

**ELEKTROKOAGÜLASYON VE ELEKTROOKSİDASYON YÖNTEMİ İLE KATI
ATIK DÜZENLİ DEPOLAMA SAHASI SIZINTI SUYUNUN ARITIMI**

Emre ODUNCU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ümran TEZCAN ÜN

Eskişehir

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Ocak, 2017

Bu Tez Çalışması BAP Komisyonunca kabul edilen 1304F065 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Emre ODUNCU'nun "Elektrokoagülasyon ve Elektrokodasyon Yöntemi ile Katı Atık Düzenli Depolama Sahası Sızıntı Suyu Arıtımı" başlıklı tezi 20/01/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Çevre Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Unvanı-Adı Soyadı

İmza

Üye (Tez Danışmanı) : Prof. Dr. Ümran TEZCAN ÜN

.....

Üye : Prof. Dr. Ülker BAKIR ÖĞÜTVEREN

.....

Üye : Doç. Dr. Belgin KARABACAĞLU

.....

.....

Enstitü Müdürü

ÖZET

ELEKTROKOAGÜLASYON VE ELEKTROOKSİDASYON YÖNTEMİ İLE KATI ATIK DÜZENLİ DEPOLAMA SAHASI SIZINTI SUYUNUN ARITIMI

Emre ODUNCU

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ocak, 2017

Danışman : Prof. Dr. Ümran TEZCAN ÜN

Bu çalışmada üç farklı yöntem kullanılarak sızıntı suyunun elektrokimyasal yöntem olan elektrooksidasyon ve elektrokoagülasyon ile arıtılabilirliği incelenmiştir. Tek kutuplu alüminyum elektrotlar ile yapılan ilk çalışmada pH 5 ve 75mA/cm² akım yoğunluğunda 45 dakikalık elektrokoagülasyon işlemi sonucunda 4100 mg/L olan başlangıç KOİ derişimi %57 arıtım verimi ile 1766 mg/L değerine indirilebilmiştir. İkinci çalışmada ise Pt ve BDD olmak üzere iki farklı elektrot denenmiştir. pH 4, 65mA/cm² ve 0,5 M NH₄Cl ilavesi ile gerçekleşen deneyler sonucunda; 4100 mg/L olan başlangıç KOİ derişimi BDD elektrot ile 300 dakikalık elektrooksidasyon işlemi sonununda %98 arıtım verimi ile 100 mg/L derişimine indirilmiş ve %99,91 renk giderimi gözlenmiştir. Pt kaplı elektrot ile 480 dakikalık elektrooksidasyon işlemi sonucunda %76 arıtım verimi ile 1000mg/L derişime ulaşılmıştır ve %97,2 renk giderimi gözlenmiştir. Üçüncü çalışmada ise 2-3-2 delik düzenine sahip dönerli çakışık plaka demir elektrotlar ile elektrokoagülasyon denenmiş. Response Surface Metodu ile yapılan değerlendirmeler sonucunda $(y = -20,0528 + 26,1451 X_1 + 0,583139 X_2 - 60,5524 X_3 + 22,9433 (X_3)^2 - 3,00792 (X_1)^2 + 2,63792 X_1 X_3)$ matematik modeline ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler : Elektrokoagülasyon, Elektrooksidasyon, sızıntı suyu, Elektrokimya.

ABSTRACT

LANDFILL LEACHATE TREATMENT USING ELECTROCOAGULATION AND ELECTROOXIDATION METHODS

Emre ODUNCU

Department of Environmental Engineering

Anadolu University, Graduate School of Sciences, January, 2017

Supervisor : Prof. Dr. Ümran TEZCAN ÜN

In this thesis, treatability of leachate was investigated performing 3 different methods. The first operation was carried out using with monopolar aluminum electrodes. After electrocoagulation process of 45 minutes in the conditions of pH 5 and current density of 75mA/cm²; the initial concentration of 4100 mg/L COD was reduced to 1766 mg/L with 57% removal efficiency. In the second operation, the performance of two different electrodes (Pt and BDD coated) was investigated. At the end of the operations held in the conditions of pH 4, 65mA/cm² current density and 0,5 M NH₄Cl addition, the initial concentration of 4100 mg/L COD was reduced to 100mg/L with 98% removal efficiency and %99.91 color removal, after 300 minutes electrooxidation using BDD coated electrodes. Additionally, the initial concentration of 4100 mg/L COD was reduced to 1000mg/L with the removal rate 76% and 97.2% color removal, after 480 minutes electrooxidation using Pt coated electrodes. In the third operation, the iron positioned with 2-3-2 hole configuration was tested. Under the advantage of using Response Surface Method, mathematical model of $(y = -20.0528 + 26.1451 X_1 + 0.583139 X_2 - 60.5524 X_3 + 22.9433 (X_3)^2 - 3.00792 (X_1)^2 + 2.63792 X_1X_3)$ was reached.

Keywords : Electrocoagulation, Electrooxidation, Leachate, Electrochemistry.

20/01/2017

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilemeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Anadolu Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

.....
Emre ODUNCU

TEŞEKKÜR

Çalışmanın her safhasında bilgi ve deneyimiyle beni yönlendiren, edindirdiği akademik düşüncenin yanı sıra edindiği tecrübe ve bakış açısını bana aktarmaya çalışarak hayat vizyonu kazandıran, hayatımda ve tezimde çok büyük bir yere sahip olan değerli danışman hocam **Prof. Dr. Ümran TEZCAN ÜN'e,**

Her başım sıkıştığında ve yardıma ihtiyacım olduğunda arkamda olarak maddi ve manevi hiçbir desteğini esirgemeyen, bu tezin oluşmasında en büyük katkılardan birine sahip olan hocam **Yrd. Doç. Dr. Eren ÖCAL'a,**

Her kapısını çaldığımda sıkılmadan ve bıkmadan bana yardımcı olan, vizyonu ve bilgi birikimiyle beni yönlendiren **Prof. Dr. Nihal ERGİNEL'e,**

Sevgisi, şevkati ve anlayışıyla bu zorlu dönemimde ayakta kalmamı sağlayan **Göksu VURDU'ya,**

Tanıdığım süre boyunca bana her konuda yol gösteren ve dostluktan öte bağları ile her durumda yanımda duran **Seher TOPAL ve Onur Yağmur SARI'ya,**

Ve tabii ki,

27 yıllık hayatım boyunca desteklerini hiçbir zaman benden çekmeyen ve varlıklarıyla güvenlerini ve sevgilerini bana hissettiren, aktardıkları etik ve ahlaki değerleriyle benim ben olmamı sağlayan, dünüm, bugünüm ve yarınım canım **Ailem; Handan ve Nural ODUNCU'ya,**

Sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim...

Emre ODUNCU
Ocak, 2017

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI.....	i
JURİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ	1
2. SIZINTI SUYU	3
2.1. Katı Atık Düzenli Depolama Sahası.....	3
2.2. Sızıntı Suyu.....	6
3. ELEKTROKİMYASAL ARITIM SÜREÇLERİ	9
3.1. Elektrokimyasal Süreçler ve Esasları.....	10
3.2. Elektrokoagülasyon (Elektropihtılaştırma) Süreci ve Kuramı.....	10
3.3. Elektrooksidasyon (Elektroyükseltgeme) Süreci ve Kuramı.....	14
4. KONU İLE İLGİLİ YAPILMIŞ SONUÇLAR	17
5. MATERYAL VE YÖNTEM	20
5.1. Sızıntı Suyu ve Analizi.....	20
5.2. Paralel Plakalı Alüminyum Elektrotlar Kullanılarak Elektropihtılaştırma Yöntemi ile Sızıntı Suyunun Arıtıldığı Deneysel Düzenek	22

5.3. Elektroyükseltgeme Yöntemi ile Sızıntı Suyunun Arıtıldığı Deneysel Düzenek.....	23
5.4. Delikli Demir Elektrotlar Kullanılarak Sızıntı Suyunun Arıtımı ve Elektropihtilaşma Yöntemi ile Cevap Yüzey Metodu.....	24
5.4.1. Delikli demir elektrot ile elektropihtilaşma	24
5.4.2. Cevap yüzey yöntemi (Response surface method)	25
6. DENEYSEL SONUÇLAR	26
6.1. Paralel Plakalı Alüminyum Elektrotlar Kullanılarak Elektropihtilaşma ile Sızıntı Suyunun Arıtımı.....	26
6.1.1. Başlangıç pH'nın etkisinin belirlenmesi	26
6.1.2. Akım yoğunluğunun etkisinin belirlenmesi	30
6.1.3. Farklı destek elektrolitlerin etkisinin belirlenmesi	35
6.2. Elektroyükseltgenme Yöntemi ile Sızıntı Suyunun Arıtımı	38
6.2.1. Başlangıç pH'nın etkisinin belirlenmesi	38
6.2.2. Akım yoğunluğunun etkisinin belirlenmesi	47
6.2.3. Farklı destek elektrolitlerin etkisinin belirlenmesi	55
6.2.4. Zamanın etkisinin belirlenmesi	64
6.3. Delikli Demir Elektrot Kullanılarak Sızıntı Suyunun Elektropihtilaşma Yöntemi ile Arıtımı ve Cevap Yüzey Metodu (Response Surface Method).....	73
6.3.1. Tekrarlanabilirlik deneyleri ve verileri.....	73
6.3.2. RSM deneyleri ve verileri	77
7. SONUÇ TARTIŞMA ve ÖNERİLER	88
KAYNAKÇA	91
ÖZGEÇMİŞ	96

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Sızıntı Suyu Oluşumu.....	6
Şekil 3.1. Elektropihtilashmada Gerçekleşen Etkileşimler.....	11
Şekil 3.2. Elektrokoagülasyon İşlemi.....	12
Şekil 3.3. Doğrudan (direkt) ve Dolaylı (İndirekt) Yükseltgeme.....	15
Şekil 5.1. Elektrokimyasal Hücre	22
Şekil 5.2. Tek kutuplu Elektropihtilashma Düzenegi.....	22
Şekil 5.3. Elektroyükseltgeme Reaktör Düzenegi	23
Şekil 5.4. Elektropihtilashma Reaktör Düzenegi.....	24
Şekil 6.1. Başlangıç pH'ın KOİ Derişimine Etkisi.....	28
Şekil 6.2. Başlangıç pH'ın KOİ Giderimine Etkisi.....	29
Şekil 6.3. Başlangıç pH'ın Enerji Tüketimine Etkisi.....	30
Şekil 6.4. Akım Yoğunluğu ile KOİ Derişimine Etkisi.....	33
Şekil 6.5. Akım Yoğunluğunun KOİ Giderimine Etkisi.....	34
Şekil 6.6. Akım Yoğunluğunun Enerji Tüketimine Etkisi.....	34
Şekil 6.7. Destek Elektrolit Çeşidinin KOİ Derişiminin Farklı Destek Elektrolitlere göre Değişimi.....	37
Şekil 6.8. Farklı Destek Elektrolitlerin KOİ Giderimine Etkisi.....	37
Şekil 6.9. Farklı Destek Elektrolitlerin Enerji Tüketimine Etkisi.....	38
Şekil 6.10. BDD Elektrot için pH'ın KOİ Derişimine Etkisi.....	41
Şekil 6.11. BDD Elektrot için pH'ın KOİ Giderimine Etkisi.....	41
Şekil 6.12. Pt kaplı Elektrot için pH'ın KOİ Derişimine Etkisi.....	44
Şekil 6.13. Pt kaplı Elektrot için pH'ın KOİ Giderimine Etkisi.....	44

Şekil 6.14. BDD Elektrot için pH'ın Enerji Tüketimine Etkisi.....	46
Şekil 6.15. Pt kaplı Elektrot için pH'ın Enerji Tüketimine Etkisi.....	47
Şekil 6.16. BDD Elektrot için Akım Yoğunluğunun KOİ Derişimine Etkisi.....	50
Şekil 6.17. BDD Elektrot için Akım Yoğunluğunun KOİ Giderimine Etkisi.....	50
Şekil 6.18. Pt kaplı Elektrot için Akım Yoğunluğunun KOİ Derişimine Etkisi.....	53
Şekil 6.19. Pt kaplı Elektrot için Akım Yoğunluğunun KOİ Giderimine Etkisi.....	53
Şekil 6.20. BDD Elektrot için Akım Yoğunluğunun Enerji Tüketimi Etkisi.....	54
Şekil 6.21. Pt kaplı Elektrot için Akım Yoğunluğunun Enerji Tüketimi Etkisi.....	55
Şekil 6.22. BDD Elektrot için Destek Elektrolit Çeşidinin KOİ Derişimine Etkisi....	58
Şekil 6.23. BDD Elektrot için Destek Elektrolit Çeşidinin KOİ Derişimine Etkisi	58
Şekil 6.24. Pt kaplı Elektrot için Destek Elektrolit Çeşidinin KOİ Derişimine Etkisi	61
Şekil 6.25. Pt kaplı Elektrot için Destek Elektrolit Çeşidinin KOİ Giderimine Etkisi	61
Şekil 6.26. BDD Elektrot için Destek Elektrolit Çeşidinin KOİ Giderimine Etkisi	61
Şekil 6.27. Pt kaplı Elektrot için Destek Elektrolit Çeşidinin Enerji Tüketimi Etkisi.....	63
Şekil 6.28. BDD Elektrotla Zamana Karşı KOİ Derişimi.....	66
Şekil 6.29. BDD Elektrotla Zamana Karşı KOİ Giderimi.....	66
Şekil 6.30. BDD Elektrotla Zamana Karşı Renk Derişimi.....	67
Şekil 6.31. BDD Elektrotla Zamana Karşı Renk Giderimi.....	68
Şekil 6.32. Pt kaplı Elektrotla Zamana Karşı KOİ Derişimi.....	69
Şekil 6.33. Pt kaplı Elektrotla Zamana Karşı KOİ Giderimi.....	69
Şekil 6.34. Pt kaplı Elektrotla Zamana Karşı Renk Derişimi.....	71
Şekil 6.35. Pt kaplı Elektrotla Zamana Karşı Renk Giderimi.....	71
Şekil 6.36. BDD Elektrotla Zamana Karşı Enerji Tüketimi.....	72

Şekil 6.37. Pt kaplı Elektrotla Zamana Karşı Enerji Tüketimi.....	73
Şekil 6.38. ANOVA Grafikleri.....	77
Şekil 6.39. Olasılık Dağılım Grafiği.....	81
Şekil 6.40. Hata Dağılım Grafiği	82
Şekil 6.41. Deney Yapılış Sırasına Göre Hataların Dağılımı	82
Şekil 6.42. pH ve Destek Elektrolit İlavesinin Etkileşimi Kontur Plot Grafiği	83
Şekil 6.43. pH ve Destek Elektrolit İlavesinin KOİ Giderimi Üzerine Etkisi.....	84
Şekil 6.44. pH ve Akım Yoğunluğu Etkileşimi Kontur Plot Grafiği.....	85
Şekil 6.45. pH ve Akım Yoğunluğunun KOİ Giderimi Üzerine Etkisi.....	85
Şekil 6.46. Destek Elektrolit İlavesi ve Akım Yoğunluğunun Etkileşimi Kontur Plot Grafiği.....	86
Şekil 6.47. Destek Elektrolit İlavesi ve Akım Yoğunluğunun KOİ Giderimi Üzerine Etkisi	87
Şekil 6.48. Optimizasyon Grafiği.....	87
Şekil 7.1. Arıtım Öncesi ve Sonrası Sızıntı Suyu.....	89

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Düzenli Depolama Sahasında Olması Gereken Birimler	5
Çizelge 2.2. Sızıntı Suyunda Bulunan Kirleticiler ve Değerleri.....	7
Çizelge 2.3. Sızıntı Suyu İçeriğinin Yaşa Göre Değişimi.....	8
Çizelge 3.1. Elektropihtilaşmanın Üstünlükleri ve Olumsuzlukları.....	14
Çizelge 5.1. Düzenli Depolama Sahasında Elde Edilen Sızıntı Suyunun Özellikleri..	20
Çizelge 6.1. pH 3 için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (Akım Yoğunluğu: 30mA/cm ² (3,2 A), Destek elektrolit:Yok).....	27
Çizelge 6.2. pH 5 için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (Akım Yoğunluğu: 30mA/cm ² (3,2 A), Destek elektrolit:Yok).....	27
Çizelge 6.3. pH 7 için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (Akım Yoğunluğu: 30mA/cm ² (3,2 A), Destek elektrolit:Yok).....	27
Çizelge 6.4. pH 9 için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (Akım Yoğunluğu: 30mA/cm ² (3,2 A), Destek elektrolit:Yok).....	28
Çizelge 6.5. 30 mA/cm ² Akım Yoğunluğunda (3,2A) Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (pH: 5, Destek elektrolit:Yok).....	31
Çizelge 6.6. 45 mA/cm ² Akım Yoğunluğunda (3,2A) Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (pH: 5, Destek elektrolit:Yok).....	32
Çizelge 6.7. 55 mA/cm ² Akım Yoğunluğunda (3,2A) Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (pH: 5, Destek elektrolit:Yok).....	32
Çizelge 6.8. 65 mA/cm ² Akım Yoğunluğunda (3,2A) Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (pH: 5, Destek elektrolit:Yok).....	32
Çizelge 6.9. 75 mA/cm ² Akım Yoğunluğunda (3,2A) Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (pH: 5, Destek elektrolit:Yok).....	33
Çizelge 6.10. Destek Elektrolit İlave Edilmeyen Deneysel Sonuçlar (pH: 5, Akım yoğunluğu:65mA/cm ²).....	35
Çizelge 6.11. 0,01M Na ₂ SO ₄ Destek Elektrolit İlave Edilen Deneysel Sonuçlar (pH: 5, Akım yoğunluğu:65mA/cm ²).....	36
Çizelge 6.12. 0,01M NaCl Destek Elektrolit İlave Edilen Deneysel Sonuçlar (pH: 5, Akım yoğunluğu:65mA/cm ²).....	36

Çizelge 6.13. BDD Elektrot ile pH 2 için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (Akım Yoğunluğu: 35mA/cm ² (3,5 A), Destek elektrolit:Yok)	39
Çizelge 6.14. BDD Elektrot ile pH 4 için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (Akım Yoğunluğu: 35mA/cm ² (3,5 A), Destek elektrolit:Yok)	39
Çizelge 6.15. BDD Elektrot ile pH 6 için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (Akım Yoğunluğu: 35mA/cm ² (3,5 A), Destek elektrolit:Yok)	40
Çizelge 6.16. BDD Elektrot ile pH 8 için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (Akım Yoğunluğu: 35mA/cm ² (3,5 A), Destek elektrolit:Yok)	40
Çizelge 6.17. BDD Elektrot ile pH 4 için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (Akım Yoğunluğu: 35mA/cm ² (3,5 A), Destek elektrolit:Yok)	40
Çizelge 6.18. Pt Kaplı Elektrot ile pH 2 için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (Akım Yoğunluğu: 35mA/cm ² (3,5 A), Destek elektrolit:Yok)	42
Çizelge 6.19. Pt Kaplı Elektrot ile pH 4 için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (Akım Yoğunluğu: 35mA/cm ² (3,5 A), Destek elektrolit:Yok)	42
Çizelge 6.20. Pt Kaplı Elektrot ile pH 6 için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (Akım Yoğunluğu: 35mA/cm ² (3,5 A), Destek elektrolit:Yok)	43
Çizelge 6.21. Pt Kaplı Elektrot ile pH 8 için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (Akım Yoğunluğu: 35mA/cm ² (3,5 A), Destek elektrolit:Yok)	43
Çizelge 6.22. Pt Kaplı Elektrot ile pH 10 için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (Akım Yoğunluğu: 35mA/cm ² (3,5 A), Destek elektrolit:Yok)	43
Çizelge 6.23. BDD Elektrot ile 25mA/cm ² için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (pH: 4, Destek elektrolit:Yok).....	48
Çizelge 6.24. BDD Elektrot ile 35mA/cm ² için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (pH: 4, Destek elektrolit:Yok).....	48
Çizelge 6.25. BDD Elektrot ile 45mA/cm ² için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (pH: 4, Destek elektrolit:Yok).....	48
Çizelge 6.26. BDD Elektrot ile 55mA/cm ² için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (pH: 4, Destek elektrolit:Yok).....	49
Çizelge 6.27. BDD Elektrot ile 65mA/cm ² için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (pH: 4, Destek elektrolit:Yok).....	49
Çizelge 6.28. Pt Kaplı Elektrot ile 25mA/cm ² için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (pH: 4, Destek elektrolit:Yok).....	51
Çizelge 6.29. Pt Kaplı Elektrot ile 35mA/cm ² için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (pH: 4, Destek elektrolit:Yok).....	51

Çizelge 6.30. Pt Kaplı Elektrot ile 45mA/cm ² için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (pH: 4, Destek elektrolit:Yok).....	52
Çizelge 6.31. Pt Kaplı Elektrot ile 55mA/cm ² için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (pH: 4, Destek elektrolit:Yok).....	52
Çizelge 6.32. Pt Kaplı Elektrot ile 65mA/cm ² için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (pH: 4, Destek elektrolit:Yok).....	52
Çizelge 6.33. BDD Elektrot ile Destek Elektrolit Kullanılmadan Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (pH: 4, Akım yoğunluğu: 65mA/cm ²).....	56
Çizelge 6.34. BDD Elektrot ile 0,5M NH ₄ Cl Destek Elektrolit Kullanılarak Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (pH: 4, Akım yoğunluğu: 65mA/cm ²).....	56
Çizelge 6.35. BDD Elektrot ile 0,5M NaCl Destek Elektrolit Kullanılarak Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (pH: 4, Akım yoğunluğu: 65mA/cm ²).....	56
Çizelge 6.36. BDD Elektrot ile 0,5M KCl Destek Elektrolit Kullanılarak Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (pH: 4, Akım yoğunluğu: 65mA/cm ²).....	57
Çizelge 6.37. BDD Elektrot ile 0,5M K ₂ SO ₄ Destek Elektrolit Kullanılarak Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (pH: 4, Akım yoğunluğu: 65mA/cm ²).....	57
Çizelge 6.38. Pt Kaplı Elektrot ile Destek Elektrolit Kullanılmadan Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (pH: 4, Akım yoğunluğu: 65mA/cm ²).....	59
Çizelge 6.39. Pt Kaplı Elektrot ile 0,5M NH ₄ Cl Destek Elektrolit Kullanılarak Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (pH: 4, Akım yoğunluğu: 65mA/cm ²).....	59
Çizelge 6.40. Pt Kaplı Elektrot ile 0,5M NaCl Destek Elektrolit Kullanılarak Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (pH: 4, Akım yoğunluğu: 65mA/cm ²).....	60
Çizelge 6.41. Pt Kaplı Elektrot ile 0,5M KCl Destek Elektrolit Kullanılarak Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (pH: 4, Akım yoğunluğu: 65mA/cm ²).....	60
Çizelge 6.42. Pt Kaplı Elektrot ile 0,5M K ₂ SO ₄ Destek Elektrolit Kullanılarak Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (pH: 4, Akım yoğunluğu: 65mA/cm ²).....	60
Çizelge 6.43. BDD Elektrot ile Zamana Karşı Elde Edilen Sonuçlar (pH: 4, Akım yoğunluğu: 65mA/cm ² , Destek elektrolit: Yok).....	65
Çizelge 6.44. Pt Kaplı Elektrot ile Zamana Karşı Elde Edilen Sonuçlar (pH: 4, Akım yoğunluğu: 65mA/cm ² , Destek elektrolit: Yok).....	69
Çizelge 6.45. Reçeteler ve Karşılık Gelen Deneysel Parametreler.....	74
Çizelge 6.46. Personel A ve B için % Giderim Değerleri.....	74
Çizelge 6.47. ANOVA Test Sonuçları.....	76
Çizelge 6.48. Deney Sıralaması ve Deneysel Şartlar Şartlar.....	78
Çizelge 6.49. KOİ Giderimi için Hesaplanmış Değer ve Katsayılar.....	80

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

i	: Akım Yoğunluğu
I	: Amper
%	: Yüzde
e ⁻	: Elektron
S	: Siemens
°C	: Santigrat Derece
n	: Tanecik sayısı
t	: Zaman

KISALTMALAR

KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
COD	: Chemical Oxygen Demand
BOİ	: Biyokimyasal Oksijen İstemi
BOD	: Biological Oxygen Demand
BDD	: Bor Katkılı Elmas
C	: Derişim
C ₀	: Başlangıç Derişimi
F	: Faraday Sabiti
V	: Voltaj (Gerilim)

1.GİRİŞ

Sanayinin gelişmesi ve dünya nüfusunun artmasına paralel olarak evsel, endüstriyel ve tarımsal alanlarda oluşan atık miktarı da artış göstermektedir. Atık Yönetimi Yönetmeliği'ne (2015, madde 4) göre; “üreticisi veya fiilen elinde bulunduran gerçek veya tüzel kişi tarafından çevreye atılan veya bırakılan ya da atılması zorunlu olan herhangi bir madde veya materyal “atık” olarak değerlendirilmektedir. Bu atıkların belirli bir yerde toplanması, çevreye en az zararla bertaraf edilmesi ya da en aza indirilmesi gerekmektedir.

Eurostat (2014), verilerine göre Türkiye için ortalama evsel atık üretimi için hesaplanan değer 31 milyon 230 bin ton'dur. Bu veriler ışığında; Avrupa Birliği üye ve aday ülkeleri açısından açığa çıkan evsel atık miktarları incelendiğinde Almanya 50 milyon ton ile başı çekmekte, arkasından yaklaşık 34 milyon ton ile Fransa ikinciliği ele almaktadır. Fransa'nın ardından ise Türkiye gelmektedir ve Avrupa Birliği üye ve aday ülkeleri arasında en fazla atık oluşturan 3. ülke konumunda bulunmaktadır. Yine 2014 yılı Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK, 2014a) belediye atık istatistikleri verilerine göre açığa çıkan atıkların %64'ü düzenli depolama tesislerinde depolanmakta ya da bertaraf edilmektedir.

Katı atıkların depolanması sırasında çoğunlukla dışarıdan nüfuz eden yağmur suyu çöp kitleleriyle temas geçerek suda çözünen organik maddeler, anorganik tuzlar ve metaller gibi kirlilik unsurlarını kendi bünyesine almasıyla kirliliği artırır. Ayrıca, depolama faaliyeti sırasında gerçekleşen biyolojik ve kimyasal tepkimelerde kirliliğe katkıda bulunur. Sonuç olarak, depolama faaliyeti sırasında ortaya çıkan bu organik ve diğer kirlenmeler tarafından zengin, kompleks ve değişken yapıda kirliliğe katkıda bulunan suya “sızıntı suyu” adı verilmektedir. Bu kompleks yapıdaki sızıntı suyunun arıtımı çevre ve sağlık açısından büyük önem taşımaktadır.

Sızıntı suyunun arıtımı çeşitli yöntemler kullanılarak yapılmaktadır. Ancak, kullanılan yöntemlerde arıtım başarısının yüksek olmadığı görülmektedir. Sızıntı suyunun içeriğinin ağır metal ve organik kirlenmeler açısından yoğun olması nedeniyle geleneksel olarak uygulanan fiziksel ve kimyasal yöntemlerin yetersiz kalması, daha

ekonomik, daha verimli ve uygulanması kolay bir arıtım yönteminin geliştirilmesi ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle, ileri arıtım yöntemlerine yönelinmiştir. Bu çalışmada, ileri arıtım yöntemlerinden olan elektrokoagülasyon (elektropıhtılaşıma) ve elektrooksidasyon (elektroyükseltgeme) süreçleri kullanılarak katı atık düzenli depolama sahası sızıntı suyunun arıtımı gerçekleştirilecektir. Çalışmada sızıntı suyunun farklı yöntem ve deneysel düzenekler kullanılarak doğrudan deşarj edilebilir kirletici seviyelerine indirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda üç farklı çalışma yürütülmüştür.

2. SIZINTI SUYU

2.1 Katı Atık Düzenli Depolama Sahası

Her türlü insani (evsel, tarımsal ya da endüstriyel) ve hayvansal faaliyetlerden kaynaklanan, üreticisi için herhangi bir kullanım değeri kalmadığı düşünülen ve katı halde bulunan tüm atıklar ‘katı atık’ olarak nitelendirilir (Şen, 2007,s 3-4). Katı atıkların sınıflandırılması aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir (Çetinkaya, 2013, s3);

- Evsel katı atıklar
- Arıtma çamuru
- Özel atıklar (Tıbbi atıklar)
- Sokak süprüntüleri
- İnşaat ve hafriyat atıkları
- Endüstriyel atıklar

“Düzenli depolama sahaları; atıkların kontrollü olarak kabul edildiği, depolama yapıldıktan sonra atıkta meydana gelen tepkimeler sonucu oluşan atıkların da kontrol edildiği alanlar olarak tanımlanabilir. Düzenli depolama ile bertaraf, ilin kendine özgü yapısıyla da ilintili olarak diğer bertaraf yöntemlerine göre daha az maliyetli yöntemlerden biridir.” (Türkiye Belediyeler Birliği Atık Komisyonu [TBAK], 2014, s 1).

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı’nın 2014 verilerine göre; toplamda 113 adet düzenli depolama sahası aktif olarak kullanılmaktadır (TUİK, 2014b) Ek olarak; Türkiye İstatistik Kurumu (TUİK, 2015) verilerine göre atıkların büyük bir çoğunluğu düzenli depolama tesislerinde depolanmaktadır. Örneğin; 2014 yılında belediyeler tarafından toplanan atık miktarı 28 milyon tondur ve bu miktarın %64’ü düzenli depolama tesisine yollanmıştır (TUİK, 2014a)

Katı atık düzenleme sahaları atıkların depolanması için büyük önem taşımaktadır. Belirli koşullar sağlanmadığı takdirde başta çevre sorunları olmak üzere bir çok probleme neden olabilir. Düzenli depolama sahasının yerinin belirlenmesinde aşağıdaki temeller dikkate alınmaktadır (Baran, 1995);

- Ulaşım ve meskun mahal durumu

- Meteorolojik koşullar
- Jeomorfolojik koşullar
- Jeolojik-Hidrojeolojik koşullar
- Jeoteknik

Bunun yanı sıra, Türkiye Belediyeler Birliği Atık Komisyonu'nca hazırlanan raporda bir düzenli depolama alanında olması gerekli birimler Çizelge 2.1'de gösterilmiştir.

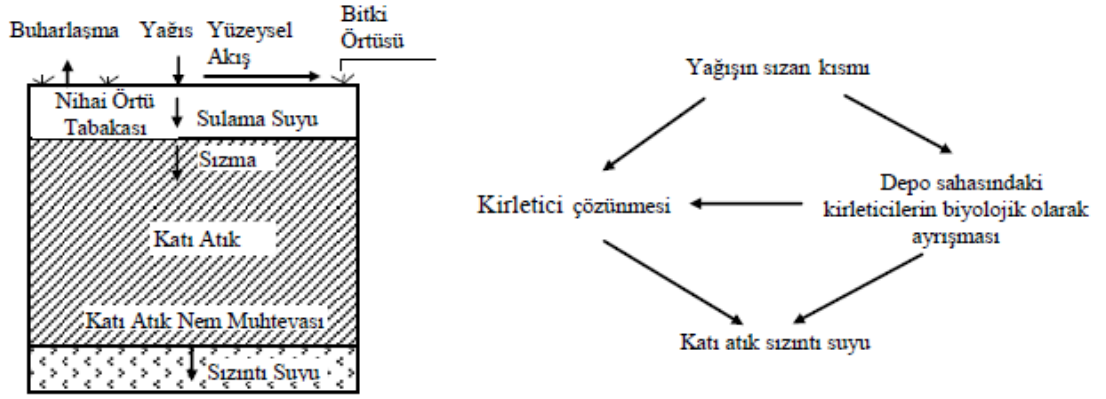
Çizelge 2.1: Düzenli depolama sahasında olması gereken birimler

Düzenli Depolama Sahasında Olması Gereken Birimler	
1	Sahaya giriş çıkışın kontrol edildiği bekçi kontrol noktası
2	Sahaya gelen tüm atıkların tartılması amacıyla kantar binası
3	Personelin yemek, temizlik ve barınma ihtiyacı için sosyal tesis
4	İdari bina
5	Sahaya girip çıkan araçların temizliği için, tekerlek yıkama ünitesi
6	Araç tamir ve bakım atölyesi
7	Jeneratör binası
8	Yangın ve kullanma suyu deposu
9	Ambalaj atıkları toplama ve ayırma tesisi
10	Sahaya giriş çıkış için yol
11	Atıkların sıkıştırılmasında kullanılacak araçlar için yol
12	Otopark
13	Tüm sahayı çevreleyen çit
14	Tüm sahayı çevreleyen yüzey suyu toplama kanalları
15	Yeraltı suyu kirliliğini kontrol etmek amacıyla en az 3 adet gözlem kuyusu
16	Depolama alanı
17	Sızıntı suyu için drenaj sistemi
18	Sızıntı suyunun toplandığı lagünler
19	Sızıntı suyu arıtım tesisi
20	Gaz toplama sistemi, bacalar, menholler, bacalar,
21	Enerji üretim ve gaz yakma tesisi

Kaynak: (Türkiye Belediyeler Birliği Atık Komisyonu, 2014, s 6)

2.2. Sızıntı Suyu

Katı atıkların depolanması sırasında gerek katı atığın sahip olduğu nem, gerekse dışarıdan dahil olan nem ve yağmur suyu, organik maddeleri çözürek organik madde ve diğer kompleks bileşiklerinden oluşan kirli su sızıntı suyunu oluşturmaktadır (Alver, 2012, s 13). Yönetmelikte ise (Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik, 2010, madde 4) “Depolanan atıklardan süzülen ve depolama sahasından kaynaklanan sıvı” olarak nitelendirilmektedir. Sızıntı suyunun nasıl oluştuğuna dair şablon Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Sızıntı suyu oluşumu

Kaynak: (Öztürk, 2011, s 3)

Sızıntı suları bir çok organik ve anorganik bileşiği bünyesinde barındıran yoğun kokulu ve kompleks yapıda bir karışımdır. Sızıntı suyunun içerisinde tipik olarak bulunan kirlenici unsurlar ve değer aralıkları Çizelge 2.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 2.2: Sızıntı suyunda bulunan kirleticiler ve değerleri

Parametre	Değer	Parametre	Değer
pH	7–10	KOİ (mg/L)	500–38800
BOİ (mg/L)	245–24500	NH ₄ -N (mg/L)	10,2–2000
Alkalinite (mg/L)	1271	Klor (mg/L)	1383
İletkenlik(mS/cm/m)	670	Amonyak (mg/L)	230
Nitrat (mg/L)	10,25	Nitrit (mg/L)	21,5
TKN (mg/L)	261,8	Sülfat (mg/L)	32,8
Ortofosfat (mg/L)	0,2	Toplam Katı (mg/L)	3655
Uçucu Katılar (mg/L)	675	TAK (mg/L)	77
UAK (mg/L)	28	Sodyum (mg/L)	659
Magnezyum (mg/L)	65	Potasyum (mg/L)	371
Kalsiyum (mg/L)	91	Krom (mg/L)	0,05
Manganez (mg/L)	1,2	Demir (mg/L)	4,9
Bakır (mg/L)	0,08	Çinko (mg/L)	0,2
Kadmiyum (mg/L)	0,025	Kurşun(mg/L)	0,075
Civa (µg/L)	12,75	Arsenik (µg/L)	30,7
UYA (mg/L)	11–1029	TDS (mg/L)	68–3389
Toplam Azot (mg/L)	16,6–630	TOK (mg/L)	30–800
KOİ: Kimyasal Oksijen İhtiyacı; BOİ: Biyolojik Oksijen İhtiyacı; TKN: Toplam Kjeldahl Azotu; UAK: Uçucu Askıda Katı, TAK: Toplam Askıda Katı; UYA: Uçucu Yağ Asidi; TOK: Toplam Organik Karbon			

Kaynak: (Sil ve Kumar, 2017, s 394)

Organik madde içeriği biyolojik ve kimyasal etmenler nedeniyle bozunmaya uğrayarak zamanla azalma eğilimi gösterse de anorganik madde içeriği genel olarak sabit kalabilmektedir (Civan, 2014). Bu nedenle, sızıntı suyunun yaşı da önemli sabitlerden biridir. Sızıntı suyunun yaşına göre kirletici unsurlar açısından değişimi Çizelge 2.3’de verilmektedir.

