

**ZEYTİNYAĞI ENDÜSTRİSİ ATIK SULARININ
ELEKROKİMYASAL ARITIMI**

Serkan UĞUR

**Yüksek Lisans Tezi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
2004**

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Serkan Uğur'un Zeytinyağı Endüstrisi Atıksularının Elektrokimyasal Arıtımı başlıklı Çevre Mühendisliği Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans tezi 23.02.2004 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Adı-Soyadı

İmza

Üye (Tez Danışmanı) : Yard.Doç.Dr. Ümran TEZCAN ÜN

Üye : Prof. Dr. Ülker BAKIR ÖĞÜTVEREN

Üye : Yard.Doç.Dr. Nezihe AZCAN

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 27.02.2004 tarih ve 9/1 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

Prof. Dr. Altuğ İFTAR
Fen Bilimleri Enstitüsü
Müdürü

ÖNSÖZ

“Zeytinyağı Endüstrisi Atıksularının Elektrokimyasal Arıtımı” başlıklı bu çalışma, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Çevre Teknolojileri Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Çalışmalarım sırasında bilgi ve hoşgörüsü ile yanımda olan, benden her konuda desteğini esirgemeyen değerli danışman hocam Sn. Yard.Doç.Dr. Ümran TEZCAN ÜN’e,

Deneysel çalışmalarında bilgi ve deneyimleriyle yaptıkları katkılardan dolayı değerli hocam Sn. Yard.Doç.Dr. A. Savaş KOPARAL’a

Çevre Sorunları Uygulama ve Araştırma Merkezi’nin her türlü imkanlarından yararlanmamı sağlayan Çevre Sorunları Uygulama ve Araştırma Merkezi Müdürü hocam Sn. Prof.Dr. Ülker BAKIR ÖĞÜTVEREN’e

İlgi ve desteklerinden dolayı Çevre Sorunları Uygulama ve Araştırma Merkezi elemanlarından, arkadaşlarım , Araş. Gör. Aysun ÖZKAN’a, Okutman Yusuf YAVUZ’a, Araş. Gör. Ebru ÖNDER’e, Kimya Teknikeri Emel ÇELİKEL’e, Çevre Mühendisliği Bölümü elemanlarından Araş. Gör. Serdar GÖNCÜ’ye, Araş. Gör. Özlem ÖZDEN’e ve Araş. Gör. Zerrin ÇOKAYGİL’e

Desteklerinden dolayı Sn. Reşat FAZLIOĞLU ve ailesine

Yaşantım boyunca maddi manevi daima yanımda olan sevgili aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Serkan UĞUR

Ocak 2004 ©

ÖZET**Yüksek Lisans Bitirme Tezi****ZEYTİNYAĞI ENDÜSTRİSİ ATIK SULARININ
ELEKTROKİMYASAL ARITIMI****SERKAN UĞUR****Anadolu Üniversitesi****Fen Bilimleri Enstitüsü****Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı****Danışman : Yrd. Doç. Dr. Ümran Tezcan ÜN****2004, 80 sayfa**

Zeytinyağı üretimi sırasında ortaya çıkan genel Zeytinyağı atıksuyu (karasu), organik maddeler, askıda katı maddeler, zehirli fenolik maddeler, yağ ve gres içermektedir. Bu tür bir atıksuyun akarsu, kanalizasyon sistemi veya toprağa deşarj edilmesi, alıcı ortamda önemli bir kirliliğe neden olmaktadır. Türkiye, dünyada zeytin üretimi yapan dördüncü büyük ülkedir ve üretilen zeytinin yaklaşık %90'ı zeytinyağı üretiminde kullanılmaktadır. Bu çalışmada, küçük ve orta işletmelerde kullanımı kolay ve ekonomik olabilecek elektrokoagülasyon yöntemi ile zeytinyağı atıksuyunun arıtılabilirliği incelenmiştir. Giderim verimi, akım verimi ve enerji tüketimi üzerinde akım yoğunluğu, reaktör malzemesi, elektrolit ve destek elektrolit derişimlerinin etkileri çalışılmıştır. Giderim verimi olarak %86 değerine ulaşılmış, düşük enerji tüketimi ve yüksek akım verimleri elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrokoagülasyon, Karasu, KOİ giderimi, Zeytinyağı

ABSTRACT**Master of Science Thesis****ELECTROCHEMICAL TREATMENT OF OLIVE OIL WASTEWATERS****SERKAN UĞUR**

**Anadolu University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Environmental Engineering Program**

**Supervisor: Assist.Prof.Dr. Ümran TEZCAN ÜN
2004, 80 pages**

Olive mill wastewater (blackwater) originating during olive oil production contains organic substances, suspended solids, toxic phenolic substances, oil and grease. Discharging this kind of wastewater to a river, sewer system or soil causes an important pollution of receiving body. Turkey is the fourth largest olive producing country in the world and almost 90% of the olive produced is used to produce olive oil. In this study, treatability of olive mill wastewater by electrocoagulation method that would be feasible and economic in use for small and mid size facilities were examined. Effect of current density, reactor material (aluminium and iron), electrolyte and supporting electrolyte concentration on the removal efficiency, current efficiency and energy consumption were studied. Removal efficiency of 86% was achieved practically and low energy consumption and high current efficiencies were obtained.

Keywords: Blackwater, Electro-coagulation, Olive oil, Removal of COD

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. ZEYTİNYAĞI ÜRETİMİ VE ZEYTİNYAĞI ENDÜSTRİSİ ATIKSUYU	5
2.1. Zeytinyağı Üretimi.....	5
2.1.1. Kesikli üretim süreci (pres süreci).....	7
2.1.2. Sürekli üretim süreci (santrifüj süreç).....	8
2.2. Zeytinyağı Endüstrisi Atıksularının Özellikleri.....	9
2.3. Zeytinyağı Endüstrisi Atıksularının Çevresel Etkileri	12
3. ZEYTİNYAĞI ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ ARITIM YÖNTEMLERİ	15
3.1. Biyolojik Yöntemler.....	15
3.1.1. Aerobik arıtım	15
3.1.2 Anaerobik arıtım	16
3.2. Fiziksel ve Kimyasal Yöntemler.....	17
3.2.1. Membran süreçleri.....	17
3.2.1.1. Ultrafiltrasyon (UF) ile ön arıtma	18
3.2.1.2. Ultrafiltrasyon membranı sonrasında ters osmoz ile ileri arıtma	19
3.2.1.3. Nanofiltrasyon (NF) membranı ile arıtma	19

3.3. Elektrokimyasal Yöntem ile Atıksuların Arıtılması	19
3.4. Diğer Yöntemler	25
3.4.1. Kompostlaştırma	25
3.4.2. Lagünlerde buharlaştırma	26
3.4.3. Arazide arıtım	26
3.4.4. Distilasyon yöntemi ile arıtım	27
3.4.5. Karasuyun adsorpsiyonu	27
3.5. Zeytinyağı Endüstrisi Atıksularının Arıtımında Kullanılan Yöntemlerin Maliyet Analizleri.....	27
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	29
4.1. Zeytinyağı Atıksularının Elektrokoagülasyon Yöntemiyle Giderim Çalışmaları.....	29
4.1.1. Kullanılan kimyasal maddeler.....	30
4.1.2. Kullanılan yardımcı araçlar.....	30
4.1.3. Tayin.....	31
4.1.4. Deney sonuçlarının hesaplanmasında kullanılan eşitlikler	31
4.2. Deneysel Çalışmalardan Elde Edilen Sonuçlar	32
4.2.1. Reaktörün katot veya anot olduğu durumda deney sonuçları...	32
4.2.2. Akımın yoğunluğunun etkisinin incelendiği deney sonuçları..	34
4.2.3. Başlangıç derişiminin etkisinin incelendiği deney sonuçları....	42
4.2.4. Destek elektrolit derişiminin etkisinin incelendiği deney sonuçları.....	52
4.2.5. Polielektrolit derişiminin etkisinin incelendiği deney sonuçları.....	61
4.2.6. Alüminyum reaktörün etkisinin incelendiği deney sonuçları ...	64
5. SONUÇLAR.....	67
KAYNAKLAR.....	70

EKLER

EK.1 Anot yüzey alanı hesabı.....	76
EK.2 Örnek hesaplamalar	78

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
1.1. Dünyadaki zeytinyağı üretiminin ülkelere göre yüzde dağılımları	2
2.1. Zeytinyağı üretiminde kullanılan süreçlerin akım şeması	7
3.1. Yukarı akışlı çamur yataklı bir anaerobik reaktöre ait şematik kesit	17
3.2. İnan ve arkadaşlarının çalıştıkları reaktör	22
3.3. İsrailides ve arkadaşlarının çalışmalarını yaptıkları elektroliz hücresi	23
4.1. Deneysel çalışmaların yapıldığı düzenek	30
4.2. Son KOİ derişiminin reaktörün anot veya katot olmasıyla değişimi. APA: 0,5 g.L ⁻¹ , Demir reaktör.	33
4.3. Reaktörün anot veya katot olmasıyla giderimin değişimi. APA: 0,5 g.L ⁻¹ , Demir reaktör.	33
4.4. Reaktörün anot veya katot olmasıyla akım veriminin değişimi. APA: 0,5 g.L ⁻¹ , Demir reaktör.	34
4.5. Reaktörün anot veya katot olmasıyla enerji tüketiminin değişimi. APA: 0,5 g.L ⁻¹ , Demir reaktör.	34
4.6. Farklı akım yoğunluklarında KOİ derişiminin zamanla değişimi. KOİ: 45000 mg.L ⁻¹ , PAC: 0,5 g.L ⁻¹ , H ₂ O ₂ : 26,36 g.L ⁻¹	39
4.7. Farklı akım yoğunluklarında % giderimin zamanla değişimi. KOİ: 45000 mg.L ⁻¹ , PAC: 0,5 g.L ⁻¹ , H ₂ O ₂ : 26,36 g.L ⁻¹	39
4.8. Farklı akım yoğunluklarında kWh.kg ⁻¹ cinsinden enerji tüketiminin zamanla değişimi. KOİ: 45000 mg.L ⁻¹ , PAC: 0,5 g.L ⁻¹ , H ₂ O ₂ : 26,36 g.L ⁻¹	40
4.9. Farklı akım yoğunluklarında kWh.m ⁻³ cinsinden enerji tüketiminin zamanla değişimi. KOİ: 45000 mg.L ⁻¹ , PAC: 0,5 g.L ⁻¹ , H ₂ O ₂ : 26,36 g.L ⁻¹	40
4.10. Farklı akım yoğunluklarında akım veriminin zamanla değişimi. KOİ: 45000 mg.L ⁻¹ , PAC: 0,5 g.L ⁻¹ , H ₂ O ₂ : 26,36 g.L ⁻¹	41
4.11. Farklı akım yoğunluklarında KOİ derişiminin zamanla değişimi. KOİ: 97000 mg.L ⁻¹ , PAC: 0,5 g.L ⁻¹ , H ₂ O ₂ : 26,36 g.L ⁻¹	42

4.12. Farklı akım yoğunluklarında % giderimin zamanla değişimi. KOİ: 97000 mg.L ⁻¹ , PAC: 0,5 g.L ⁻¹ , H ₂ O ₂ : 26,36 g.L ⁻¹	41
4.13. Farklı akım yoğunluklarında kWh.kg ⁻¹ cinsinden enerji tüketiminin zamanla değişimi. KOİ: 97000 mg.L ⁻¹ , PAC: 0,5 g.L ⁻¹ , H ₂ O ₂ : 26,36 g.L ⁻¹	41
4.14. Farklı akım yoğunluklarında kWh.m ⁻³ cinsinden enerji tüketiminin zamanla değişimi. KOİ: 97000 mg.L ⁻¹ , PAC: 0,5 g.L ⁻¹ , H ₂ O ₂ : 26,36 g.L ⁻¹	42
4.15. Farklı akım yoğunluklarında akım veriminin zamanla değişimi. KOİ: 97000 mg.L ⁻¹ , PAC: 0,5 g.L ⁻¹ , H ₂ O ₂ : 26,36 g.L ⁻¹	42
4.16. 20 mA.cm ⁻² akım yoğunluğunda KOİ derişiminin başlangıç KOİ derişimi ile değişimi. PAC: 0,5 g.L ⁻¹ , H ₂ O ₂ : 26,36 g.L ⁻¹	45
4.17. 20 mA.cm ⁻² akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile % giderimin zamanla değişimi. PAC: 0,5 g.L ⁻¹ , H ₂ O ₂ : 26,36 g.L ⁻¹ ,.....	46
4.18. 20 mA.cm ⁻² akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile kWh.kg ⁻¹ cinsinden enerji tüketiminin zamanla değişimi. PAC: 0,5 g.L ⁻¹ , H ₂ O ₂ : 26,36 g.L ⁻¹ ,.....	46
4.19. 20 mA.cm ⁻² akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile kWh.m ⁻³ cinsinden enerji tüketiminin zamanla değişimi. PAC: 0,5 g.L ⁻¹ , H ₂ O ₂ : 26,36 g.L ⁻¹ ,.....	46
4.20. 20 mA.cm ⁻² akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile akım veriminin zamanla değişimi. PAC: 0,5 g.L ⁻¹ , H ₂ O ₂ : 26,36 g.L ⁻¹	47
4.21. 30 mA.cm ⁻² akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile KOİ derişiminin zamanla değişimi. PAC: 0,5 g.L ⁻¹ , H ₂ O ₂ : 26,36 g.L ⁻¹	47
4.22. 30 mA.cm ⁻² akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile % giderimin zamanla değişimi. PAC: 0,5 g.L ⁻¹ , H ₂ O ₂ : 26,36 g.L ⁻¹	47
4.23. 30 mA.cm ⁻² akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile kWh.kg ⁻¹ cinsinden enerji tüketiminin zamanla değişimi. PAC: 0,5 g.L ⁻¹ , H ₂ O ₂ : 26,36 g.L ⁻¹	48

