. *Water Research*, 182, 115919. doi:10.1016/j.watres.2020.115919
- Öztel, M. D., Kuleyin, A., & Akbal, F. (2020). Treatment of zinc plating wastewater by combination of electrocoagulation and ultrafiltration process. *Water Science and Technology*, 82(4), 663–672. doi:10.2166/wst.2020.357
- Patel, H. (2024). Removal of COD, BOD and color of different industrial effluents using activated neem char. *Environmental Advances*, 16, 100553. doi:10.1016/j.envadv.2024.100553
- Piepho, H. P. (2019). A coefficient of determination (R^2) for generalized linear mixed models. *Biometrical Journal*, 61(4), 860–872. doi:10.1002/bimj.201800270

- Rostami, M. S., & Khodaei, M. M. (2024). Recent advances in chitosan-based nanocomposites for adsorption and removal of heavy metal ions. *International Journal of Biological Macromolecules*, 270, 132386. doi:10.1016/j.ijbiomac.2024.132386
- Roudi, A. M., Salem, S., Abedini, M., Maslahati, A., & Imran, M. (2021). Response Surface Methodology (RSM)-Based Prediction and Optimization of the Fenton Process in Landfill Leachate Decolorization. *Processes*, 9(12), 2284. doi:10.3390/pr9122284
- Sadaf, S., Roy, H., Fariha, A., Rahman, T. U., Tasnim, N., Jahan, N., ... & Islam, M. S. (2024). Electrocoagulation-based wastewater treatment process and significance of anode materials for the overall improvement of the process: A critical review. *Journal of Water Process Engineering*, 62, 105409. doi:10.1016/j.jwpe.2024.105409
- Sahu, O., Mazumdar, B., & Chaudhari, P. K. (2014). Treatment of wastewater by electrocoagulation: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(4), 2397–2413. doi: 10.1007/s11356-013-2208-6
- Sandoval, M. A., Fuentes, R., Thiam, A., & Salazar, R. (2021). Arsenic and fluoride removal by electrocoagulation process: A general review. *Science of The Total Environment*, 753, 142108. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.142108
- Sedighi, S., Bazargan, A., & Mirbagheri, S. A. (2021). Consuming the least amount of energy and resources in landfill leachate electrocoagulation. *Environmental Technology & Innovation*, 22, 101454. doi:10.1016/j.eti.2021.101454
- Somaklı, C. (2022). *Metal Kaplama Tesisi Atık Çamurlarının Yönetiminde Swot Ve Mcdm Yöntemlerinin Kullanımı* Eskişehir Teknik Üniversitesi.
- Sridhar, R., Sivakumar, V., Prince Immanuel, V., & Prakash Maran, J. (2011). Treatment of pulp and paper industry bleaching effluent by electrocoagulant process. *Journal of Hazardous Materials*, 186(2–3), 1495–1502. doi:10.1016/j.jhazmat.2010.12.028
- Tahreen, A., Jami, M. S., & Ali, F. (2020). Role of electrocoagulation in wastewater treatment: A developmental review. *Journal of Water Process Engineering*, 37, 101440. doi:10.1016/j.jwpe.2020.101440
- Thomas, B. D., Marks, A., Smerigan, B., Aburto-Vazquez, G., Uludag-Demirer, S., Dusenbury, J. S., & Liao, W. (2024). Life cycle impact and economic assessment of decentralized strategies to treat source-separated wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 64, 105550. doi:10.1016/j.jwpe.2024.105550
- URL-1. Metal Plating Processes and Methods of Measuring Surface Hardness and Thickness of Coatings. <https://www.balseal.com/technical-library/engineering-library/technical-reports/>. Erişim tarihi: 24/07/2024.
- URL-2. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, SKKY 2004, <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=7221&MevzuatTur=7&Me>

vzuatTertip=5. Erişim tarihi: 24/07/2024.

VaporTECH. (2024). What's the Difference Between PVD and CVD Coating Processes? Erişim tarihi: 27 Mayıs 2024. Erişim adresi: <https://blog.vaportech.com/pvd-cvd-coating-process>.

Verma, S. K., Khandegar, V., & Saroha, A. K. (2013). Removal of Chromium from Electroplating Industry Effluent Using Electrocoagulation. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 17(2), 146–152. doi:10.1061/(asce)hz.2153-5515.0000170

Xiang, H., Min, X., Tang, C. J., Sillanpää, M., & Zhao, F. (2022). Recent advances in membrane filtration for heavy metal removal from wastewater: A mini review. *Journal of Water Process Engineering*, 49, 103023. doi:10.1016/j.jwpe.2022.103023

Yan, F., An, L., Xu, X., Du, W., & Dai, R. (2024). A review of antibiotics in surface water and their removal by advanced electrocoagulation technologies. *Science of The Total Environment*, 906, 167737. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.167737

Zhang, Y. Y., Tang, X., Zhang, J., Zhang, Y. Y., Yu, R., Wang, W., ... & Yu, J. (2024). Valuable components recovery from wastewater and brine using electrocoagulation-based coupled process: A systematic review. *Desalination*, 583, 117732. doi:10.1016/j.desal.2024.117732