Çizelge 2.3: *Sızıntı suyu içeriğinin yaşa göre değişimi*

Parametre	Genç	Orta	Yaşlı	Tipik Atık Su
Yaş	<5	5–10	>10	Ham
pH	6,5	6,5–7,5	>7,5	–
KOİ (mg/L)	20.000–40.000	4.000–10.000	500–4.000	350
BOİ (mg/L)	10.000–20.000	4.000–10.000	50–100	250
TOK (mg/L)	9.000–25.000	–	100–1000	100
Uçucu Yağ Asidi (mg/L)	9.000–25.000	–	50–100	50

Kaynak: (Sil ve Kumar, 2017, s 395)

3. ELEKTROKİMYASAL ARITIM SÜREÇLERİ

Literatürde konu ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, sızıntı suyunun arıtımı ile ilgili çeşitli yöntemlerin kullanıldığı görülmektedir. Ancak, sızıntı suyunun içeriğinin kompleks yapıda olmasından dolayı daha ekonomik, daha verimli ve daha kolay uygulanabilir arıtım yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Geleneksel arıtım yöntemleri bu konuda ihtiyacı karşılamakta yetersiz kalmakta ve gelişen teknolojiyle birlikte daha etkin ileri arıtım yöntemlerine ihtiyaç doğmaktadır. Bu çalışmada, son yıllarda ilgi çeken arıtım yöntemlerinden elektrokimyasal süreçlerin ve parametrelerinin arıtıma etkisi incelenmiştir.

Elektrokimyasal süreçlerin tarihçesi incelendiğinde, elektriğin arıtımda kullanılmasının ilk kez 1889 yılında İngiltere’de teklif edildiği görülür(Chen, 2004). Elektrik enerjisi kullanılarak mineral zenginleştirilmesi ise 1904 yılında Elmore tarafından patentini almıştır (Elmore, 1905). Demir ve alüminyum elektrot kullanılarak elektrokoagülasyon (elektropıhtılaşıma) işleminin ise 1909 yılında Amerika’da patenti alınmıştır. Elektrokoagülasyon (elektropıhtılaşıma) işlemi ilk defa büyük ölçekte Amerika’da 1946 yılında içme suyunun arıtımında kullanılmıştır (Stuart, 1946). 19. Yüzyılın sonlarına doğru ise elektrokoagülasyon, İngiltere’nin başkenti Londra’da birkaç büyük ölçekli arıtım tesisinde denenmiştir (Matteson vd., 1995).

Görüldüğü üzere, elektrokimyasal süreçlerin arıtım işlemi için kullanılması bilinen bir yöntemdir. Buna karşın, kurulum ve işletme maliyetinin yüksek olması ve özellikle elektriğin birim fiyatının pahalı olması gibi sebeplerden ötürü geniş kullanım alanı bulamamış ve farklı yöntemler arıtımda yer almaya başlamıştır (Hakizimana, vd., 2017; Holt, Barton ve Mitchell, 2005; Vik vd., 1984). Gelişen endüstri ve artan nüfus ile birlikte daha kompleks atık suların ortaya çıkması ve arıtımının zorlaşması, daha hızlı, daha verimli ve daha çevreci arıtım yöntemlerine yönelmeye yol açmıştır. Elektrokimyasal süreçler, sahip olduğu üstünlükler nedeniyle tekrar önem kazanmış ve son dönemlerde çalışılan konular arasında yer almıştır (Chen, 2004).

3.1. Elektrokimyasal Süreçler ve Esasları

Elektrokimya, elektrik enerjisi ile gerçekleşen kimyasal olayları inceleyen bir bilim dalıdır. Elektrokimyasal yasalar endüstride birçok uygulama alanı bulduğu gibi elektrokimyanın arıtıma uygulanması sonucunda düşük maliyetli, çok yönlü ve çevreye uyumlu bir arıtım gerçekleştirilebilmektedir (Yalçın ve Gürü, 2010; Şen, 2007, s 49).

Çevreye uyum: Elektrokimyasal yöntemlerde ana reaktif elektrotlardır. Yöntem, genelde kimyasal madde ilavesi gerektirmemektedir. Ayrıca tepkimeler sonucunda, ikincil ürünlerin oluşumu gözlenmemektedir.

Enerji verimliliği: Düşük elektrik akım dağılımları, gerilim düşmeleri ve yan tepkimelerden dolayı oluşan güç kayıplarını en aza indirmek için uygun elektrot ve hücre tasarımları yapılarak enerji verimleri artırılabilir.

Çok yönlülük: Elektrokimyasal yöntemler birçok çevre kirlilik unsurunun gideriminde doğrudan veya dolaylı olarak kullanılabilir. İşlem sonrasında istenmeyen kirlilik unsurları, çok düşük derişimlere kadar düşürülebilir.

Otomasyona uyum: Elektrokimyasal yöntemlerde akım, gerilim gibi önemli parametreler kontrol altına alınabildiği için veri elde edebilmesi kolaylaşmakta ve süreç kontrol edilebilir.

Elektrokimyasal süreçler incelendiğinde başta elektrokoagülasyon (elektropıhtılaşıma), elektrooksidasyon (elektroyükseltgeme) ve elektroflotasyon (elektroyüzdürme) olmak üzere 3 farklı yöntem ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada elektropıhtılaşıma ve elektroyükseltgeme süreçlerine yer verilmiştir.

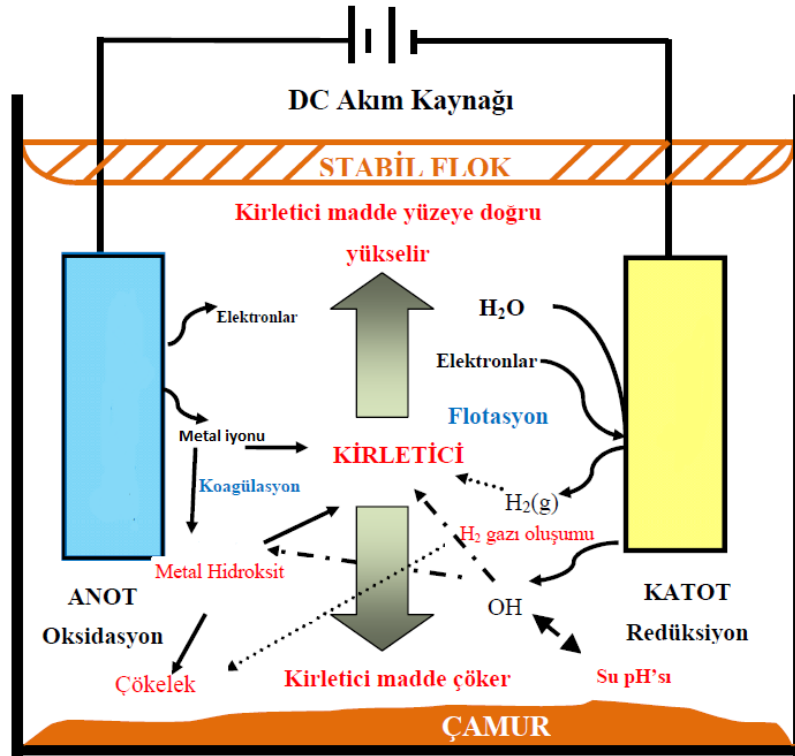
3.2. Elektrokoagülasyon (Elektropıhtılaşıma) Süreci ve Kuramı

Elektropıhtılaşıma; çözünebilen ve pıhtılaştırıcı özelliğe sahip metal bir (genellikle Fe ya da Al) elektrota elektrik akımı uygulanması ile gerçekleştirilen bir elektrokimyasal arıtım yöntemidir. Çoğunlukla anot ve katot adı verilen elektrotlara güç kaynağı yardımıyla doğru akım (DC) verilmesiyle uygulanır (Şık, 2015, s 41). Elektropıhtılaşıma sürecin; koagülasyon (pıhtılaşıma), adsorbsiyon (soğurma), çöktürme ve flotasyon

(yüzdürme) mekanizmalarının biri veya birkaçına dayanmaktadır. Elektropihtılaştırma aşamaları şöyle sıralanabilir (Ulu Kaç, 2016, s 40-42)

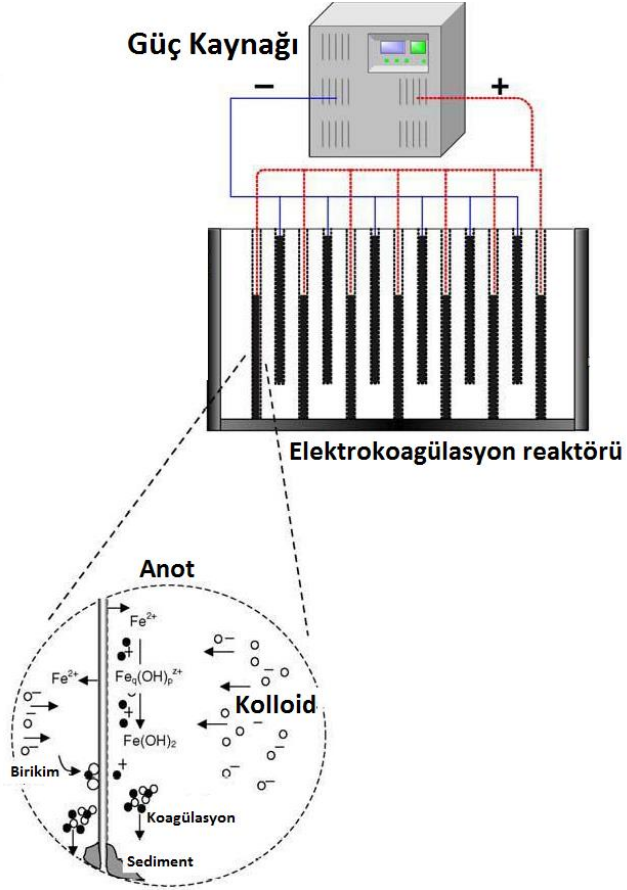
- 1) Elektrik akımını uygulanmasıyla anodun metal iyonu şeklinde çözünmesi
- 2) Metal iyonlarının, Van der Waals ve diğer etkileşimlerle zıt yüklü taneciklere bağlanması ve sonucunda pihtılaşması
- c) Pihtılaşmaya başlayan parçacıkların birleşerek daha büyük parçacıklar olan yumaklara dönüşmesi ve suyun kaldırma kuvveti ve oluşan gaz molekülleri yardımıyla bu yumakların yüzeye çıkarak bir tabaka oluşturması

Yukarıda bahsedilen aşamalar Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de ayrıntılı şekilde gösterilmektedir.



Şekil 3.1: Elektropihtılaştırmada gerçekleşen etkileşimler

Kaynak: (Holt vd, 2002, s 216)



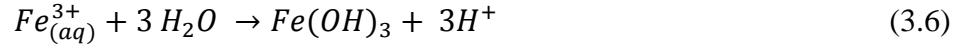
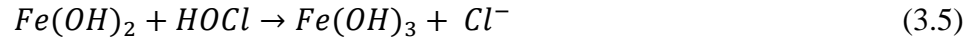
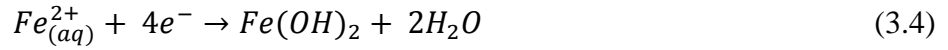
Şekil 3.2: *Elektrokoagülasyon işlemi*

Kaynak: (Klamklang, 2007, s 18)

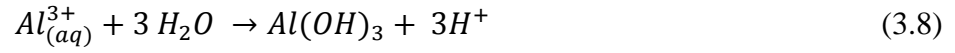
Anotta gerçekleşen karşılıklı tepkimeler (3.1) ve (3.2)'de gösterilmektedir.



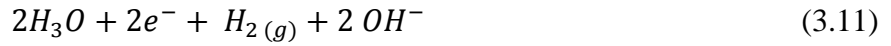
Demir elektrotlar durumunda; demir anodun iyon haline geçerek çözeltilmeye verilmesi (3.3), çözünen demirin serbest halde bulunan hidroksiller bağlanarak demir (II) hidroksit oluşturması (3.4), ortamda klor varlığında klorun yükseltgenmesi sonucu yan ürün olarak oluşan hipokloröz asit ile tepkimeye girerek çökmesiyle önemli bir bileşik olan demir (III) hidroksit oluşur (3.5). Eğer ortamda klorlu bir bileşik yok ise, çözeltilmeye geçen Fe^{3+} iyonları su ile birleşerek yine demir (III) hidroksit meydana gelebilir (3.6).



Aluminyum elektrot kullanıldığında, Al^{3+} iyonları halinde çözeltiliye salınır (3.7) ve ortamda bulunan hidroksil radikalleri ile birleşerek aluminyum hidroksit oluşturur (3.8). Bu bileşik pıhtılaşmak için yumakların oluşması adına önemlidir.



Katotta ise durum biraz farklıdır ve normalde (3.9) tepkimesi gerçekleşirken, asidik çözeltide (3.10) ve bazik çözeltide (3.11) tepkimesi gerçekleşir.



Her yöntemde olduğu gibi elektropıhtılaşma sürecinin de kendine özgü üstünlük ve olumsuzlukları bulunmaktadır ve bunlar Çizelge 3.1’de detaylı olarak gösterilmektedir (Moussa, vd., 2017; Holt vd., 2005; Mollah vd., 2005; Mollah vd., 2001).

Çizelge 3.1: Elektropihtılaştırmanın üstünlükleri ve olumsuzlukları

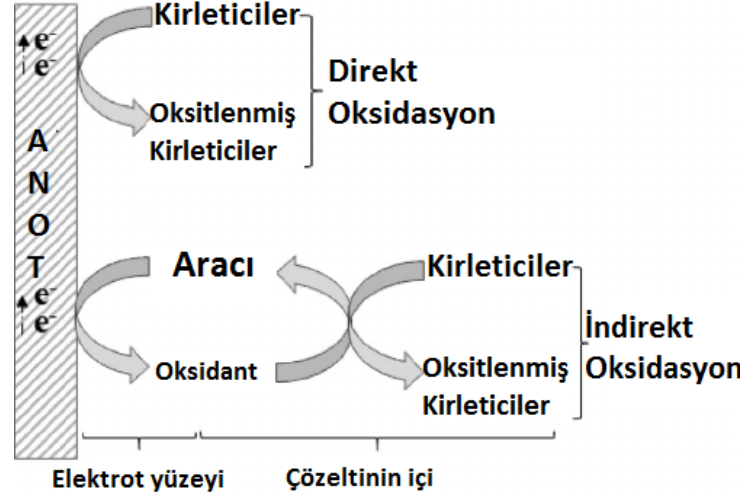
Üstünlükleri	Olumsuzlukları
Kimyasal madde eklemesi olmadığı ya da çok az olduğu için; kimyasal madde açısından yüksek derişimli ikincil atıklar çıkmamaktadır.	Anot zamanla çözeltiye geçerek tükenir ve yenilenmesi gerekir.
Elektropihtılaştırma yöntemi sırasında açığa çıkan gaz baloncukları kirlilik unsurlarını yüzeye taşımakta ve çözeltilerden ayrıştırılmasını kolaylaştırmaktadır.	Elektropihtılaştırma sürecinde, katot etkinliğini kaybeder ve verim düşebilir.
Kullanılan donanımın basitliği sebebiyle kolayca uygulanabilir ve otomasyona uygundur.	Elektrik üretiminin az veya pahalı olduğu alanlarda, işletme maliyeti yüksek olabilir
Arıtım sonucu daha berrak, kokusuz su oluşmaktadır.	
Oluşan yumaklar daha büyük ve kararlıdır ve bu sebeple süzmeyle kolayca çözeltilerden ayrıştırılabilirler.	
Kimyasal pihtılaşmaya oranla daha az hacimde çamur çıkar ve zehirli etkisi yoktur.	
Küçük koloidal parçacıklar bile hızlı ve etkili bir biçimde çöktürülebilir.	

3.3. Elektrooksidasyon (Elektroyükseltgeme) Süreci ve Kuramı

Çözünmeyen metal/metal oksit elektrotlar (Pt/Ti, Ti/Ru/Ir, Ni/Ti/Ga, çelik gibi) kullanılarak kirleticilerin yükseltgenerek arıtımın sağlandığı yöntem elektroyükseltgeme olarak adlandırılır (Özden, 2016, s 16)

Elektroyükseltgeme doğrudan (direkt) ve dolaylı (indirekt) elektroliz olmak üzere iki başlık altında incelenebilir. Doğrudan elektroyükseltgeme, kirleticilerin doğrudan anot ile temas ederek yükseltgenir. Doğrudan elektroyükseltgeme hızı; difüzyon hızından, tepkime kinetiğinden ve elektrotun katalitik aktivitesindeki düşüşten etkilenir. Dolaylı elektroyükseltgeme ise, elektrotta açığa çıkan yükseltgeyici kirleticileri

parçalaması yoluyla yürütülür (Radjenovic ve Sedlak, 2015). Direk ve indirekt oksidasyonlar Şekil 3.3’de detaylı bir biçimde gösterilmektedir.

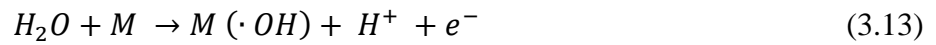


Şekil 3.3: Doğrudan (direkt) ve Dolaylı (İndirekt) Yükseltgeme
Kaynak: (Fernandes, vd., 2015, s 193)

Elektroyükseltgeme’de gerçekleşen tepkimeler aşağıda ayrıntılı bir şekilde verilmiştir; (Sarkka, 2013, s 23-25; Kapalka, Foti ve Comninellis, 2010)

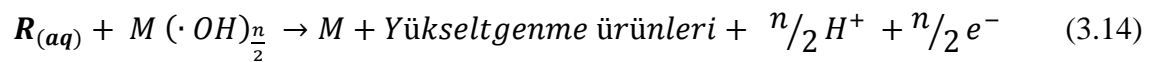


Asidik ortamda su, elektron vererek yükseltgen özelliğe sahip hidroksil radikalleri soğurmasını sağlayabilir. (3.13)



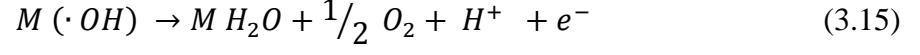
M: Elektrot yüzeyi

R olarak gösterilen organik kirlilik unsurları (3.14)’de gösterildiği gibi yükseltgenirken, radikaller anot yüzeyinde fiziksel olarak soğurulur.



n: Organik bileşiklerin yükseltgenmesine neden olan elektron sayısı

Üretilen hidroksil radikallerinin organik bileşiklerle tepkimesi (3.14), yan tepkime olan radikallerin oksijene yük aktarımı (3.15) ile eş zamanlı gerçekleşir ve bu iki tepkime rekabet içindedir.



Bunun yanı sıra, Cl^- gibi yükseltgenlerin varlığı dolaylı yükseltgeme de gerçekleşebilmekte ve bu verimi etkileyebilmektedir.

4. KONU İLE İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Li ve arkadaşları (Li vd., 2011), elektropihtılaşıma yöntemi kullanarak sızıntı suyundan amonyak azotu ve kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) giderimini çalışmışlardır. 4,96 mA/cm² akım yoğunluğunda, asidik pH'da, 2319 mg/L Cl⁻ varlığında, demir elektrotlarla 90 dakikalık deney sonucunda %49,8 KOİ giderimi elde edilirken, en yüksek %38,6 amonyak azotu giderimi elde etmişlerdir. Yürütülen deneyler sonucunda elektropihtılaşıma yönteminin sızıntı suyunun ön arıtımı için kullanılabileceği belirtmişlerdir.

İlhan ve arkadaşları (İlhan vd., 2008), alüminyum ve demir olmak üzere iki farklı elektrotlar kullanarak, elektropihtılaşıma yöntemi ile sızıntı atıksuyunun arıtımını gerçekleştirmişlerdir. 45cm² anot alanına sahip plaka elektrotlar ile gerçekleştirilen deneylerde; 30 dakikalık arıtım sonunda alüminyum elektrotlar ile %56, demir elektrotlar kullanarak ise %35 KOİ giderimi elde etmişlerdir.

Elektropihtılaşıma yöntemi kullanılarak sızıntı suyu arıtımı üzerine yapılan bir diğer çalışmada **Bouhezila ve arkadaşları (Bouhezila vd, 2011)** Paralel plaka demir ve alüminyum elektrotlar kullanılmıştır. Alüminyum elektrot kullanılarak; %70 KOİ giderimi, %24 toplam azot giderimi, %56 renk giderimi, %60 bulanıklık giderimi elde edilirken demir elektrotta ise; %68 KOİ giderimi, %15 toplam azot giderimi, %28 renk giderimi, %16 bulanıklık giderimi elde edilmiştir. Elektrik enerjisi tüketimi ve yöntem maliyeti sırasıyla alüminyum elektrot için; 0,022 (kWh/L) ve 0,54 (US\$/m³) iken demir elektrot için; 0,019 (kWh/L) ve 0,47 (US\$/m³)'tir.

Şen (2007), yüksek lisans tezinde İzaydaş Katı Depolama Sahası'ndan alınan sızıntı suyunun elektropihtılaşıma ve elektroyükseltgeme yöntemi ile arıtımını çalışmıştır. Paralel plaka ve tek kutuplu paralel elektrotlu pilot tesis çalışmalarında elektropihtılaşıma ve elektroyükseltgeme süreçleri ile 30 dakika sonunda %18-56 arası Kimyasal Oksijen İhtiyacı giderimi elde etmiştir. Jet-loop reaktörüyle biyolojik arıtım sonrası çıkan sızıntı suyu numunesinin alüminyum plakalarla elektropihtılaşımasında 30. dakika sonunda %49 Kimyasal Oksijen İhtiyacı ve %53 Toplam Organik Karbon giderimi gözlemiştir.

Orkun (2007), yüksek lisans tezinde alüminyum elektrotlarla $30\text{mA}/\text{cm}^2$ akım yoğunluğunda 120 dakikada %70 Kimyasal Oksijen İhtiyacı giderilmiştir. Aynı akım yoğunluğunda demir elektrotlarla yapılan çalışmada ise 180 dakika sonunda %65,85 giderime ulaşılmıştır.

İlhan (2006), yüksek lisans tezinde paralel plaka reaktörle alüminyum elektrotlarla 12,56 W %45,5 Kimyasal Oksijen İhtiyacı giderimi gözlenirken, aynı akımda aynı deneysel şartlarda demir elektrotlarla %34,1 KOİ giderimi elde edilmiştir. 39,76 W olarak değiştirildiğinde Kimyasal Oksijen İhtiyacı giderimleri alüminyum elektrotlu reaktör için %59,1, demir elektrotlu reaktör için %42,3 olmuştur.

Elektroyükseltgeme ile sızıntı suyu giderimi çalışmalarında **Urtiega ve arkadaşları (Urtiga vd., 2011)** bor katkılı elmas anot ile yaptıkları deneyler sonucunda oluşan klorlu bileşiklerincelemiştir. pH (5 - 8), akım (6,3 - 8,4 A), klor ilavesi (2500 – 4500 mg/L) ile. %84 renk giderimi elde ederken, %51 KOİ giderimi ve %32 amonyak giderimine ulaşmışlardır.

Turro ve arkadaşları (Turro vd., 2011) Ti/IrO₂-RuO₂ anot ile HClO₄ varlığında, 2960 mg/L KOİ içeriğine sahip sızıntı suyunu arıtmaya çalışmışlardır. Parametre olarak; süre, (240 dakikaya kadar), sıcaklık (30°C – 60°C – 80 °C), akım yoğunluğu (8 – 16 – 32 mA/cm²), başlangıç pH'ı (0,25 – 3 – 5 - 6), HClO₄ miktarı (0,25 M ve 1 M) ve destek elektrolit ilavesi denemişlerdir. %90 KOİ giderimi elde ederken, rengi tamamen gidermişlerdir. Enerji tüketimleri ise 35kWh/kg olmuştur.

Panizza ve Martinez-Huitle (2013), sızıntı suyunda elektroyükseltgeme yönteminde elektrot malzemesinin etkisini araştırmışlardır. Elektrot malzemesi olarak; bor katkılı elmas, PbO₂ ve TiRuSnO₂ anot kullanmışlardır. 780 mg/dm³ KOİ ve 266 mg/dm³ NH₄⁺-N sahip suda, 420 dm³/saat akış hızında 2 A'da çalışmışlardır. TiRuSnO₂ anotta, %35 KOİ, %52 renk giderimi ve %65 azot giderimi elde ederken, PbO₂ ile renk ve azot giderimi tümüyle sağlamış fakat 115 mg/dm³ KOİ kalmıştır. Bor katkılı elmas elektrot ile daha başarılı sonuçlar elde etmişlerdir.

Zhang ve arkadaşları (Zhang vd., 2011) sızıntı suyunun elektroyükseltgeme ile arıtımının deney tasarımı ve Response Surface Metod kullanarak incelemiştir. Anot olarak titanyum kaplı rutheniyum dioksit (RuO₂) ve iridyum dioksit (IrO₂) kullanmışlardır. Parametre olarak akım yoğunluğu, elektrotlar arası uzaklık ve tepkime

süresi incelenmiştir. 2470 mg/L KOİ derişimine sahip sızıntı suyunun 90 dakika sonunda, 68 mA/cm² akım yoğunluğunda ve 2,2 cm elektrot aralığında %66,2 verim ile giderimi sağlanmıştır.

5. MATERYAL ve YÖNTEM

5.1. Sızıntı Suyu ve Analiz

Deneyel çalışmalarda kullanılan katı atık düzenli depolama sahası sızıntı suyu Kocaeli İZAYDAŞ katı atık düzenli depolama sahasından 2012 yılı Kasım ayı içerisinde temin edilmiş ve buzdolabında +4°C’de muhafaza edilmiştir. Temin edilen atık suyun özellikleri Çizelge 5.1’de görülmektedir. Sızıntı suyunun ağır metal derişimlerinin belirlenmesinde ICP spektrofotometresi (Inductively Coupled Plasma-Optic Emission Spectrophotometric) (Varian 720 ES) kullanılmıştır.

Çizelge 5.1: Düzenli depolama sahasında elde edilen sızıntı suyunun özellikleri

Özellikler	Sızıntı Suyu Değerleri
Kimyasal Oksijen İhtiyacı(KOİ)	4100 mg/L
pH	9
İletkenlik	19 mS/cm
Kadmiyum (Cd)	0,0047 mg/L
Krom (Cr)	0,4408mg/L
Bakır (Cu)	0,2123mg/L
Demir (Fe)	2,656mg/L
Kurşun (Pb)	0,0413mg/L
Çinko (Zn)	0,1614mg/L

Çalışmada atıksuyun organik kirlilik yükü Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) analizi ile belirlenmiş ve arıtım verimi KOİ giderimi üzerinden hesaplanmıştır. pH ayarı gerektiğinde 0,1 N H₂SO₄ ve 0,1 N NaOH ile yapılmıştır. Deneyler sırasında pH ve iletkenlik değerler belirli zaman aralıklarında izlenmiş fakat kontrol edilmemiştir.

Deneyler yürütülürken, belirli aralıklarla alınan örnekler Mavi Bant filtre kağıdı ile süzölmüştür. Alınan örnekler, KOİ analizi Standart Metot Kapalı Reflux Yöntemine göre yapılmıştır. Bu yöntemde, kuvvetli asidik ve yüksek sıcaklık şartlarında, katalizörlerin de varlığında sudaki organik kirletici maddenin yükseltgenmesi için harcanan oksidant miktarı belirlenmektedir. Örnekler gerekli kimyasal maddeler ilave

edildikten sonra, Lavibond RD125 marka bozundurucuda 150°C’de 2 saat bekletilmekte ve soğutulduktan sonra Demir (II) Amonyum Sülfat $[\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2]$ (DAS) ile titre edilerek KOİ belirlenmektedir. KOİ (mg/L) derişimi eşitlik (5.1) kullanılarak belirlenmiş ve eşitlik (5.2) kullanılarak % giderim değerleri ile hesaplanmıştır.

$$KOİ = \frac{8000 \times C \times (V_1 - V_2)}{V_o} \quad (5.1)$$

C: Demir Amonyum Sülfatın standardizasyon değeri
V₁: Kör için harcanan DAS hacmi (mL)
V₂: Örneğin titrasyonu için harcanan DAS hacmi (mL)
V_o: Analiz edilen numune hacmi (mL)

$$\%Giderim = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100 \quad (5.2)$$

C₀: Başlangıç derişimi
C_t: t anındaki derişimi

Bütün analizler standart sapmayı en aza indirmek için iki kere gerçekleştirilmiştir. Gerekli görüldüğü takdirde deney tekrar edilmiştir.

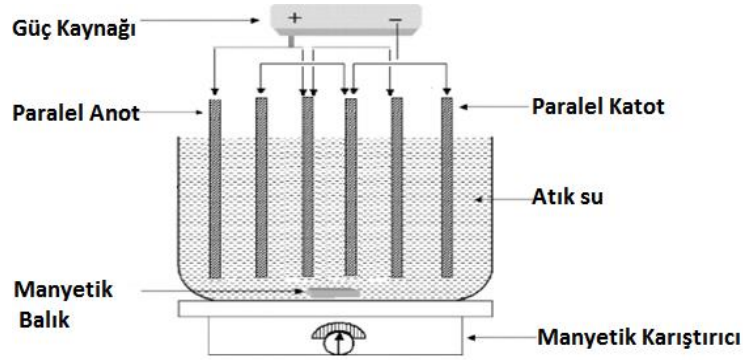
Çalışmada deneyler sırasında tüketilen elektrik enerjisi eşitlik (5.3) kullanılarak hesaplanmıştır

$$E_c = \frac{V \times I \times T}{V_w} \quad (5.3)$$

E_c: Elektrik tüketimi (kWh/m³)
V: Gerilim (V)
I: Akım (A)
T: Deney süresi (saat)
V_w: Arıtılan atıksuyun hacmi (m³)

5.2. Paralel Plakalı Alüminyum Elektrotlar Kullanılarak Elektropihtılaştırma Yöntemi ile Sızıntı Suyunun Arıtıldığı Deneysel Düzenek

Sızıntı suyunun elektropihtılaştırma yöntemi ile arıtımında 4 cm x 4 cm boyutlarında paralel plakalı alüminyum elektrotlar tek kutuplu düzende kullanılmıştır. Plakalar arası mesafenin 1 cm olduğu elektrot demetinde sırasıyla 3 plaka anot, 3 plaka katot olacak şekilde bağlantılar yapılmıştır. Reaktörün toplam aktif anot alanı 96 cm²'dir. Deneysel çalışmada kullanılan Reaktör Şekil 5.1'de ve deneysel düzeneğin fotoğrafı Şekil 5.2'de görülmektedir.