- 4.24. 30 mA.cm^{-2} akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile kWh.m^{-3} cinsinden enerji tüketiminin zamanla değişimi.
PAC: $0,5 \text{ g.L}^{-1}$, H_2O_2 : $26,36 \text{ g.L}^{-1}$ 48
- 4.25. 30 mA.cm^{-2} akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile akım veriminin zamanla değişimi. PAC: $0,5 \text{ g.L}^{-1}$,
 H_2O_2 : $26,36 \text{ g.L}^{-1}$ 48
- 4.26. 40 mA.cm^{-2} akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile KOİ derişiminin zamanla değişimi. PAC: $0,5 \text{ g.L}^{-1}$,
 H_2O_2 : $26,36 \text{ g.L}^{-1}$ 49
- 4.27. 40 mA.cm^{-2} akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile % giderimin zamanla değişimi.
PAC: $0,5 \text{ g.L}^{-1}$, H_2O_2 : $26,36 \text{ g.L}^{-1}$ 49
- 4.28. 40 mA.cm^{-2} akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile kWh.kg^{-1} cinsinden enerji tüketiminin zamanla değişimi.
PAC: $0,5 \text{ g.L}^{-1}$, H_2O_2 : $26,36 \text{ g.L}^{-1}$ 49
- 4.29. 40 mA.cm^{-2} akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile kWh.m^{-3} cinsinden enerji tüketiminin zamanla değişimi.
PAC: $0,5 \text{ g.L}^{-1}$, H_2O_2 : $26,36 \text{ g.L}^{-1}$ 50
- 4.30. 40 mA.cm^{-2} akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile akım veriminin zamanla değişimi. PAC: $0,5 \text{ g.L}^{-1}$, H_2O_2 : $26,36 \text{ g.L}^{-1}$ 50
- 4.31. 75 mA.cm^{-2} akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile KOİ derişiminin zamanla değişimi.
PAC: $0,5 \text{ g.L}^{-1}$, H_2O_2 : $26,36 \text{ g.L}^{-1}$ 50
- 4.32. 75 mA.cm^{-2} akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile % giderimin zamanla değişimi.
PAC: $0,5 \text{ g.L}^{-1}$, H_2O_2 : $26,36 \text{ g.L}^{-1}$ 51
- 4.33. 75 mA.cm^{-2} akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile kWh.kg^{-1} cinsinden enerji tüketiminin zamanla değişimi.
PAC: $0,5 \text{ g.L}^{-1}$, H_2O_2 : $26,36 \text{ g.L}^{-1}$ 51
- 4.34. 75 mA.cm^{-2} akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile kWh.m^{-3} cinsinden enerji tüketiminin zamanla değişimi.
PAC: $0,5 \text{ g.L}^{-1}$, H_2O_2 : $26,36 \text{ g.L}^{-1}$ 51

4.35. 75 mA.cm ⁻² akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile akım veriminin zamanla değişimi. PAC: 0,5 g.L ⁻¹ , H ₂ O ₂ : 26,36 g.L ⁻¹	52
4.36. %Giderimin H ₂ O ₂ derişimi ile değişimi. PAC: 1 g.L ⁻¹ , Demir reaktör: Anot, C ₀ : 45000 mg.L ⁻¹	53
4.37. Akım veriminin H ₂ O ₂ derişimi ile değişimi. PAC: 1 g.L ⁻¹ , Demir reaktör: Anot, C ₀ : 45000 mg.L ⁻¹	54
4.38. Enerji tüketiminin H ₂ O ₂ derişimi ile değişimi. PAC: 1 g.L ⁻¹ , Demir reaktör: Anot, C ₀ : 45000 mg.L ⁻¹	54
4.39. Polielektrolit ve destek elektrolit deşişimlerine göre KOİ derişiminin zamanla değişimi. Akım yoğunluğu: 30 mA.cm ⁻²	57
4.40. Polielektrolit ve destek elektrolit derişimlerine göre % giderimin zamanla değişimi. Akım yoğunluğu: 30 mA.cm ⁻²	58
4.41. Polielektrolit ve destek elektrolit derişimlerine göre kWh.kg ⁻¹ cinsinden enerji tüketiminin zamanla değişimi. Akım yoğunluğu: 30 mA.cm ⁻²	58
4.42. Polielektrolit ve destek elektrolit derişimlerine göre kWh.m ⁻³ cinsinden enerji tüketiminin zamanla değişimi. Akım yoğunluğu: 30 mA.cm ⁻²	59
4.43. Polielektrolit ve destek elektrolit derişimlerine göre akım veriminin zamanla değişimi. Akım yoğunluğu: 30 mA.cm ⁻²	59
4.44. Giderimin NaCl derişimi ile değişimi. PAC: 0,5 g.L ⁻¹ , Demir reaktör: Katot, C ₀ : 97000 mg.L ⁻¹	60
4.45. Giderimin NaCl derişimi ile değişimi. PAC: 0,5 g.L ⁻¹ , Demir reaktör: Katot, C ₀ : 97000 mg.L ⁻¹	61
4.46. Enerji tüketimi NaCl derişimi ile değişimi. PAC: 0,5 g.L ⁻¹ , Demir reaktör: Katot, C ₀ : 97000 mg.L ⁻¹	61
4.47. Elektrolit olarak PAC ve APA'nın kullanımının akım verimine etkisi. Alüminyum reaktör: Anot.....	63
4.48. Elektrolit olarak PAC ve APA'nın kullanımının akım verimine etkisi. Alüminyum reaktör: Anot.....	63

4.49. Elektrolit olarak PAC ve APA'nın kullanımının enerji tüketimine etkisi. Alüminyum reaktör: Anot.....	63
4.50. Elektrot malzemesi ile KOİ derişiminin zamanla değişimi	65
4.51. Elektrot malzemesi ile giderimin zamanla değişimi	65
4.52. Elektrot malzemesi ile kWh.kg ⁻¹ cinsinden enerji tüketiminin zamanla değişimi.....	65
4.53. Elektrot malzemesi ile kWh.m ⁻³ cinsinden enerji tüketiminin zamanla değişimi	66
4.54. Elektrot malzemesi ile akım veriminin zamanla değişimi	66

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

1.1. Dünyada ki zeytin yağı üretim miktarının ülkelere göre dağılımı	1
1.2. Var ve yok yıllara göre zeytin ve zeytin yağı üretimi.....	3
2.1. Sürekli santrifüj sisteminin pres teknolojisine kıyasla avantaj ve dezavantajları	8
2.2. Bir ton Zeytinin işlenmesine bağlı olarak süreçte madde ve enerji dengesi, girdi ve çıktı analizi.....	9
2.3. Zeytinyağı üretiminde kullanılan süreçlerin karakteristik özellikleri	11
2.4. Klasik ve sürekli yöntemle zeytinyağı üretimi yapan tesislerden çıkan karasuların bileşimi	11
3.1. Elektrotlarda oluşan tepkime mekanizmaları	21
3.2. Arıtım sistemlerinin ilk yatırım masrafları.....	28
3.3. Karasu arıtım süreçleri işletme masrafları	28
4.1. Çeşitli zeytinyağı üretim tesisleri atıksularının KOİ değerleri.....	29
4.2. KOİ'si 97000 olan numune için 20 mA.cm ⁻² akım yoğunluğunda reaktör anot ve katot iken yapılan çalışmaların sonuçları.....	32
4.3. KOİ'si 97000 olan numune için 20 mA.cm ⁻² akım yoğunluğunda reaktör anot ve katot iken % Giderim, Enerji tüketimi ve akım verimi sonuçları	33
4.4. KOİ derişimi 45000 mg.L ⁻¹ olan atıksu için 20 mA.cm ⁻² akım yoğunluğundaki deney sonuçları	35
4.5. KOİ derişimi 45000 mg.L ⁻¹ olan atıksu için 30 mA.cm ⁻² akım yoğunluğundaki deney sonuçları.....	35
4.6. KOİ derişimi 45000 mg.L ⁻¹ olan atıksu için 40 mA.cm ⁻² akım yoğunluğundaki deney sonuçları	35
4.7. KOİ derişimi 45000 mg.L ⁻¹ olan atıksu için 75 mA.cm ⁻² akım yoğunluğundaki deney sonuçları	36

- 4.8. KOİ derişimi 45000 mg.L⁻¹ olan atıksu için 20 mA.cm⁻² akım yoğunluğundaki deneysel çalışma sonucunda % giderim, enerji tüketimi, akım verimi değerleri..... 36
- 4.9. KOİ derişimi 45000 mg.L⁻¹ olan atıksu için 30 mA.cm⁻² akım yoğunluğundaki deneysel çalışma sonucunda % giderim, enerji tüketimi, akım verimi değerleri..... 36
- 4.10. KOİ derişimi 45000 mg.L⁻¹ olan atıksu için 40 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda ki deneysel çalışma sonucunda % giderim, enerji tüketimi, akım verimi değerleri 36
- 4.11. KOİ derişimi 45000 mg.L⁻¹ olan atıksu için 75 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda ki deneysel çalışma sonucunda % giderim, enerji tüketimi, akım verimi değerleri 37
- 4.12. KOİ derişimi 97000 mg.L⁻¹ olan atıksu için 20 mA.cm⁻² akım yoğunluğundaki deney sonuçları..... 37
- 4.13. KOİ derişimi 97000 mg.L⁻¹ olan atıksu için 30 mA.cm⁻² akım yoğunluğundaki deney sonuçları..... 37
- 4.14. KOİ derişimi 97000 mg.L⁻¹ olan atıksu için 40 mA.cm⁻² akım yoğunluğundaki deney sonuçları..... 37
- 4.15. KOİ derişimi 97000 mg.L⁻¹ olan atıksu için 75 mA.cm⁻² akım yoğunluğundaki deney sonuçları 38
- 4.16. KOİ derişimi 97000 mg.L⁻¹ olan atıksu için 20 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda ki deneysel çalışma sonucunda % giderim, enerji tüketimi, akım verimi değerleri 38
- 4.17. KOİ derişimi 97000 mg.L⁻¹ olan atıksu için 30 mA.cm⁻² akım yoğunluğundaki deneysel çalışma sonucunda % giderim, enerji tüketimi, akım verimi değerleri 38
- 4.18. KOİ derişimi 97000 mg.L⁻¹ olan atıksu için 40 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda ki deneysel çalışma sonucunda % giderim, enerji tüketimi, akım verimi değerleri 38
- 4.19. KOİ derişimi 97000 mg.L⁻¹ olan atıksu için 75 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda ki deneysel çalışma sonucunda % giderim, enerji tüketimi, akım verimi değerleri..... 39

4.20. 20 mA.cm ⁻² akım yoğunluğunda elde edilen deneysel sonuçlar. PAC: 0,5 g.L ⁻¹ , H ₂ O ₂ : 13,18 g.L ⁻¹	43
4.21. 30 mA.cm ⁻² akım yoğunluğunda elde edilen deneysel sonuçlar. PAC: 0,5 g.L ⁻¹ , H ₂ O ₂ : 13,18 g.L ⁻¹	43
4.22. 40 mA.cm ⁻² akım yoğunluğunda elde edilen deneysel sonuçlar. PAC: 0,5 g.L ⁻¹ , H ₂ O ₂ : 13,18 g.L ⁻¹	43
4.23. 75 mA.cm ⁻² akım yoğunluğunda elde edilen deneysel sonuçlar. PAC: 0,5 g.L ⁻¹ , H ₂ O ₂ : 13,18 g.L ⁻¹	44
4.24. 20 mA.cm ⁻² akım yoğunluğunda %giderim, enerji tüketimi, akım verimi değerleri	44
4.25. 30 mA.cm ⁻² akım yoğunluğunda %giderim, enerji tüketimi, akım verimi değerleri	44
4.26. 40 mA.cm ⁻² akım yoğunluğunda %giderim, enerji tüketimi, akım verimi değerleri	45
4.27. 75 mA.cm ⁻² akım yoğunluğunda %giderim, enerji tüketimi, akım verimi değerleri	45
4.28. Farklı akım yoğunluklarında H ₂ O ₂ derişimi etkisinin incelendiği deney sonuçları. C ₀ : 45000 mg.L ⁻¹ , Demir reaktör: anot, PAC: 1 g.L ⁻¹	53
4.29. Farklı akım yoğunluklarında H ₂ O ₂ derişimi etkisinin incelendiği %giderim, enerji tüketimi ve akım verimi değerleri	53
4.30. 30 mA.cm ² akım yoğunluğunda yapılan deneysel çalışmanın sonuçları	55
4.31. 30 mA.cm ² akım yoğunluğunda yapılan deneysel çalışmanın sonuçları. PAC: 0,5 g.L ⁻¹	55
4.32. 30 mA.cm ² akım yoğunluğunda yapılan deneysel çalışmanın sonuçları. H ₂ O ₂ : 13,18 g.L ⁻¹	55
4.33. 30 mA.cm ² akım yoğunluğunda yapılan deneysel çalışmanın sonuçları. H ₂ O ₂ : 26,36 g.L ⁻¹	55
4.34. 30 mA.cm ² akım yoğunluğunda yapılan deneysel çalışmanın sonuçları. PAC: 0,5 g.L ⁻¹ H ₂ O ₂ : 26,36 g.L ⁻¹	56

4.35. 30 mA.cm ² akım yoğunluğunda yapılan deneysel çalışmanın % giderim, enerji tüketimi ve akım verimi değerleri.....	56
4.36. 30 mA.cm ² akım yoğunluğunda yapılan deneysel çalışmanın % giderim, enerji tüketimi ve akım verimi değerleri. PAC: 0,5 g.L ⁻¹	56
4.37. 30 mA.cm ² akım yoğunluğunda yapılan deneysel çalışmanın % giderim, enerji tüketimi ve akım verimi değerleri. H ₂ O ₂ : 13,18 g.L ⁻¹	56
4.38. 30 mA.cm ² akım yoğunluğunda yapılan deneysel çalışmanın % giderim, enerji tüketimi ve akım verimi değerleri. H ₂ O ₂ : 26,36 g.L ⁻¹	57
4.39. 30 mA.cm ² akım yoğunluğunda yapılan deneysel çalışmanın % giderim, enerji tüketimi ve akım verimi değerleri. PAC: 0,5 g.L ⁻¹ H ₂ O ₂ : 26,36 g.L ⁻¹	57
4.40. Farklı akım yoğunluklarında NaCl derişiminin etkisinin incelendiği deney sonuçları. C ₀ : 97000 mg.L ⁻¹ , Demir reaktör: katot, APA: 0,5 g.L ⁻¹	60
4.41. Farklı akım yoğunluklarında NaCl derişiminin etkisinin incelendiği %giderim, enerji tüketimi akım verimi değerleri	60
4.42. 20 mA.cm ⁻² akım yoğunluğunda farklı polielektrolit etkisinin incelendiği %giderim, enerji tüketimi akım verimi değerleri	62
4.43. 20 mA.cm ⁻² akım yoğunluğunda farklı polielektrolit kullanılması durumunda %giderim, enerji tüketimi ve akım verimi değerleri	62
4.44. Demir ve alüminyum reaktör için deneysel çalışmaların sonuçları. Reaktör:Anot, PAC: 0,5 g.L ⁻¹ , H ₂ O ₂ : 26,36 g.L ⁻¹	64
4.45. Demir ve alüminyum reaktör için %giderim,Enerji tüketimi ve akım verimi değerleri.....	64