Şekil 5.1: Elektrokimyasal hücre



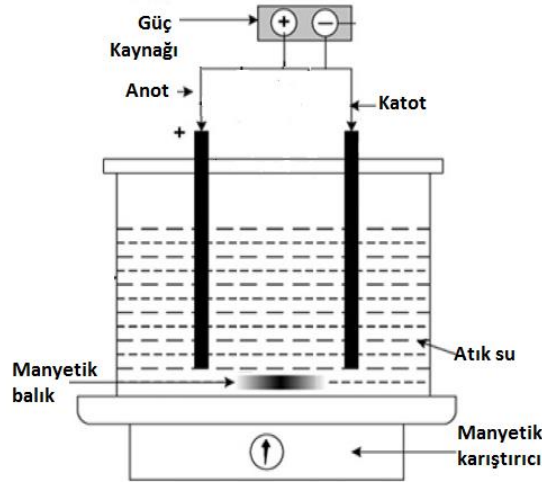
Şekil 5.2: Tek kutuplu Elektropihtılaştırma düzeneği

Elektropihtılaştırma ile gerçekleştirilen deneylerde 400 mL konulduktan sonra, gerekli olduğu durumlarda pH ayarlanmış, elektrot demeti cam reaktör içerisine tabandan 2 cm yükseklikte olacak şekilde yerleştirilmiş ve anot ve katot güç kaynağına (Statron

2257) bağlanmıştır. Elektrokimyasal arıtım düzeneği bir manyetik karıştırıcı üzerine konularak pıhtılaşmanın etkin bir şekilde gerçekleştirilmesi için atıksu manyetik balık ile 100 rpm hızında karıştırılmıştır. Belirli aralıklarla elektrokimyasal hücreden örnekler alınmış ve deney süresince iletkenlik, pH, sıcaklık ve gerilim değerleri takip edilmiştir. Alınan örneklerde süzildükten sonra KOİ analizleri yapılmıştır.

5.3. Elektroyükseltgeme Yöntemi ile Sızıntı Suyunun Arıtıldığı Deneysel Düzenek

Elektroyükseltgeme çalışmasında, Magneto Special Anodes BV (Hollanda / Schiedam)'dan temin edilen iki farklı elektrot kullanılmıştır. Elektrotlardan bir tanesi, 100 x 50 x 2 mm boyutlarında iki tarafı Bor Katkılı Elmas (Boron-Doped Diamond /BDD) Niobium anot diğeri ise, aynı boyutlarda iki tarafı Platin (Pt) kaplı Titanyum (Ti) anottur. Çalışmada, her iki elektrotun etkinliğinin karşılaştırılabilmesi için, aktif anot yüzey alanı 100 cm²'dir. Çalışmalarda her iki anot ile birlikte, katot olarak aynı boyutlarda demir kullanılmıştır. Elektroyükseltgeme deneyleri için kullanılan deney düzeneği Şekil 5.3'te gösterilmiştir



Şekil 5.3: Elektroyükseltgeme reaktör düzeneği

Elektroyükseltgeme çalışmalarında, 500 mL atıksu cam reaktöre konulmuş ve pH ayarı için 0,1 N H₂SO₄ ve 0,1 N NaOH kullanılmıştır. Cam reaktör manyetik karıştırıcının üstüne yerleştirilerek 100 rpm'de karıştırılma yapılmıştır. Güç kaynağına (Statron 2257) anot ve katot bağlantıları yapıldıktan sonra arıtım başlamıştır.

içerisine tabandan 2 cm yükseklikte olacak şekilde yerleştirilmiş, anot ve katot güç kaynağına (Statron 2257) bağlanmıştır. Anot olarak kullanılan delikli demir plaklar aynı zamanda mekanik karıştırıcıya bağlanmıştır. Böylece demir plaklar anot olarak görev yaparken bir yandan da çözünen iyonların çözelti içinde homojen olarak dağılımı sağlanmış, yumak oluşumu iyileştirmiştir. İşlem 60 dakika sürdürülmüş, anot 50rpm sabit bir hızında karıştırılmıştır. Deneyle süresince alınan örneklerde Bölüm 5.1’de anlatıldığı şekilde KOİ analizi yapılmıştır.

5.4.2 Cevap Yüzey Yöntemi (Response Surface Method)

Deneylelerin planlanma aşamasında önce metodun ve operatörünün etkisinin belirlenmesi amacıyla tekrarlanabilirlik testi (Gage R&R) yapılmıştır. Tekrarlanabilirlik testi aşamasında, farklı parametreleri içeren 10 adet reçete oluşturulmuş deney planlaması yapılmış, planlanan deneyleler ve tekrarlanabilirlik açısından 2 farklı operatör tarafından yapılmıştır. Her bir operatör deneyleleri 2’şer tekrar olarak yürütmüş ve her bir operatör için 20, toplamda 40 ayrı deney gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları ANOVA testi Gage R&R ile incelenmiştir. Tekrarlanabilirlik deneyleleriyle ilgili veriler Bölüm 6.3.1’de verilmiştir. Deneylelere de pH (3, 5, 7), akım yoğunluğu (30 mA/cm², 40 mA/cm², 50 mA/cm²) ve anyonik polielektrolit miktarı (0,5 mg/L, 1 mg/L, 1,5 mg/L) olmak üzere 3 farklı değişken ve 3’er değer üzerinden Deney Tasarımı gerçekleştirilmiştir. Deney verilerinin değerlendirilmesi aşamasında KOİ giderim yüzdesi çıktı olarak alınmış ve belirlenen parametrelerin giderim yüzdesine etkisi belirlenmiştir. Sonuçlar, Cevap Yüzey Metodu ile değerlendirilmiş ve parametrelerin birbirleri ile olan ilişkisi incelenmiştir. Verilen değerlendirilmesinde MiniTab 14.0 programı kullanılmıştır.

6. DENEYSEL SONUÇLAR

6.1. Paralel Plakalı Alüminyum Elektrotlar Kullanılarak Elektropihtılaştırma ile Sızıntı Suyunun Arıtımı

6.1.1. Başlangıç pH'nın etkisinin belirlenmesi

Başlangıç pH'ı elektropihtılaştırma sürecinde önemli bir yere sahiptir. Başlangıç pH'nın etkisi; 3, 5, 7 ve 9 pH değerleri kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar Çizelge 6.1 Çizelge 6.2, Çizelge 6.3 ve Çizelge 6.4'te görülmektedir. Deneyler sırasında atıksuyun başlangıç pH değeri ayarlandıktan sonra deney boyunca atıksudaki pH değişimi izlenmiş, fakat kontrol edilmemiştir. Elektropihtılaştırma süresince katotta hidroksil iyonları çıkmakta ve H⁺ iyonları ise diğer aktif bileşiklerle bağlandığı için pH değeri deney süresince artış göstermektedir (Chen X., Chen P. Ve Yue, 2000) Deneysel çalışmalar sonucunda 4100 mg/L başlangıç KOİ derişimine sahip atıksu 60 dakikalık elektropihtılaştırma sonrasında pH 3, 5, 7, 9 değerleri için sırasıyla 2208, 2125, 2374 ve 2456 mg/L değerlerine %46, %48, %42 ve %40 arıtım verimleri ile indirilmiştir. En iyi giderim pH 5'te elde edilmiştir ve çözelti başlangıç pH'ı daha asidik veya bazik oldukça giderim verimi düşmüştür. Süreç sırasında anottan çözünen Al³⁺ iyonları katotta oluşan OH⁻ iyonlarıyla birleşerek Al(OH)₃ yumakları oluşmaktadır ve bu bileşik sahip olduğu fazla yüzey alanıyla organik bileşiklere ve diğer kirlilik unsurlarıyla birleşerek çökelmektedir (Elabbas vd., 2016; Kobya, Can ve Bayramoğlu, 2003). Al(OH)₃ pH 4'ten sonra oluşmaktadır ve pH 6.5'tan sonra ise sudaki çözünürlüğü azalmaktadır (Moussa vd., 2017; Holt vd., 2002). Ayrıca çözeltide pH'ın artmasıyla beraber bazik ortamda Al(OH)₄⁻ bileşeni daha baskın olarak görülmekte ve bu bileşiği kirlilik unsurlarıyla birleşerek çökelme oluşturması çok düşüktür (Holt vd., 2002; Wang, Chou ve Kuo, 2009). Başlangıç pH ile KOİ derişiminin değişimi Şekil 6.1 ve pH ile % giderime ilişkisi Şekil 6.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.1: pH 3 için elde edilen deneysel sonuçlar.

(Akım Yoğunluğu: 30mA/cm² (3,2 A), Destek elektrolit:Yok)

Zaman (dk)	pH	İletkenlik (mS/cm)	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	2,98	21,6	9,1	3	4100	0	0
15	5,92	25,2	21	2,2	2263	44,80	4,4
30	6,5	24,2	24	2,2	2236	45,47	13,2
45	7,55	25,5	25,3	2,1	2236	45,47	25,8
60	8,05	28,2	27	2	2208	46,15	41,8

Çizelge 6.2: pH 5 için elde edilen deneysel sonuçlar.

(Akım Yoğunluğu: 30mA/cm² (3,2 A), Destek elektrolit:Yok)

Zaman (dk)	pH	İletkenlik (mS/cm)	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	5,15	22,1	7	4,5	4100	0	0
15	6,16	20,8	14	2,5	2070	49,51	5,0
30	7,11	21,4	18,1	2,6	2153	47,49	15,4
45	7,46	20,4	21,3	2,6	2125	48,17	31,0
60	8,58	20,4	23,5	2,6	2125	48,17	51,8

Çizelge 6.3: pH 7 için elde edilen deneysel sonuçlar.

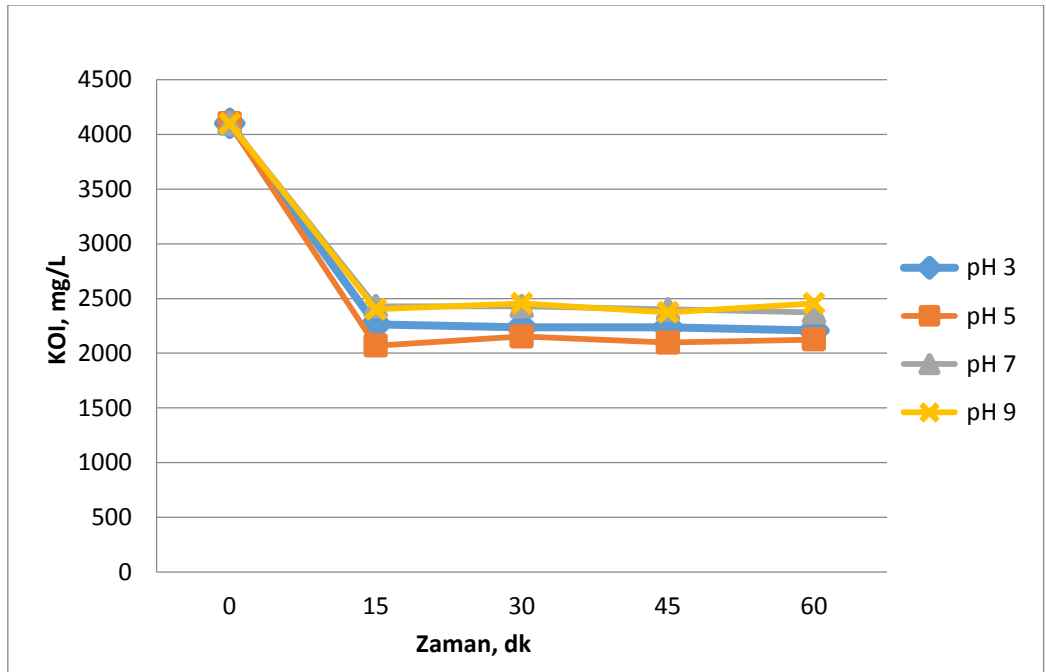
(Akım Yoğunluğu: 30mA/cm² (3,2 A), Destek elektrolit:Yok)

Zaman (dk)	pH	İletkenlik (mS/cm)	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	7,06	15,02	5,9	3,8	4100	0	0
15	7,96	17	18	2,7	2429	40,76	5,4
30	8,16	19,3	22	2,6	2429	40,76	15,8
45	8,28	18,2	25,1	2,6	2401	41,43	31,4
60	8,45	16,2	26,4	2,7	2374	42,11	48,8

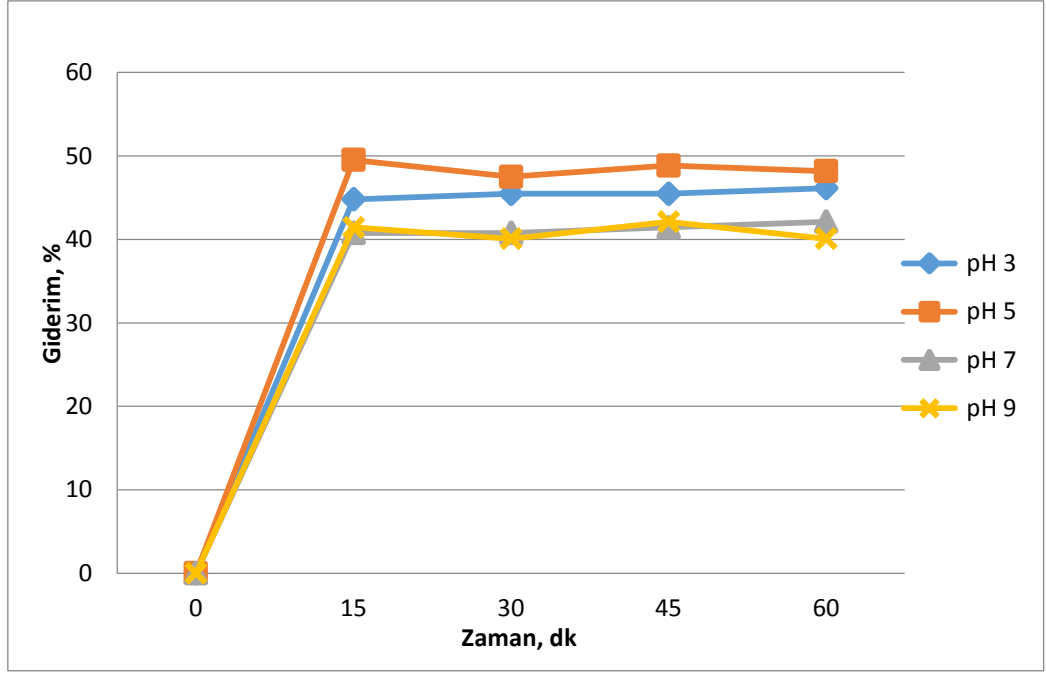
Çizelge 6.4: pH 9 için elde edilen deneysel sonuçlar.

(Akım Yoğunluğu: 30mA/cm^2 (3,2 A), Destek elektrolit:Yok)

Zaman (dk)	pH	İletkenlik (mS/cm)	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	8,82	13,9	10	5,8	4100	0	0
15	9,32	21,2	21,2	5,1	2401	41,43	10,2
30	9,62	22,8	27,1	6,2	2456	40,09	35
45	9,58	20	29,1	6,4	2374	42,11	73,4
60	9,8	18,8	23,7	6,4	2456	40,09	124,6

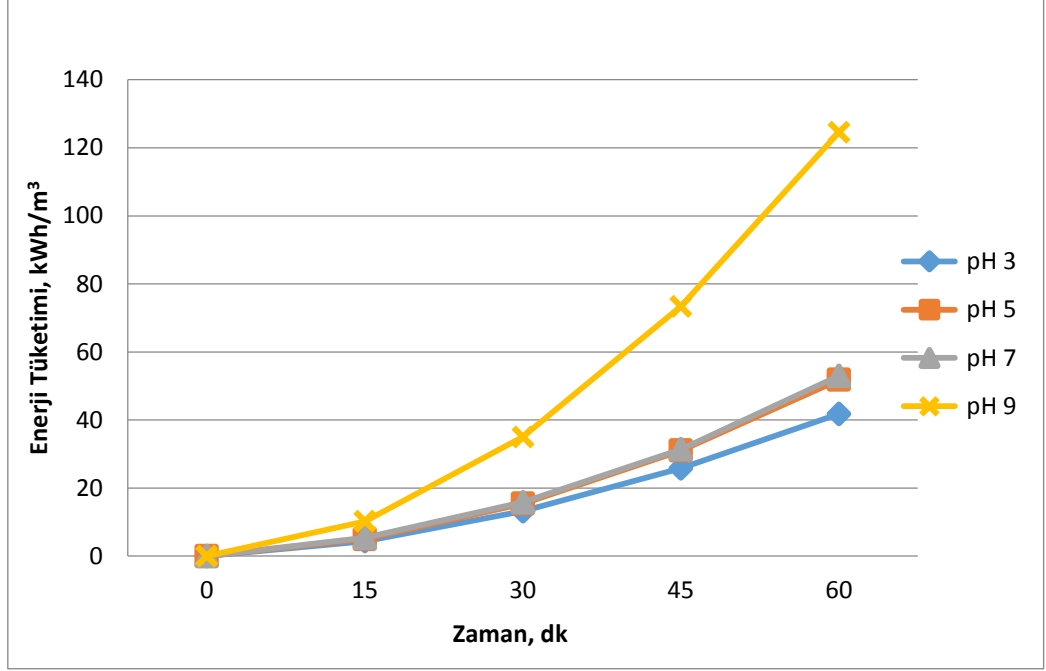


Şekil 6.1: Başlangıç pH'ın KOİ derişimine etkisi



Şekil 6.2: Başlangıç pH'nin KOİ giderimine etkisi

Başlangıç pH'nin enerji tüketimine etkisi incelendiğinde ise başlangıç pH'nin düşmesiyle birlikte enerji tüketiminin de azaldığı Şekil 6.3'ten de görülebilir. pH'ı düşürmek için eklenen bileşiklerin etkisiyle elektriksel iletkenlik artmış ve bu da enerji tüketimini düşürmüştür. Gerilimin arttığı ve sonuçta elektrik tüketimi yüksek pH'larda görülmüştür (Tezcan Un, Koparal ve Oğutveren, 2009). 60 dakika arıtım işlemi sonunda enerji tüketimi pH 3, 5, 7, 9 değerleri için sırasıyla 42, 52, 53, ve 125 kWh/m³ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.3: Başlangıç pH'in enerji tüketimine etkisi

6.1.2. Akım yoğunluğunun etkisinin belirlenmesi

Akım yoğunluğu elektropihtılaştırma sürecinde en önem parametrelerden biridir. pH 5'te gerçekleştirilen deneylerde akım yoğunluğunun KOİ giderimine etkisi 30, 45, 55, 65, 75 mA/cm² akım yoğunluklarında belirlenmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar, Çizelge 6.5, Çizelge 6.6, Çizelge 6.7, Çizelge 6.8, Çizelge 6.9'da görülmektedir ve Şekil 6.4 ve 6.5'te görülmektedir. Şekil 6.4 ve Şekil 6.5'ten de görülebileceği üzere artan akım yoğunluğu ile giderim verimi artmıştır. başlangıç KOİ derişimi 4100 mg/L 30 dakika sonunda 30, 45, 55, 65, 75 mA/cm² değerleri için sırasıyla %47, %47, %50, %52, %54 giderim verimleri ile 2153, 2180, 2070, 1960, 1904 mg/L derişimlerine düşmüştür. Elektropihtılaştırma çalışmalarında Faraday Yasası'na göre (6.1) artan akım ile ortama salınan alüminyum iyonunun miktarı artmakta ve sonuçta yumak oluşumu artarak pıhtılaştırma artmaktadır. Faraday Yasası;

$$m = \frac{I \times t \times M}{z \times F} \quad (6.1)$$

Şeklindedir. Burada “m” ortaya çıkan metal iyon kütlesi (g); “I” akım (A); “t” deney zamanı (dk/saat); “M” metalin atomik kütlesi (g/mol); “z” anodik çözünme sonucu çözeltiye salınan elektron miktarı (Aluminyum için z=3) ve “F” ise Faraday sabiti (96486 C eq⁻¹) dir.

Benzer çalışmalarda, Linarez-Hernandes ve arkadaşları (Linarez-Hernandes vd., 2010), demir elektrotla yürüttükleri çalışmalarında 200, 400, 600, 800 A/m² akım yoğunluğunu denemiş olup akım yoğunluğu arttıkça KOİ gideriminin de arttığını gözlemişlerdir. Aynı şekilde Khandegar ve Saroha (Khandegar and Saroha, 2012), 0,0625, 0,125, 0,1875 A/m² akım yoğunluklarında alüminyum -alüminyum, alüminyum-demir ve demir-demir elektrot kombinasyonlarını kullanarak, her bir kombinasyon için akım yoğunluğu arttıkça KOİ gideriminin arttığı sonucunu elde etmişlerdir.

Çizelge 6.5: 30 mA/cm² akım yoğunluğunda (3,2A) elde edilen deneysel çalışmalar. (pH: 5, Destek elektrolit:yok)

Zaman (dk)	pH	İletkenlik (mS/cm)	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	5,15	22,1	7	4,5	4100	0	0
15	6,16	20,8	14	2,5	2070	49,51	5,0
30	7,11	21,4	18,1	2,6	2153	47,49	15,4
45	7,46	20,4	21,3	2,6	2125	48,17	31,0
60	8,58	20,4	23,5	2,6	2125	48,17	51,8

Çizelge 6.6: 45 mA/cm^2 akım yoğunluğunda (4,9A) elde edilen deneysel çalışmalar.
(pH: 5, Destek elektrolit:yok)

Zaman (dk)	pH	İletkenlik (mS/cm)	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	4,92	18,3	10,5	4,3	4100	0	0
15	5,62	19,2	14,3	3,2	2153	47,49268	9,8
30	6,81	21,5	22	3	2180	46,81951	28,2
45	7,71	19,7	26,4	3,1	2180	46,81951	56,7
60	8,32	22,5	29,2	3	2153	47,49268	93,4

Çizelge 6.7: 55 mA/cm^2 akım yoğunluğunda (5,9A) elde edilen deneysel çalışmalar.
(pH: 5, Destek elektrolit:yok)

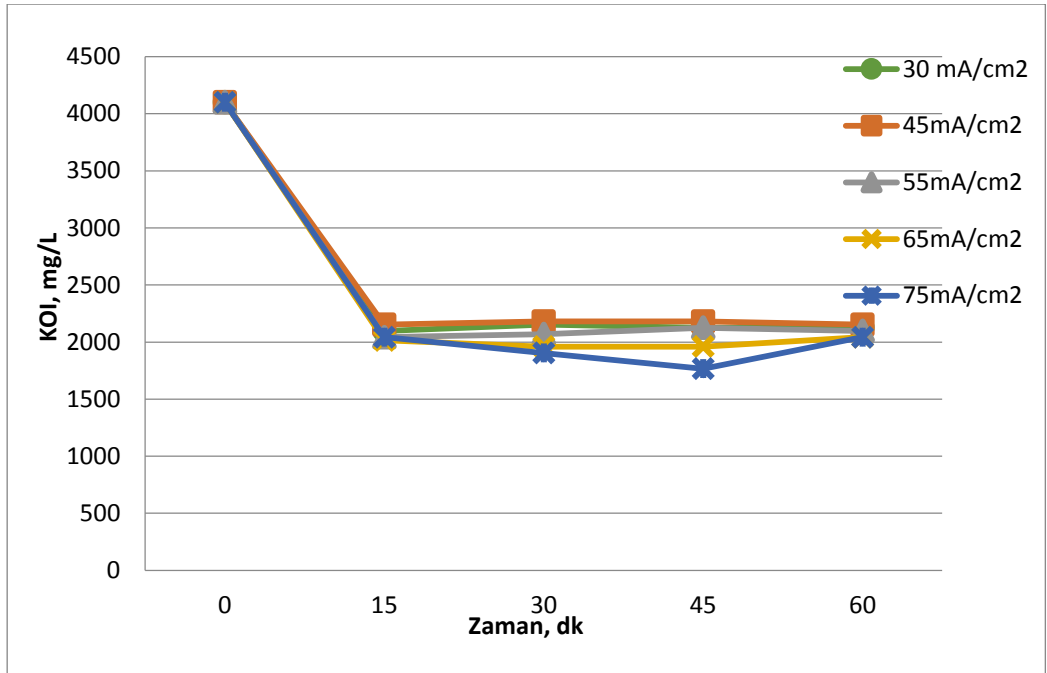
Zaman (dk)	pH	İletkenlik (mS/cm)	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	4,9	20,2	9,6	4	4100	0	0
15	6,86	19,5	20,8	3,5	2042	50,18	12,9
30	8,57	20,1	26,6	3,5	2070	49,51	38,7
45	8,67	21,5	26,5	3,5	2125	48,17	77,4
60	8,65	21,2	30,1	3,5	2098	48,84	129,0

Çizelge 6.8: 65 mA/cm^2 akım yoğunluğunda (7,0A) elde edilen deneysel çalışmalar.
(pH: 5, Destek elektrolit:yok)

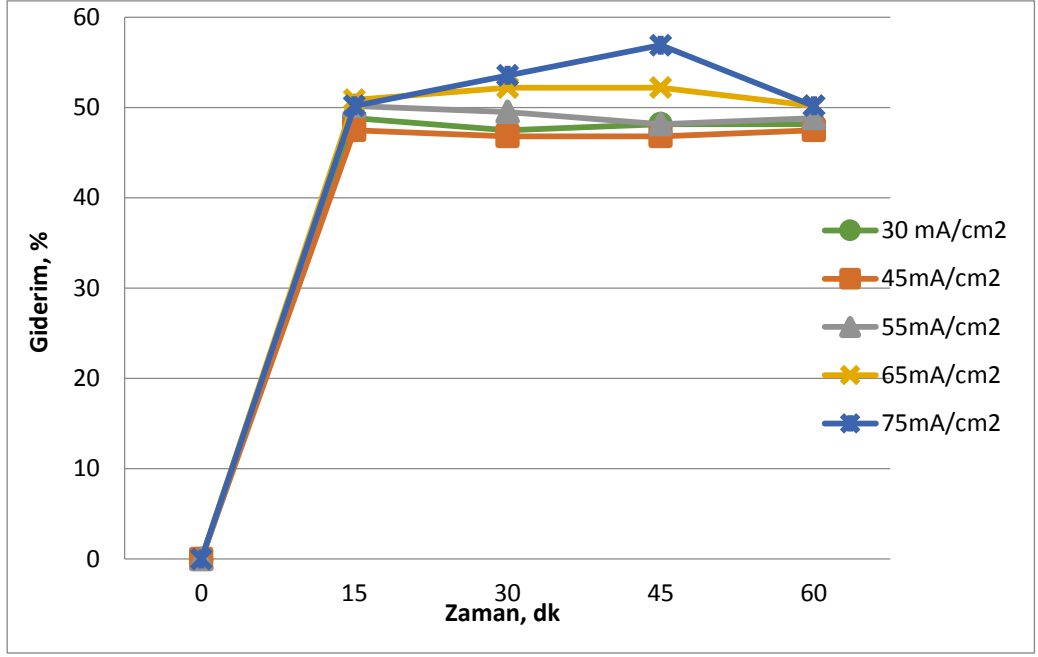
Zaman (dk)	pH	İletkenlik (mS/cm)	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	5,15	21,5	11,2	5	4100	0	0
15	6,24	19,5	18,2	3,8	2015	50,86	16,4
30	6,45	20,1	24,4	4,2	1960	52,20	53,4
45	7,21	20,5	29,1	4,5	1960	52,20	112,4
60	8,65	20,5	31,1	4,9	2042	50,19	198,2

Çizelge 6.9: 75 mA/cm² akım yoğunluğunda (8,1A) elde edilen deneysel çalışmalar.
(pH: 5, Destek elektrolit:yok)

Zaman (dk)	pH	İletkenlik (mS/cm)	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	4,98	21,2	9,8	10,2	4100	0	0
15	6,27	19,5	27,1	5,1	2042	50,19	25,8
30	6,72	20,1	32,5	6,5	1904	53,55	91,6
45	7,82	20,5	34,2	6,6	1766	56,92	191,9
60	8,21	21,2	39,1	6,9	2042	50,19	331,6

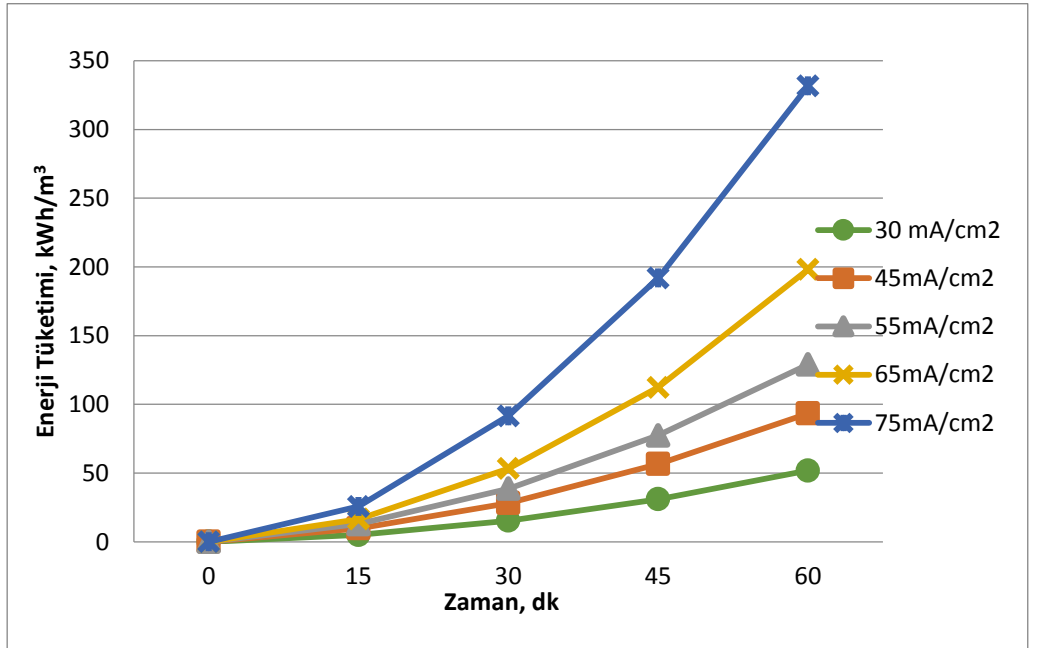


Şekil 6.4: Akım yoğunluğunun KOİ derişimine etkisi



Şekil 6.5: Akım yoğunluğunun KOİ giderimine etkisi

Akım yoğunluğundaki artış doğal olarak enerji tüketiminde de artışa neden olmuştur. Şekil 6.6'dan da görülebileceği üzere 60 dakika sonunda, 30, 45, 55, 65, 75 mA/cm² değerleri için sırasıyla; 52, 93, 129, 198 ve 332 kWh/m³ enerji tüketimleri olmuştur.



Şekil 6.6: Akım yoğunluğunu enerji tüketimine etkisi

6.1.3. Farklı destek elektrolitlerin etkisinin belirlenmesi

Farklı destek elektrolitin etkisi denenirken pH değeri 5 te ve akım yoğunluğu 65 mA/cm²'de sabit tutulmuştur ve etkisi 0,01 M Na₂SO₄ ve 0,01 M NaCl kullanılarak belirlenmeye çalışılmıştır. Destek elektrolit hiç eklenmeyerek, 0,01 M Na₂SO₄ ve 0,01 M NaCl eklenerek yürütülen deneylerden elde edilen sonuçlar sırasıyla Çizelge 6.10, Çizelge 6.11 ve Çizelge 6.12'de gösterilmektedir. Destek elektrolit ilave edilmesiyle arıtım veriminin düştüğü gözlenmiştir. Destek elektrolit ilave edilmediğinden ilave edilen %50 arıtım verimi, 0,01 M Na₂SO₄ %49'a düşmüş ve 0,01 M NaCl ilavesi ile de %45'e düşmüştür. Bu düşüş Şekil 6.7 ve Şekil 6.8'de görülebilmektedir.

Golder, Samanta ve Ray (2007), tek kutuplu ve iki kutuplu elektrotlarla yürüttüğü benzer çalışmasında destek elektrolit ilave edilmediği durum ile Cl⁻ iyonu ilavesi durumlarını karşılaştırmış ve beklediğinin aksine iki düzenleme de tipinde de iyon ilavesi olduğu takdirde arıtım veriminde yaklaşık %3,6 düşüş tespit etmiştir Bunun nedeni olarak pıhtılaşma gerekli olan metal hidroksitlerin oluşması yerine metal iyonlarının Cl⁻ ile birleşmesini ve daha az kararlı yumakların oluşmasını göstermiştir.

Çizelge 6.10: Destek elektrolit ilave edilmeyen deneysel çalışmalar.
(pH: 5, Akım yoğunluğu: 65 mA/cm²)

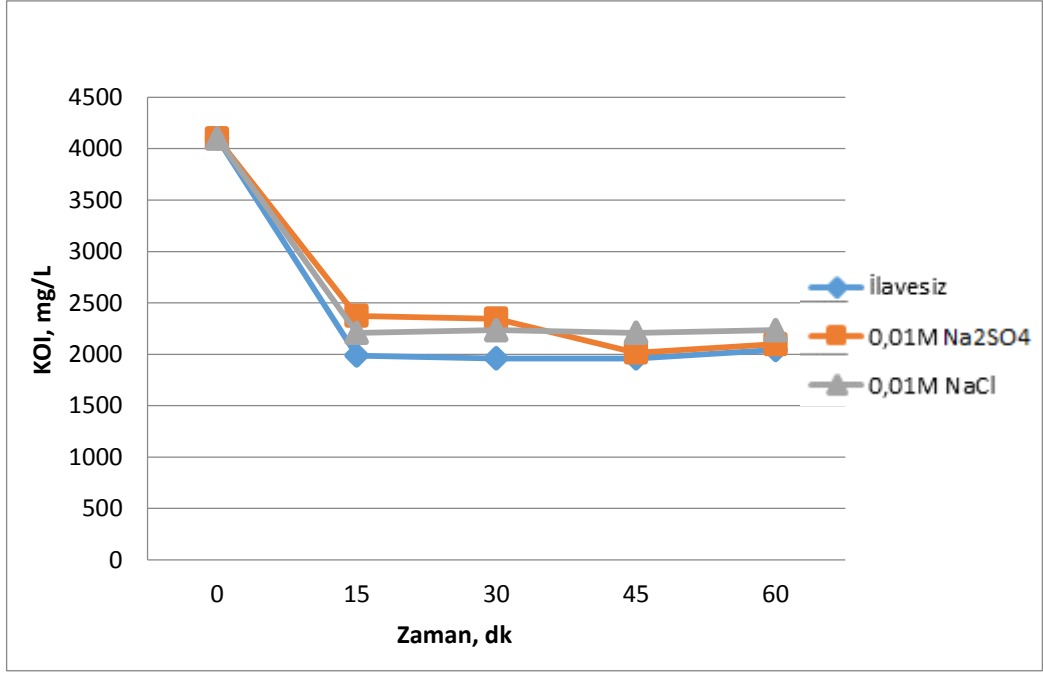
Zaman (dk)	pH	İletkenlik (mS/cm)	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	5,15	21,5	11,2	5	4100	0	0
15	6,24	19,5	18,2	3,8	2015	50,86	16,4
30	6,45	20,1	24,4	4,2	1960	52,20	53,4
45	7,21	20,5	29,1	4,5	1960	52,20	112,4
60	8,65	20,5	31,1	4,9	2042	50,19	198,2

Çizelge 6.11: 0,01M Na₂SO₄ Destek elektrolit ilave edilen deneysel çalışmalar.
(pH: 5, Akım yoğunluğu: 65 mA/cm²)

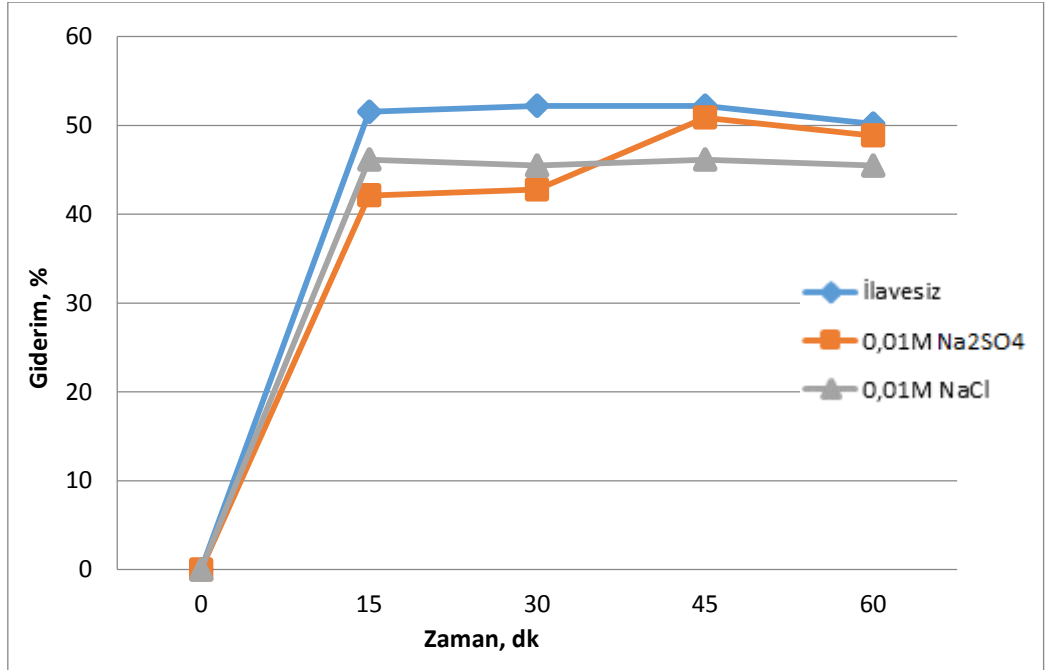
Zaman (dk)	pH	İletkenlik (mS/cm)	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	5,12	28,2	10,2	6	4100	0	0
15	6,04	28,4	21	3,6	2374	42,11	15,8
30	7,36	28,5	28,2	4	2346	42,78	50,8
45	8,31	29,3	29,1	4,2	2015	50,86	105,9
60	9,68	29,6	31	4,4	2098	48,84	182,9

Çizelge 6.12: 0,01M NaCl Destek elektrolit ilave edilen deneysel çalışmalar.
(pH: 5, Akım yoğunluğu: 65 mA/cm²)

Zaman (dk)	pH	İletkenlik (mS/cm)	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	4,85	28,1	9	6,2	4100	0	0
15	6,21	28,5	23,1	3,5	2208	46,15	15,3
30	6,46	29,1	29,2	4,3	2236	45,47	52,9
45	7,21	30,3	33	4,3	2208	46,15	109,3
60	8,15	30,9	31,2	4,4	2236	45,47	186,3



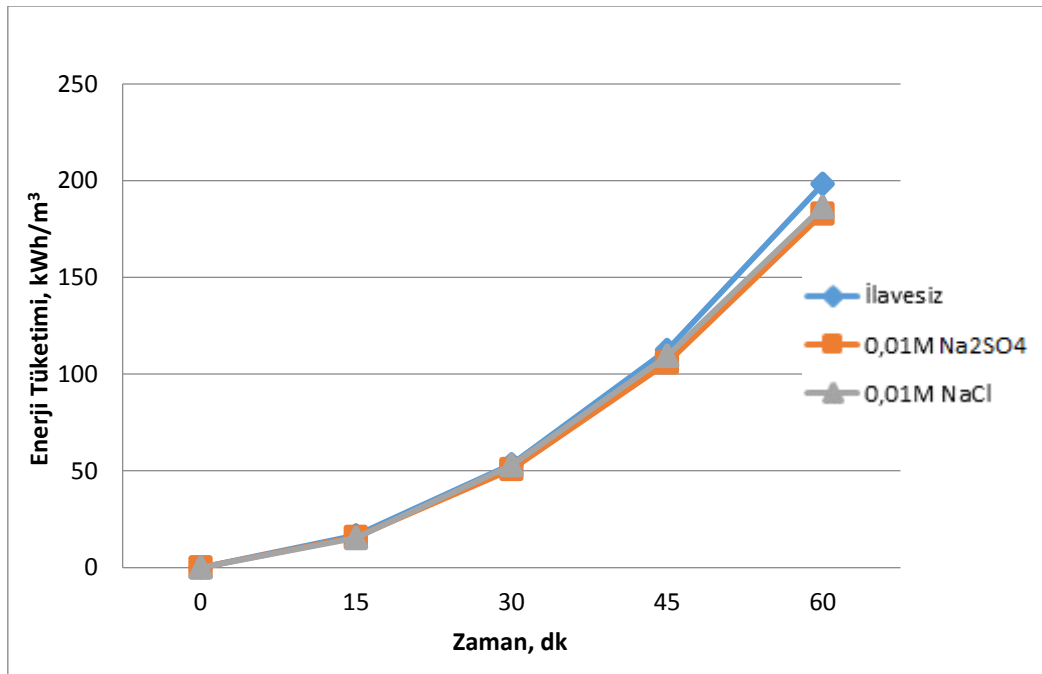
Şekil 6.7: Destek elektrolit çeşidinin KOİ derişiminin farklı destek elektrolitlere göre değişimi



Şekil 6.8: Farklı destek elektrolitlerin KOİ giderimine etkisi

Farklı destek elektrolitlerin eklenmesiyle ise ilave edilmesinin enerji tüketimini düşürdüğü Şekil 6.9'dan gözlenmektedir. 60 dakikalık işletme sonunda herhangi bir ilave olmadığı takdirde enerji tüketimi 198 kWh/m^3 iken, $0,01 \text{ M NaCl}$ ilavesinde 186 kWh/m^3 ; $0,01 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$ ilavesinde 183 kWh/m^3 'e düşmüştür.

Yıldız, Koparal ve Keskinler (2008), yaptıkları çalışmada benzer sonuçlara ulaşmıştır. Elektrolit ilaveleri arasında belirgin bir değişim gözlenmemesine rağmen SO_4 varlığında elektrik gideriminin daha az olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, klor türevi bileşiklerin çözeltide kullanılması sonucu Klor gazı açığa çıktığı için destek elektrolit ilave edilecekse klor'dan kaçınılması önerilmiştir.



Şekil 6.9: Farklı Destek elektrolitlerin enerji tüketimine etkisi

6.2. Elektroyükseltgenme Yöntemi ile Sızıntı Suyunun Arıtımı

6.2.1 Başlangıç pH'ının etkisinin belirlenmesi

Elektropihtılaşıma olduğu gibi elektroyükseltgeme yönteminde de pH önemli parametrelerden biridir. pH'nın etkisi başlangıç pH'ı 2, 4, 6, 8 ve 10 olacak şekilde ayarlanarak incelenmiştir. BDD kaplı Niobium anot ile yapılan deney sonuçları sırasıyla

Çizelge 6.13, Çizelge 6.14, Çizelge 6.15, Çizelge 6.16, Çizelge 6.17 ‘de detaylı bir şekilde verilmiştir. 60 dakikalık elektrooksidasyon işlemi sonunda pH 2, 4, 6, 8, 10 değerleri için sırasıyla, %35, %40, %29, %22 ve %18 arıtım verimiyle 4100 mg/L olan başlangıç derişimi 2650 mg/L, 2450 mg/L, 2900 mg/L, 3200 mg/L ve 3350 mg/L KOİ değerlerine inmiştir Arıtımın başlangıç pH’ın düşük olduğu durumlarda iyi sonuçların elde edildiği görülmüştür. Şekil 6.10 ve Şekil 6.11’den de görüldüğü gibi en yüksek verimli pH 4’te elde edilmiştir.

Çizelge 6.13: *BDD elektrot ile pH 2 için elde edilen deneysel sonuçlar.*

(Akım Yoğunluğu: 35mA/cm² (3,5 A), Destek elektrolit:Yok)

Zaman (dk)	pH	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	1,99	14,2	15,6	4100	0	0
15	2,12	24,4	12,9	3350	18,29	22,6
30	1,92	27,9	10,4	3100	24,39	40,8
45	1,83	32,1	11,9	2750	32,93	61,6
60	1,77	31,8	11,8	2650	35,37	82,3

Çizelge 6.14: *BDD elektrot ile pH 4 için elde edilen deneysel sonuçlar.*

(Akım Yoğunluğu: 35mA/cm² (3,5 A), Destek elektrolit:Yok)

Zaman (dk)	pH	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	3,84	11,4	15	4100	0	0
15	3,66	26	12,8	3200	21,95	22,4
30	3,55	29	12,4	2850	30,49	44,1
45	2,95	33,8	13,2	2500	39,02	67,2
60	2,12	31	13	2450	40,24	90,0

Çizelge 6.15: BDD kaplı elektrot ile pH 6 için elde edilen deneysel sonuçlar.
(Akım Yoğunluğu: 35mA/cm² (3,5 A), Destek elektrolit:Yok)

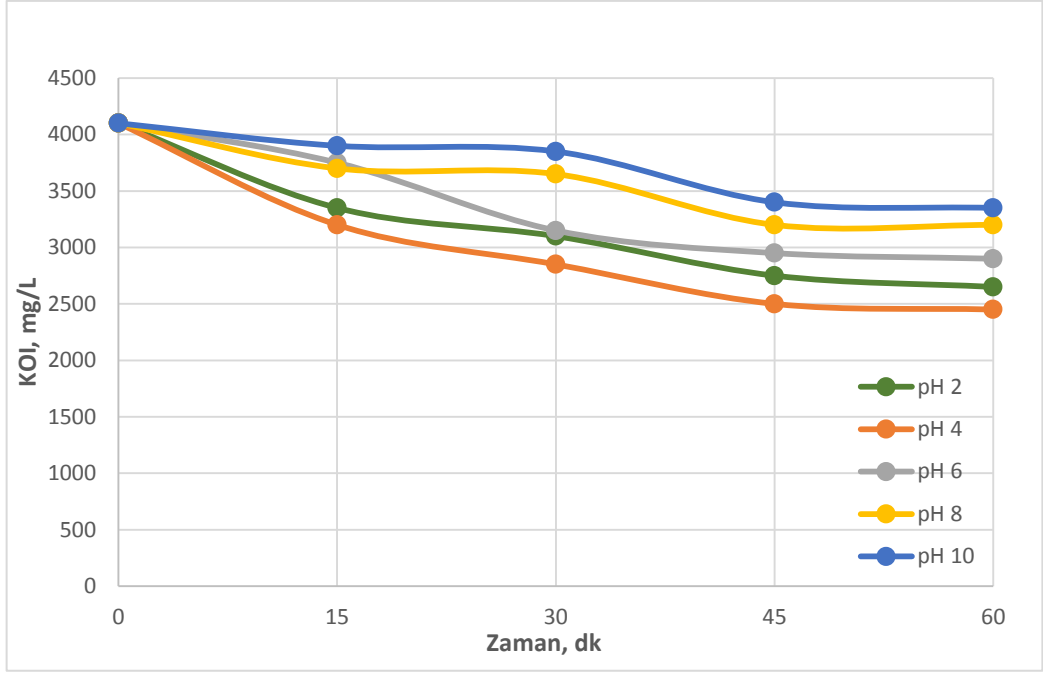
Zaman (dk)	pH	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	6,05	13,2	16,3	4100	0	0
15	7,23	26,7	14	3750	8,54	24,5
30	7,88	31,2	13	3150	23,17	47,3
45	7,95	32,4	13,4	2950	28,05	70,7
60	7,99	33,7	13,1	2900	29,27	93,6

Çizelge 6.16: BDD elektrot ile pH 8 için elde edilen deneysel sonuçlar.
(Akım Yoğunluğu: 35mA/cm² (3,5 A), Destek elektrolit:Yok)

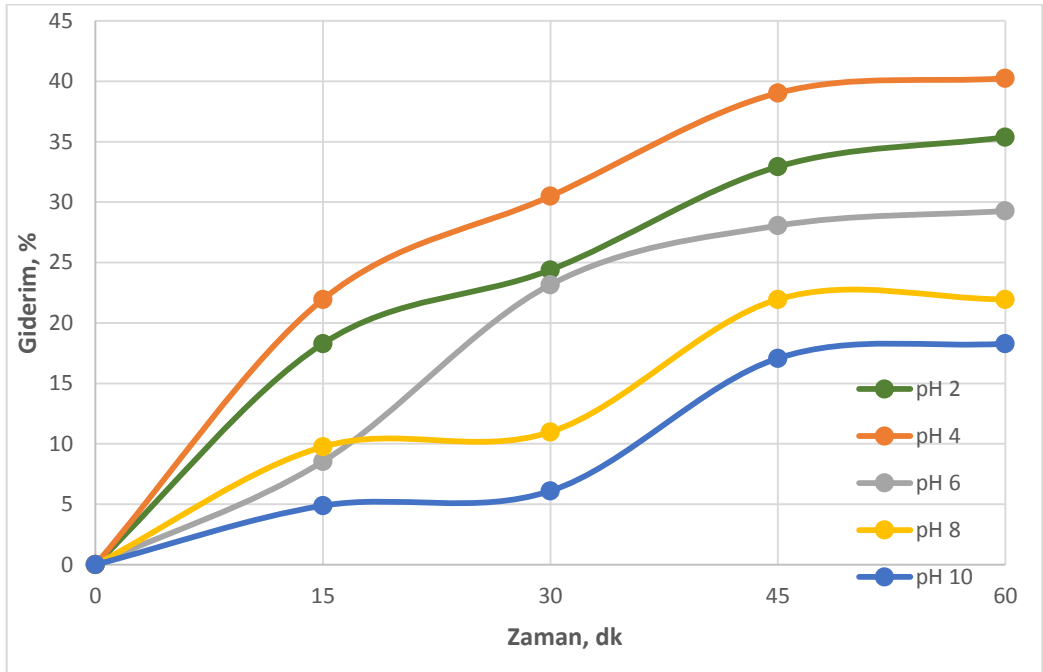
Zaman (dk)	pH	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	8,04	12,3	15,6	4100	0	0
15	9,89	29,8	13,9	3700	9,76	24,3
30	10,28	34,6	13,3	3650	10,98	47,6
45	10,35	38,2	14,6	3200	21,95	73,2
60	10,54	36,6	15,2	3200	21,95	99,8

Çizelge 6.17: BDD elektrot ile pH 10 için elde edilen deneysel sonuçlar.
(Akım Yoğunluğu: 35mA/cm² (3,5 A), Destek elektrolit:Yok)

Zaman (dk)	pH	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	9,87	14,1	16,9	4100	0	0
15	9,30	27,7	15,1	3900	4,88	26,4
30	9,22	23,1	14,8	3850	6,10	52,3
45	9,10	33,1	14,7	3400	17,07	78,1
60	9,05	35,2	14,6	3350	18,29	103,6



Şekil 6.10: BDD elektrot için pH'ın KOİ derişimine etkisi



Şekil 6.11: BDD elektrot için pH'ın KOİ giderimine etkisi

Aynı şartlarda Pt kaplı elektrot ile yapılan elektroyükseltgeme çalışmalarında başlangıç pH 2, 4, 6, 8 ve 10 olduğu durumlarda elde edilen veriler sırasıyla Çizelge 6.18, Çizelge 6.19, Çizelge 6.20, Çizelge 6.21, Çizelge 6.22’de detaylı bir şekilde verilmiştir. 60 dakikalık elektroyükseltgeme işlemi sonunda pH 2, 4, 6, 8, 10 için sırasıyla, %26, %35, %20, %23 ve %16 arıtım verimiyle 4100 mg/L olan başlangıç derişimi 3050 mg/L, 2650 mg/L, 3300 mg/L, 3150 mg/L ve 3450 mg/L KOI değerlerine inmiştir. Başlangıç pH’ın arıtıma olan etkisi Şekil 6.12 ve Şekil 6.13’te verilmiştir. Deneyle sonucunda düşük başlangıç pH değerlerinde arıtımın daha yüksek olduğu gözlenmektedir ve en iyi arıtımın gerçekleştiği pH değeri 4’de elde edildiği görülmüştür.

Çizelge 6.18: Pt kaplı elektrot ile pH 2 için elde edilen deneysel sonuçlar.
(Akım Yoğunluğu: 35mA/cm² (3,5 A), Destek elektrolit:Yok)

Zaman (dk)	pH	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	2,12	21,2	12,6	4100	0	0
15	2,19	26,1	11,2	3450	15,85	19,6
30	1,2	30,1	10,1	3250	20,73	37,3
45	1,49	38,2	9,1	3150	23,17	53,2
60	2,11	42,3	9,1	3050	25,61	69,1

Çizelge 6.19: Pt kaplı elektrot ile pH 4 için elde edilen deneysel sonuçlar.
(Akım Yoğunluğu: 35mA/cm² (3,5 A), Destek elektrolit:Yok)

Zaman (dk)	pH	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	4,11	17,7	16,8	4100	0	0
15	5,04	34,4	12,6	3200	21,95	22,1
30	5,58	36,9	11,2	3050	25,61	41,7
45	6,39	39,7	9,2	2800	31,71	57,8
60	6,42	41,2	9,6	2650	35,37	74,6

Çizelge 6.20: Pt kaplı elektrot ile pH 6 için elde edilen deneysel sonuçlar.
(Akım Yoğunluğu: 35mA/cm² (3,5 A), Destek elektrolit:Yok)

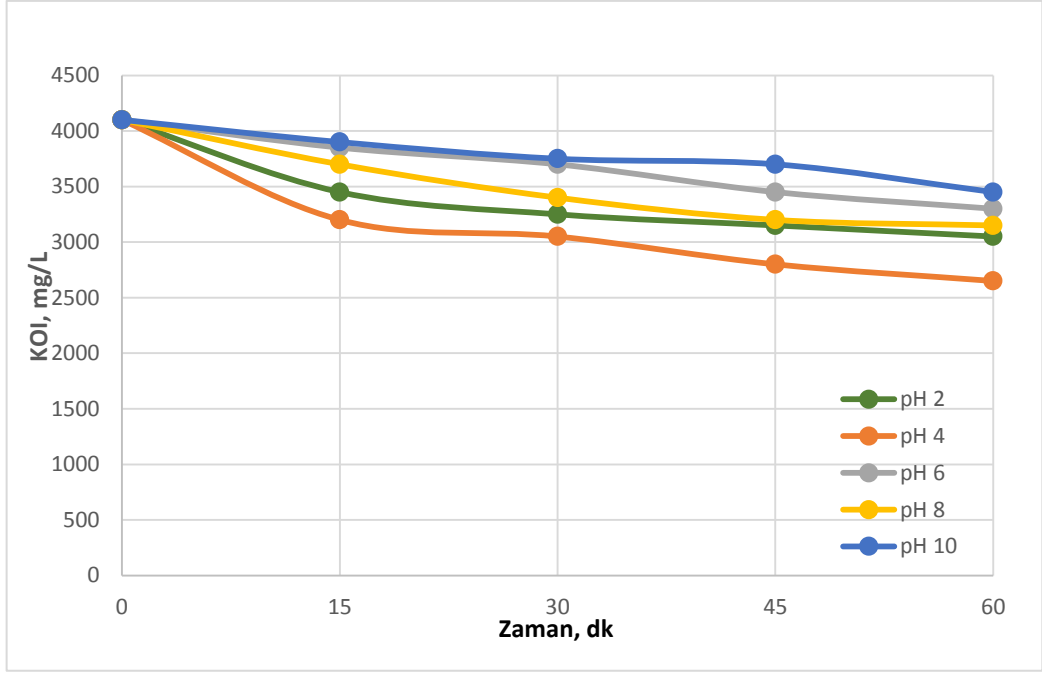
Zaman (dk)	pH	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	6,1	21,2	14,3	4100	0	0
15	6,89	28,1	14,0	3850	6,10	24,5
30	7,18	34,4	11,3	3700	9,76	44,3
45	8,12	39,5	11,0	3450	15,86	63,5
60	8,18	42,2	10,5	3300	19,51	81,9

Çizelge 6.21: Pt kaplı elektrot ile pH 8 için elde edilen deneysel sonuçlar.
(Akım Yoğunluğu: 35mA/cm² (3,5 A), Destek elektrolit:Yok)

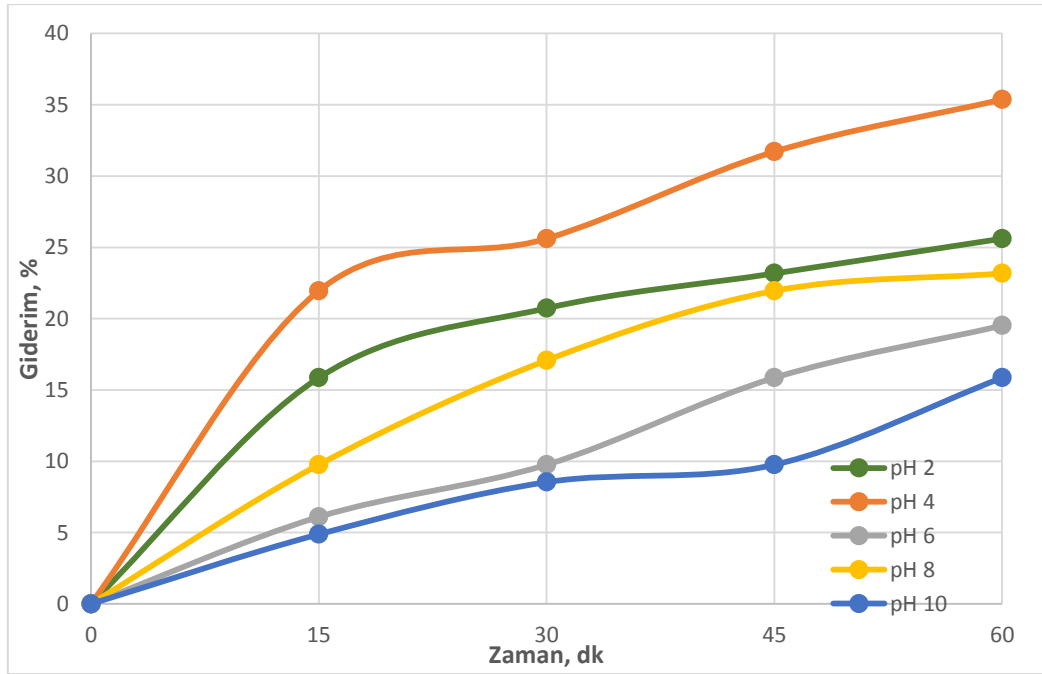
Zaman (dk)	pH	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	8,21	21,4	15,1	4100	0	0
15	7,82	30,2	14,4	3700	9,76	25,2
30	8,19	35,2	12,1	3400	17,07	46,4
45	8,13	36,2	11,1	3200	21,95	65,8
60	8,35	35,9	10,2	3150	23,17	83,7

Çizelge 6.22: Pt kaplı elektrot ile pH 10 için elde edilen deneysel sonuçlar.
(Akım Yoğunluğu: 35mA/cm² (3,5 A), Destek elektrolit:Yok)

Zaman (dk)	pH	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	9,89	22,2	13,4	4100	0	0
15	9,91	28,1	13,1	3900	4,88	22,9
30	9,72	34,1	13	3750	8,54	45,7
45	9,83	38,3	12,4	3700	9,76	67,4
60	9,92	42,1	11,3	3450	15,85	87,2



Şekil 6.12: Pt kaplı elektrot için pH'ın KOİ derişimine etkisi



Şekil 6.13: Pt kaplı elektrot için pH'ın KOİ giderimine etkisi

Pt kaplı ve BDD elektrotlar kullanıldığında en iyi arıtım verimi; Pt için %35 ve BDD için %40 olup, BDD kaplı elektrotun, Pt kaplı elektrota oranla %5 daha verimli olduğu görülmüştür. İki elektrot için de en iyi pH'ın 4 olduğu görülmüştür.

Yavuz ve Shahbazi (2012), BDD kaplı elektrotla Reactive Black 5 boya arıtımı için yaptıkları deneylerinde asidik (pH 3,52), nötr (pH 7,0) ve bazik (pH 10,17) pH'larda denemeler yaparak pH'ın arıtım verimine olan etkisini araştırmışlardır. Fakat, herhangi bir etki gözlemlenememiştir. Bunun olası nedeninin boyanın yapısı olduğu düşünülmektedir.

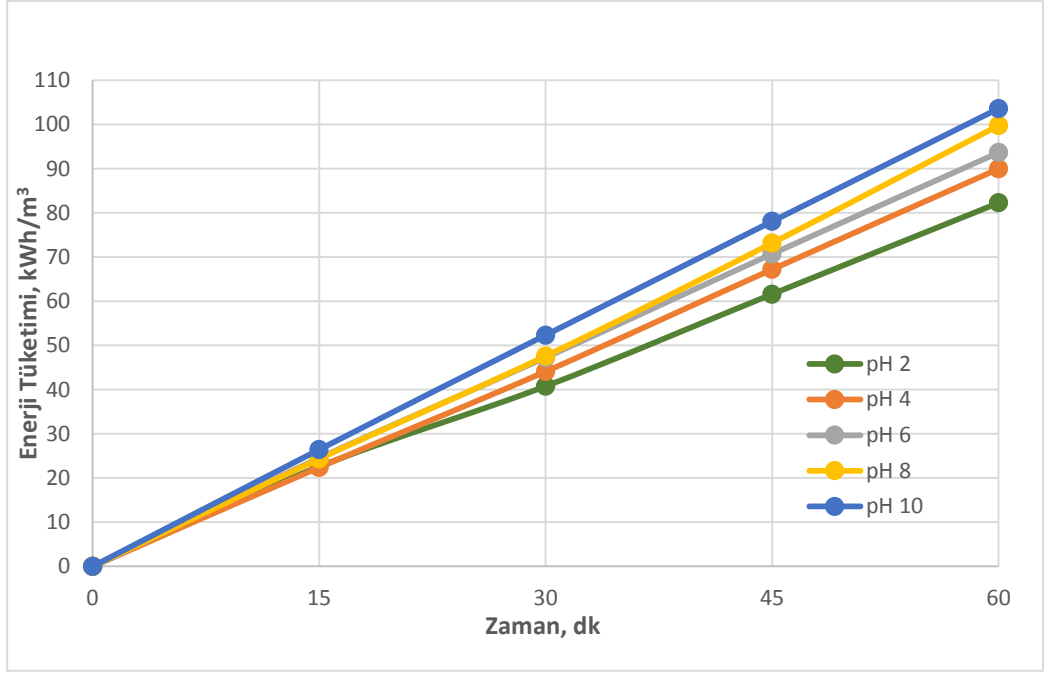
Zou ve arkadaşları (2017), BDD kaplı elektrotlarla tekstil atıksuyundan KOİ giderimi üzerine yaptıkları çalışmada, pH'ın etkisini incelemişlerdir. Asidik (pH 2,0), nötr (Ph 7,0) ve bazik (pH 10,0) pH'larda çalışmışlar ve asidik pH'da bariz olaak %95 arıtım verimi ile en yüksek verimi elde etmişlerdir. Bunun nedeni olarak kompleks bileşikler içeren bir atıksuda Cl⁻ gibi yükseltgen bileşiklerin de bulunabileceğini ve asidik pH'ın bu okside edici iyonları aktif hale getirdiğinden bahsetmiştir ve Scialdone ve arkadaşları (2009) BDD kaplı elektrot ve IrO₂-Ta₂O₅ anotlar ile organik madde arıtımı üzerine yaptıkları benzer çalışmada sodyum klorür (NaCl) ilavesi ve etkisini araştırmış ve asidik pH'ın daha veriminin daha yüksek arıtım olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Ammar ve arkadaşları (2016), BDD anot kullanılarak KOİ giderimi çalışmalarında pH 3, 5, 7 ve 9 değerlerin denemişlerdir. 240 dakika sonunda pH 9'da %62 arıtım verimi elde ederken, pH 3'de % 91 arıtım verimi elde etmişlerdir. Ammar ve arkadaşları asidik ortamda daha fazla OH[·] radikali ortaya çıkması ve bu OH[·] radikallerinin organik maddeleri yükseltgeyerek daha fazla kirlilik unsurunu giderdiğini söylemektedir. Bu da Enache ve arkadaşları (2009), nın gerçekleştirdiği hidroksil radikallerinin etkisi üzerine yaptığı çalışma ile örtüşmektedir.

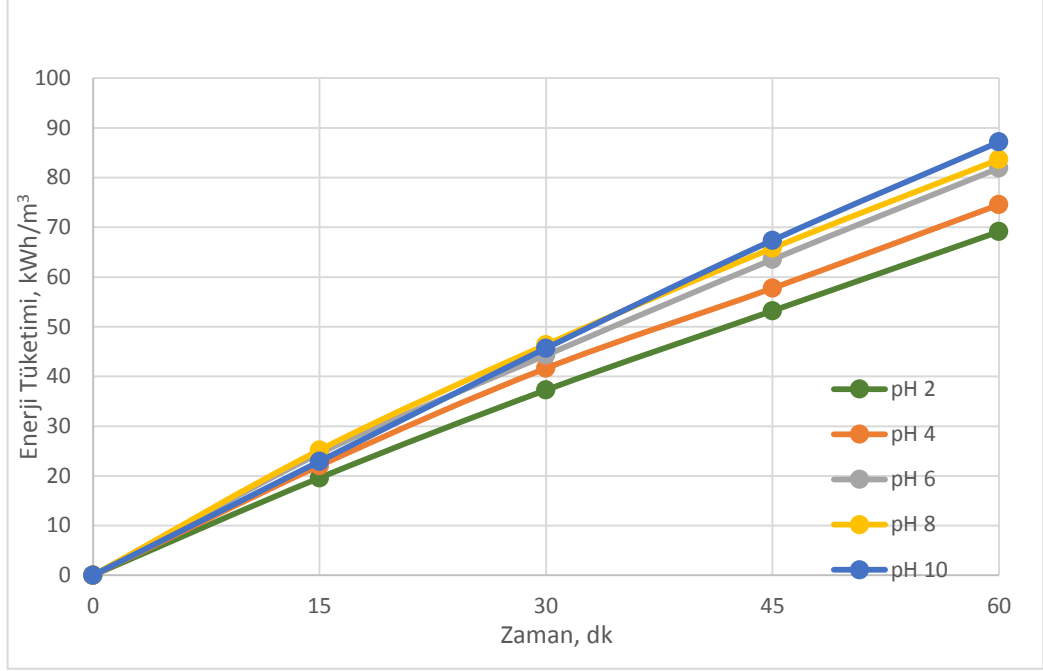
Alanyazında asidik pH değerlerinde elektroyükseltgenme daha verimli geçtiği sonucu görülmektedir fakat pH etkisi ayrıntılı bir şekilde çalışılmamıştır. pH 2 yerine, pH 4'te arıtımın neden bariz bir şekilde en iyi verimle gerçekleştiğinin araştırılması için ek çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

BDD kaplı ve Pt kaplı elektrotlarla yapılan çalışmalarda enerji tüketimi hesaplanmış ve sonuçlar BDD elektrot için Şekil 6.14'te ve Pt kaplı elektrot için Şekil 6.15'te gösterilmiştir. Enerji tüketimi pH 2'de BDD kaplı için 82,25 kWh/m³ Pt için ise

69,12 kWh/m³ olarak hesaplanmıştır. pH düştükçe enerji tüketiminin de azaldığı açıkça görülebilmektedir. Bunun sebebinin elektrokoagülasyonda da olduğu gibi, pH ayarlanması sırasında ilave edilen bileşiklerin elektrik iletimini iyileştirdiği şeklinde açıklanabilir.



Şekil 6.14: BDD elektrot için pH'in enerji tüketimine etkisi



Şekil 6.15: Pt kaplı elektrot için pH'ın enerji tüketimine etkisi

6.2.2. Akım yoğunluğunun etkisinin belirlenmesi

Akım yoğunluğunun etkisi pH 4'te araştırılmıştır. Akım yoğunluğunun etkisi incelenirken 25 mA/cm^2 , 35 mA/cm^2 , 45 mA/cm^2 , 55 mA/cm^2 ve 65 mA/cm^2 akım yoğunlukları kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar sonucunda ve BDD kaplı elektrot için elde edilen sonuçlar Çizelge 6.23, Çizelge 6.24, Çizelge 6.25, Çizelge 6.26 ve Çizelge 6.27'de verilmiştir. 60 dakikalık elektroyükseltgeme işlemi sonrasında 25 mA/cm^2 , 35 mA/cm^2 , 45 mA/cm^2 , 55 mA/cm^2 ve 65 mA/cm^2 için sırasıyla %22, %40, %41, %49, %62 arıtım verimleriyle başlangıç KOİ derişimi 4100 mg/L 'den sırasıyla, 3200 mg/L , 2450 mg/L , 2400 mg/L , 2100 mg/L , 1550 mg/L 'ye inmiştir. Akım yoğunluğu arttıkça arıtım da artmıştır ve bu artış Şekil 6.16 ve 6.17'de görülebilmektedir.