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

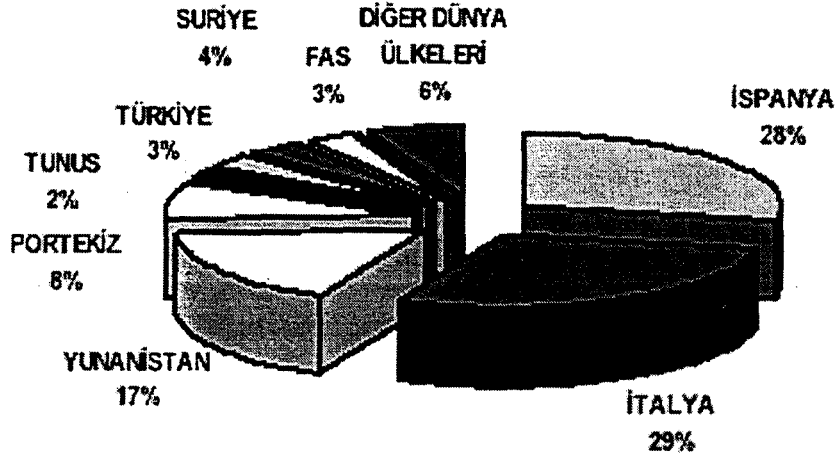
A	: Akım
Ac	: Alternatif akım
AKM	: Askıda katı madde
$Al(OH)_3$: Alüminyum hidroksit
APA	: Anyonik poli akrilamid
BOI_5	: 5 günlük biyokimyasal oksijen ihtiyacı
CO_2	: Karbon dioksit
Dc	: Doğru akım
$Fe(OH)_3$: DemirII hidroksit
$Fe(OH)_3$: DemirIII hidroksit
g	: Gram
H_2O_2	: Hidrojen peroksit
H_2SO_4	: Sülfirik asit
KOI	: Kimyasal oksijen ihtiyacı
kW	: kilowatt
kWh	: kilowatt saat
L	: Litre
mg	: Miligram
MJ	: Mega Joule
NaCl	: Sodyum klorür
NaOH	: Sodyum hidroksit
NF	: Nanofiltrasyon
PAC	: Poli alüminyum klorür
RO	: Ters osmoz
UF	: Ultrafiltrasyon
V	: Gerilim

1. GİRİŞ

Zeytin, zeytingiller ailesinden 35 türü bulunan bitki cinsidir. Zeytinin ana yurdu Anadolu'dur. Yayılma alanı ise Türkiye, Yunanistan, İtalya, Kuzey Afrika, Portekiz, İspanya ve güney Fransa'dır. Zeytin ağacı genellikle eğimli, kireçli ve zayıf topraklarda sulanmayan yerlerde yetiştiği için, ülkemiz büyük bir zeytin üretim potansiyeline sahiptir. Türkiye zeytin üretiminde İtalya, İspanya ve Yunanistan'ın arkasından dördüncü sırayı almaktadır [1]. Dünyadaki zeytin yağı üretim miktarının ülkelere göre dağılımı Çizelge 1.1.'de, grafiksel gösterimi Şekil 1.1.'de verilmiştir.

Çizelge 1.1. Dünyadaki zeytin yağı üretim miktarının ülkelere göre dağılımı [2]

DÜNYA ZEYTİN ÜRETİMİ (1000 TON)					
	1996/97	1997/98	1998/99	1999/00	2000/01
Cezayir	50,5	15,0	54,5	52,5	31,0
Arjantin	11,5	8,0	6,5	11,0	3,0
Hırvatistan	-	-	3,5	13,5	6,0
G.Kıbrıs	2,0	1,5	2,0	2,0	5,0
AB Ülkeleri	1754,5	2116,5	1707,0	1744,0	1912,0
İsrail	5,5	3,0	4,5	2,0	5,0
Ürdün	23	14	21,5	6,5	17,0
Lübnan	6,5	3,5	7,0	5,0	6,0
Fas	110,0	70,0	65,0	40,0	35,0
Filistin	12,0	9,0	5,5	2,0	20,0
Suriye	125,0	70,0	115,0	81,0	165,0
Tunus	270,0	93,0	215,0	210,0	150,0
Türkiye	200,0	40,0	170,0	54,0	180,0
Diğerleri	24,5	22,0	23,5	24,5	18,5
G. TOPLAM	2595,0	265,5	2400,5	2248,0	2533,5



Şekil 1.1. Dünyadaki zeytinyağı üretiminin ülkelere göre yüzde dağılımları [2]

Zeytin ve zeytinyağı tüketiminin sürekli artışı nedeniyle, zeytin yetiştiriciliği ve zeytin üretimi de 1950'den bugüne kadar devamlı artış göstermektedir. Örneğin; 1945-1970 tarihleri arasında ağaç sayısı 2,5 kat, zeytin üretimi ise 4 kat artmıştır. Böylelikle zeytin yetiştiriciliği gelişmiş, ticarete yalnızca bir gıda maddesi olarak değil, aynı zamanda tıbbi özellikleri ve kozmetik uygulamaları açısından da önem kazanmıştır. Elde edilen zeytinin büyük bir kısmı yağ üretiminde, diğer kısmı ise sofralık zeytin ve ezme olarak kullanılmaktadır [3].

Akdeniz ki zeytin yetiştiricisi ülkelerde insanların beslenme rejimlerindeki önemini korumuş ve günümüzde kaliteli lezzetli bir yağ kaynağını temsil etmektedir. Kalorifik değerinden başka, bir gıda maddesi olarak, diğer bitkisel yağlardan ayrılan özellikleri ve herhangi bir işleme tabi tutulmadan yenilebildiği için oldukça yüksek bir değer kazanmıştır. [3].

Zeytinyağı, olgunluğa ulaşmış zeytin meyvelerinden presle ve santrifüjle elde edilen yemeklik bir yağdır. Dünya'da 7,5 milyon hektar alan üzerinde mevcut toplam 800 milyon adet zeytin ağacının %95'i Akdeniz ülkelerinde yer almaktadır [4].

Türkiye bulunduğu coğrafi konum ve Akdeniz iklimi özellikleriyle dünyanın önde gelen zeytin ve zeytinyağı üreticilerindedir. Zeytin ağacı zahmetli

büyümele birlikte uzun ömürlü bir ağaç olup olgun bir zeytin ağacından 15-20 kg zeytin elde edilmektedir. Ortalama 5 kg zeytinden 1 litre zeytinyağı çıkarıldığı düşünülürse, bir zeytin ağacından yılda ortalama 3 ya da 4 litre zeytinyağı üretebilmektedir. En fazla yağ içeren meyvelerden biri olan zeytin, ağırlığının %20-30' u kadar yağ içermektedir [4].

Ülkemizde, zeytinyağı üretimi zeytin ağaçlarının bir yıl çok ürün bir yıl az ürün verme özelliğinden yıldan yıla (var yılı yok yılı) önemli düzeyde değişiklik göstermektedir. 1980 yılında 215000 ton olan üretim, 1998'de 200000 ton ve yok yılı olan 1999'da ise 70000 ton olarak gerçekleşmiştir. 1980-1999 yılları arasındaki değişim incelendiğinde ise genel olarak bir düşüşün olduğu saptanmaktadır. Çizelge 1.2.'de var ve yok yıllarına göre zeytin ve zeytinyağı üretimi verilmiştir [5].

Çizelge 1.2. Var ve yok yıllara göre zeytin ve zeytin yağı üretimi [6]

Yıllar	Ürün veren ağaç sayısı	Ürün vermeyen ağaç sayısı (1000 adet)	Zeytin üretimi (1000 ton)	Yemekliğe ayrılan (1000 ton)	Yağlığa ayrılan (1000 ton)	Zeytinyağı üretimi (1000 ton)
1989-90	76460	6250	500	162	338	35
1990-91	79600	5960	1100	337	763	80
1991-92	81520	6185	640	181	459	60
1992-93	81260	5828	750	231	519	56
1993-94	81703	5460	550	200	350	48
1994-95	82192	5955	1400	350	1050	160
1995-96	81437	6144	515	206	309	40
1996-97	83200	6540	1800	435	1365	200
1997-98	85700	10000	510	200	310	40
1998-99	85850	7600	1650	430	1220	170
1999-2000	87130	8370	600	240	360	70
2000-2001	89200	8570	1800	490	1310	190

Zeytinyağının elde edilmesindeki teknolojik gelişmelere paralel olarak, bu ürünle birlikte ortaya çıkan katı ve sıvı atıkların miktarında da artışlar olmaktadır. Özellikle sıvı atıklar arıtılması zor olan önemli kirleticilerdir [3]. Zeytinyağı üretiminde ortaya çıkan karasuyun bilinçsizce alıcı ortamlara deşarjı çevreye son derece zararlıdır. Karasuyun KOİ derişimi 200 g.L⁻¹ değerine kadar çıkabilmektedir ve karasu biyolojik arıtmayı engelleyici özellikler taşıyan organik bileşikler (uzun zincirli yağ asitleri ve fenolik bileşikler gibi) içermektedir [4]. Bu yüksek KOİ içeriğinin yanı sıra zeytinyağı atık suyu genel olarak %83 su, %15

organik bileşikler ve %2 oranında da inorganik bileşikler içerir. İçeriğindeki organik bileşenlerin başlıcaları ise şekerler, polialkoller, organik asitler ve poli fenollerden oluşur [7].

Ülkemizdeki zeytinyağı işletmeleri genellikle aile işletmesi olan küçük tesislerdir. Bu tesisler, zeytin üretim bölgelerinde dağınık olarak yerleşmiş konumdadır. Her bir tesis için ayrı arıtma tesisi yapılması ekonomik uygulanabilirlik açısından olası değildir. Zeytinyağı üretiminden kaynaklanan karasu çoğu kez herhangi bir işlem uygulanmadan doğrudan alıcı ortama deşarj edilmektedir [4].

Zeytinyağı endüstrisi atık sularının içerdikleri yüksek miktarda kirlilik nedeniyle doğaya doğrudan deşarj edilmeleri çevreye zarar vermektedir. Aynı zamanda bu kirlilik yükü nedeniyle artırılması zor olan sular için kullanılan yöntemler çok pahalı veya yeterli giderim verimliliğine sahip olamamaktadır. Günümüzde evsel ve endüstriyel atık suların arıtımında da kullanılan elektrokimyasal arıtım süreçleri bu konunun çözüme ulaştırılmasında bir yöntem olarak düşünülmektedir. Bu çalışmada zeytinyağı atıksuyunun elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımı incelenmiştir.

2. ZEYTİNYAĞI ÜRETİMİ VE ZEYTİNYAĞI ENDÜSTRİSİ ATIKSUYU

2.1. Zeytinyağı Üretimi

Zeytinyağı üretimi aşağıdaki basamaklardan oluşur. Bunlar;

- Dağıtım
- Zeytinlerin yıkanması
- Ezme
- Zeytin hamurunun ezilmesi
- Yağ ayırma
- Yağın saflaştırılması
- Kalıntı yağın ayırımı

Dağıtım: Sepetlerle toplanan zeytinler daha sonra silolara gönderilir. Ve buradan da ilk aşaması için işletmeye gönderilir.

Zeytinlerin yıkanması: işletmeye gelen zeytinlerden ilk olarak, yaprak gibi yabancı maddeler uzaklaştırılır ve yıkama tesislerinde zeytinler yıkanır. Bazı işletmelerde askıda katıların çöktürülmesi ve filtrasyon işlemlerinden geçirilerek yıkama suları tekrar işletmeye geri döndürülür. İşletmelerde bazen zeytinler temizleme işlemine tabi tutulmadan işlenir. Zeytinlerin yıkanması için 1000 kg zeytin başına 150-200 L su gerekir. Yıkama işleminden sonra zeytinler silolara alınır ve pompa yardımıyla öğütme sürecine gönderilir.

Ezme: Zeytinler, çekirdekleri ile beraber öğütülürler ve homojen bir karışım haline getirilirler. Bu karışım, yatay olarak uzanan granit bir blok ve ona dik olarak duran granit değirmen taşından oluşan taş değirmende hazırlanır. Metal ve çekiç değirmenler de bu amaçla kullanılmaktadır. Eğer donmuş ya da çok kuru zeytinler işlenecekse bir miktar su ilave edilir (100-150L su/1000kg zeytin) [8].

Zeytin hamurunun ezilmesi: Zeytin hamuru aşağı akışlı ezicinin içinde ılık su ilavesinden sonra karıştırılır. Zeytin hücrelerinin daha iyi kırılması ve büyük yağ damlaları oluşturması için dövülür. Bu amaçla, zeytin içinde bulunan hücreler arasındaki osmotik basıncı kırmak için karışıma tuz ilave edilir. Bu işlem bir çok

defa tekrarlanır. Santrifüjle ayırma sürecinin verimini arttırmak için posa ısıtılır [8].

Dövme işleminden sonra hamur daha iyi öğütülür. Hamur, dik merkezli helezon pompa ile, iki ya da üç fazlı dekantöre iletilme işleminden önce ezicide %100'e kadar su eklenir [8].

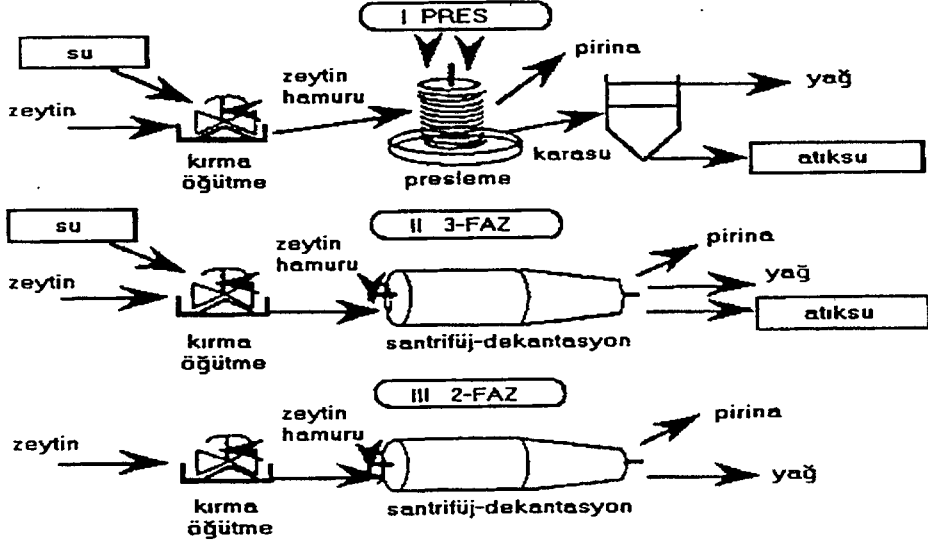
Yağ ayırımı: Zeytin yağı, kesikli süreçte geleneksel sıkma yöntemi kullanılarak küçük yağ değirmenlerinde ayrılır. Ayrılan yağ tanklarda toplanır ve sedimentasyonla süzülür. Bir ton işlenmiş zeytinden yaklaşık olarak ortalama 200 kg yağ çıkar. Yağı ve posayı ayırma işleminin verimini arttırmak için hücre duvarlarına etki edecek olan biyolojik ve kimyasal maddeler eklenebilir. Geleneksel sıkma yönteminde, zeytin yağı ayırma süreci için enerji ihtiyacı, işlenmiş ton başına 40-63 kWsaat, üç fazlı dekantörlerde ise 90-114 kWsaattir. Atıksu ile yağda bulunan askıda katı maddeleri ayırabilmek için saflaştırma sürecine 1000 kg santrifüjlenmiş yağ başına 100-150 L su, eklenir [8].

Yağın saflaştırılması: Yağda, az da olsa bulunabilecek olan katı maddeler titreşimli elekten elenir. Atık su ile yağdaki askıda katı maddelerin ayrılabilmesi için santrifüjlenen 1000 kg yağ başına 100-150 litre su safsızlaştırma birimine eklenir [8].

Kalıntı yağın ayrılması: Üç fazlı dekantörden gelen yüksek kirlilik içeren atıksu, kalıntı yağın ayrıldığı titreşimli elek ve santrifüjle arıtılır. İki defa santrifüjlenen yağ tanklara alınır ve helezonlu pompa ile yüzeysel ya da yer altı tanklarına pompalanır. Yağın sıkılarak ayrılması sonucu oluşan katı atık %6 oranında yağ içerirken, sürekli üç fazlı dekantör ile ayırma sonucu oluşan katı atık %4 oranında zeytinyağı içerir. İki fazlı dekantasyon işlemi sonucu oluşan katı-sıvı karışımının yağ içeriği ise %2,5-3,5 arasında değişmektedir. Bazı özel tesislerde bu amaç için çözücü ile ayırma süreci kullanılmaktadır. İlk önce atık tamamen kurutulur ve sonra çözücü olarak hekzan kullanılarak ayırma işlemi gerçekleştirilir. Kuru kalıntılar yem olarak kullanılabilir. Bazı ayırma tesislerinde, ayırmadan sonra çekirdekler posadan ayrılır ve kurutularak ısıtmada kullanılır. Posa ise gübre ya da yem olarak satılır. Bazı yağ değirmenlerinde sıkma işleminden sonra çıkan katı atıklar doğrudan yakıt olarak kullanılır [8].

Zeytinyağı üretiminde kullanılan iki ana süreç vardır. Bunlardan birincisi kesikli üretim süreci (Pres süreci), ikincisi ise sürekli üretim sürecidir (Santrifüj Sistemleri).

Şekil 2.1.'de zeytinyağı üretim süreçlerinin akım şeması verilmiştir.



Şekil 2.1. Zeytinyağı üretiminde kullanılan süreçlerin akım şeması [9]

2.1.1. Kesikli üretim süreci (pres süreci)

Klasik üretim sürecidir. Presleme yönteminde zeytinler, sisteme ilave edildikten sonra yıkanmakta, ezilmekte ve yoğrulmaktadır. Elde edilen hamur daha sonra preslenerek yağ ve suyu ayrılmaktadır. Son olarak, düşey santrifüj veya dekantörlerle yağ ve su kısmı ayrılmaktadır. Katı faz pirina olarak ayrılır.

Pres sürecinde oluşan atıksuyun BOI_5 derişimi $90-100 \text{ g.L}^{-1}$, KOI derişimi $120-130 \text{ g.L}^{-1}$, pH değeri 4,5-5,0 arasında değişmektedir. Zeytinyağı üretimi yapan çoğu ülkede bu atıksular yaz aylarında yapay sızdırma tanklarında depolanmakta, böylece buharlaşması veya sızdırılması sağlanmaktadır. Sonuçta oluşan katı kısmın nem içeriği %25, yağ içeriği %6 civarındadır. Bu kısım sıcak hava tanklarında veya açık tanklarda kurutulmaktadır. Katı kısımda bulunan yağ,

hekzan ile geri kazanılmaktadır. Bu süreçten kalan katı kısım yakıt olarak kullanılarak işletmenin ihtiyacı olan suyun ısıtılması sağlanabilir [10].

2.1.2. Sürekli üretim süreci (santrifüj süreç)

Sürekli süreçte, presin yerini santrifüj almıştır ve sürekli çalışmayı sağlamaktadır. Kullanılan dekantöre bağlı olarak iki farklı üretim süreci geliştirilmiştir,

a) Sistem suyu gerektiren ve üretim sonucunda üç faz (yağ, karasu ve pirina) oluşturan 3-fazlı süreç,

b) Sistem suyu gerektirmeyen ve üretim sonucunda sadece iki faz (yağ ve pirina) oluşturan 2-fazlı süreç. Bu üretim sistemi; besleme, yıkama, kırma ve hamur hazırlama birimlerden oluşmaktadır [9].

Bu iki sürecin birbirlerine göre bazı avantaj ve dezavantajları vardır. Sürekli santrifüj sisteminin pres teknolojisine kıyasla avantaj ve dezavantajları Çizelge 2.1.'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Sürekli santrifüj sisteminin pres teknolojisine kıyasla avantaj ve dezavantajları [9]

Avantajları	Dezavantajları
Sürekli sistem	Daha yüksek ilk yatırım maliyeti
Daha az işçi	
Aynı günde üretimi gerçekleştirme imkanı	
Daha fazla üretim	
Daha iyi kalite kontrolü	
Daha az oda ve yer gereksinimi	
Geliştirilmiş sistem kontrolü ve otomasyon	

Zeytinyağı üretim süreçlerinde oluşacak atıksuyun miktarı ve kirlilik özellikleri, tesiste uygulanan yöntem ve teknolojiye bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. 2 fazlı santrifüj süreci, sistem suyu gereksinimi olmadığından, su ve enerji gereksinimi yönünden avantajlı olan tek süreçtir. Oluşan düşük atıksu hacmi ve çok düşük kirlilik yükü sebebiyle, bu süreç avantajlıdır. Bu sistemin diğer ilave avantajları elektrik tüketiminde azalma ve atıksu uzaklaştırmadaki kolaylık olarak sıralanabilir. Üç fazlı üretim sisteminde oluşan atıksu hacmi ve oluşan kirlilik yükü, iki fazlı sisteme kıyasla daha yüksektir. Pres sisteminde

oluşan atıksu hacmi daha az olmakla beraber, oluşan kirlilik yükü, iki fazlı sistemden daha fazladır. Çizelge 2.2.'de klasik ve sürekli yöntemlerle zeytinyağı üretiminde oluşan madde ve enerji dengesi girdi ve çıktıları verilmiştir [9].

Çizelge 2.2. Bir ton Zeytinin işlenmesine bağlı olarak süreçte madde ve enerji dengesi, girdi ve çıktı analizi [9]

Üretim süreci	Girdiler	Girdi Miktarları	Çıktılar	Çıktı Miktarları
Geleneksel pres Süreci	Zeytin Yıkama suyu Enerji	1000 kg 0,1 –0,12 m ³ 40-63 kWh	Yağ Kıta atık (%25 su + % 6 yağ) Karasu (% 88 su)	~200 kg ~ 400 kg ~600 L
3-Fazlı Dekantör	Zeytin Yıkama suyu Dekantörü temizleme suyu Yağdaki safsızlıkları yıkama suyu Enerji	1000 kg 0,1 –0,12 m ³ 0,5-1 m ³ ~10L 90-117kWh	Yağ Kıta atık (%50 su + % 4 yağ) Atıksu (% 94 su + % 1 yağ)	200 kg 500-600 kg 1000- 1200 L
2-Fazlı Dekantör	Zeytin Yıkama suyu Enerji	1000 kg 0,1-0,12 <90-117kWh	Yağ Kıta atık (%60 su + % 3 yağ)	200 kg 800-950 kg

2.2. Zeytinyağı Endüstrisi Atıksularının Özellikleri

Zeytin üretiminden oluşan atıklar, presleme işleminden oluşan pirina (zeytin kıta atıkları ve zeytin çekirdeği) ve zeytin öz suyu olarak sınıflandırılabilir. Pirina, yağı alınmak üzere pirina yağı çıkaran işletmelere gönderilir ve burada çözücü ile yağı ayrılır. Arta kalan yağsız pirina esas olarak lignin ve selüloz içermekte olup, yüksek ısı değere sahiptir. Kompostlanabilir ve yakılabilir. Zeytinyağı üretiminde oluşan atıklar şöyle sıralanabilir:

Zeytin Bitki Özsuyu (Karasu): Dünyanın pek çok yerinde büyük bir problem oluşturmaktadır. Çoğu ülkede tarıma dayalı endüstriyel atıkların, kanalizasyona, nehirlere ve akarsulara deşarjında kısıtlamalar bulunmaktadır. Bazı ülkelerde, belli miktarlardaki karasu zeytin üretim alanlarına sulama amaçlı

verilmektedir. Zeytin bitki özsuyu değerli iz elementleri ve potasyum, fosfor vb. ile organik bileşikleri içerir. Atıksudaki bazı bileşenler değerli antioksidanlardır. Son zamanlarda, zeytin özsuyu ilaçlarda da kullanılmaktadır.

Zeytin Katı Atıkları ve Zeytin Çekirdeği: Zeytinin üretiminde presleme esnasında oluşan bir atıktır. Zeytin katı atıkları ve zeytin çekirdeği ısıtma amacıyla, yapı malzemesi ya da aktif mangal kömürü olarak kullanılabilir.

Ham Zeytin Keki: Zeytinlerin ilk olarak klasik ve sürekli yöntemler ile preslenmesinden sonra geriye kalan kalıntıdır. Kekin içerisinde az miktarda da olsa yağ bulunmaktadır. Eğer elde edilen bu keke başka bir işlem uygulanmayacaksa, genellikle ısınma, hayvan yemi ve yeniden zeytin üretimi amacıyla kullanılabilir.

Tükenmiş Zeytin Keki: Ham zeytin kekinin çözücü ile özütlemeye tabi tutulması sonucu oluşan kalıntıdır. Bu kekte ısınma, hayvan yemi ve yeniden zeytin üretimi amacıyla kullanılabilir.

Çekirdeği Ayrılmış Zeytin Keki: İşlenmiş kekin içerisinde kalan parçalanmış zeytin çekirdeklerinin çıkarılması sonucu oluşan kektir. Bu kek de ısınma, hayvan yemi ve yeniden zeytin üretimi amacıyla kullanılabilir.

Sulu Pirina: Tüm işlemlerden önce kekin içerisinde parçalanmış zeytin çekirdeklerinin çıkarılması sonucu oluşan kalıntı keke sulu pirina adı verilmektedir.

Zeytin Özsuyu: Presleme işleminden sonra elde edilen kekin çökeltme ya da santrifüj işlemleri ile yağdan ayrılması sonucu oluşan kahverengi sulu sıvıya zeytin özsuyu denilmektedir. İki fazlı dekantör sisteminin kullanılması ile oluşan zeytin özsuyunun kirlilik problemleri önemli ölçüde azaltılabilmektedir [10].

Karasuyun bileşimi; uygulanan üretim teknolojisine, üretim miktarına ve kullanılan zeytin hammaddesine bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Çizelge 2.3.'de zeytinyağı üretiminde kullanılan farklı süreçlerin su kullanımları ve atıksu özellikleri verilmektedir [9].

Çizelge 2.3. Zeytinyağı üretiminde kullanılan süreçlerin karakteristik özellikleri [9]

Süreç Tipi (100 kg zeytin için)	Sistem uyu (L)	Isı Enerjisi (MJ)	Atıksu Karakteristikleri	
			Hacim (L)	KOI (g/Kg)
Kesikli (Pres)	0-40	3,3	40-50	90-130
Sürekli (3-fazlı)	50-70	5,8	90-110	60-90
Sürekli (2-fazlı)	0	0	5-10	10-15

Bu tür atıksular; asidik pH ve yüksek organik madde ($KOI= 100 \text{ mg.L}^{-1}$) içeriğine sahiptir. Ayrıca, askıda katı madde (AKM), pektinler, şeker, fenol bileşikleri ve bitkisel yağları da yüksek miktarlarda içermektedir. Diğer taraftan, bu tür atıksular, içerdiği aromatik bileşikler, basit ve kompleks şekerlerden dolayı, yüksek enerji kaynağı potansiyeline sahiptirler. Klasik ve sürekli yöntemle zeytinyağı üretimi yapan tesislerden çıkan karasuların bileşimleri Çizelge 2.4.'de verilmiştir [9].

Çizelge 2.4. Klasik ve sürekli yöntemle zeytinyağı üretimi yapan tesislerden çıkan karasuların bileşimi [9]

Parametre	Klasik Yöntemde Atılan Karasu	Sürekli Yöntemde Atılan Karasu
PH	4,5-5,0	4,7-5,2
Toplam Katı Madde	% 12,0	%3,0
Toplam Uçucu Katı Madde	% 10,5	% 2,6
Toplam Mineral Katı Madde	% 1,5	% 0,4
Askıda Katı Madde	%0,1	% 0,9
Kimyasal Oksijen İhtiyacı (mg.L^{-1})	120000-130000	40000
Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı (mg.L^{-1})	90000-100000	33000
Şeker	% 2,0– 8,0	% 1,0
Toplam Azot	% 5,0 – 2,0	% 0,28
Organik Asitler	% 0,5-1,0	-
Polialkoller	% 1,0 – 1,5	% 1,0
Pektin,Tanin vb.	% 1,0	% 0,37
Polifenoller	% 1,0 – 2,4	% 0,5
Yağ	% 0,03 –10,0	% 0,5 – 2,3

2.3. Zeytinyağı Endüstrisi Atıksularının Çevresel Etkileri

Sıvı atığın içeriği işlenen zeytinlerin olgunluk derecesine ve türüne göre değişmektedir. Ayrıca zeytin ağaçlarının yetiştirildiği toprağın cinsi, iklim şartları ve zeytinlerin depolanması, yağ elde etme yöntemleri ve bu sırada kullanılan su miktarları ile atıksuyun biriktirildiği ortamın farklı olması da atıksuyun içeriğinde belirgin farklılıkların ortaya çıkmasına neden olur.