Çizelge 6.23: BDD elektrot ile 25mA/cm² için elde edilen deneysel sonuçlar.
(pH: 4, Destek elektrolit:Yok)

Zaman (dk)	pH	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	4,05	12,1	12,2	4100	0	0
15	4,50	21,0	8,1	3450	15,85	10,1
30	4,88	24,2	12,2	3400	17,07	25,4
45	4,51	26,8	11,6	3350	18,29	39,9
60	4,12	26,1	10,1	3200	21,95	52,5

Çizelge 6.24: BDD elektrot ile 35mA/cm² için elde edilen deneysel sonuçlar.
(pH: 4, Destek elektrolit:Yok)

Zaman (dk)	pH	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	3,84	11,4	15,0	4100	0	0
15	3,66	26,0	13,2	3200	21,95	22,4
30	3,55	29,0	12,4	2850	30,49	44,1
45	2,95	33,8	13,8	2500	39,02	67,2
60	2,12	31,0	13,0	2450	40,24	90,0

Çizelge 6.25: BDD elektrot ile 45mA/cm² için elde edilen deneysel sonuçlar.
(pH: 4, Destek elektrolit:Yok)

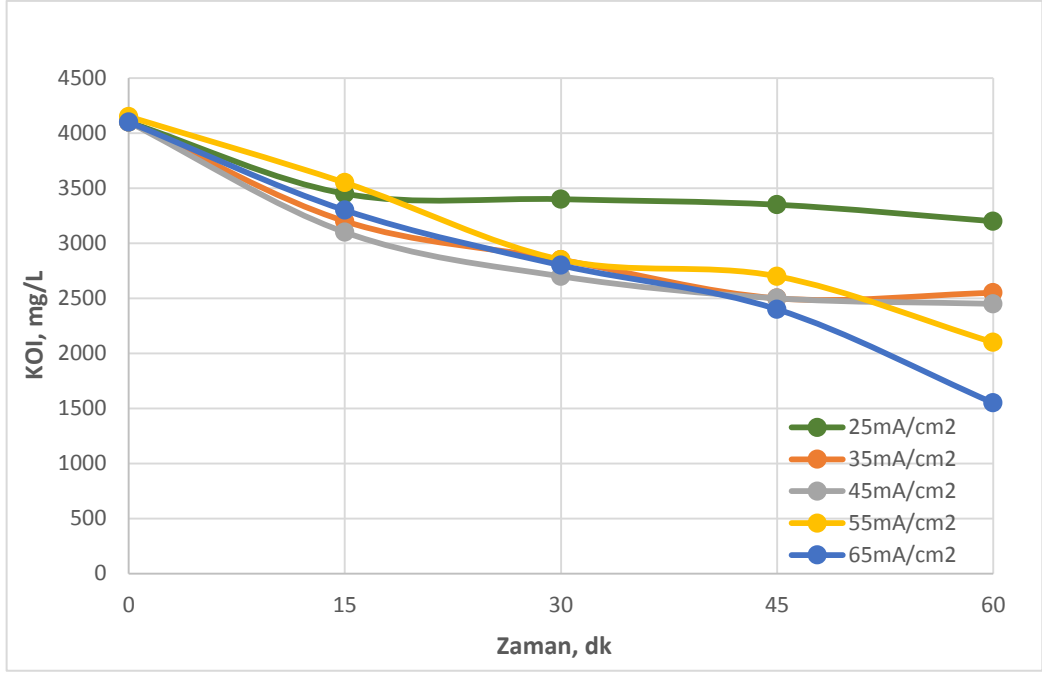
Zaman (dk)	pH	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	4,01	13,8	17,8	4100	0	0
15	3,05	28,2	13,2	3100	24,39	29,7
30	3,01	33,2	11,9	2700	34,15	56,5
45	2,98	36,2	12	2500	39,02	83,5
60	2,91	38,4	12,3	2400	41,46	111,2

Çizelge 6.26: BDD elektrot ile 55mA/cm² için elde edilen deneysel sonuçlar.
(pH: 4, Destek elektrolit:Yok)

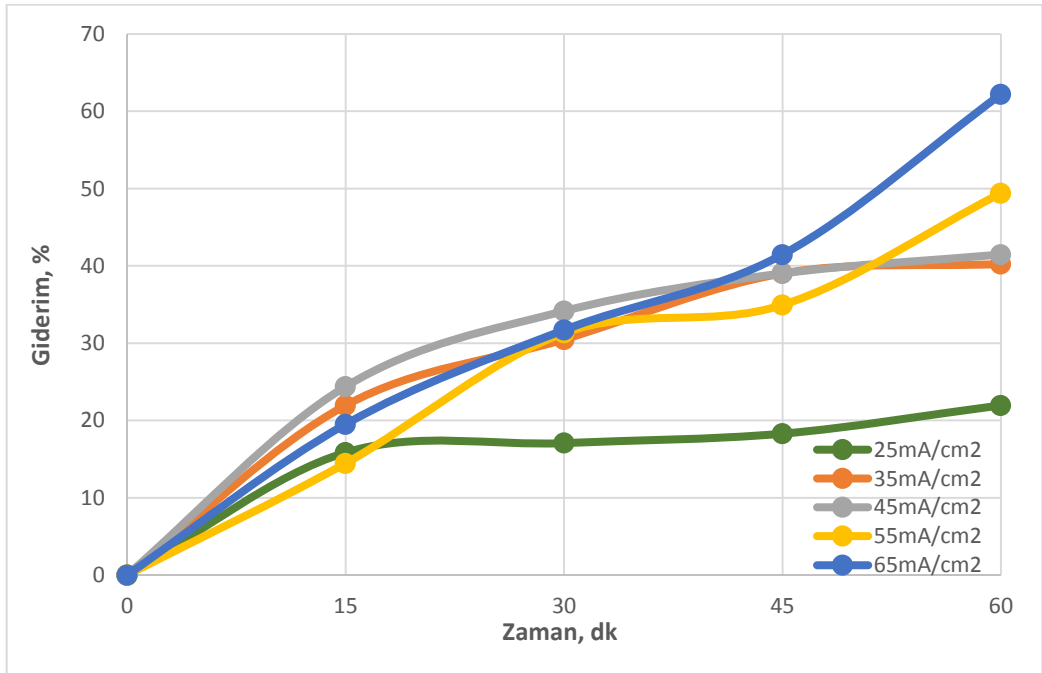
Zaman (dk)	pH	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	3,89	13,7	29,0	4100	0	0
15	2,93	32,1	18,9	3550	13,41	52,0
30	2,47	39,8	17,0	2850	30,48	98,7
45	2,32	41,0	16,8	2700	34,14	144,9
60	2,10	42,5	16,8	2100	48,78	191,1

Çizelge 6.27: BDD elektrot ile 65mA/cm² için elde edilen deneysel sonuçlar.
(pH: 4, Destek elektrolit:Yok)

Zaman (dk)	pH	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	3,88	18,1	25,2	4100	0	0
15	3,60	29,2	19,1	3300	19,51	62,1
30	3,08	32,1	16,2	2800	31,71	114,7
45	2,50	33,4	17,1	2400	41,46	170,3
60	2,30	37,2	18,3	1550	62,20	229,8



Şekil 6.16: BDD elektrot için akım yoğunluğunun KOİ derişimine etkisi



Şekil 6.17: BDD elektrot için akım yoğunluğunun KOİ giderimine etkisi

Akım yoğunluğunun arıtıma olan etkisi Pt kaplı elektrot kullanılarak da aynı şartlarda belirlenmiştir. Sonuçlar sırasıyla, Çizelge 6.28, Çizelge 6.29, Çizelge 6.30, Çizelge 6.31 ve Çizelge 6.32’de verilmiştir. Şekil 6.18 ve Şekil 6.19’dan görüleceği gibi 60 dakikalık elektroyükseltgeme sonrasında 25 mA/cm^2 , 35 mA/cm^2 , 45 mA/cm^2 , 55 mA/cm^2 ve 65 mA/cm^2 için sırasıyla %24, %36, % 43, % 49, %59 arıtım verimleriyle başlangıç KOİ derişimi 4100 mg/L ’den sırasıyla; 3100 mg/L , 2650 mg/L , 2350 mg/L , 2100 mg/L , 1700 mg/L ’ye indirilmiştir.

Çizelge 6.28: Pt kaplı elektrot ile 25 mA/cm^2 için elde edilen deneysel sonuçlar.
(pH: 4, Destek elektrolit:Yok)

Zaman (dk)	pH	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	4,05	16,9	12,5	4100	0	0
15	3,69	22,0	11,9	3650	10,98	14,9
30	3,60	26,2	10,5	3450	15,85	28,0
45	3,28	29,2	9,4	3100	24,39	39,8
60	3,01	31,4	9,4	3100	24,39	51,5

Çizelge 6.29: Pt kaplı elektrot ile 35 mA/cm^2 için elde edilen deneysel sonuçlar.
(pH: 4, Destek elektrolit:Yok)

Zaman (dk)	pH	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	4,11	17,7	16,8	4100	0	0
15	5,04	34,4	12,6	3200	21,95	22,1
30	5,58	36,9	11,2	3050	25,61	41,7
45	6,39	39,7	9,2	2800	31,71	57,8
60	6,42	41,2	9,6	2650	35,37	74,6

Çizelge 6.30: Pt kaplı elektrot ile 45mA/cm² için elde edilen deneysel sonuçlar.
(pH: 4, Destek elektrolit:Yok)

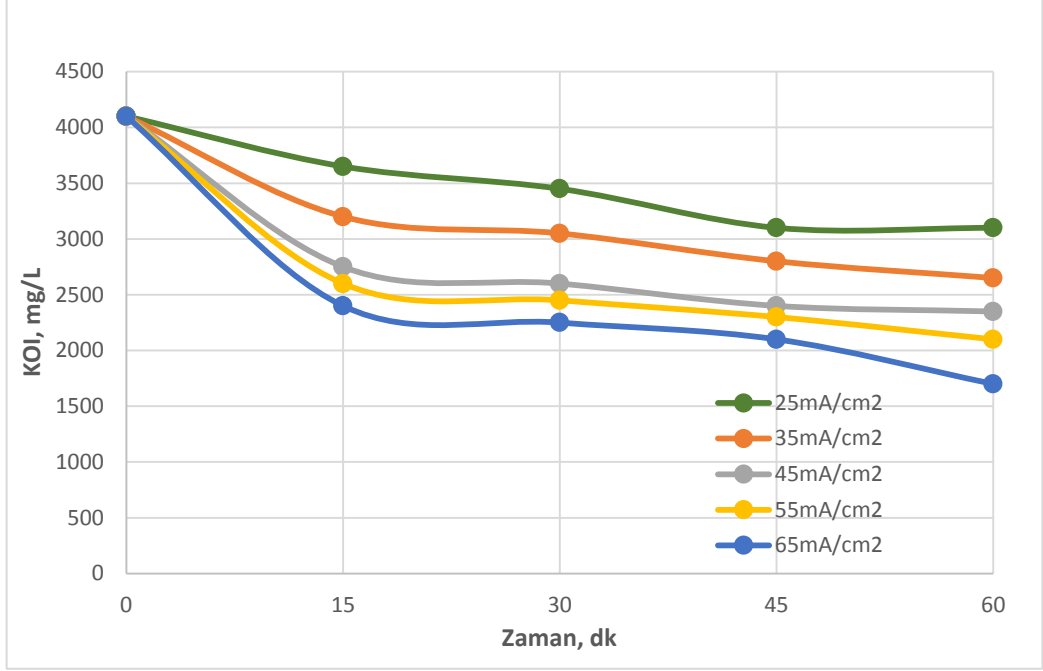
Zaman (dk)	pH	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	3,85	16,2	13,5	4100	0	0
15	3,11	25,4	12,7	2750	32,93	28,6
30	3,19	33,8	11,2	2600	36,59	53,8
45	3,10	38,7	9,7	2400	41,46	75,6
60	3,12	43,2	9,9	2350	42,68	97,9

Çizelge 6.31: Pt kaplı elektrot ile 55mA/cm² için elde edilen deneysel sonuçlar.
(pH: 4, Destek elektrolit:Yok)

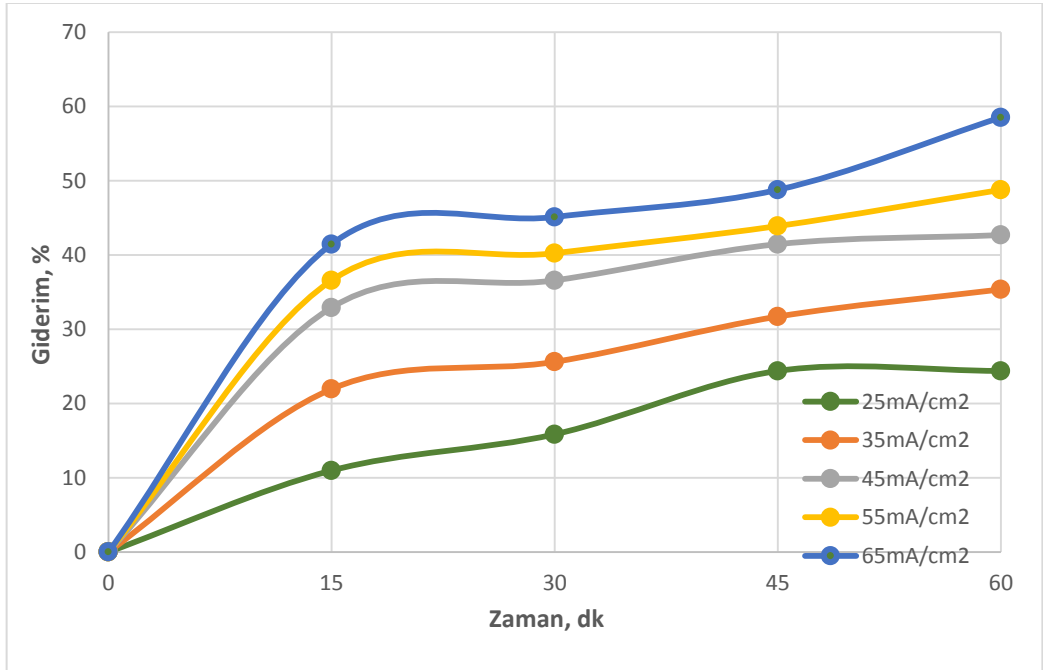
Zaman (dk)	pH	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	4,12	15,2	16,6	4100	0	0
15	3,38	38,7	13,4	2600	36,59	36,9
30	3,42	40,5	12,0	2450	40,24	69,9
45	3,83	41,5	10,7	2300	43,90	99,3
60	3,55	48,5	10,9	2100	48,78	129,3

Çizelge 6.32: Pt kaplı elektrot ile 65mA/cm² için elde edilen deneysel sonuçlar.
(pH: 4, Destek elektrolit:Yok)

Zaman (dk)	pH	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	4,05	14,3	16,2	4100	0	0
15	3,68	36,2	13,8	2400	41,46	44,9
30	3,36	44,2	12,9	2250	45,12	86,8
45	3,39	47,6	11,0	2100	48,78	122,5
60	3,21	52,1	12,1	1700	58,54	161,9



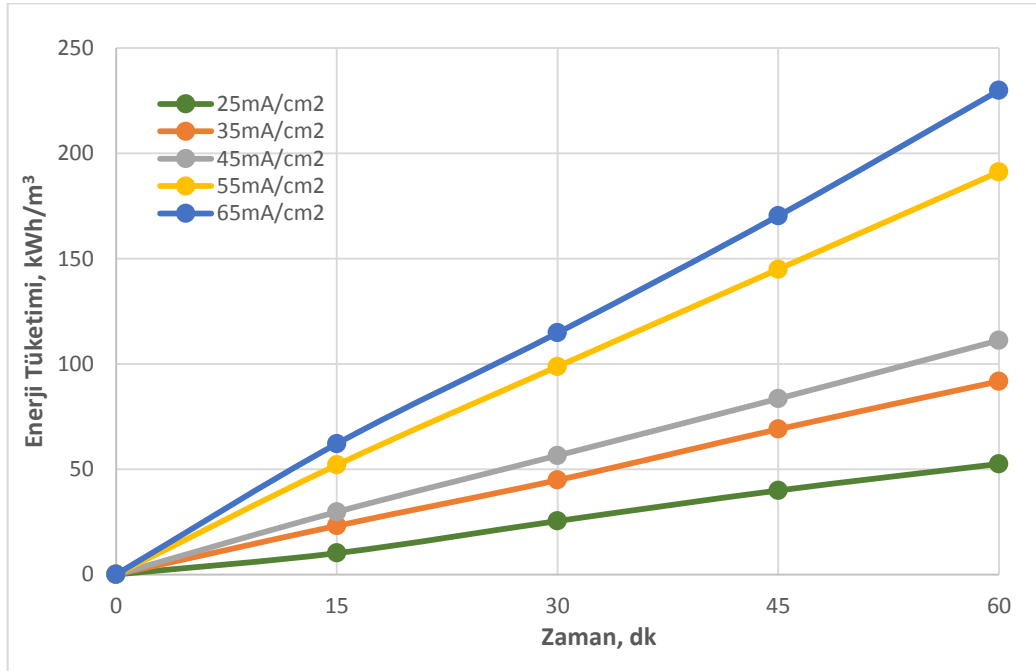
Şekil 6.18: Pt kaplı elektrot için akım yoğunluğunun KOİ derişimine etkisi



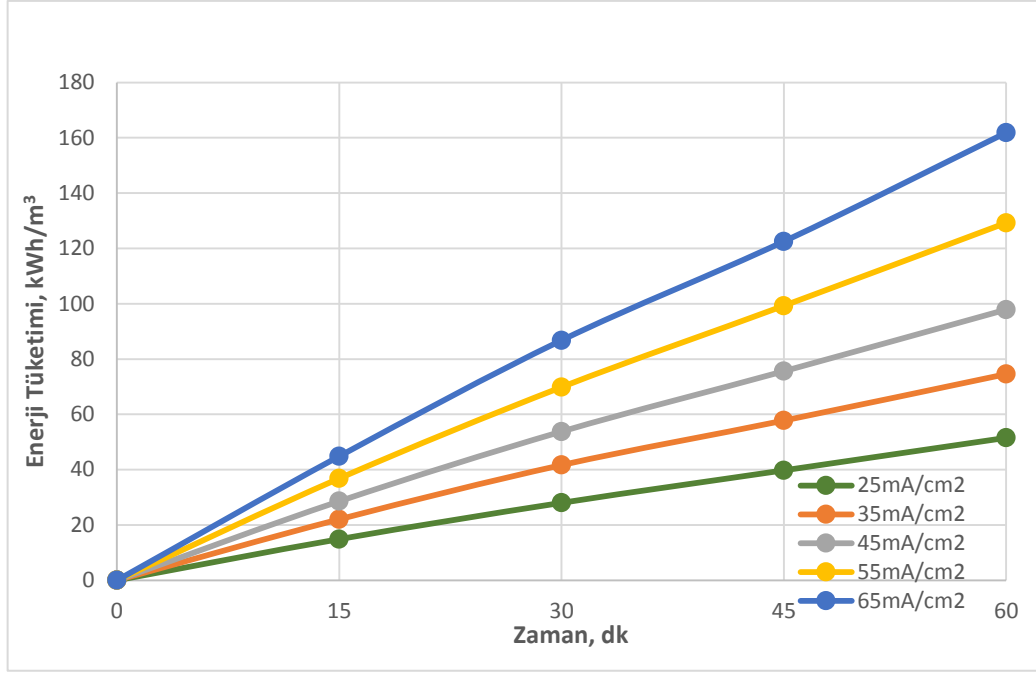
Şekil 6.19: Pt kaplı elektrot için akım yoğunluğunun KOİ giderimine etkisi

Pt kaplı ve BDD kaplı elektrotlar kullanılması ile elde edilen sonuçlarda aynı eğilim göstererek akım yoğunluğu arttıkça arıtımın verimi de artmıştır. Akım arttıkça daha fazla yükseltgenin çözelti içinde açığa çıkmakta ve bu yükseltgenler, yükseltgenme hızını arttırarak arıtım verimini yükseltmektedir (Wang vd., 2016; Skoumal vd., 2009). Deneyler sırasında, elektrik akımının artışı ısınma problemini de beraberinde getirmektedir. Sıcaklık artışının yükseltgenme hızını artırdığı bilinmektedir ve arıtım verimindeki artışın bir kısmının çözeltinin sıcaklığında meydana gelen artışın neden olduğu düşünülmektedir (Zhang, Choi ve Huang., 2005).

Elektroyükseltgeme süresince elektrik enerjisi tüketimi hesaplanarak, Sonuçlar BDD kaplı elektrot için Şekil 6.20’de ve Pt kaplı elektrot için Şekil 6.21’de gösterilmiştir. 60 dakikalık elektrooksidasyon işlemi sonrasında en az elektrik tüketimi $25\text{mA}/\text{cm}^2$ ve en çok elektrik tüketimi ise $65\text{mA}/\text{cm}^2$ de görülmüştür. $25\text{mA}/\text{cm}^2$ de enerji tüketimleri BDD kaplı elektrot için $52,5\text{ kWh}/\text{m}^3$ iken Pt kaplı elektrot için $51,5\text{ kWh}/\text{m}^3$ ’tür. En yüksek enerji tüketimleri ise $65\text{mA}/\text{cm}^2$ de BDD kaplı elektrot için $229,78\text{ kWh}/\text{m}^3$ iken Pt kaplı elektrot için bu değer $161,85\text{ kWh}/\text{m}^3$ ’tür. Akım yoğunluğu arttıkça gerilim de yükselmiş ve buna bağlı olarak enerji tüketimi de artış göstermiştir.



Şekil 6.20: BDD kaplı elektrot için akım yoğunluğunun enerji tüketimine etkisi



Şekil 6.21: Pt kaplı elektrot için akım yoğunluğunun enerji tüketimine etkisi

6.2.3. Farklı Destek elektrolitlerin etkisinin belirlenmesi

Farklı destek elektrolitlerin arıtıma olan etkisi 65 mA/cm² akım yoğunluğunda ve pH 4'te sabitlenmiştir. Destek elektrolit olarak NH₄Cl, NaCl, KCl ve K₂SO₄ denenmiş ve miktar olarak hepsi 0,5 M olacak şekilde atıksuya ilave edilmiştir. BDD kaplı elektrolit ile; destek elektrolit ilavesiz, NH₄Cl, NaCl, KCl ve K₂SO₄ destek elektrolit ilaveli durumda deney sonuçları sırasıyla Çizelge 6.33, Çizelge 6.34, Çizelge 6.35, Çizelge 6.36 ve Çizelge 6.37'de gösterilmiştir. Şekil 6.22 ve Şekil 6.23'ten de görülebileceği gibi destek elektrolit ilavesiz, NH₄Cl, NaCl, KCl ve K₂SO₄ ilaveli deneyler için arıtım sırasıyla %62, %32, %24, %30 ve %23 verimle gerçekleşmiş, başlangıç KOİ derişimi 4100 mg/L olan başlangıç KOİ derişimi yine sırayla 1550 mg/L, 2800 mg/L, 3100mg/L, 2550 mg/L ve 3150 mg/L değerlerine düşürülmüştür.

Çizelge 6.33: BDD elektrot ile destek elektrolit kullanılmadan elde edilen deneysel sonuçlar. (pH: 4, Akım yoğunluğu: 65mA/cm²)

Zaman (dk)	pH	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	3,88	18,1	25,2	4100	0	0
15	3,60	29,2	19,1	3300	19,51	62,1
30	3,08	32,1	16,2	2800	31,71	114,7
45	2,50	33,4	17,1	2400	41,46	170,3
60	2,30	37,2	18,3	1550	62,20	229,8

Çizelge 6.34: BDD elektrot ile 0,5M NH₄Cl destek elektrolit kullanılarak elde edilen deneysel sonuçlar. (pH: 4, Akım yoğunluğu: 65mA/cm²)

Zaman (dk)	pH	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	4,05	15,0	14,5	4100	0	0
15	3,12	38,0	11,7	3850	6,10	38,0
30	2,42	42,5	11,2	3650	10,98	74,4
45	2,19	42,0	9,4	3100	24,39	105,0
60	1,86	43,6	9,6	2800	31,71	136,2

Çizelge 6.35: BDD elektrot ile 0,5M NaCl destek elektrolit kullanılarak elde edilen deneysel sonuçlar. (pH: 4, Akım yoğunluğu: 65mA/cm²)

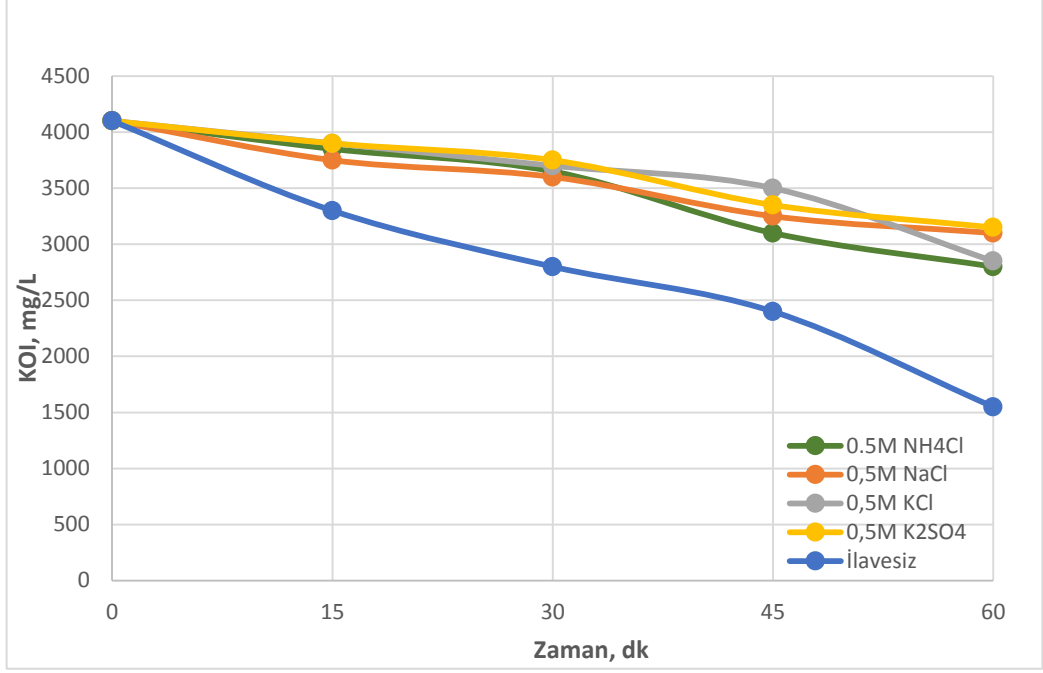
Zaman (dk)	pH	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	3,85	24,5	11,9	4100	0	0
15	4,38	35,9	9,7	3750	8,54	31,5
30	2,85	43,1	9,3	3600	12,20	61,8
45	1,84	44,2	9,2	3250	20,73	91,7
60	1,62	46,3	9,9	3100	24,39	123,8

Çizelge 6.36: BDD elektrot ile 0,5M KCl destek elektrolit kullanılarak elde edilen deneysel sonuçlar. (pH: 4, Akım yoğunluğu: 65mA/cm²)

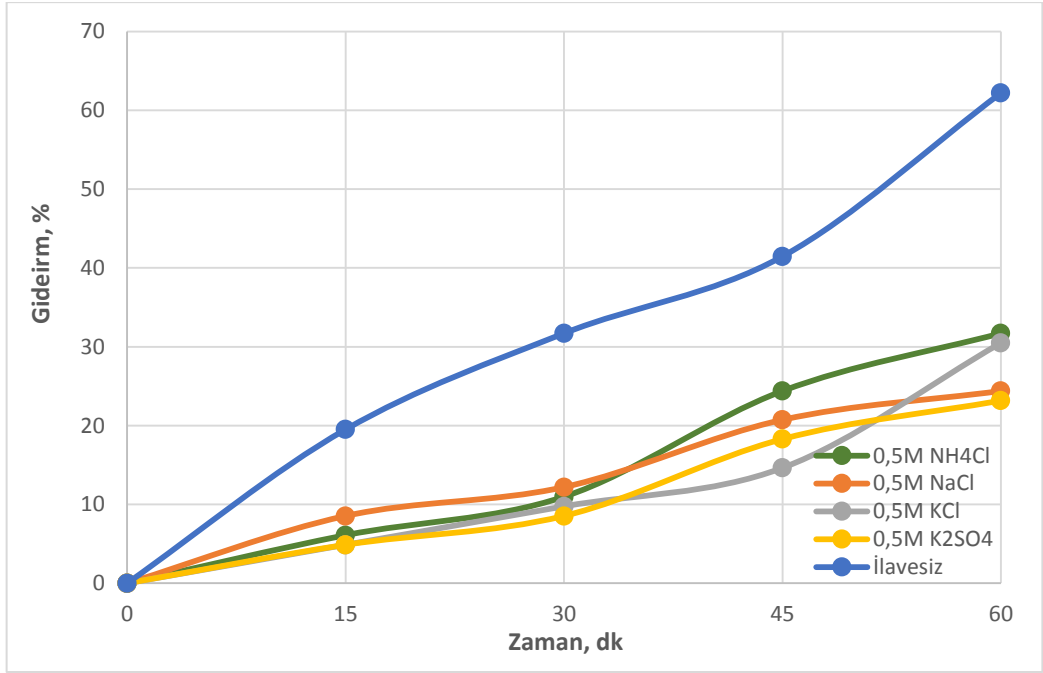
Zaman (dk)	pH	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	3,86	23,9	12,5	4100	0	0
15	3,01	35,1	10,1	3900	4,88	32,8
30	2,77	42,0	9,9	3700	9,76	65,0
45	2,14	40,4	9,4	3500	14,63	95,6
60	1,86	40,6	9,6	2850	30,49	126,8

Çizelge 6.37: BDD elektrot ile 0,5M K₂SO₄ destek elektrolit kullanılarak elde edilen deneysel sonuçlar. (pH: 4, Akım yoğunluğu: 65mA/cm²)

Zaman (dk)	pH	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	4,02	21,2	11,8	4100	0	0
15	6,84	35,9	10,2	3900	4,88	33,2
30	7,60	40,9	9,5	3750	8,54	64,0
45	7,18	37,4	9,6	3350	18,29	95,2
60	6,13	44,3	9,5	3150	23,17	126,1



Şekil 6.22: BDD elektrot için destek elektrolit çeşidinin KOİ derişimine etkisi



Şekil 6.23: BDD elektrot için destek elektrolit çeşidinin KOİ giderimine etkisi

Farklı destek elektrolitlerin etkisi aynı koşullarda Pt kaplı elektrot kullanılarak da denenmiş ve destek elektrolit ilavesiz, NH₄Cl, NaCl, KCl ve K₂SO₄ destek elektrolit için deney sonuçları sırasıyla Çizelge 6.38, Çizelge 6.39, Çizelge 6.40, Çizelge 6.41 ve Çizelge 6.42’de verilmiştir. Şekil 6.24 ve Şekil 6.25’ten de görülebileceği gibi destek elektrolit ilavesiz, NH₄Cl, NaCl, KCl ve K₂SO₄ ilaveli deneyler için arıtım verimi sırasıyla %59, %41, %34, %32 ve %26 olmuş, 4100 mg/L olan başlangıç KOİ derişimi yine sırayla 1700 mg/L, 2400 mg/L, 2700mg/L, 2800 mg/L ve 3050 mg/L değerlerine indirilmiştir.

Çizelge 6.38: Pt kaplı elektrot ile destek elektrolit kullanılmadan elde edilen deneysel sonuçlar. (pH: 4, Akım yoğunluğu: 65mA/cm²)

Zaman (dk)	pH	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	4,05	14,3	16,2	4100	0	0
15	3,68	36,2	13,8	2400	41,46	44,9
30	3,36	44,2	12,9	2250	45,12	86,8
45	3,39	47,6	11,0	2100	48,78	122,5
60	3,21	52,1	12,1	1700	58,54	161,9

Çizelge 6.39: Pt kaplı elektrot ile 0,5M NH₄Cl destek elektrolit kullanılarak elde edilen deneysel sonuçlar. (pH: 4, Akım yoğunluğu: 65mA/cm²)

Zaman (dk)	pH	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	3,99	19,3	9,9	4100	0	0
15	4,75	38,7	9,8	3650	10,98	31,9
30	8,65	39,2	7,7	2900	29,27	56,9
45	8,69	38,1	7,6	2450	40,24	81,6
60	8,71	40,3	7,1	2400	41,46	104,7

Çizelge 6.40: Pt kaplı elektrot ile 0,5M NaCl destek elektrolit kullanılarak elde edilen deneysel sonuçlar. (pH: 4, Akım yoğunluğu: 65mA/cm²)

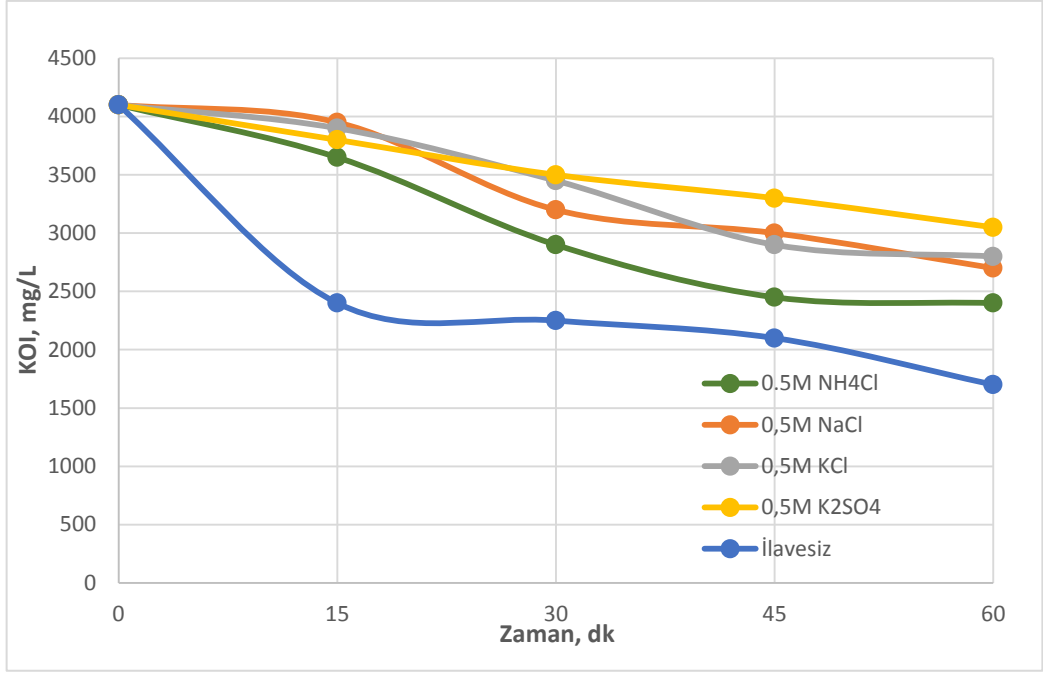
Zaman (dk)	pH	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	4,12	19,0	10,1	4100	0	0
15	5,77	28,1	7,2	3950	3,66	23,4
30	6,21	32,1	7,8	3200	21,95	48,8
45	6,85	34,2	7,7	3000	26,83	73,8
60	8,92	36,4	7,9	2700	34,15	99,5

Çizelge 6.41: Pt kaplı elektrot ile 0,5M KCl destek elektrolit kullanılarak elde edilen deneysel sonuçlar. (pH: 4, Akım yoğunluğu: 65mA/cm²)

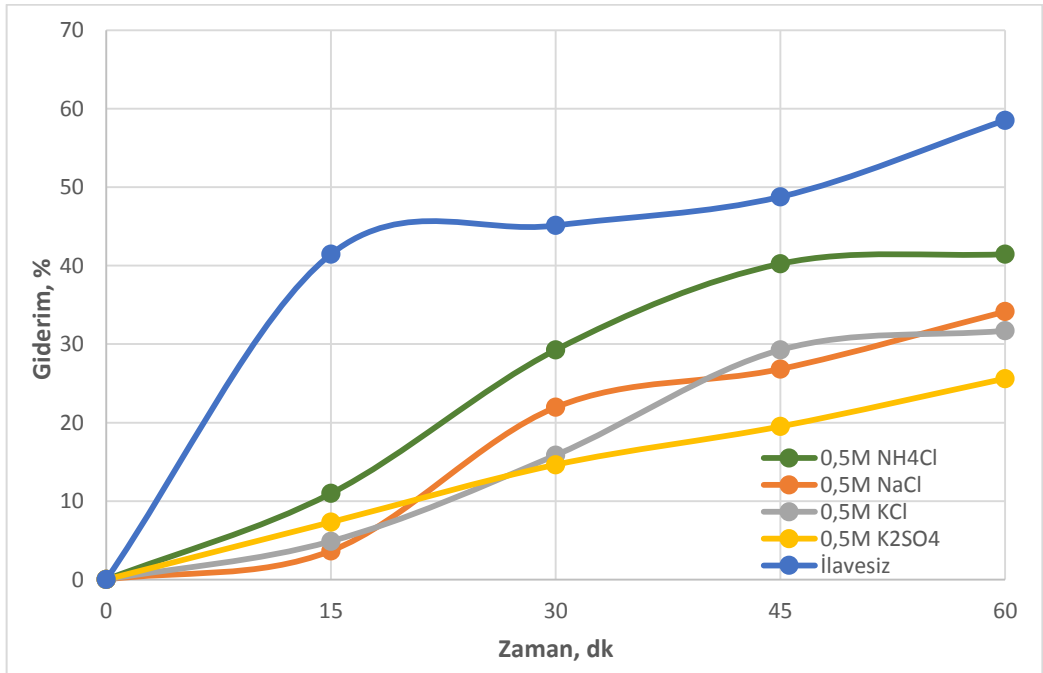
Zaman (dk)	pH	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	3,93	19	10,2	4100	0	0
15	5,92	30,1	9,3	3900	4,88	30,2
30	6,12	38,1	9,5	3450	15,85	61,1
45	8,23	39,5	9,2	2900	29,27	91,0
60	8,22	40,1	9,0	2800	31,71	120,3

Çizelge 6.42: Pt kaplı elektrot ile 0,5M K₂SO₄ destek elektrolit kullanılarak elde edilen deneysel sonuçlar. (pH: 4, Akım yoğunluğu: 65mA/cm²)

Zaman (dk)	pH	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	Verim (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	4,11	19,0	10,3	4100	0	0
15	6,18	30,5	8,9	3800	7,32	28,9
30	7,13	31,5	8,6	3500	14,63	56,9
45	7,94	37,8	9,2	3300	19,51	86,8
60	6,13	39,2	9,1	3050	25,61	116,4



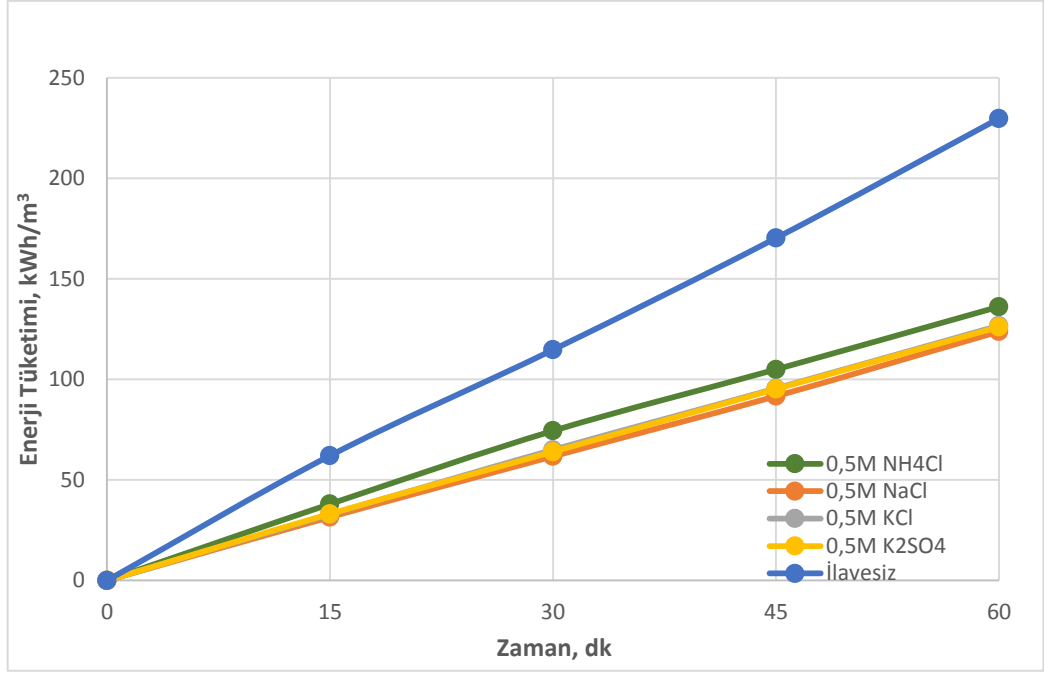
Şekil 6.24: Pt kaplı elektrot için destek elektrolit çeşidinin KOİ derişimine etkisi



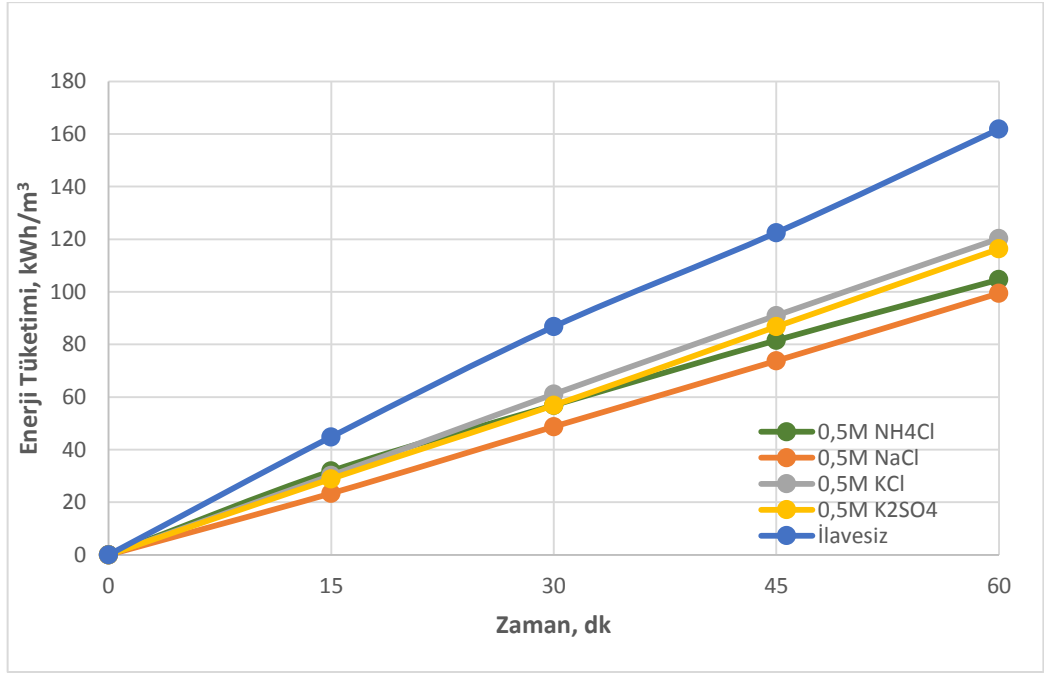
Şekil 6.25: Pt kaplı elektrot için destek elektrolit çeşidinin KOİ giderimine etkisi

Destek elektrolit ilavesi alanyazıda farklı şekillerde çalışılmıştır. Genellikle ucuz olması, kolay elde edilebilmesi, okside edici olması sebebiyle NaCl en çok tercih edilen destek elektrolit olmuştur. Yapılan tüm çalışmalardan destek elektrolit ilavesinin iletkenliği arttığı ve enerji tüketimi azalttığı bilinmektedir. Ancak, arıtım verimine olan etkisi ile tartışmalı konulardan bir tanesidir (Fernandes, vd., 2015; Deng ve Englehardt, J.D., 2007). Araştırmaların bir kısmı destek elektrolit ilavesinde arıtım veriminin arttığı sonucuna ulaşmıştır. Örneğin, Wang, Lau ve Fang (2001) sızıntı suyunun arıtımı sırasında 5000mg/L SO_4^{2-} ekleyerek, KOİ giderimini %36'dan %47'ye çıkarmıştır. Diğer araştırmacılar ise, deneyler sonucunda destek elektrolit ilavesinin arıtım verimini olumsuz etkilediği sonucuna ulaşmıştır. Bu çelişkinin genel olarak artırılmaya çalışılan atıksuların bir çok farklı bileşeni içinde barındırarak kompleks bir yapıda bulunması ve bu bileşiklerin ve moleküllerin birbirleriyle olan etkileşiminden olduğu düşünülmektedir (Fernandes vd., 2015). Elektrolit çeşidinin araştırıldığı çalışmalarda Cl⁻ iyonları içeren bileşiklerin daha iyi arıtım verimi ile sonuçlandığı görülmüştür. Klor içeren destek elektrolitler kendi aralarında karşılaştırıldığında iki elektrot türünde de en iyi arıtım NH_4Cl ilavesinde elde edilmiştir.

Farklı destek elektrolitlerin elektrik tüketimine olan etkisi incelenmiş ve BDD kaplı elektrot için Şekil 6.26'da ve Pt kaplı elektrot için Şekil 6.27'de gösterilmiştir. Elektrolit ilave edildiğinde, ilave edilmeyen duruma göre enerji tüketiminde bariz bir düşüş gözlenmektedir. Bunun sebebi, ortama eklenen ilave iyonların varlığından dolayı elektrik akımını daha iyi bir şekilde iletmesi olduğu düşünülmektedir (Yıldız, Koparal ve Keskinler, 2008). Destek elektrolitler kendi aralarında incelendiğinde ise herhangi bir belirgin etki gözlenememiştir.



Şekil 6.26: BDD kaplı elektrot için destek elektrolit çeşidinin enerji tüketimine etkisi



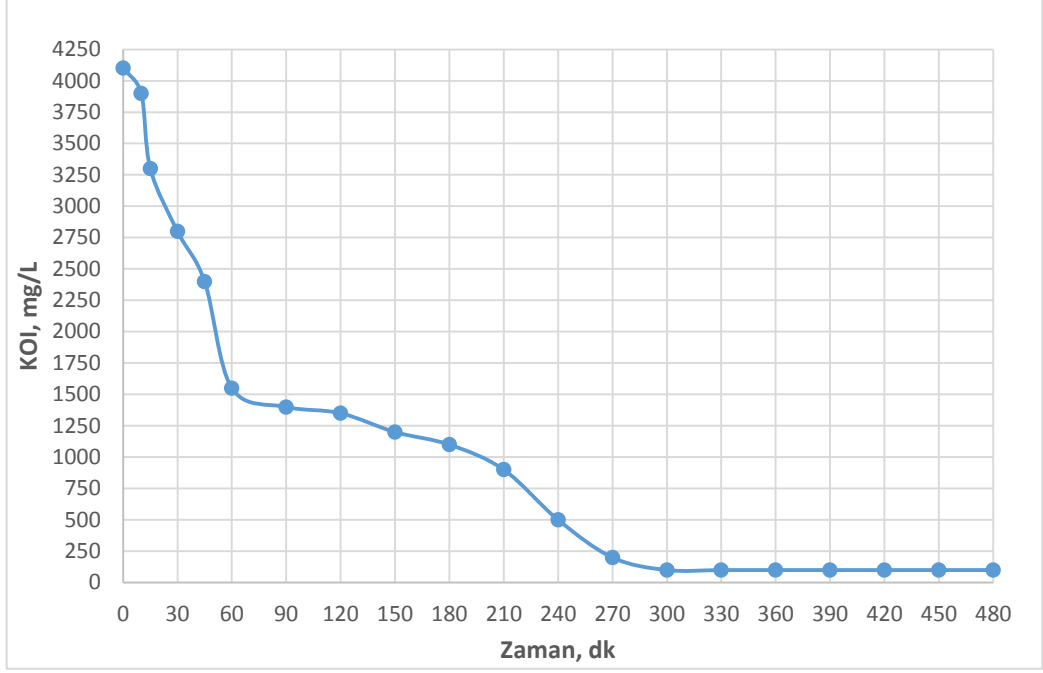
Şekil 6.27: Pt kaplı elektrot için destek elektrolit çeşidinin enerji tüketimine etkisi

6.2.4. Zamanın etkisinin belirlenmesi

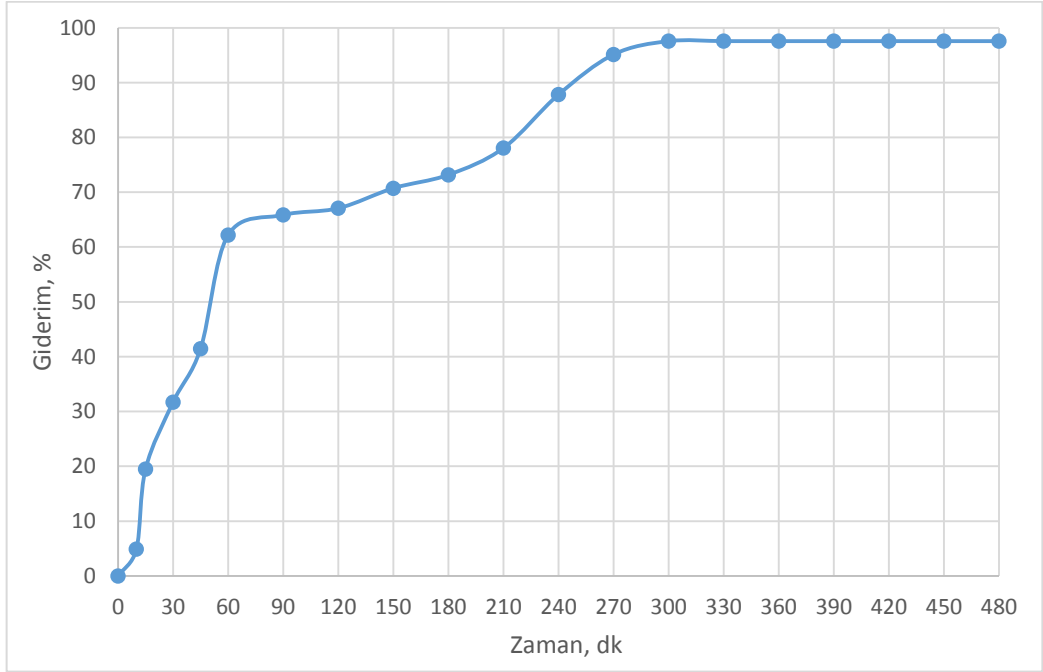
Elektroyükseltgenme çalışmaları, pH 4 ve 65 mA/cm² akım yoğunluğunda 480 dakikalık deneyler olarak tasarlanmıştır. Elektroyükseltgeme çalışmasında ulaşılabilecek en yüksek arıtım giderim verimini görebilmek ve zamanla KOİ değişimini izleyebilmek için uzun süreli deneyler gerçekleştirilmiştir. BDD kaplı elektrot ile yapılan çalışmanın sonuçları Çizelge 6.43'de ve Şekil 6.28 ve Şekil 6.29'da gösterilmektedir. Arıtıma olan etkisi incelendiği vakit, zaman ile arıtım veriminin arttığı gözlenmiştir. 300 dakika sonunda en yüksek arıtım verimi olan %97.91 ile 4100 mg/L olan başlangıç derişiminden 100 mg/L değerine düşmüş ve geri kalan zaman dilimlerinde sabit olarak kalmıştır.

Çizelge 6.43: BDD elektrot ile zamana karşı elde edilen sonuçlar.
(pH: 4, Akım yoğunluğu: 65mA/cm², Destek elektrolit: Yok)

Zaman (dk)	pH	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	KOI Gid. Verimi (%)	Renk (Abs)	Renk Gid. Verimi (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	3,88	18,1	25,2	4100	0	2,18	0	0
15	3,60	29,2	19,1	3300	19,51	0,15	93,35	62,1
30	3,08	32,1	16,2	2800	31,71	0,015	99,31	114,7
45	2,50	33,4	17,1	2400	41,46	0,014	99,36	170,3
60	2,30	37,2	18,3	1550	62,20	0,015	99,31	229,8
90	3,12	48,2	12,0	1400	65,85	0,015	99,31	307,8
120	3,31	49,5	14,2	1350	67,07	0,012	99,45	400,1
150	3,15	51,2	14,1	1200	70,73	0,011	99,50	491,7
180	5,98	55,2	16,5	1100	73,17	0,010	99,54	599,0
210	6,23	51,2	17,2	900	78,05	0,005	99,77	710,8
240	8,71	48,8	17,6	500	87,80	0,003	99,86	825,2
270	8,95	49,6	20,8	200	95,12	0,003	99,86	960,4
300	9,25	55,5	21,2	100	97,56	0,002	99,91	1098,2
330	7,68	60,1	22,0	100	97,56	0,002	99,91	1241,2
360	6,99	61,4	25,4	100	97,56	0,002	99,91	1406,3
390	5,25	62,3	25,6	100	97,56	0,002	99,91	1572,7
420	4,21	62,4	23,3	100	97,56	0,002	99,91	1724,1
450	3,25	64,2	24,4	100	97,56	0,002	99,91	1882,7
480	3,71	65,8	24,3	100	97,56	0,002	99,91	2040,7

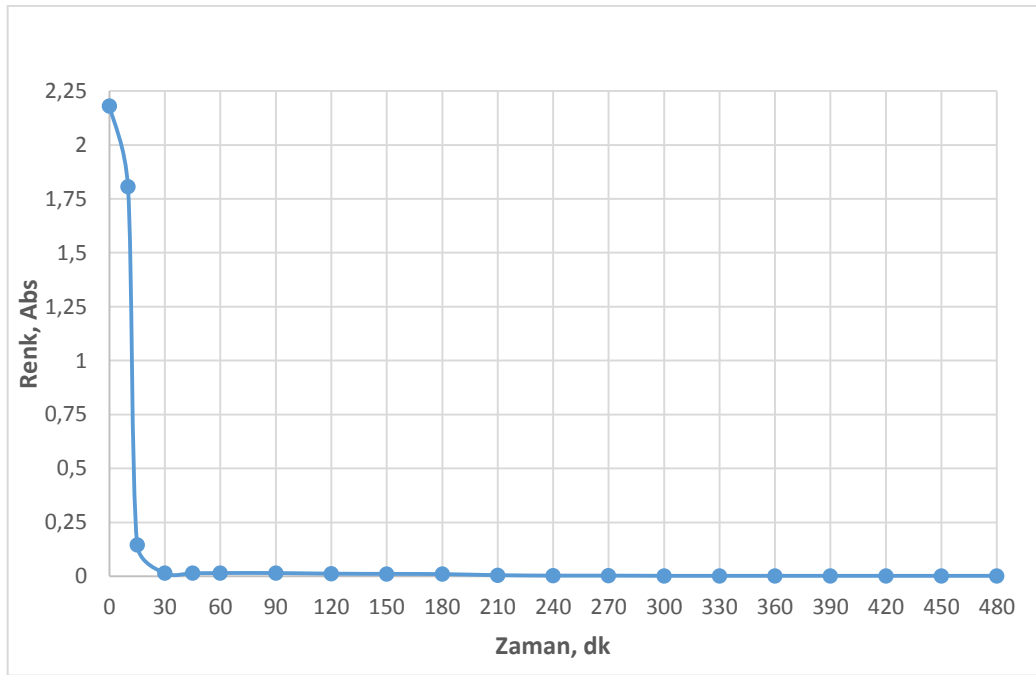


Şekil 6.28: BDD elektrotla zamana karşı KOI derişimi

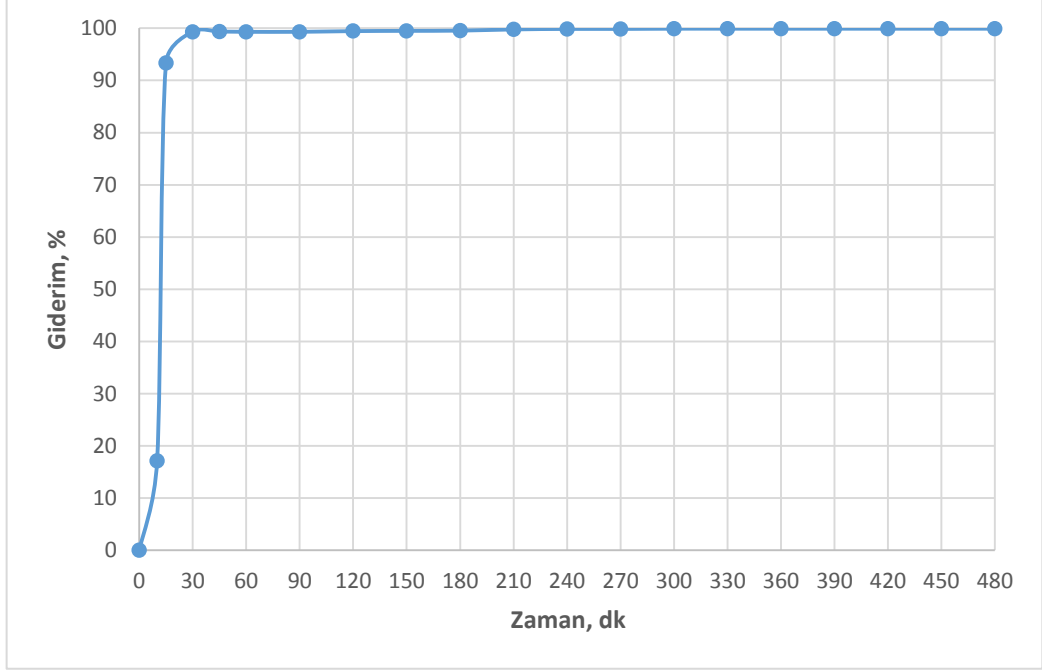


Şekil 6.29: BDD elektrotla zamana karşı KOI giderimi

BDD elektrot ile yapılan elektroyükseltgeme çalışmasında atık sudaki renk değişimi Şekil 6.30 ve Şekil 6.31’de gösterilmiştir. BDD kaplı elektrotun atıksuda meydana gelen renk değişimi incelendiğinde 30 dakika sonunda %99,31 değeri elde edilmiştir. Bu zamandan sonra ise arıtım verimi değişmemektedir. BDD elektrotla yapılan deneylerde daha iyi bir arıtım verimine ulaşma sebebinin, anot yüzeyinde tutunan hidroksil radikallerinin ($\cdot\text{OH}$) BDD yüzeyi ile zayıf bir bağ kurması ve kolayca ayrılması olduğu düşünülmektedir (Radjenovic ve Sedlak, 2015).



Şekil 6.30: BDD elektrotla zamana karşı Renk derişimi

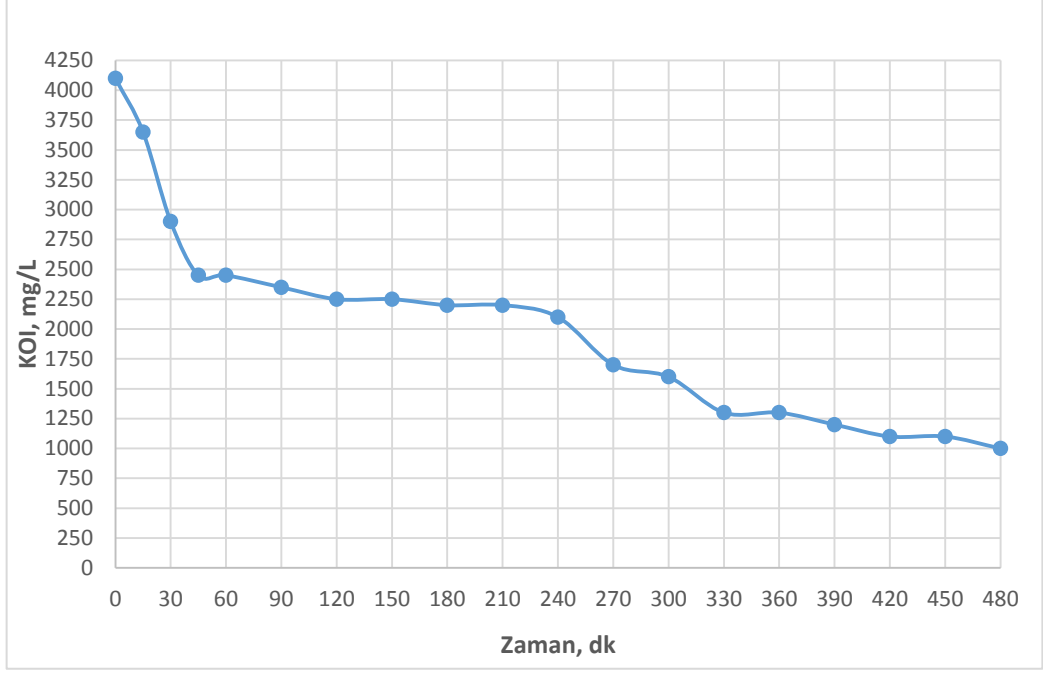


Şekil 6.31: BDD elektrotla zamana karşı Renk giderimi

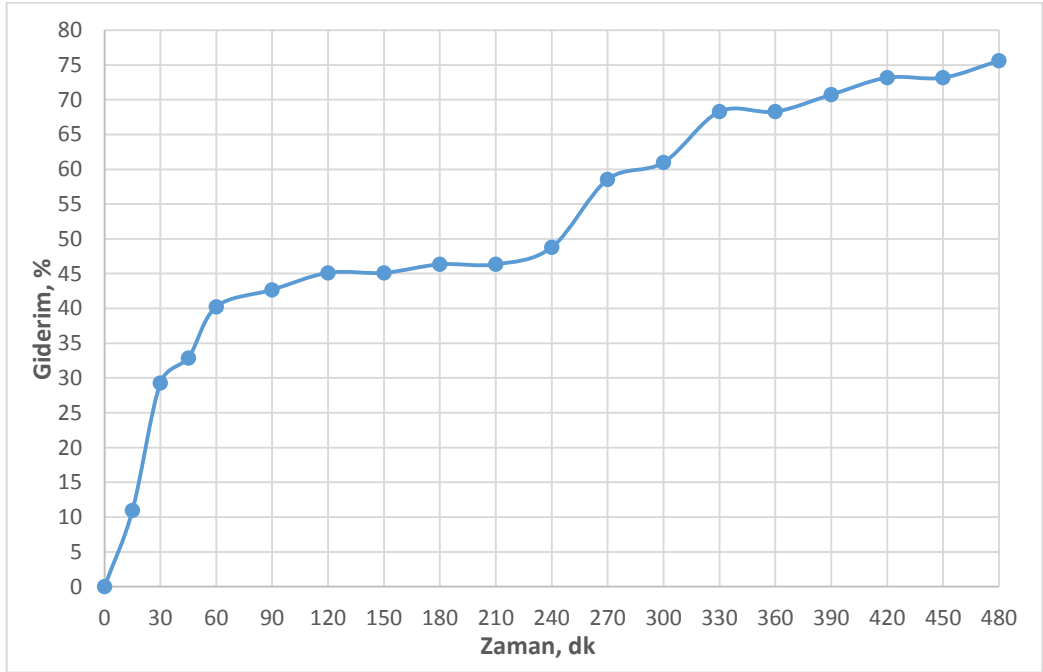
Pt kaplı elektrot kullanarak zaman ile elektroyükseltgeme sürecinde oluşan değişikliklerin belirlendiği bir çalışma yapılmış ve sonuçları Çizelge 6.44’de verilmiştir. Arıtıma olan etkisi ise Şekil 6.32 ve Şekil 6.33’da gösterilmiştir. Arıtım zamana göre artmaktadır ve 480 dakika sonunda 4100 mg/L olan başlangıç derişimi %76 arıtım verimi ile 1000 mg/L değerine indirilmiştir. Renk gideriminde ise 90 dakika sonunda %94,7 arıtım verimine ulaşılmıştır. Renk gideriminin zamana karşı olan değişimi Şekil 6.32 ve Şekil 6.33’te görölmektedir.