Atıksuda yüksek derişimde organik madde, yağ ve AKM bulunur. Ayrıca atıksuyun fenollerden kaynaklanan zehirlilik etkisi de bulunmaktadır. Atıksu içerdiği organik asitler ve fenolik maddeler nedeniyle zayıf asit özelliği gösterir.

Yüksek oranda organik madde içeren ve yağ derişiminin da yer yer 7000 mg.L⁻¹'ye ulaştığı karasuyun çevreye doğrudan verilmesi halinde alıcı su ortamlarındaki aşırı oksijen tüketimi yanında su yüzeyinin yağ tabakası ile kaplanarak oksijen aktarımının engellenmesi, estetik görünümünün bozulması ve polifenollerin zehirli etkileri gibi istenmeyen durumlar ortaya çıkmaktadır. Daha açık bir ifade ile mikroorganizmaların metabolik süreçlerinde yer alan çözülmüş ve askıdaki organik maddelerin ve azot bileşiklerinin biyokimyasal parçalanması alıcı ortamdaki oksijen bilançosundaki en önemli tüketimi oluşturur. Kirlilik yüküne maruz kalmamış akarsularda ve göllerde ototrof süreçler sonucunda üretilen organik madde ile aerob hetetrof organizmaların tüketimi arasında doğal bir denge bulunur. Alıcı ortama dışarıdan biyolojik olarak ayrışabilecek nitelikteki organik maddelerin verilmesi bu hassas dengeyi önemli ölçüde değiştirmektedir. Bu değişim sonucunda ortamda belirli bir miktarda çözülmüş oksijen kalırsa yeni bir denge oluşabilir. Oksijen tüketiminin oksijen kazanımından daha fazla olduğu durumlarda ise, alıcı ortamdaki biyolojik süreçler tamamen nitelik değiştirirler.

Karasuyun yüksek oranda potasyum içeriği nedeniyle zirai sulamada kullanılması ile ilgili uygulamalarda yüksek asidite, tuzluluk ve aşırı miktarda polifenoller içermesi önemli sorunlara yol açmaktadır. Sığ lagünlerde buharlaştırma yolu ile uzaklaştırma uygulamalarında da koku ve sivrisinek problemi ile yer altı suyunun kirlenme riski gibi sakıncalar bulunmaktadır. Fenolik maddelerin fitotoksik ve antibakteriyel etkileri de göz önüne alındığında

hem toprağa hem de su kaynaklarına yapılacak arıtmasız deşarjın ciddi problemler yarattığı pek çok çalışma ile saptanmıştır [11].

Bu atıksuların bertarafında karşılaşılan en önemli problemlerden bir diğeri ise, zeytinyağı üreten işletmelerin büyük işletmeler olması yerine dağınık küçük işletmelerden oluşmasıdır. Bu durumda yapılacak yatırımların maliyeti artmakta ve ekonomik sınırları aşılmaktadır. Bu nedenlerden dolayı mutlaka zeytin karasuyunun uygun arıtım koşulları değerlendirilmeli ve bu atıksuların uygun bertaraf koşulları araştırılmalıdır [12].

Zeytinyağı endüstrisi atıksularının çevresel etkileri aşağıdaki şekilde özetlenebilir;

- i. Nehir yataklarında biriken askıda katı maddeler (AKM), gerekli oksijenin mikroorganizmalara ulaşmasını engeller. Anaerobik mikroorganizmalar organik maddenin anaerobik olarak fermantasyonunu gerçekleştirir ve bu durum sonucunda da kötü kokulu gazlar ortaya çıkar [13].
- ii. Zeytinyağı endüstrisi atıksuları içindeki yağlar, suların atmosferle temasını engelleyen yüzeysel film tabakası oluşturarak suyun iç kesimlerine oksijenin geçişini engellediği için suda yaşayan bitki ve hayvanların yaşamını olumsuz etkiler [13].
- iii. Asit, polifenol ve metalik iyonlar gibi suda çözülmüş maddeler suyun çözülmüş oksijen kapasitesini bir miktar da olsa azaltır [13].
- iv. Zeytinyağı endüstrisi atıksularında polifenol olması, biyolojik arıtım süreçlerini gerçekleştiren floranın gelişimini engeller [13].
- v. Tanenler, zeytinyağının öğütülmesiyle oluşan atık suda kalan zeytin posalarından kaynaklanır. Bitki, hayvan ya da insanlar için çok zararlı olmamasına rağmen, sucul ortamlara deşarj edilmesi halinde suyu koyu kahverengi renge boyar [13].
- vi. Zeytinyağı atıksuları önemli miktarda indirgenmiş şeker içerir, doğal sulara doğrudan deşarj edilmesi sonucunda mikroorganizmaların sayısında büyük bir artış olur. Bu nedenle sudaki çözülmüş oksijen tükenir ve böylece suda yaşayan diğer canlılara düşen oksijenin payı azalır. Bu ekosistemde dengesizliğe neden olur. Diğer birkaç süreçten

ise yüksek fosfor içeren zeytinyağı atık suyu oluşabilir. Bu fosfor doğal sularda alglerin büyümesini ve artışını hızlandırarak ötrofikasyon oluşumuna neden olur. Atık suda besinlerin böylesine büyük miktarda bulunması patojenlerin çoğalması ve sulara geçmesi için mükemmel bir ortam sağlar ki böylece su ile etkileşim içinde olan insanlar ve su yaşamı için kötü sonuçlar ortaya çıkar [13].

- vii. Atıksu toprağın kalitesini düşüren organik maddeler, mineraller ve asitler içerir. Bu, mikroorganizmaların toprak-hava ve hava-su dengesinin bozulmasına ve bunun sonucunda toprak verimliliğinin azalmasına neden olur [13].
- viii. Kurutma havuzlarının varlığında böcekler ortaya çıkar ve bunlar hastalık taşıyıcı olduklarından insan ve hayvan sağlığını olumsuz yönde etkileyecek sonuçlar ortaya çıkar [13].

3. ZEYTİNYAĞI ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ ARITIM YÖNTEMLERİ

Zeytinyağı üretimi sonucu oluşan karasuda organik madde, askıda katı madde ve yağ derişimleri çok yüksek olduğundan, arıtımında fiziko-kimyasal, biyolojik, ileri ve son arıtma yöntemlerinin uygulanması gerekmektedir [1].

3.1. Biyolojik Yöntemler

Karasu, zeytin özsuyunun seyrelmiş kısmı olması nedeniyle biyolojik olarak kolayca parçalanabilir kabul edilebilir. Fakat karasuyun içeriğindeki polifenol ve lipidlerin biyolojik olarak parçalanma hızı, şeker ve uçucu asitlere göre daha düşüktür. Bu nedenle karasuyun biyolojik arıtımı, kirliliklerin hızla arıtılması ve tesisinin ekonomik olması açısından küçük olmasını gerekliliğinden, oldukça zor olmaktadır [8].

3.1.1. Aerobik arıtım

Aerobik biyolojik süreçler, aerobik mikroorganizmaların oksijen varlığında, kirlilikleri yükseltgeyerek parçalaması esasına dayanır. Organizmalar kirlilikleri kullanarak biyokütle ve çamur gibi yeni hücreler üretirler. Aktif çamur, damlatmalı filtre gibi aerobik süreçler genellikle atıksuda düşük derişimlerde bulunan çözünmüş ve kolloidal haldeki kirlilikleri arıtırlar. Sistemin etkili işletilmesi 1 g KOİ/L gibi düşük derişimlerde mümkündür. Yüksek derişimlerdeki kirlilikler ise ancak yüksek alıkonma sürelerinde ve yüksek geri devir oranlarında arıtılabilir. Bu nedenle karasuyun aerobik biyolojik arıtımı, yüksek KOİ ve fenol içeriği nedeniyle, uygun değildir. Bunun yanısıra, aerobik biyolojik arıtım sonrasında çok yüksek miktarlarda çamur oluşmaktadır. Ham atıksuyun KOİ derişimi 50 g.L⁻¹ gibi oldukça yüksek değerlerde olduğundan, sistem sonrası oluşacak çamur miktarı yaklaşık olarak arıtılan atıksu hacmine eşittir.

Zeytinyağı üretimi atıksuları, fenol bakımından zengin olup, biyolojik ayrışmayı engellemekte ve belli ölçüde ekotoksosite göstermektedir. Bu nedenle karasuyun biyolojik arıtımı için fenolün giderilmesi gereklidir. Karasuyun fenolik içeriği, bu konuda çalışan kişileri, aromatik bileşenleri giderebilen organizmaları kullanmaya yöneltmiştir [8]. Ayrıca bu fenoller ve yüksek yağ asitlerinden kaynaklanan düşük pH, zeytin yağı atık sularının biyolojik arıtımında sorun oluşturmaktadır [14].

Organik yükünü ve fenolik içeriğini azaltmak için karasuyun seyreltilerek *Penicillium* [15] *Aspergillus sp* [16], *Aspergillus niger* [16-17,18-19], *Aspergillus terreus* [17,20], *Candida tropicalis* [16,21], *Geotrichum sp.* [16], *Geotrichum candidum* [17,22], *Azotobacter vinelandii*, *strains of Pleurotus* [24], *Pleurotus spp.* [25,26], *Yarrowia lipolytica* [27] ve *Phanerochaete chrysosporiu* [17] gibi mikroorganizmalar ile aerobik arıtımı çeşitli araştırmacılar tarafından çalışılmıştır.

Ayrıca karasuyun *azotobacter vinelandii* kullanılarak bio-fertilizasyonu [28] ve *Phanerochaete flavido-alba* kullanılarak detoksifikasyonu da çalışılmıştır [29].

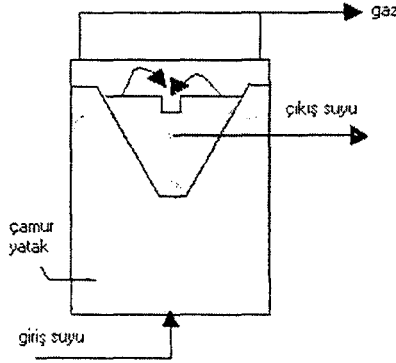
3.1.2. Anaerobik arıtım

Anaerobik arıtım teknolojileri, KOİ derişimi 1500 mg.L⁻¹'den büyük atıksuların arıtımında kullanılması, düşük miktarda atık çamur oluşturması (aerobik arıtmıdan 20 kat az), süreç sırasında açığa çıkan gazların kullanılabilmesi ve az yer işgal etmesi nedeniyle günümüzde sıkça kullanılmaktadır. Ayrıca karasuyun yüksek organik yüklü olması ve sezonluk oluşması da anaerobik arıtımı çok uygun kılmaktadır. Ancak, zeytinyağı üretimi atıksularının arıtımında kullanılan anaerobik reaktörler sadece pilot ölçeklidir, gerçek uygulaması yoktur [8].

Karasuyun kirlilik yükünün evsel atıksuyun kirlilik yükünden daha az olması durumunda, karasu ve evsel çamurun birlikte anaerobik temas reaktörün arıtılması uygun görülmektedir. Ancak karasuyun kirliliği evsel atıksudan çok fazladır ve bu kirlilik yükünün dezavantajları karasuyun bir kısmının depolanması

ile giderilebilir. Her koşulda karasuyun evsel çamurla beraber anaerobik olarak arıtılması uygun bir çözüm olarak görülmektedir [4].

Karasuyun anaerobik olarak arıtılabilirlik çalışmalarında çoğunlukla UASB (yukarı akışlı çamur yataklı anaerobik reaktör) tipi reaktörler kullanılmıştır. Şekil 3.1.'de yukarı akışlı çamur yataklı bir anaerobik reaktöre ait şematik kesit verilmiştir [4].



Şekil 3.1. Yukarı akışlı çamur yataklı bir anaerobik reaktöre ait şematik kesit [4]

Karasuyun iki kademeli pilot tesiste bozunumu [30], karasuyun sulamada kullanılabilmesi için anaerobik arıtımı [31], karasuyun kesikli reaktörde anaerobik arıtımı [32] ve karasuyun anaerobik olarak acidogenesis ve methanogenesis arasındaki etkileşimlerle arıtımı [33], yapılan çalışmalar arasındadır. Ayrıca anaerobik bozunma ile birleştirilmiş ozonlama [34], kimyasal ve fiziksel ön arıtımla birleştirilmiş anaerobik arıtımı da çalışılmıştır [35].

3.2. Fiziksel ve Kimyasal Yöntemler

3.2.1. Membran süreçleri

Filtrasyon, büyüklüklerine bağlı olarak bir veya daha çok partikül boyutundaki bileşiklerin, sıvılardan veya gazlardan ayrılması işlemidir. Membran

süreçler bu uygulamayı daha da genişleterek, çözülmüş maddelerin de sıvılardan ve gazlardan ayrılmasını mümkün hale getirmiştir.

Membran süreçlerinde, üç faz söz konusudur. Bunlar besleme, süzüntü ve derişik akımlardır. Arıtma işlemleri, besleme akımındaki bir bileşenin, membran tarafından belli bir oranda tutulması esasına dayanmaktadır. Membrandan geçen akım süzüntü, geçemeyen akım ise derişik akım olarak adlandırılmaktadır. Membrandan süzüntü tarafına doğru bir geçişin olması için bir itici kuvvetin uygulanması gerekmektedir. Membranlar itici kuvvetlerin tipine göre gruplandırılmaktadır. Bunlar boşluk boyutlarına bağılı olarak ters osmoz (RO), nanofiltrasyon (NF) ve ultrafiltrasyon (UF) membranları olarak gruplandırılmaktadır [12].

3.2.1.1. Ultrafiltrasyon (UF) ile ön arıtma

Ultrafiltrasyon membranlarının boşluk çapı, 0,05-1 nm arasında değişmekte ve çözülmüş maddeleri ve küçük partikülleri ayırmak için kullanılmaktadır. Ayırmada temel etken moleküler büyüklük olmakla beraber, molekül şekli ve yükü de önemli bir rol oynamaktadır.

Ultrafiltrasyon membranları ile molekül ağırlıkları 1000-1000000 arasında değişen maddeler tutulabilmektedir. UF membranları, zeytinyağı atıksularının arıtılmasında genellikle ön arıtma elemanı olarak kullanılmaktadır. UF membranlarındaki KOİ giderme verimi % 50-90 arasında değişmektedir. Ultrafiltrasyonda arıtılan suyun alıcı ortama verilmesi söz konusu değildir. Dolayısıyla, UF sonrası ilave bir arıtmanın yapılması gerekmektedir [12].

Karasuyun öncelikle santrifüjlenerek askıda katılarının uzaklaştırılması sağlanmakta ve daha sonra ultrafiltrasyon membranından geçirilmesi ile yüksek KOİ giderimi gerçekleştirilmektedir [36]. Canepa ve arkadaşları polisufone Ultrafiltrasyon membranı, adsorplayıcı polimerler ve polipiperazin amid ters osmoz membranların bulunduğu pilot tesisi 6 ay süre ile çalıştırmışlar ve %99'luk KOİ giderimi elde etmişlerdir [37]. Ayrıca İtalya'da da atıksu toplama, yağ uzaklaştırma, askıda katıların çökmesi, polimerik membranlarda ultrafiltrasyon ve biyolojik arıtım basamaklarını içeren bir arıtım tesisi yapılmıştır [38].

3.2.1.2. Ultrafiltrasyon membranı sonrasında ters osmoz ile ileri arıtma

Zeytinyağı atıksularının arıtılmasında ters osmoz (RO) membranları, ultrafiltrasyon (UF) membranları sonrasında ileri arıtım olarak kullanılmaktadır. Böylelikle, ters osmoz membranlarının kullanım süresi artmakta ve çok daha iyi kalitede su elde edilmektedir. Ultrafiltrasyon membranların ön arıtma amaçlı olarak kullanılmasının başlıca faydaları şunlardır;

1. Sürekli ve kolay otomatik işletme imkanının olması
2. Ters osmoz membranları için daha iyi kalitede su üretmesi
3. Kimyasal madde ilavesi gerektirmemesi
4. Fazla yer kaplamaması [12].

3.2.1.3. Nanofiltrasyon (NF) membranı ile arıtma

NF membranları, özellikle son yıllarda ortaya çıkmış ve kullanımı hızla artmıştır. Boşluk çapı açısından, ters osmoz ile ultrafiltrasyon membranları arasında bulunmaktadır. Son zamanlarda, ince filmli selüloz olmayan membranlardaki gelişmeler ile beraber kullanımı daha da yaygın hale gelmiştir. Nanofiltrasyon membranları, ters osmozdan daha düşük basınçlarda işletilmektedir. Fakat, ters osmoza göre daha düşük kalitede su vermektedir [12].

3.3. Elektrokimyasal Yöntem ile Atıksuların Arıtılması

Zeytinyağı endüstrisi atıksularının arıtımında; fenollerin biyolojik arıtım sürecine olan kötü etkileri, biyogaz üretiminde üretilen gazın depolanmasının sorun olması, koagülasyon, flokülasyon, filtrasyon, açık havuzlarda buharlaştırma ve yakma gibi arıtım süreçlerinde kötü koku oluşumu, ters osmoz ve ultrafiltrasyon gibi yöntemlerin düşük etkinlikte ve yüksek maliyetli olması gibi dezavantajları vardır [39]. Ayrıca bu yöntemler, problemin ancak kısmi çözümünü sağlayabilmekte ve ardından bir biyolojik arıtımının yapılması gerekmektedir [40].

Elektrokoagülasyon; çözünebilen ve pıhtılaştırıcı özelliğe sahip metal (alüminyum ve demir gibi) bir elektrodun kullanıldığı elektrokimyasal atıksu arıtım sürecidir. Elektrokoagülasyonda pıhtılaşma ve çökelme mekanizmaları sisteme kimyasal madde ilavesi ile değil, elektrokimyasal reaktördeki elektrotlar aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Elektrokoagülasyonda anot olarak kullanılan metal, iyon şeklinde çözünür. Örneğin anodun demir olması durumunda Fe^{+2} iyonları oluşacaktır. Suyun elektrolizi ile katotta hidrojen gazı yanında OH^- iyonları da oluşur.

Katotta:



Anotta:



Anotta üretilen demir iyonları ve katotta üretilen hidroksil iyonları çözelti içine difüzenerek $Fe(OH)_2$ oluşturmak üzere tepkime verirler.



sudaki O_2 İle



Bu aşamada sudaki kirleticiler, oluşan $Fe(OH)_3$ 'ün çökmesiyle eş zamanlı olarak $Fe(OH)_3$ yumağına tutunarak eş zamanlı olarak çöker.

Elektrokoagülasyon su ve atıksu arıtımında etkili ve basit bir yöntemdir. Tekstil atıksuları, içme suları, lokanta atıksuları, metal endüstrisi, galvanize sanayi, gıda endüstrisi, otomobil endüstrisi yem endüstrileri, petrol rafinerileri, petrokimya endüstrilerinde atıksu arıtılmasında başarı ile uygulanmaktadır.

Kirliliklerin gideriminde hızlı ve etkin, işletmesi kolay, düşük yatırım ve işletme maliyeti olan bir süreçtir.

Elektroflotasyon yöntemi endüstriyel atıksuların arıtımı yanında evsel atıksuların arıtımında da kullanılmaya başlanmıştır. Atıksu arıtımında ön arıtma veya ikincil kademe, evsel atıksuyun arıtımında ise üçüncül arıtma birimi olarak kullanılabilir. Bu süreçte sıvı ortamdan elektriksel akım geçirilmekte ve elektrotlarda oluşan hidrojen ve oksijen gazları kolloidlere yapışarak bunları sıvı yüzeyine doğru çıkarmaktadır. Yüzeydeki köpük, köpük sıyrıcılar vasıtasıyla alınabilmektedir.

Bu süreçte elektrotlar tepkimelerin gerçekleşmesinde kullanılan esas malzemedir. Bu nedenle uygun elektrot seçimi önemlidir [40]. Elektrokoagüasyonda demir ve alüminyum elektrotlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu elektrotlar, ucuz, temini kolay ve üstelik etkisi kanıtlanmış elektrotlardır. Çizelge 3.1'de elektrotlarda oluşan tepkime mekanizmaları verilmiştir [41].

Çizelge 3.1. Elektrotlarda oluşan tepkime mekanizmaları [41]

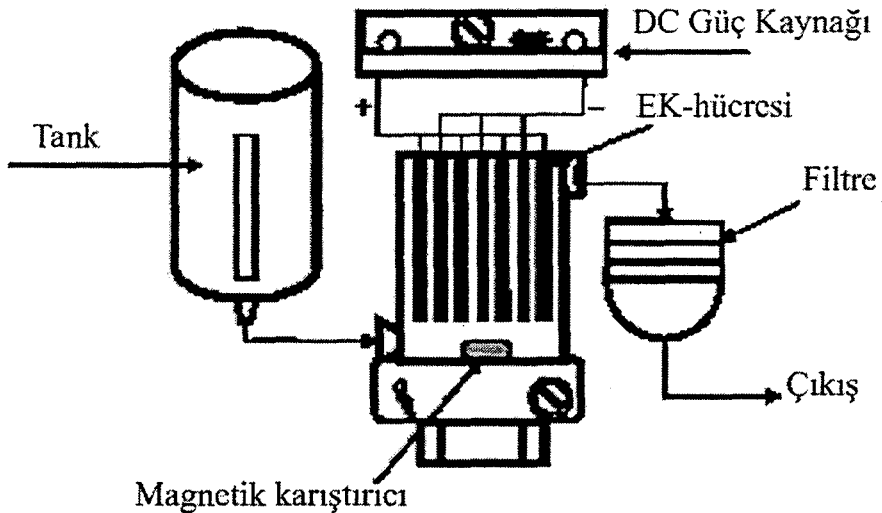
Anot	Katot
$4 \text{ OH}^- - 4e^- \Rightarrow 2 \text{ H}_2\text{O} + \text{O}_2$	$2\text{H}^+ + 2e^- \Rightarrow \text{H}_{2(\text{g})} + 2\text{H}_2\text{O}$ (Asidik çözeltide)
$2 \text{ H}_2\text{O} - 4e^- \Rightarrow \text{O}_{2(\text{g})} + 4 \text{ H}^+$	$2\text{H}_2\text{O} + 2e^- \Rightarrow \text{H}_{2(\text{g})} + 2 \text{ OH}^-$ (bazik çözeltide)
$2 \text{ Cl}^- - 2e^- \Rightarrow \text{Cl}_{2(\text{g})}$	$\text{O}_{2(\text{g})} + \text{H}_2\text{O} + 4e^- \Rightarrow 4 \text{ OH}^-$
$\text{Cl}_{2(\text{g})} + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{HOCl} + \text{H}^+ + \text{Cl}^-$	
Al-anot	
$\text{Al}_{(\text{k})} - 3e^- \Rightarrow \text{Al}^{+3}$	$\text{Al}_{(\text{k})} + 4 \text{ OH}^- \Rightarrow [\text{Al}(\text{OH})_4]^- + 3e^-$ (çok yüksek pH'da)
$\text{Al}^{+3} + 3 \text{ H}_2\text{O} \Rightarrow \text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+$	
Fe-anot	
$\text{Fe}_{(\text{k})} + 2 e^- \Rightarrow \text{Fe}^{+2}_{(\text{aq})}$	
$\text{Fe}^{+2}_{(\text{aq})} + 2 \text{ H}_2\text{O} \Rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 + 2 \text{ H}_2\text{O}$	$\text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{OH}^- \Rightarrow [\text{Fe}(\text{OH})_4]^-$
$\text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{HOCl} \Rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{Cl}^-$	$[\text{Fe}(\text{OH})_4]^- + 2 \text{ OH}^- \Rightarrow [\text{Fe}(\text{OH})_6]^{3-}$ (çok yüksek pH'da)
$\text{Fe}^{+2} - e^- \Rightarrow \text{Fe}^{+3}_{(\text{aq})}$	
$\text{Fe}^{+3} + 3 \text{ H}_2\text{O} \Rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+$	

Doğru akımda anot olarak demir veya alüminyum elektrotlar çözünerek çözeltiye Al^{+3} ve Fe^{2+} , Fe^{3+} iyonları vermekte olup, bu iyonlar sudaki hidroksil iyonları ile birleşerek çözünmeyen $\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ve $\text{Fe}(\text{OH})_3$ gibi metal hidroksitleri oluşturmaktadır. Elektrokoagülasyon anında oluşan metal

hidroksit partiküllerinin adsorpsiyon özellikleri çok yüksektir. Pıhtılaşan partiküller atıksularda bulunan mikro koloidal partikülleri ve iyonları kendilerine doğru çekerek adsorblamaktadır [40].

Oluşan yumaklar çökelmekte ve elektroflotasyonda oluşan gazlar yardımıyla su yüzeyine kaldırılabilir. Elektroflotasyon ve elektrokoagülasyonun aynı sistemde olması elektroflotokoagülasyon süreci olarak adlandırılmaktadır. Yüzeiden veya tabandan toplanan partiküller filtrasyon süreçlerinde susuzlaştırılmaktadır [40].

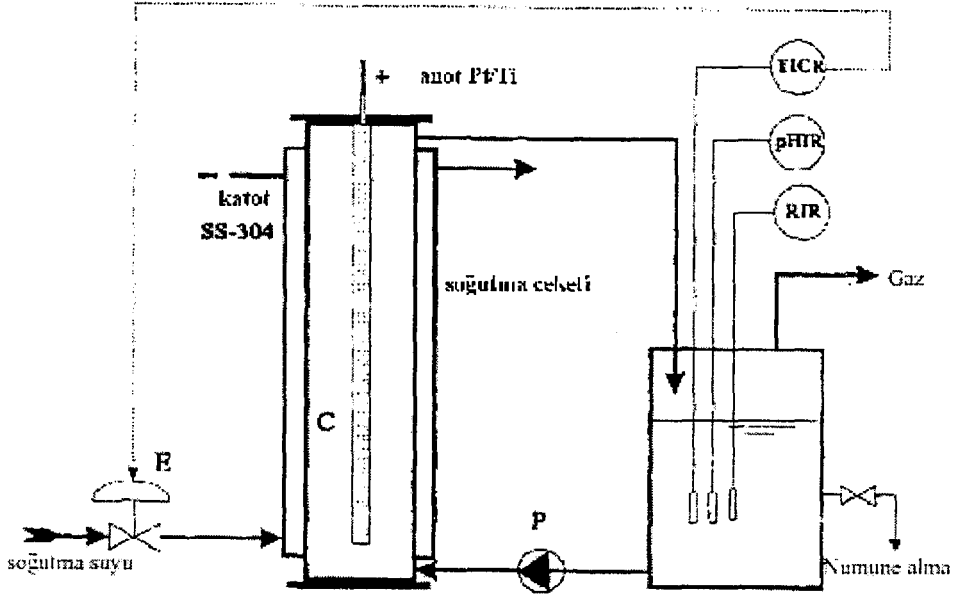
İnan ve arkadaşlarının yapmış olduğu bir çalışmada zeytinyağı endüstrisi atık suyu elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtmaya çalışılmıştır. Bu çalışmada 48500 mg.L^{-1} KOİ, 1780 mg.L^{-1} AKM ve 2120 m^{-1} bulanıklığa sahip su kullanılmış ve deneyler 500 ml hacminde laboratuvar ölçekli paralel plakalı reaktörde gerçekleştirilmiştir. Reaktör Şekil 3.2.'de görülmektedir [41].



Şekil 3.2. İnan ve arkadaşlarının çalıştıkları reaktör [41]

Bu çalışmada elektrot malzemesi olarak Alüminyum ve demir, yumaklaştırıcı olarak katyonik polielektrolit, pH ayarlamak için H_2SO_4 ve NaOH kullanılmıştır. Bu çalışmada KOİ gideriminde %52'ye, renk gideriminde %95'e ve AKM gideriminde %68'e ulaşmıştır [41].

Israilides ve arkadaşları zeytinyağı endüstrisi atıksularının elektroliz yöntemiyle arıtımını çalışmışlardır. Bu çalışmada elektrot malzemesi olarak paslanmaz çelik ve Platin kaplanmış Titanyum alaşımı, destek elektrolit olarak sodyum klorür (NaCl) kullanılmıştır. Deneysel çalışmaların yapıldığı düzenek Şekil 3.3.'te gösterilmiştir [39].