Çizelge 6.44: Pt kaplı elektrot ile zamana karşı elde edilen sonuçlar.
(pH: 4, Akım yoğunluğu: 65mA/cm², Destek elektrolit: Yok)

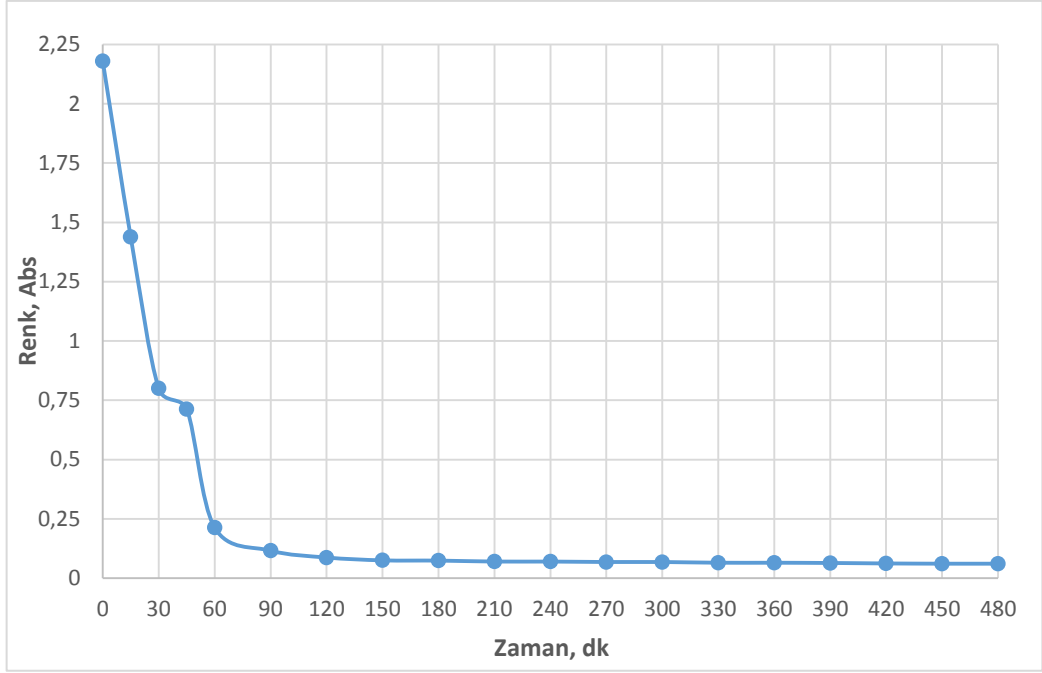
Zaman (dk)	pH	Sıcaklık (°C)	Gerilim (volt)	KOI (mg/L)	KOI Gid. Verimi (%)	Renk (Abs)	Renk Gid. Verimi (%)	Enerji Tük. kWh/m ³
0	4,05	14,3	16,2	4100	0	2,18	0	0
15	3,72	35,4	18,1	3650	10,98	1,44	34,01	39,2
30	3,36	44,2	12,9	2900	29,27	0,80	63,31	123,1
45	8,69	38,1	7,6	2450	40,24	0,71	67,29	172,5
60	3,21	52,1	12,1	2450	40,24	0,21	90,23	251,1
90	3,80	48,3	19,1	2350	42,68	0,12	94,68	375,3
120	3,80	55,3	17,7	2250	45,12	0,09	96,01	490,3
150	5,85	58,2	19,1	2250	45,12	0,08	96,56	614,5
180	5,10	58,3	18,2	2200	46,34	0,07	96,60	732,8
210	3,62	59,1	19,5	2200	46,34	0,07	96,79	859,5
240	3,73	59,5	20,5	2100	48,78	0,07	96,79	992,8
270	3,58	58,4	20,5	1700	58,54	0,07	96,88	1126,0
300	3,53	60	21,1	1600	60,98	0,07	96,88	1263,2
330	3,68	62,5	19,0	1300	68,29	0,07	97,02	1386,7
360	3,21	60,5	18,1	1300	68,29	0,07	97,02	1504,3
390	3,53	60,2	17,5	1200	70,73	0,07	97,06	1618,1
420	3,87	60,5	17,6	1100	73,17	0,06	97,16	1732,5
450	3,91	61,1	17,5	1100	73,17	0,06	97,20	1846,2
480	3,90	61,3	17,5	1000	75,61	0,06	97,20	1960,0



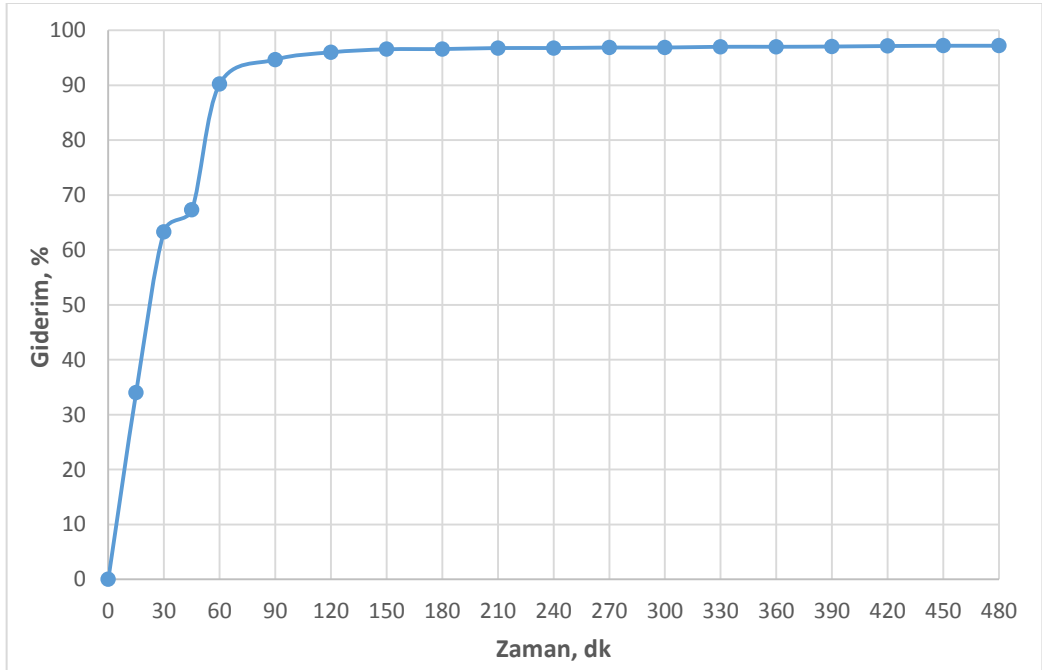
Şekil 6.32: Pt kaplı elektrotla zamana karşı KOİ derişimi



Şekil 6.33: Pt kaplı elektrotla zamana karşı KOİ değışimi

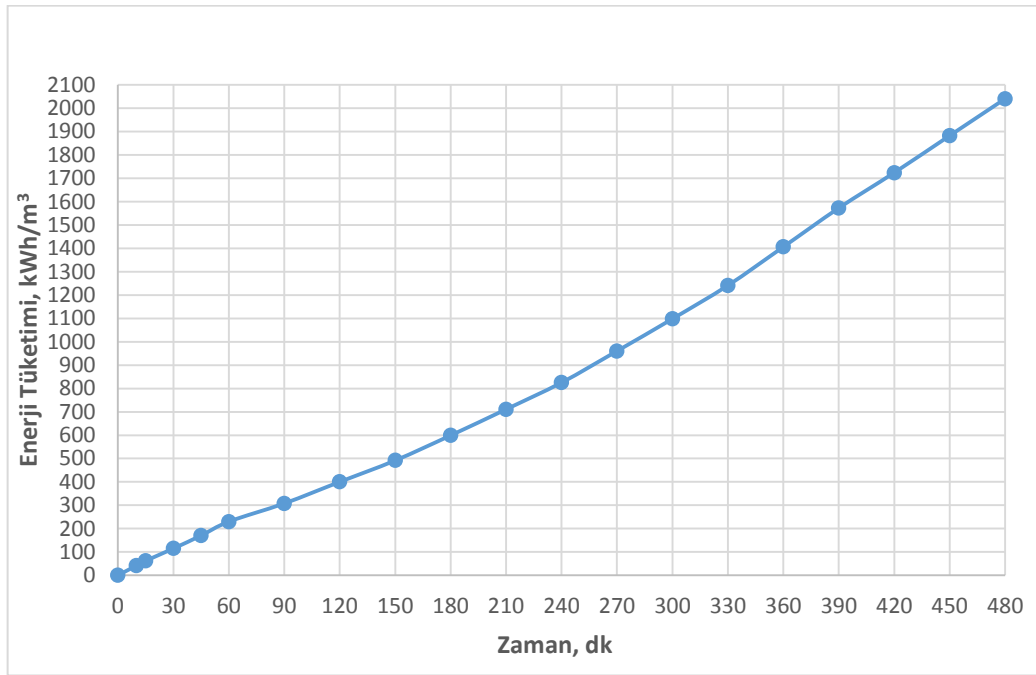


Şekil 6.34: Pt kaplı elektrotla zamana karşı Renk derişimi

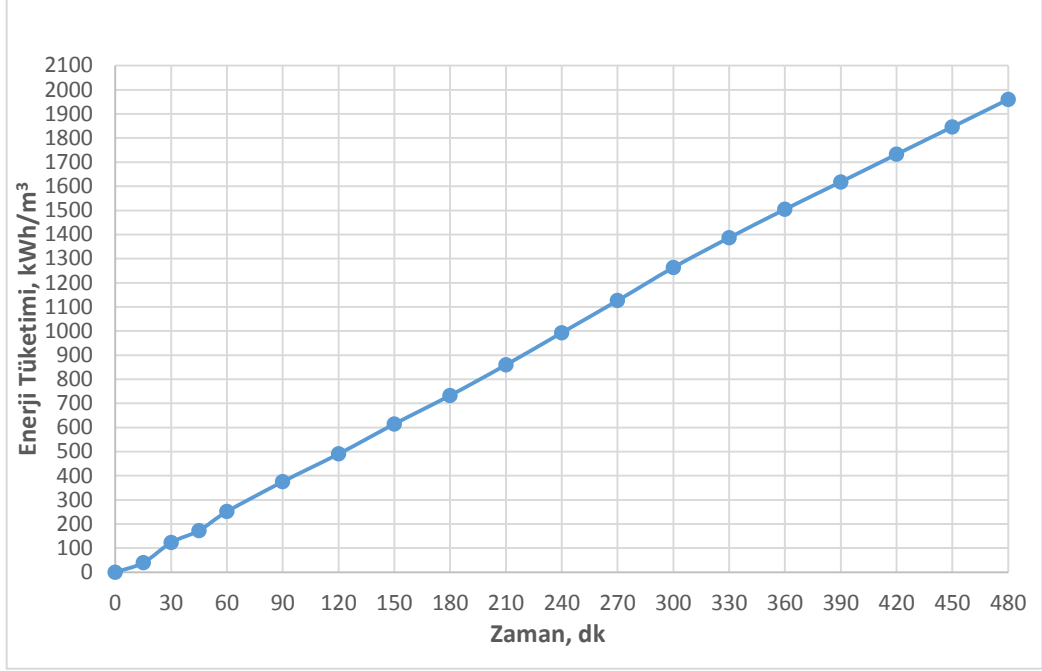


Şekil 6.35: Pt kaplı elektrotla zamana karşı Renk değişimi

Zamana karşı enerji tüketimi hesaplanarak, enerji tüketim hesabı BDD kaplı elektrot için Şekil 6.36'da Pt kaplı elektrot için Şekil 6.37'de gösterilmektedir. 480 dakikalık elektroyükseltgeme işlemi sonucunda enerji tüketimleri BDD kaplı için 2041 kWh/m³, Pt kaplı elektrot için 1960 kWh/m³ değerine ulaşmaktadır. İki elektrot türü karşılaştırıldığında, BDD elektrotunun enerji tüketiminin daha büyük olduğu görülmektedir. Fakat, ulaşılan arıtım verimlerine karşı elektrik enerjisi tüketimi göz önüne alındığında BDD elektrotun daha verimli olduğu görülmektedir.



Şekil 6.36: BDD elektrotla zamana karşı enerji tüketimi



Şekil 6.37: Pt kaplı elektrotla zamana karşı enerji tüketimi

6.3. Delikli Demir Elektrot Kullanılarak Sızıntı Suyunun Elektropihtaşma Yöntemi ile Arıtımı ve Cevap Yüzey Metodu (Response Surface Method)

6.3.1. Tekrarlanabilirlik deneyleri ve verileri

Deneysel çalışmaların, tekrarlanabilirlik ve yeniden üretilebilirlik testinden değerlendirilmesi yapılmak üzere istatistik model kullanılmıştır. A ve B kişisi olmak üzere iki farklı operatör, aynı koşullarda deneyler yürütmüştür. 10 farklı uygulama üzerinden yürütülen 2'şer numune alınarak yürütülen ve 2 ayrı tekrar ile her bir operatör 20'şer deney olmak üzere toplam 40 deney gerçekleştirilmiştir. Reçete değerleri ve karşılık gelen deneysel koşullar Çizelge 6.45'te belirtilmiştir.

Çizelge 6.45: Reçeteler ve karşılık gelen deneysel parametreler

Reçete 1	Akım yoğunluğu: 30 mA/cm ² , polielektrolit: 0.5 mg/L, pH: 3
Reçete 2	Akım yoğunluğu: 40 mA/cm ² , polielektrolit: 0.5 mg/L, pH: 3
Reçete 3	Akım yoğunluğu: 50 mA/cm ² , polielektrolit: 0.5 mg/L, pH: 3
Reçete 4	Akım yoğunluğu: 30 mA/cm ² , polielektrolit: 0.5 mg/L, pH: 5
Reçete 5	Akım yoğunluğu: 40 mA/cm ² , polielektrolit: 0.5 mg/L, pH: 5
Reçete 6	Akım yoğunluğu: 50 mA/cm ² , polielektrolit: 0.5 mg/L, pH: 5
Reçete 7	Akım yoğunluğu: 30 mA/cm ² , polielektrolit: 0.5 mg/L, pH: 7
Reçete 8	Akım yoğunluğu: 40 mA/cm ² , polielektrolit: 0.5 mg/L, pH: 7
Reçete 9	Akım yoğunluğu: 50 mA/cm ² , polielektrolit: 0.5 mg/L, pH: 7
Reçete 10	Akım yoğunluğu: 30 mA/cm ² , polielektrolit: 1 mg/L, pH: 3

60 dakikalık elektropıhtılaşma işlemi sonunda her bir örnekten 2'şer örnek alınarak Bölüm 5.1'de anlatıldığı şekilde KOİ analizi gerçekleştirilmiştir. Çizelge 6.46'ta 2 farklı deney personeli için gerekli koşullar ve deney sonrasında alınan örneklerden hesaplanan giderim verimleri gösterilmektedir.

Çizelge 6.46: Personel A ve B için % Giderim değerleri

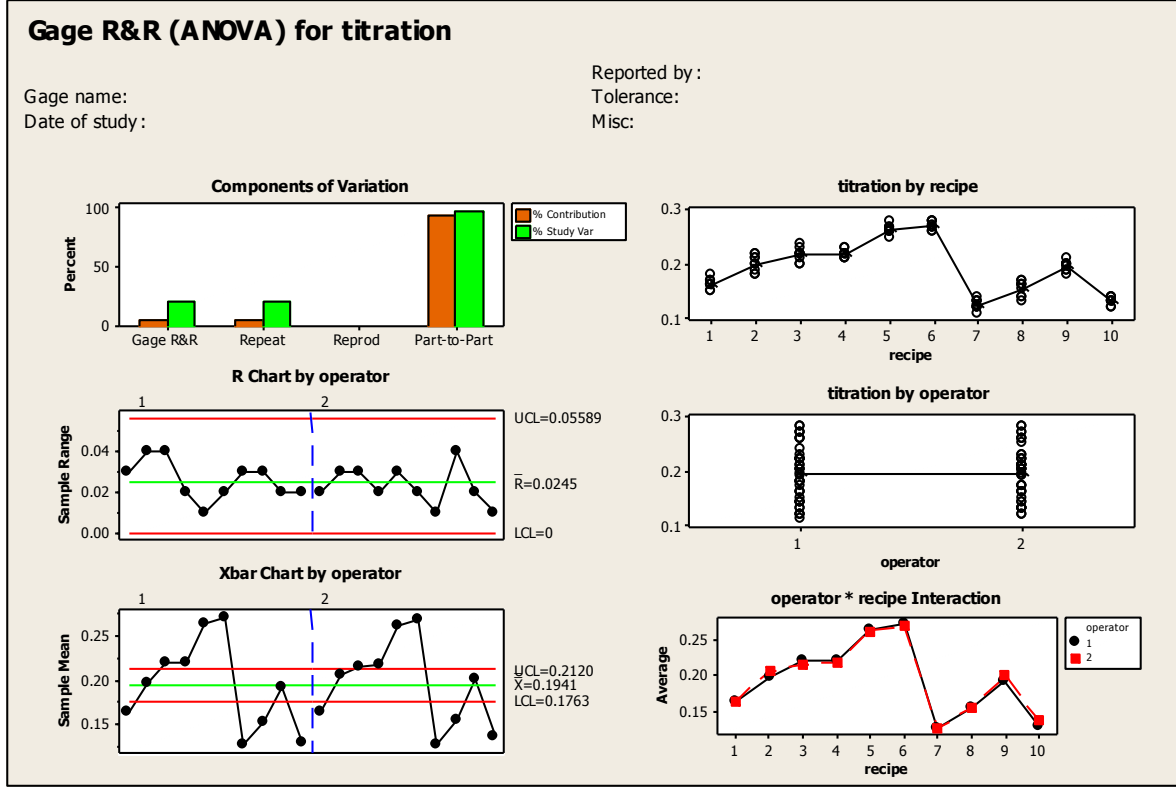
Personel A		Personel B	
Reçete	Giderim (%)	Reçete	Giderim (%)
1	20,00	1	24,44
1	22,22	1	20,00
1	26,67	1	24,44

1	22,22	1	22,22
2	35,56	2	33,33
2	33,33	2	35,56
2	26,67	2	28,89
2	26,67	2	31,11
3	35,56	3	35,56
3	40,00	3	37,78
3	31,11	3	33,33
3	35,56	3	31,11
4	35,56	4	33,33
4	37,78	4	37,78
4	33,33	4	35,56
4	35,56	4	33,33
5	46,67	5	42,22
5	44,44	5	48,89
5	44,44	5	44,44
5	46,67	5	44,44
6	46,67	6	48,89
6	48,89	6	46,67
6	48,89	6	46,67
6	44,44	6	44,44
7	17,78	7	13,33
7	13,33	7	15,56
7	15,56	7	15,56
7	11,11	7	13,33
8	17,78	8	22,22
8	22,22	8	24,44
8	24,44	8	22,22
8	17,78	8	15,56
9	31,11	9	31,11
9	31,11	9	33,33
9	26,67	9	28,89
9	28,89	9	31,11
10	13,33	10	15,56
10	17,78	10	17,78
10	13,33	10	20,00
10	17,78	10	17,78

Deney sonuçları ANOVA Gage R&R (Gage Repeatability & Reproducibility) ile incelenmiş olup Şekil 6.38 ve Çizelge 6.4’de verilmiştir.

Çizelge 6.47: ANOVA Test sonuçları

Gage R&R Study - ANOVA Method						
Two-Way ANOVA Table With Interaction						
Source	DF	SS	MS/CM	F	P	
recipe	9	0.186926	0.0207696	460.126	0.000	
operator	1	0.000031	0.0000313	0.692	0.427	
recipe * operator	9	0.000406	0.0000451	0.323	0.964	
Repeatability	60	0.008375	0.0001396			
Total	79	0.195739				
Two-Way ANOVA Table Without Interaction						
Source	DF	SS	MS/CM	F	P	
recipe	9	0.186926	0.0207696	163.200	0.000	
operator	1	0.000031	0.0000313	0.246	0.622	
Repeatability	69	0.008781	0.0001273			
Total	79	0.195739				
Gage R&R						
%Contribution						
Source	VarComp	(of VarComp)				
Total Gage R&R	0.0001273	4.70				
Repeatability	0.0001273	4.70				
Reproducibility	0.0000000	0.00				
operator	0.0000000	0.00				
Part-To-Part	0.0025803	95.30				
Total Variation	0.0027076	100.00				
Study Var %Study Var						
Source	StdDev (SD)	(6 * SD)	(%SV)			
Total Gage R&R	0.0112812	0.067687	21.68			
Repeatability	0.0112812	0.067687	21.68			
Reproducibility	0.0000000	0.000000	0.00			
operator	0.0000000	0.000000	0.00			
Part-To-Part	0.0507966	0.304779	97.62			
Total Variation	0.0520342	0.312205	100.00			
Number of Distinct Categories = 6						



Şekil 6.38: ANOVA grafikler

Çizelge ve değerler incelendiğinde, deney personeli ve tekrarların deney sonuçları içerisinde etkilediği görülmektedir. “% study variance” değeri %21,68 hesaplanmıştır ve kabul edilebilir üst değer olan %30’un altında ve istatistiki olarak tekrarlanabilir (Healy and Wallace, 2011).

6.3.2 RSM deneyleri ve verileri

Çalışmanın geri kalan aşamasında; pH (3, 5, 7), akım yoğunluğu (30 mA/cm², 40 mA/cm², 50 mA/cm²) ve destek polielektrolit (0.5, 1, 1.5 mg/L) parametrelerinde düşük, orta ve yüksek seviye olmak üzere 3 seviye kullanılmıştır. Değerlerde kodlanmaya ihtiyaç duyulmamıştır. Deneylerin gerçekleştirilmesinden önce ilgili parametre ve değerlerle 27 ayrı deney şartı her biri ikişer tekrar olacak şekilde toplam 54 deneylik deney tasarımı gerçekleştirilmiştir. Deney tasarımında her bir koşul için deney numarası verilmiş ve bu numaralar gelişigüzel bir biçimde program tarafından sıralanmıştır. Deney numaraları,

İlgili deney şartları ve başarı unsuru olarak %KOİ giderimi Çizelge 6.48'de gösterilmektedir.

Çizelge 6.48: *Deney sıralaması ve deneysel şartlar*

Deney Numarası	Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Polielektrolit miktarı (mg/L)	pH	KOİ giderimi (%)
21	30	0,5	3	24,44
17	30	0,5	3	25,55
3	30	0,5	5	42,22
19	30	0,5	5	37,78
44	30	0,5	7	16,67
39	30	0,5	7	15,56
49	30	1,0	3	20,00
16	30	1,0	3	18,89
43	30	1,0	5	25,56
48	30	1,0	5	24,44
47	30	1,0	7	16,67
50	30	1,0	7	16,67
2	30	1,5	3	23,33
12	30	1,5	3	23,33
45	30	1,5	5	32,22
54	30	1,5	5	33,33
15	30	1,5	7	22,22
51	30	1,5	7	21,11
27	40	0,5	3	34,44
32	40	0,5	3	30,00
34	40	0,5	5	46,67
29	40	0,5	5	45,56
10	40	0,5	7	21,11
26	40	0,5	7	18,89
22	40	1,0	3	25,56
6	40	1,0	3	26,67
37	40	1,0	5	31,11
5	40	1,0	5	32,22
4	40	1,0	7	20,00
23	40	1,0	7	18,89

9	40	1,5	3	27,78
24	40	1,5	3	28,89
7	40	1,5	5	37,78
25	40	1,5	5	36,67
28	40	1,5	7	28,89
46	40	1,5	7	28,89
20	50	0,5	3	38,89
41	50	0,5	3	36,67
42	50	0,5	5	49,89
1	50	0,5	5	47,78
33	50	0,5	7	30,00
11	50	0,5	7	28,89
28	50	1,0	3	35,56
30	50	1,0	3	36,67
52	50	1,0	5	35,56
31	50	1,0	5	37,78
53	50	1,0	7	25,56
38	50	1,0	7	26,67
35	50	1,5	3	30,00
8	50	1,5	3	31,11
13	50	1,5	5	45,56
18	50	1,5	5	45,56
36	50	1,5	7	33,33
40	50	1,5	7	34,44

Çizelge 6.48 incelendiğinde en iyi arıtımın 42 numaralı ve aynı şartlarda gerçekleştirilen 1 numaralı deneyler (50 mA/cm² akım yoğunluğu, 1,0 mg/L polielektrolit ilavesi ve pH 5) değerinde gerçekleştiği görülmektedir. % KOİ giderimleri ise 1 numaralı deney için %49,89 iken 42 numaralı deney için %47,78'dir. Çizelge 6.48'deki veriler Response Surface Method ile değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonuçları Çizelge 6.49'da gösterilmektedir.

Çizelge 6.49: KOİ giderimi için hesaplanmış değer ve katsayılar

Response Surface Regression: COD versus Current Density; Electrolyte; pH						
The analysis was done using coded units.						
Estimated Regression Coefficients for COD						
Term		Coef	SE Coef	T	P	
Constant		34.3811	0.8887	38.686	0.000	
Current Density		5.8314	0.4868	11.980	0.000	
Electrolyte		-0.7381	0.4868	-1.516	0.136	
pH		-2.5922	0.4868	-5.325	0.000	
Electrolyte*Electrolyte		5.7358	0.8431	6.803	0.000	
pH*pH		-12.0317	0.8431	-14.270	0.000	
Electrolyte*pH		2.6379	0.5962	4.425	0.000	
S = 2.921 R-Sq = 90.4% R-Sq(adj) = 89.2%						
Analysis of Variance for COD						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS/CM	F	P
Regression	6	3784.64	3784.64	630.77	73.94	0.000
Linear	3	1485.70	1485.70	495.23	58.06	0.000
Square	2	2131.93	2131.93	1065.96	124.96	0.000
Interaction	1	167.01	167.01	167.01	19.58	0.000
Residual Error	47	400.93	400.93	8.53		
Lack-of-Fit	20	361.11	361.11	18.06	12.24	0.000
Pure Error	27	39.82	39.82	1.47		
Total	53	4185.56				
Unusual Observations for COD						
Obs	StdOrder	COD	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
9	49	36.670	30.773	1.013	5.897	2.15 R
23	11	46.670	40.855	0.889	5.815	2.09 R
32	2	42.220	35.024	1.013	7.196	2.63 R
R denotes an observation with a large standardized residual.						
Estimated Regression Coefficients for COD using data in uncoded units						
Term		Coef				
Constant		-20.0528				
Current Density		0.583139				
Electrolyte		-60.5524				
pH		26.1451				
Electrolyte*Electrolyte		22.9433				
pH*pH		-3.00792				
Electrolyte*pH		2.63792				

Belirlilik katsayısı bu deney seti için $R^2_{(adj)} = 89,2$ 'dir. Kurulan regresyon denklemi ile KOİ'deki değişkenliğin açıklanabilir kısmı %89 olarak bulunmaktadır. Bu oran kabul edilebilir sınırlar içerisinde. Bunun yanı sıra çıkarılan matematiksel model (6.2)'de gösterilmektedir.

$$y = -20.0528 + 26.1451 X_1 + 0.583139 X_2 - 60.5524 X_3 + 22.9433 (X_3)^2 - 3.00792 (X_1)^2 + 2.63792 X_1 X_3 \quad (6.2)$$

Burada;

X_1 : pH

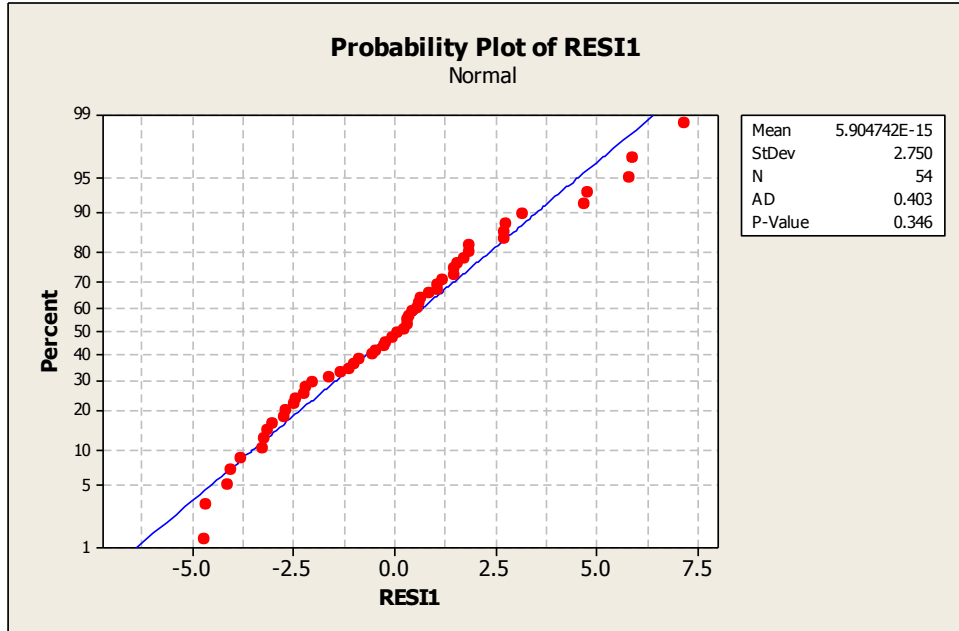
X_2 : Akım yoğunluğu

X_3 : Polielektrolit miktarı

parametrelerini temsil etmektedir.

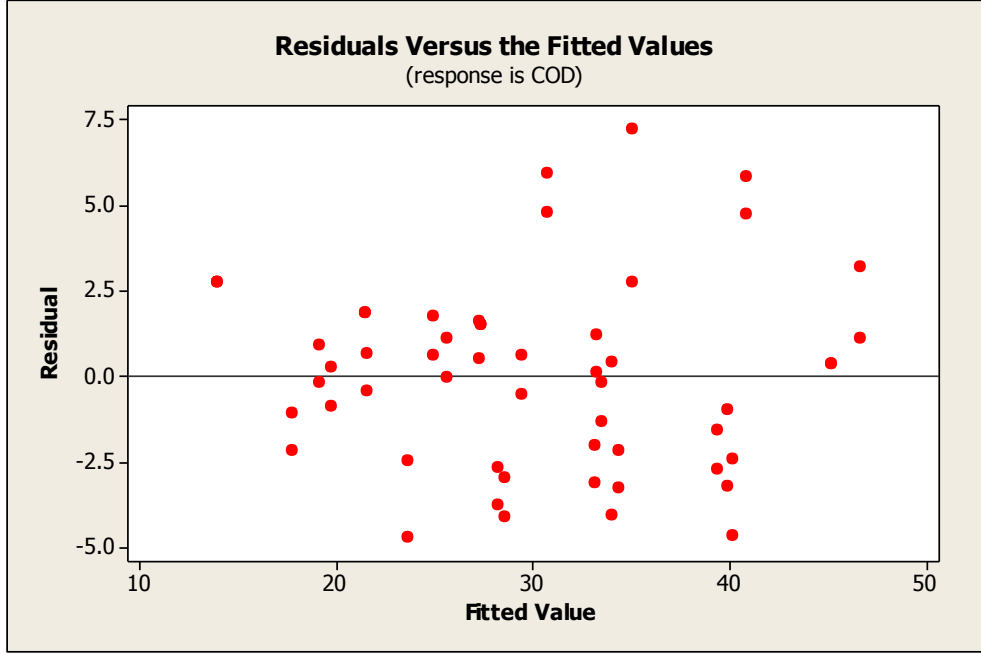
Elde edilen veriler dahilinde Şekil 6.39, Şekil 6.40 ve Şekil 6.41 kullanılarak aşağıdaki matematiksel model varsayımları yapılabilmektedir.

- 1) Şekil 6.39'dan görülebileceği gibi deney verileri üzerinden yapılan modeldeki hatalar normal bir şekilde dağılmışlardır. Bu sonuca, 0,346 olan p değerinin 0,05'ten büyük olması ile de varlabilmektedir.



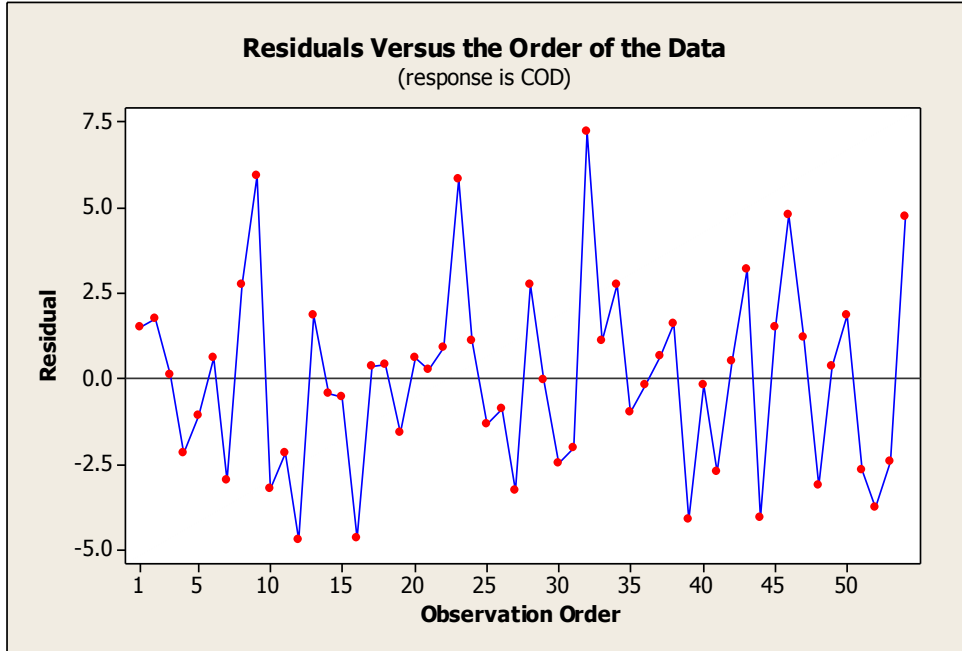
Şekil 6.39: Olasılık dağılım grafiği

- 2) Şekil 6.40'dan görüldüğü gibi dağılım belirli aralıklarla rastsal olarak dağılmış olup hataların sabit varyansa sahip olduğu söylenebilir.



Şekil 6.40: Hata dağılım grafiği

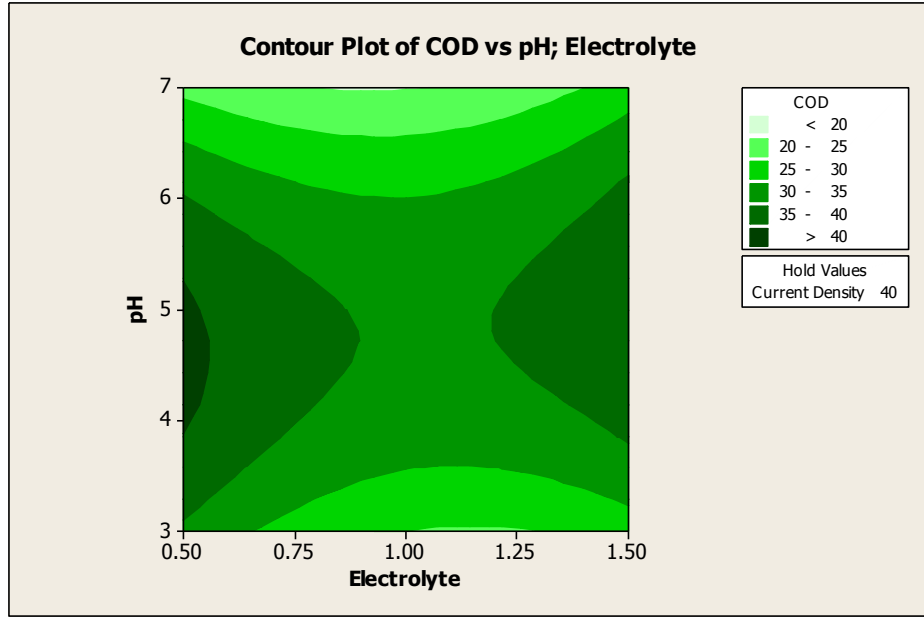
- 3) Şekil 6.41 incelendiğinde deneyin yapılış sırasıyla bağlantılı herhangi bir hata yapılmadığı, hataların bağımsız olduğu görülebilmektedir.