Şekil 3.3. Israilides ve arkadaşlarının çalışmalarını yaptıkları elektroliz hücresi [39].

Çalışılan düzenek bir elektroliz hücresi, bir geri döngü reaktörü ve bir soğutucu sistemden oluşmaktadır. Çalışmada katot olarak kullanılan 20 cm çapında paslanmaz çelik, anot 48 cm uzunluğunda ve 0,25 cm çapında Platin kaplı Titanyum alaşımıdır. Çalışılan su $178,22 \text{ g.L}^{-1}$ KOİ, $52,17 \text{ g.L}^{-1}$ AKM, $42,55 \text{ BOD}_5$ ve $11,41 \text{ g.L}^{-1}$ fenolik bileşik içermektedir. Çalışma süresi 10 saat olan bu elektroliz hücresiyle KOİ giderimi %93 ve fenol giderimi de %99,4 olarak gerçekleşmiştir [39].

Vlyssides ve arkadaşları da Şekil 3.3'teki sistemi kullanarak KOİ'si 250 g.L^{-1} , toplam katı madde miktarı (TKM) 340 g.L^{-1} ve toplam organik karbonu (TOK) 98 g.L^{-1} olan zeytinyağı endüstrisi atık suyuyla yapmış oldukları çalışmada KOİ'de %95,6, TOK'de %80,4 ve AKM'de de %93'lük bir giderime ulaşmışlardır [42].

Longhi ve arkadaşları PbO₂ anot kullanarak karasuda bulunan fenol ve polifenollerin yükseltgenmesini, geleneksel biyolojik arıtmadan önce bir ön arıtım olarak çalışmışlardır. 500-2000 A.m⁻² arasında değişen akım yoğunluklarında fenolik bileşenlerin giderimi %90, KOİ giderimi %50 civarında gerçekleşmiştir [43].

Fenol gideriminin yapıldığı diğer bir çalışmada ise elektrolit olarak üretilen hidrojen peroksit ile giderim yapılmıştır, pH, katot gerilimi, Fe(II) derişimi ve fenol derişimi gibi işletme şartları belirlenmiştir. Fenol, pH3'te etkin olarak karbondioksit'e dönüşmekte, pH3'te KOİ giderim veriminin 260-2600 mg.L⁻¹ başlangıç KOİ aralığında % 60 olduğu tespit edilmiştir. [44].

Yapılan diğer bir çalışmada da fenolün sentetik bor katkılı elmas ince film elektrotta asidik ortamda kimyasal yükseltgenmesi gerçekleştirilmiştir. Uygulanan akım ve fenol derişimine bağlı olarak fenolün tamamı CO₂'e dönüşmekte veya diğer aromatik bileşiklere (benzokinon, hidrokinon, kateşol) kısmen yükseltgenmektedir [45]. Ayrı bir çalışmada da sentetik bor katkılı elmas elektrotta organik bileşiklerin elektrokimyasal yükseltgenmesi için gerekli elektrot yüzey alanı ve spesifik enerji tüketimi tahmini için teorik analiz yapılmıştır [46].

Fenolün kurşundioksit dolgu yatak anotta elektrokimyasal yükseltgenmesi Sucre ve Watkinson tarafından çalışılmıştır. Hücreler hem kesikli hem de sürekli sistemde işletilmiştir. Çözeltideki tüm fenoller kolayca yükseltgenmiş ancak toplam organik karbon giderimi düşük kalmıştır. Yükseltgenen fenol yüzdesi akım yoğunluğu arttıkça artmış, başlangıç fenol derişimi, elektrolit akış hızı, pH ve anot partikül boyutu arttıkça düşmüştür [47].

Elektrokimyasal fenol gideriminin yapıldığı başka bir çalışmada potansiyostatik şartlarda kesikli hücre kullanılarak fenol dönüşümü, anot akım verimi, hidrokinon verimi ve sürecin enerji tüketimi değerlendirilmiştir [48]. Fenolün SnO₄ anot kullanılarak giderildiği bir çalışmada da tepkime araçlarının analizi ve karbon denkliği sonucunda başlıca tepkimenin fenolün CO₂'ye yükseltgenmesinin olduğu saptanmıştır [49].

3.4. Diğer Yöntemler

3.4.1. Kompostlaştırma

Tarımsal faaliyetler sonucu büyük miktarda organik kirlilik içeren atıklar oluşur. Bu atıklar insan sağlığı, çevre ve ekonomik açıdan büyük bir öneme sahiptir. Bu faaliyetlerden biri olan zeytinyağı üretimi sonucu oluşan atıklar içerdikleri yüksek orandaki fenolik bileşikler ve organik karbon nedeniyle; direk deşarj sonrası alıcı ortamdaki mikroorganizmalar için ve arıtma tesislerindeki biyolojik süreçler için toksik etki yapar. Bu etki sonucu biyolojik faaliyet durur [50].

Kompostlaştırma süreci genel olarak, katı atığın içindeki organik maddelerin bozunması işlemidir. Bu süreç, katı atığın içinde bulunan bitki ve hayvan atıklarını daha kararlı, toprak iyileştiricisi ve şartlandırıcısı olarak kullanılabilir bir hale dönüştürebilen bir işlemdir. Katı ve sıvı atıklar içindeki organik maddeler çeşitli mikroorganizmalarla daha basit bileşiklere, özellikle CO₂ ve H₂O'ya dönüştürülürler. Bu işlemle organik katı atıklar, biyokimyasal olarak ayrışır ve zemin kalitesi iyileştirilir. Böylece hem materyal mikroplardan arınır hem de önemli miktarda hacim azalması mümkün olur [51].

Kompostlaştırma işlemi sonrasında CO₂, su buharı, mineraller ve stabilize olmuş organik madde oluşmaktadır. Bu nedenle kompostlaştırma işlemi, karasuyun geri kullanımı için pratik ve ekolojik bir yöntemdir. Bu sayede karasu ve prinanın herhangi bir fitotoksik etkisi olmaksızın organik gübre olarak kullanımı sağlanmaktadır. Ancak bu gübrenin pazarlanabilirliği bilinmemektedir [8]. Zeytinyağı endüstrisi atık suları bir katı faz ile birlikte kompostlanarak arıtılabilir. Bu işlem sırasında katı faz dolgu malzemesi görevi görürken, sıvı faz sürekli olarak verilir, nemlilik ve besin kaynağı olarak çalışır. Bu işlem sırasında atıksu azot açısından zenginleşir ve kompost yığımından çıkan ısı sonucunda da sıvı kısım uzaklaştırılmış olur. Katı faz için evsel katı atıklar, arıtma tesisi çamuru, kümes atıkları ve zeytin çekirdekleri kullanılabilir [14].

3.4.2. Lagünlerde buharlaştırma

Zeytinyağı üretimi, yılın belli zamanlarında yapılmaktadır. Bu tür endüstrilerde genellikle atıksuların lagünlere verilip buharlaştırılarak arıtılması yoluna gidilmektedir. Bu yöntem, İspanya'da Çevre Koruma Otoriteleri tarafından karasuyun alıcı ortamlara verilmesini önlemek amacıyla uygulanmaktadır. Lagün hacimleri 2 ton zeytin için 1 m³ olarak öngörülmüştür. Arazi maliyetinin yüksek oluşu, askıda katı madde için ön arıtma gerektirebilecek olması, atık sudaki yağların ön arıtma gerektiren bir sorun olabilmesi, koku ve böcek sorunu yaratması, oluşan fitotoksitite yüzünden alanın ilerde tarım amaçlı kullanılamaması, lagün hacmi küçük olduğu durumlarda taşma riski, zeytinyağı atıksularının yılın soğuk mevsimlerinde oluşması, buharlaşma dışında çok düşük seviyede biyolojik arıtım olması [14], geniş alanlara ihtiyaç duyulması ve bu tür alanların her zaman yağ fabrikalarının yakınında bulunmaması nedeniyle atıksuların lagünlere taşınma sorunu olması, ayrıca atıksuyun sızma olasılığı sonucunda, yeraltı suyunun kirlenme riski gibi nedenlerle karasuyun lagünlerde buharlaştırılmasına zamanla karşı çıkmıştır [10].

3.4.3. Arazide arıtım

Toprak, arazi özellikleri ve iklimsel koşullar uygun olduğunda, 5000 m³ .ha⁻¹ gibi yüksek miktarda uygulamayla arazide arıtım yöntemi bir çözüm olabilir. Ayrıca bu yöntem zeytinyağı endüstrisi atıksularının su ve gübre değerinin geri kazanılmasını mümkün kılan doğrudan sulama ile toprağın verimliliğini, mikrobiyal faaliyetleri ve toprağın tanecik yapısının kararlılığını artırır. Atıksu bu amaçla kullanılacağı zaman polifenol ve tuz içeriğinin neden olacağı fitotoksik etki nedeniyle kontrollü deşarj edilmelidir [10].

Zeytinyağı endüstrisi atıksularının arazide arıtılması sonucu topraktaki ağır metaller çözünerek yeraltı sularına taşınabilir [14].

3.4.4. Distilasyon yöntemi ile arıtım

Zeytinyağı endüstrisi atıksuyunun organik ve inorganik madde içeriği, su içeriğinin buharlaştırılmasıyla derişik hale gelir. Derişik hale gelen katı kısmın giderimi, distilasyon düzeneğine enerji sağlamak amacıyla kullanılabilir fakat bu süreç sonrası ortaya çıkan gaz emisyonları hava kirliliğine neden olur, ayrıca bu işlem sonucu oluşan sıvı kısım distilasyon sonrasında bile yüksek KOİ yüküne sahiptir ve distilasyon sürecinden sonra oluşan distilat yeniden kullanılmadan ya da desarj edilmeden önce arıtıma tabi tutulmalıdır [8].

3.4.5. Karasuyun adsorpsiyonu

Zeytinyağı endüstrisi atıksularına renk veren, biyolojik olarak ayrışmayan, bakteriler ve biyolojik arıtımı engelleyen bileşikler aktif karbon kullanılarak giderilebilir, ancak aktif karbonun tekrar kullanımının mümkün olmaması nedeniyle adsorpsiyon işleminden sonra yakılacak çok fazla miktarda katı atık oluşur ve yakma sonucu kirlenici gaz emisyonuna neden olur [8].

3.5. Zeytinyağı Endüstrisi Atıksularının Arıtımında Kullanılan Yöntemlerin Maliyet Analizleri

Karasu arıtımı için uygulanan arıtım yöntemleri ile ilgili maliyet analizleri, sezonluk ortalama 5000 ton zeytin işlendiği ve 5000 m³ karasu açığa çıktığı göz önüne alınarak yapılmıştır. Çizelge 3.2.'de arıtım sistemlerinin ilk yatırım masrafları Çizelge 3.3'te de sistemlerin işletme masrafları, yan ürünlerin değerlendirilmesi sonrası elde edilen kazanç hesaba katılmadan verilmiştir [8].

Çizelge 3.2. Arıtım sistemlerinin ilk yatırım masrafları [8]

Metot / Süreç	İlk Yatırım Masrafı (euro)	10 yılda geri ödemesi (euro)	Toplam masraf Euro.m ⁻³
Zorlanmış mekanik buharlaştırma / lagünleme	180722,89	18072,29	3,61
Fiziksel/kimyasal arıtım+biyolojik arıtım+ultrafiltrasyon	150602,41	15060,24	3,01
Biyolojik arıtım	180722,89	18072,29	3,61
Fiziksel/kimyasal arıtım+ ters osmoz	138554,22	13855,42	2,77
Fiziksel/kimyasal+ultrafiltrasyon	216867,47	21686,75	4,34
Biyolojik arıtım+ters osmoz	180722,89	18072,29	3,61
Vakumla buharlaştırma	96385,54	9638,55	2,75
Zorlanmış doğal buharlaştırma	42168,67	4216,87	1,21
Geliştirilmiş doğal buharlaştırma	30120,48	3012,05	0,86

Çizelge 3.3. Karasu arıtım süreçleri işletme masrafları [8]

Metot / Süreç	Elektrik enerjisi (Euro.m ⁻³)	Kimyasal madde gideri (Euro.m ⁻³)	Çalışan personel ve bakım giderleri (Euro.m ⁻³)	Buhar arıtımı (Euro.m ⁻³)	Toplam masraf (Euro.m ⁻³)
Zorlanmış mekanik buharlaştırma/lagünleme	1,42	---	0,88	4,52	6,82
Fiziksel/kimyasal arıtım+biyolojik arıtım+ultrafiltrasyon	5,15	2,06	1,47	---	8,68
Biyolojik arıtım	1,28	2,40	2,53	---	6,21
Fiziksel/kimyasal arıtım+ ters osmoz	0,60	3,05	1,79	---	5,27
Fiziksel/kimyasal+ultrafiltrasyon	---	---	Belirlenecek	---	---
Biyolojik arıtım+ters osmoz	---	---	Belirlenecek	---	---
Vakumla buharlaştırma	0,48	---	1,32	1,90	3,69
Zorlanmış doğal buharlaştırma	0,07	--	0,40	---	0,47
Geliştirilmiş doğal buharlaştırma	---	---	0,05	---	0,05

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Zeytinyağı üretimi sonrasında açığa çıkan atıksuyun organik madde, askıda katı madde, yağ ve gres içeriği oldukça yüksektir. Bu nedenle karasuyun arıtımı ve bertaraf edilmesi, önemli çevre sorunları arasındadır. Yüksek kirlilik içeren karasuyun arıtımı için pek çok yöntem geliştirilmiştir. Bu çalışmada karasuyun elektrokimyasal yöntemle arıtımı çalışılmıştır. Bu amaçla öncelikle çeşitli illerdeki zeytinyağı üretim tesislerinden elde edilen atıksularda KOİ derişimleri belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1.'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Çeşitli zeytinyağı üretim tesisleri atıksularının KOİ değerleri

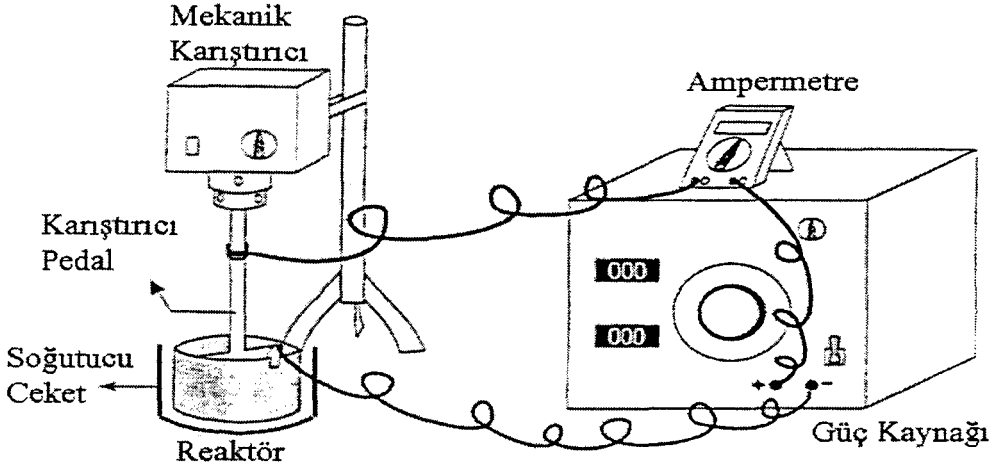
Numune yeri	Firma	KOİ (mg.L ⁻¹)
Ayvalık/ Balıkesir	Abdullah Ertem yağ san.	100840
Bodrum/ Muğla	Yiğitler zeytinyağı san.	14400
İzmir	Tariş	124369
Manisa	Rast Gıda	110084
Manisa	Soma Tarım Koop. Yağ Fab	79000
Bursa	Marmara Birlik	14800

Tesisteki üretimin şekline göre (klasik, iki fazlı veya üç fazlı) atıksuyun KOİ derişim değışmektedir. Bazı süreçlerde, zeytinyağı üretimi aşamasında oluşan ham karasu zeytin yıkama suları ile karıştırılarak seyreltilmiş olarak tek noktadan deşarj edilmektedir.