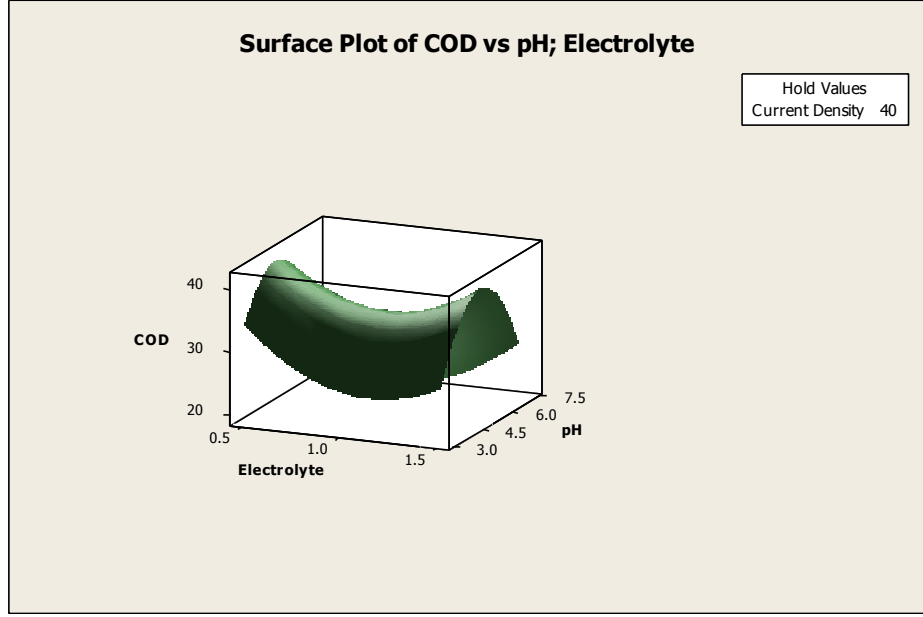
Şekil 6.41: Deney yapılış sırasına göre hataların dağılımı

Başarı ölçütü olarak KOİ giderim verimlerinin alındığı değerlendirmeler sonucu aşağıdaki ikili etkileşimlerin etkisine rastlanmıştır ve bu etkileşimler Şekil 6.42, Şekil 6.43, Şekil 6.44, Şekil 6.45, Şekil 6.46 ve Şekil 6.47 kullanılarak detaylı bir biçimde tartışılmıştır.

Şekil 6.42 ve Şekil 6.43'te pH ve destek polielektrolit ilavesinin KOİ giderimi üzerine etkisi 40 mA/cm²'de akım yoğunluğunda incelenmiştir. Şekil 6.42'deki contour plot grafiği modele yukarıdan bakma fırsatı verebilmektedir. Buna göre; en iyi KOİ giderimi pH'ın 4-5 aralığında ve destek elektrolit miktarının 0,50 mg/L olduğu zaman görülebilmektedir. pH 4-5 aralığının dışına çıktığı vakit KOİ gideriminin düştüğü görülmüştür. Elektrolit miktarı ise 1,0 mg/L 'ye kadar azalırken 1,5 mg/L'ye doğru artmaktadır. Fakat bu artış 0,5 mg/L destek elektrolitteki kadar yüksek değildir.

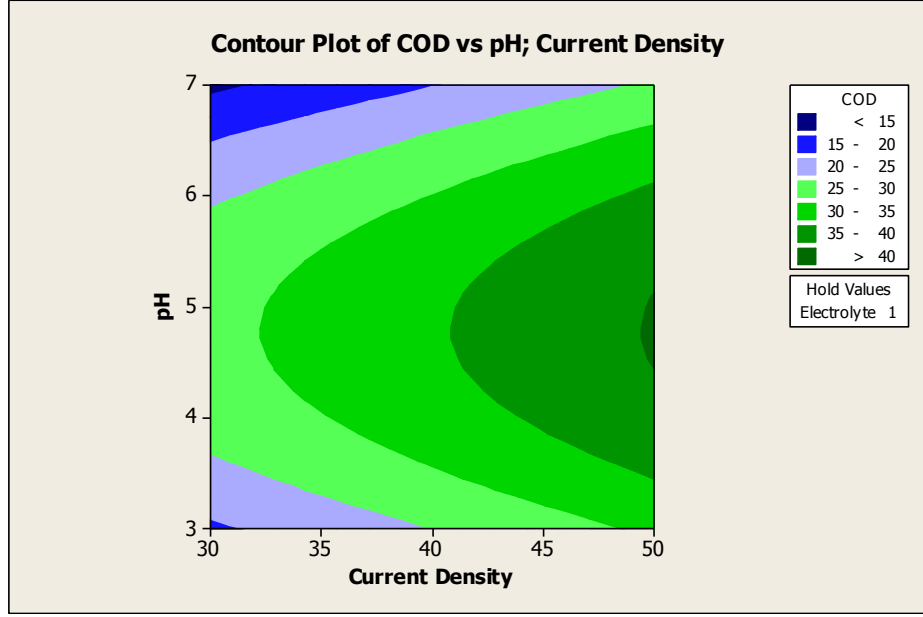


Şekil 6.42 : pH ve destek elektrolit ilavesinin etkileşimi kontur plot grafiği

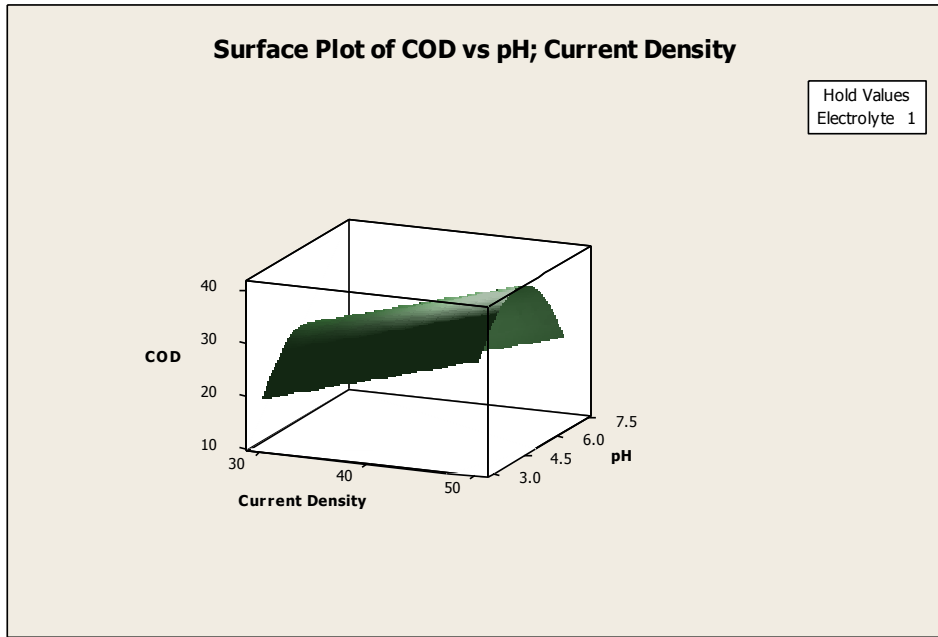


Şekil 6.43: *pH ve destek elektrolit ilavesinin KOİ giderimi üzerine etkisi*

Şekil 6.44 ve Şekil 6.45'te pH ve akım yoğunluğunun KOİ giderimi üzerine etkisi gözlenebilmektedir. 1,0 mg/L destek polielektrolit miktarında incelenmiştir. Buna göre; en iyi KOİ giderimi pH'ın 4-5 aralığında fakat 5'e yakın ve akım yoğunluğu 50 mA/cm² olduğu zaman görülmektedir. pH bu aralığın dışına çıktığı zaman KOİ gideriminin olumsuz etkilendiği gözlenmektedir. Bunun yanı sıra akım yoğunluğunun artmasıyla beraber giderimin de arttığı grafikler yardımıyla görülmektedir.

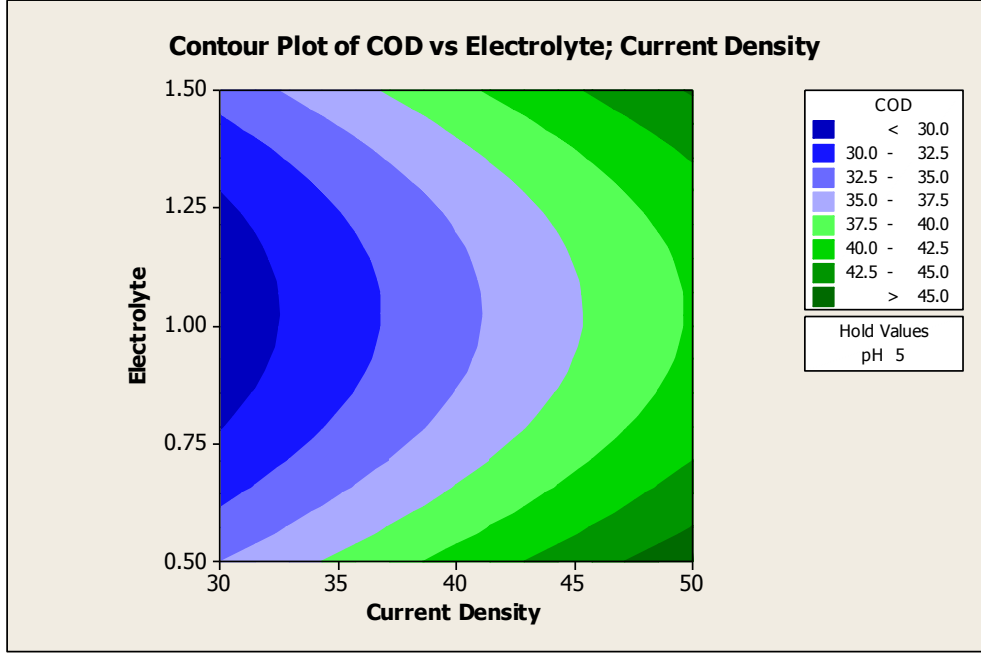


Şekil 6.44: pH ve akım yoğunluğu etkileşiminin kontur plot grafiği

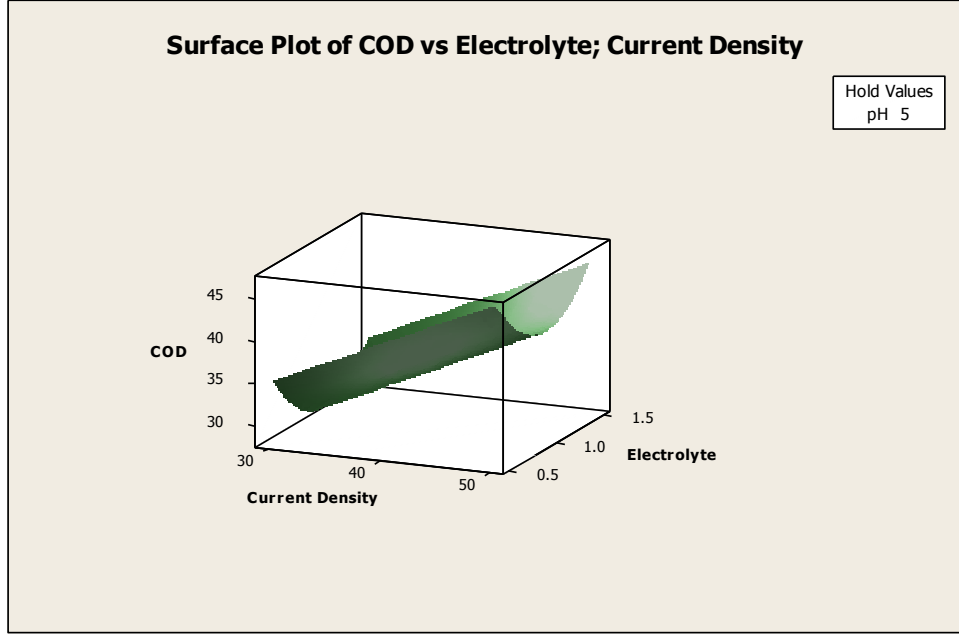


Şekil 6.45: pH ve akım yoğunluğunun KOİ giderimi üzerine etkisi

Şekil 6.46 ve Şekil 6.47’de destek elektrolit ilavesi ve akım yoğunluğunun KOİ giderimi üzerine etkisi gözlenebilmektedir. Akım yoğunluğu arttıkça KOİ giderim veriminin arttığı görülmektedir. Buna bağlı olarak en iyi artım verimi 50 mA/cm²’de gözlenmiştir. Ek olarak benzer şekilde elektrolit ilavesi etkisi 0,5 mg/L’de en iyi verimi vermektedir.

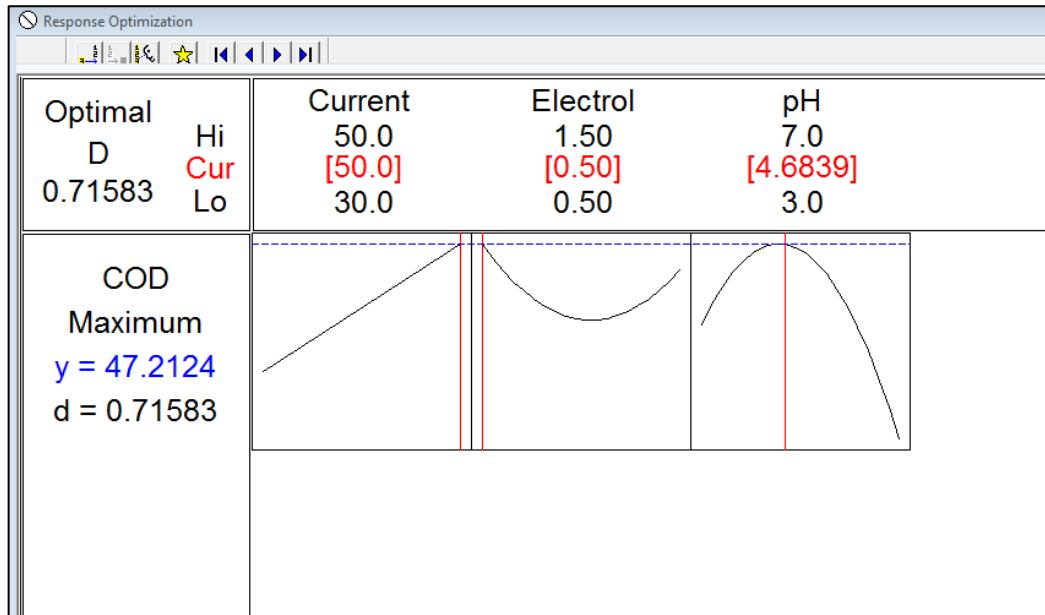


Şekil 6.46: Destek elektrolit ilavesi ve akım yoğunluğunun etkileşimi kontur plot grafiği



Şekil 6.47: Destek elektrolit ilavesi ve akım yoğunluğunun KOİ giderimi üzerine etkisi

Deneyler sonucunda elde edilen verilerin optimizasyonu yapıldığı zaman, en iyi arıtımın 50 mA/cm² akım yoğunluğu, 0.5 mg/L polielektrolit ilavesi ve pH 4.68’de gerçekleşeceği ve metot halinde en yüksek olası verimin ise %47,21 olabileceği görülmektedir. Bu değerler Şekil 6.48’de gösterilmektedir.



Şekil 6.48: Optimizasyon grafiği

7. SONUÇ, TARTIŞMA ve ÖNERİLER

Bu çalışmada düzenli depolama sahasından alınan sızıntı suyunun elektrokimyasal yöntemleri kullanılarak üç farklı yöntem ile arıtımı gerçekleştirilmiştir. İlk çalışmada paralel plakalı alüminyum elektrot ile elektropihtılaştırma yöntemi ile gerçekleştirilmiş, ikinci çalışmada elektroyükseltgenme yöntemi kullanılmış ve üçüncü çalışmada ise delikli demir elektrot ile elektropihtılaştırma yöntemi ve cevap yüzey metodu kullanılmıştır.

İlk çalışma tek kutuplu düzenlenmiş alüminyum elektrotlarla elektropihtılaştırma; farklı pH (3, 5, 7, 9), akım yoğunluğu (30, 45, 55, 65 ve 75 mA/cm²) ve destek elektrolitler (NaCl ve Na₂SO₄) denenmiştir. Çalışma verilerine göre;

- 1) Çalışmada asidik pH değerlerinde daha iyi arıtım verimine ulaşıldığı pH 5'te ise yüksek arıtımın gerçekleştiği gözlenmektedir.
- 2) Akım yoğunluğu arttıkça arıtım verimi artmaktadır.
- 3) Destek elektrolit ilavesi arıtımı olumsuz etkilemekte ve arıtım verimini gözle görülür bir şekilde düşürmektedir.

İlk çalışmada pH 5 ve 75mA/cm² akım yoğunluğunda 45 dakikalık elektropihtılaştırma sonucunda 4100 mg/L olan başlangıç KOİ derişimi %57 arıtım verimi ile 1766 mg/L değerine indirilebilmiştir.

İkinci çalışmada BDD ve Pt kaplı elektrotlar ile yapılan elektroyükseltgeme farklı pH (2, 4, 6, 8, 10), akım yoğunluğu (25, 35, 45, 55, 65 mA/cm²), destek elektrolit ilavesi (NH₄Cl, NaCl, KCl ve K₂SO₄) ve zaman (480 dakika) denenmiştir. Buna göre;

- 1) Çalışmada asidik pH değerlerinde daha iyi arıtım verimine ulaşıldığı pH 4'te ise en yüksek arıtımın gerçekleştiği gözlenmektedir.
- 2) Akım yoğunluğu arttıkça arıtım verimi artmaktadır.
- 3) Destek elektrolit ilavesi elektropihtılaştırma olduğu gibi elektroyükseltgeme da olumsuz etkilemiştir.
- 4) Arıtım verimi zamana bağlı olarak artmakta ve belirli bir zaman sonucunda en yüksek değerine ulaşarak sabit kalmaktadır.

Elektroyükseltgeme çalışmaları sonucunda, pH 4, 65mA/cm² ve ilave olmadan 4100 mg/L olan başlangıç KOİ derişimi BDD elektrot ile 300 dakikalık elektroyükseltgeme

işlemi sonucunda %98 arıtım verimi ile 100 mg/L derişimine indirilmiş ve %99,91 renk giderimi gözlenmiştir. Pt kaplı elektrot ile 480 dakikalık elektroyükseltgeme işlemi sonucunda %76 arıtım verimi ile 1000 mg/L derişimine indirilmiştir ve %97,2 renk giderimi gözlenmiştir. Arıtım öncesi ve arıtım sonrası atık su Şekil 7.1’de gösterilmektedir.



Şekil 7.1: Arıtım öncesi ve sonrası sızıntı suyu

Üçüncü çalışmada ise demir plakalardan oluşan delikli anot ile; pH (3,5, 7), akım yoğunluğu (30, 40, 50 mA/cm²) ve polielektrolit (0.5, 1, 1.5 mg/L) parametreleri çalışılmıştır. Toplam 54 deney sonucunda çıkarılan matematiksel model (6.3)’de gösterilmektedir;

$$y = -20,0528 + 26,1451 X_1 + 0,583139 X_2 - 60,5524 X_3 + 22,9433 (X_3)^2 - 3,00792 (X_1)^2 + 2,63792 X_1 X_3 \quad (6.3)$$

Deneyler sonucunda $R^2_{(adj)} = \%89,2$ olarak bulunmaktır. Bunun yanı sıra grafikler yardımı ile aşağıdaki varyasyonlara ulaşılabilmektedir;

- 1) Deney verileri üzerinden yapılan modelde hatalar normal bir şekilde dağılmışlardır.
- 2) Dağılım belirli aralıklarla rastsal olarak dağılmış olup hataların sabit varyansa sahip olduğu söylenebilir.

3) Deneyin yapılış sırasıyla bağlantılı herhangi bir hata yapılmadığı, hataların bağımsız olduğu görülebilmektedir.

Response Surface Metoduyla yapılan sistem optimizasyonu sonucunda en iyi arıtım %47,21 giderim verimiyle, 50 mA/cm² akım yoğunluğunda, 0,5 mg/L polielektrolit ilavesinde ve pH 4,68 şartlarında gerçekleştirilmiştir. 4100 mg/L olan başlangıç KOİ değeri, 60 dakikalık işletim sonucunda 2164,39 mg/L değerine düşürülmüştür.

Sızıntı suyunun arıtılması için alternatif bir yöntem denenmesi amacıyla elektrokimyasal yöntemlerden elektroyükseltgeme ve elektropıhtılaşma yöntemlerine başvuru bu çalışmada; kısa sürelerde yüksek arıtım verimleri elde edildiği gözlenmiştir. Elektroyükseltgeme ve elektropıhtılaşma yöntemleri sızıntı suyunun arıtımı için bir alternatif oluşturabileceği gibi, ihtiyaca göre başka yöntemler ile birleştirilerek birleşik arıtım yöntemlerinin uygulanmasına da açıktır.

KAYNAKÇA

- Alver, A.** (2012). Aksaray ili düzenli depolama sahası sızıntı suyu karakterizasyonu ve elektrokimyasal arıtılabilirliği. Yüksek Lisans Tezi. Aksaray: Aksaray Üniversitesi
- Ammar, B.H., Brahim, M.B., Abdelhedi, R. ve Samet Y.** (2016). Green electrochemical process for metronizadole degradation at BDD anode in aqueous solutions via direct and indirect oxidation. *Sep Purif. Technol.*, 157, 9 – 16.
- Atık Yönetimi Yönetmeliği.** (2015). T.C. Resmi Gazetesi, 29314, 02.04.2015
- Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik.** (2010). T.C. Resmi Gazetesi, 27533, 26.03.2010
- Baran, S., (1995).** Katı Atık (COP) Depo Yerlerinin Secimi ve İnşasındaki Bazı Ana Hususlar. Jeoloji Mühendisliği, 46, 54-82, Özel Çevre Koruma Kurumu Başkanlığı, Ankara.(http://eski.jmo.org.tr/resimler/ekler/43b5fd1ef60d3a4_ek.pdf?dergi=JEOL OJIMUHENDISLIGIDERGİS), (Erişim tarihi: 02.01.2017)
- Bouhezila F., Hariti M., Lounici H., Mameri N.** (2011). Treatment of the OUED SMAR town landfill leachate by an electrochemical reactor. *Desalination*, Vol 280, Issues 1-3, 347-353
- Chen, G.** (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Sep Purif. Technol.*, 34, 11 – 41.
- Chen, X., Chen, G., Yue, P.L.** (2000). Seperation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation, *Sep Purif. Technol.*, 19, 65 – 76.,
- Civan, F.** (2014). Çöp sızıntı suyunun Ni/Al₂O₃ katalizörü kullanılarak süperkritik su oksidasyonu ile arıtımı, Yüksek lisans tezi, İstanbul:Yıldız Teknik Üniversitesi
- Çetinkaya, F.A.** (2013). Mikrobiyal yakıt hücresi teknolojisi ile sızıntı suyundan elektrik enerjisi üretimi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi
- Deng, Y. ve Englehardt, J.D.** (2007). Electrochemical oxidation for landfill leachate treatment. *Waste Manage*, 27, 380-388
- Elabbas, S., Ouazzani, N., Mandi, L., Berrekhis, F., Perdicakis, M., Pontvianne, S., Pons, M-N., Lopicque, F., Leclerc, J-P.** (2016). Treatment of highly concentrated tannery wastewater using electrocoagulation: Influence of the quality of aluminium used for electrode, *J. Hazard Mater.* 319, 69-77
- Elmore, F.E.** (1905). A process for seperating constituents of subdivided ores and like substances, and apparatus therefor, *Br. Patent* 13,578
- Enache, T.A., Chiorcea-Paquim, A., Fatibello-Filho, O., Oliveira-Brett, A.M.** (2009). Electrochemistry communications hydroxyl radicals electrochemically generated in situ on a boron doped diamond electrode. *Electrochem. Commun*, 11, 1342-1345

- Eurostat.** (2014). <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do> (Erişim tarihi, 02.01.2017)
- Fernandes, A., Pacheco, M.J., Ciriaco, L. ve Lopes, A.** (2015). Review on the electrochemical processes for the treatment of sanitary landfill leachates: Present and future. *Applied Catalysis B: Environmental*, 176-175, 183-200
- Golder, A.K., Samanta, A.N. ve Ray S.** (2007). Removal of Cr³⁺ by electrocoagulation with multiple electrodes: Bipolar and tek kutuplu configuration. *J. Hazard Mater.* 141, 653-661
- 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
- Healy, S., ve Wallace M.** (2011). Gage Repeatability and Reproducibility Methodologies Suitable for Complex Test Systems/cm in Semi-Conductor Manufacturing, , Prof. Abdurrahman Coskun, (Ed), In: Six Sigma Projects and Personal Experiences, (s153 170), ISBN: 978-953-307-370-5
- Holt, P.K., Barton, G.W., Mitchell, C.A.** (2005). The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology, *Chemosphere*, 59, 355-367
- Holt, P.K., Barton, G.W., Wark, M., Mitchell, C. A.** (2002). A quantitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation, *Colloids Surf. A*, vol. 221,223-248,
- İlhan F.** (2006). Sızıntı sularının elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılması. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi
- İlhan F., Kurt U., Apaydin O., Gönüllü T.** (2008). Treatment of leachate by electrocoagulation using aluminum and iron electrodes. *Hazard. Mater.* 154, 381-389
- Kapalka, A., Foti, G. ve Comninellis C.** (2010). Chapter 1 Basic principles of the electrochemical mineralization of organic pollutants for wastewater treatment, Comninellis, C., Chen, G.,(Eds), *Electrochemistry for the environment* içinde (s 1-23), New York:Springer
- Khandegar, V., Saroha, K.A.** (2012). Electrochemical treatment of distillery spent wash using aluminum and iron electrodes. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 20, 439-443
- Klamkang, S.** (2007). Restaurant wastewater treatment by electrochemical oxidation in continuous process. Doctoral Thesis. Thailand: Chulalongkorn University
- Koby, M., Can, O.T., Bayramoğlu, M., (2003).** Treatment of textile wastewater by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes, *J. Hazard Mater. B* 100, 163-178

- Li X., Song J., Guo J., Wang Z., Feng Q.** (2011). Landfill leachate treatment using electrocoagulation, *Procedia Environmental Sciences* 10, 1159-1164
- Linarez-Hernandez, L., Barrera-Diaz, C., Bilyeu, B., Juarez-GarciaRojas, P., Campos-Medina, E.** (2010). A combined electrocoagulation-electrooxidation treatment for industrial wastewater. *J. Hazard Mater.* 175, 688-694
- Matteson, M.J., Dobson, R.L., Glenn, R.W.J., Kukunoor, N.S., Waits, W.H.I., Clayfield, E.J.** (1995). Electrocoagulation and separation of aqueous suspensions of ultrafine particles. *Colloids Surf. A* 104, 101–109.
- Meas, Y., Ramirez, J.A., Villalon, R.M., Chapman, T.W.** (2010), Industrial wastewaters treated by electrocoagulation, *Electrochimica Acta*, 55, 8165-8171
- Mollah, M.Y.A., Morkovsky, P., Gomes, J.A.G, Kesmez, M., Parga, J., Cocke D.L.** (2004). Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *J. Hazard. Mater.*, 114 (1–3), 199–210
- Mollah, M.Y.A., Schennach, R., Parga, J.R., Cocke D.L.** (2001). Electrocoagulation (EC) — science and applications. *J. Hazard. Mater.*, 84 (1), 29–41
- 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. *J. Environ.Manage* 186, 24-41
- Orkun O.M.** (2007). Katı atık sızıntı sularının elektrokimyasal yöntemlerle arıtımının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi. Samsun: Ondokuz Mayıs Üniversitesi
- Özden, E.** (2016). Boyar maddelerin elektrokoagülasyon ile arıtılabilirliğinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Gebze: Gebze İleri teknoloji Enstitüsü
- Öztürk, F.** (2011). Katı atık sızıntı suyu miktarını azaltıcı yönetim stratejileri. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi
- Panizza M. ve Martinez-Huitle C.** (2013). Role of electrode materials for the anodic oxidation of a real landfill leachate-Comparison between Ti-Ru-Sn ternary oxide, PbO₂ and boron-doped diamond anode. *Chemosphere* 90, 1455-1460
- Radjenovic, J., ve Sedlak, D.L.** (2015). Challenges and opportunities for electrochemical processes as next-generation technologies for the treatment of contaminated water. *Environ. Sci. Technol.* 49, 11292-11302
- Sarkka, H.** (2013). Electro-oxidation treatment of pulp and paper mill circulating waters and wastewaters. Doctoral Thesis. Finland: Lappeenranta University of Technology
- Scialdone, O., Randozzo, S., Galia, A. ve Silvestri, G.** (2009). Electrochemical oxidation of organics in water: Role of operative parameters in the absence and in the presence of NaCl. *Water Res.* 43, 2260-2272.

- Sil, A., ve Kumar, S.** (2017). Chapter 17 Landfill leachate treatment, Wong, C.W.J, Tyagi, R.D . ve Pandey, A. (Ed), *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering Solid Waste Management* içinde (s 391-406), Amsterdam: Elsevier
- Skoumal, M., Rodriguez, R. M., Cabot, P.L., Centellas, F., Garrido, J.A., Arias, C., Brillas,E.,** (2009). Electro-fenton, UVA photoelectro-fenton and solar photoelectro-fenton degradation of the drug ibuprofen in acid aqueous medium using platinum and boron-doped diamond anodes. *Electrochimica Acta*, 54, 2077-2085
- Stuart, F.E.** (1946). Electronic water purification progress report on the electronic coagulator – a new device which gives promies of unusually speedy and effective results, *Water Sewage*, 24 - 26
- Şen, F.** (2007). Katı atık sızıntı sularının elektrokimyasal yöntemlerle arıtılabilirliğinin incelenmesi (İZAYDAŞ Tesisleri). Yüksek Lisans Tezi. Gebze: Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü
- Şık, E.** (2015). Demir bilya anot elektrotlar kullanarak elektrokoagülasyon süreci ile içme sularından arsenik giderimi. Doktora Tezi. Gebze: Gebze İleri teknoloji Enstitüsü
- Tezcan Un, U., Koparal, S.A. ve Ogutveren U.K.** (2009). Electrocoagulation of vegetable oil refinery wastewater using aluminum electrodes. *J. Environ. Manage* 90, 428-433
- Turro E., Giannis A., Cossu R., Gidarakos E., Mantzavinos D., ve Katsaounis A.** (2011). Electrochemical oxidation of stabilized landfill leachate on DSA electrodes. *Hazard. Mater.* 190, 460-465,
- Türkiye Belediyeler Birliği Atık Komisyonu.** (2014). Düzenli depolama sahalarının tasarımı, yer seçimi ve vahşi depolama alanlarının ıslahı. (Erişim tarihi: 30.12.2016)
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK).** (2010). Düzenli depolama tesislerinde depolanan atıkların atık tipine, bertaraf veya geri kazanım yöntemine göre dağılımı Tablosu. <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=10750>. (Erişim tarihi: 13.10.2015)
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK).** (2014a). Belediye Atık İstatistikleri, <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=18777>. (Erişim tarihi: 02.01.2017)
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK).** (2014b). Atık Bertaraf ve Geri Kazanım Tesisleri İstatistikleri, <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=18776> (Erişim tarihi: 02.01.2017)
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK).** (2015). Atık Verileri, http://www.tuik.gov.tr/VeriBilgi.do?alt_id=1019. (Erişim tarihi: 13.10.2015)

- Ulu Kaç, F.** (2016). Humic substances and nom removal from aqueous solutions and lake waters (Terkos-Turkey and Saimaa-Finland) by electrocoagulation. Doktora Tezi. Gebze: Gebze İleri teknoloji Enstitüsü
- Urtiega A., Anglada A., Ortiz I., Mantvazinos D. ve Diamadopoulou E.** (2011). Boron doped diamond anodic treatment of leachate: Evaluation of operating variables and formation of oxidation by products. *Water Research* 45, 828-838.
- Vik, E.A., Carlson, D.A., Eikun A.S., Gjessing, E.T.** (1984). Electrocoagulation of potable water. *Water Res.* 18, 1355-1360
- Wang, C., Chou W. L., Kuo, Y. M.** (2009). Removal of COD from laundry wastewater by electrocoagulation/ electroflotation. *J. Hazard. Mater.* 164, 81-86
- Wang, C., Yu, Y., Yin, L., Niu, J., Hou, L.A.** (2016). Insights of ibuprofen electro-oxidation on metal-oxide-coated Ti anodes: Kinetics, energy consumption and reaction mechanisms. *Chemosphere*, 163, 584-591.
- Wang, P., Lau, W.C.I. ve Fang H.P.H.** (2001). Landfill leachate treatment by anaerobic process and electrochemical oxidation. *Environmental Science*, 22, 70-73
- Yalçın, H. ve Gürü, M.** (2010). Elektrokimya ve Uygulamaları, Palme Yayıncılık, 1-40
- Yavuz, Y. ve Shahbazi, R.** (2012). Anodic oxidation of Reactive Black 5 dye using boron doped diamond anodes in a bipolar trickle tower reactor. *Sep Purif Technol*, 85, 130-136
- Yıldız, Y.Ş., Koparal, A.S. ve Keskinler, B.** (2008). Effect of initial pH and supporting electrolyte on the treatment of water containing high concentration of humic substances by electrocoagulation. *Chemical Engineering Journal*, 138, 63-72
- Zhang, H., Choi, H.J. ve Huang, C.P.** (2005). Optimization of fenton process for the treatment of landfill leachate. *J. Hazard. Mater.* 125, 166-174
- Zhang, H., Ran, X., Wu, X. ve Zhang, D.** (2011). Evaluation of Electro-oxidation of biologically treated landfill leachate using response surface methodology. *J. Hazard. Mater.* 188, 261-268
- Zou, J., Peng, X., Li, M., Xiong, Y., Wang, B., Dong, F., Wang, B.** (2017). Electrochemical oxidation of COD from real textile wastewaters: Kinetic study and energy consumption. *Chemosphere*, 171, 332-338