4.1. Zeytinyağı Atıksularının Elektrokoagülasyon Yöntemiyle Giderim Çalışmaları

Çalışmamızda zeytinyağı üretim tesisinden alınan farklı derişimlere sahip atıksu (97000 mg.L⁻¹ ve 45000 mg.L⁻¹) kullanılmıştır. Deneyler 10 cm çaplı, 10 cm yüksekliğinde silindirik yapıda alüminyum ve demir reaktörler ile yapılmıştır. Bazı çalışmalarda reaktör anot, karıştırıcı pedal katot olarak kullanılırken, bazı çalışmalarda da karıştırıcı pedal anot, reaktör katot olarak kullanılmıştır.

Çalışmalar farklı akım yoğunluklarında (20 mA.cm^{-2} , 30 mA.cm^{-2} , 35 mA.cm^{-2} , 40 mA.cm^{-2} , 45 mA.cm^{-2} ve 75 mA.cm^{-2}) gerçekleştirilmiştir. Pıhtılaştırıcı çözelti içinde dağılımını ve yumaklaşmayı sağlamak için çözelti 60 devir.dk^{-1} hızda karıştırılmıştır. Deneyler sırasında çözeltinin sıcaklığını kontrol altında tutmak için bir soğutucu ceket kullanılmıştır. Deneysel çalışmaların yapıldığı düzenek Şekil 4.1.'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Deneysel çalışmaların yapıldığı düzenek

4.1.1. Kullanılan kimyasal maddeler

Zeytinyağı endüstrisi atık suyuyla yapılan çalışmada pıhtılaştırıcı olarak anyonik poli akrilamit (APA), poli alüminyum klorür (PAC), destek elektrolit olarak sodyum klorür (NaCl) ve hidrojen peroksit (H_2O_2) ve pH ayarlaması için de sülfürik asit (H_2SO_4) ve sodyum hidroksit (NaOH) kullanılmıştır.

4.1.2. Kullanılan yardımcı araçlar

Çalışmalarda akım 220 V girişli SEW marka güç kaynağından sağlanmıştır. Geçen akım ve gerilim DT-3800 model dijital ampermetre kullanılarak ölçülmüş ve çözelti CAT R50 model mekanik karıştırıcıyla karıştırılmıştır.

4.1.3. Tayin

Sudaki KOİ derişimini belirlemek için Standart metot 5220 yöntemi kullanılmıştır. KOİ derişimi belirlenecek işlem arıtılmış çözeltilerde öncelikle floklar sıyrılmış daha sonra 3000 devir.dk⁻¹ hızda 5 dakika süreyle santrifüjlenmiştir.

4.1.4. Denev sonuçlarının hesaplanmasında kullanılan eşitlikler

Yüzde giderim

$$\%Giderim = \frac{(C_0 - C)}{C_0} \times 100 \quad (4.1)$$

C₀: başlangıç derişimi (mg.L⁻¹)

C: son derişim (mg.L⁻¹)

Akım verimi

$$\text{Akım verimi} = \frac{\%Giderim \times C_0 \times F * V_{\text{reaktör}}}{I \times t} \quad (4.2)$$

I: Akım (A)

F: Faraday sabiti (96500 A.s.mol⁻¹)

V_{reaktör}: reaktör hacmi (L)

t: zaman (s)

Enerji tüketimi

$$\text{Enerji tüketimi(kWh.m}^{-3}\text{)} = \frac{V \times I \times t}{V_{\text{çözelti}}} \quad (4.3)$$

$$\text{Enerji tüketimi(kWh.g}^{-1}\text{)} = \frac{V \times I \times t}{(C_0 - C) \times V_{\text{çözelti}}} \quad (4.4)$$

V: gerilim (Volt)

V_{çözelti}: çözelti hacmi (L)

4.2 Deneysel Çalışmalardan Elde Edilen Sonuçlar

Deneysel çalışmalarda başlıca demir reaktör kullanılmış ancak parametre olarak alüminyum reaktör de denenmiştir. Başlangıç derişimi olarak 45000 mg.L^{-1} kullanılmış ancak başlangıç derişiminin etkisinin incelendiği deneylerde 97000 mg.L^{-1} derişimi de çalışılmıştır.

Çalışmaların büyük bir kısmında reaktör anot, karıştırıcı pedal katot olarak kullanılmış ancak reaktörün katot olduğu durumda denenmiştir. Akım yoğunluğu, kullanılan elektrolit ve destek elektrolit derişimi denenilen diğer parametrelerdir. Alüminyum reaktörle çalışırken örneğin pH'ı 5,5'a, demir reaktörle çalışılırken örneğin pH'ı 6,5'a ayarlanmıştır. Çalışma süresi 3 saat olarak belirlenmiş ve tüm deneyler üç saat süreyle yapılmıştır.

4.2.1. Reaktörün katot veya anot olduğu durumda deney sonuçları

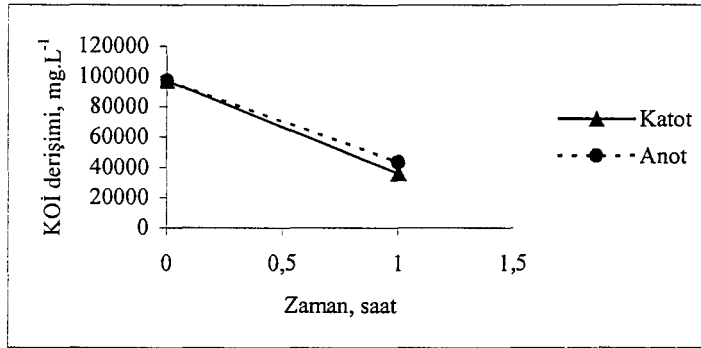
Demir reaktörde başlangıç KOİ'si 97000 mg.L^{-1} olan zeytinyağı endüstrisi atık suyunun, 20 mA.cm^{-2} akım yoğunluğunda, $0,5 \text{ g.L}^{-1}$ APA derişiminde reaktörün anot ve katot olması durumunda elde edilen deneysel sonuçlar çizelge 4.2.'de, Çizelge 4.3'te de % giderim, enerji tüketimi ve akım verimi değerleri verilmiş, Şekil 4.2.-4.4.'te sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmada süre 1 saattir.

Çizelge 4.2. KOİ'si 97000 olan numune için 20 mA.cm^{-2} akım yoğunluğunda reaktör anot ve katot iken yapılan çalışmaların sonuçları

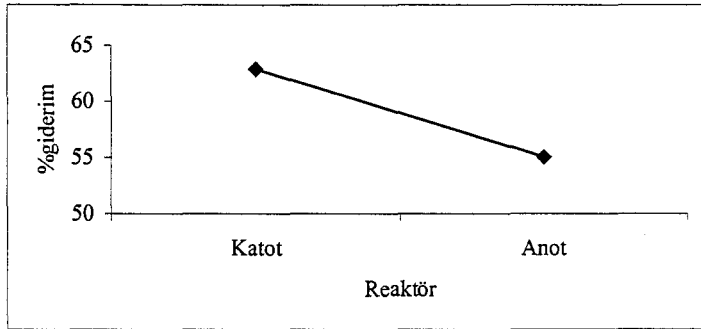
Reaktör	KOI son (mg.L^{-1})	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)
Katot	36000	25,6	8,50	12
Anot	43600	2,51	10,07	12

Çizelge 4.3. KOİ'si 97000 olan numune için 20 mA.cm^{-2} akım yoğunluğunda reaktör anot ve katot iken % Giderim, Enerji tüketimi ve akım verimi sonuçları

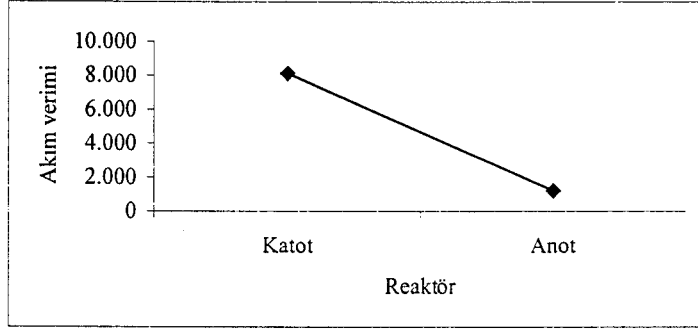
Reaktör	KOİ giderimi (%)	Enerji tüketimi		Akım verimi
		kWh.kg^{-1}	kWh.m^{-3}	
Katot	62,91	0,70	42,67	8,13
Anot	55,05	0,08	4,18	1,22



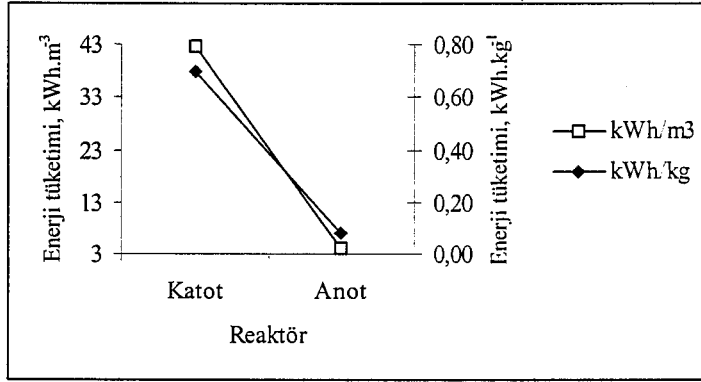
Şekil 4.2. Son KOİ derişiminin reaktörün anot veya katot olmasıyla değişimi. APA: $0,5 \text{ g.L}^{-1}$, Demir reaktör.



Şekil 4.3. Reaktörün anot veya katot olmasıyla giderimin değişimi. APA: $0,5 \text{ g.L}^{-1}$, Demir reaktör.



Şekil 4.4. Reaktörün anot veya katot olmasıyla akım veriminin değişimi. APA: 0,5 g.L⁻¹, Demir reaktör.



Şekil 4.5. Reaktörün anot veya katot olmasıyla enerji tüketiminin değişimi. APA: 0,5 g.L⁻¹, Demir reaktör.

Reaktörün anot olduğu durumda giderim verimi (Şekil 4.3), akım verimi (Şekil 4.3) ve enerji tüketimi (Şekil 4.4)) değerleri daha iyi sonuçlar vermiştir.

4.2.2. Akım yoğunluğunun etkisinin incelendiği deney sonuçları

Başlangıç KOİ'yi 45000 mg.L⁻¹ ve 97000 mg.L⁻¹ olan atıksularla 3 saatlik elektrokoagülasyon gerçekleştirilmiş ve her yarım saatlik zaman dilimlerinde örnekler alınarak KOİ analizleri yapılmıştır. Bu deneylerde de reaktör anot, karıştırıcı pedal katottur. Başlangıç KOİ derişimi 45000 mg.L⁻¹ olan atıksu için elde edilen deneysel sonuçlar Çizelge 4.4.-4.7'te verilmiştir. Farklı akım yoğunluklarında KOİ deşimlerinin, % giderim, akım verimi ve enerji tüketimlerinin zamanla deşimleri de Şekil 4.8.-4.11.'da verilmiştir. Başlangıç KOİ derişimi 97000 mg.L⁻¹ olan atıksu için elde edilen deneysel sonuçlar Çizelge

4.12.-4.15'te verilmiştir. Farklı akım yoğunluklarında KOİ değişimlerinin, % giderim, akım verimi ve enerji tüketimlerinin zamanla değişimleri de Şekil 4.8.-4.11.'da verilmiştir, zamanla değişimleri de Şekil 4.6.-4.15.'de verilmiştir. Deneyler 0,5 g.L⁻¹ PAC, 26,367 g.L⁻¹ H₂O₂ derişimlerinde üç saat süreyle yapılmıştır.

Çizelge 4.4. KOİ derişimi 45000 mg.L⁻¹ olan atıksu için 20 mA.cm⁻² akım yoğunluğundaki deney sonuçları

Zaman(saat)	Gerilim (V)	Sıcaklık (°C)	pH	KOI son (mg.L ⁻¹)
0	0	8	6,8	45000
0,5	7,41	7	8,21	28606
1	7,89	11	8,77	23885
1,5	4,97	12	8,98	22000
2	5,44	13	9,35	20000
2,5	4,82	13	9,90	19048
3,0	4,69	13	10,10	17020

Çizelge 4.5. KOİ derişimi 45000 mg.L⁻¹ olan atıksu için 30 mA.cm⁻² akım yoğunluğundaki deney sonuçları

Zaman(saat)	Gerilim (V)	Sıcaklık (°C)	pH	KOI son (mg.L ⁻¹)
0	0	10	6,8	45000
0,5	8,05	10	8,20	23256
1	8,26	15	9,00	20465
1,5	6,26	12	9,45	18140
2	5,70	12	9,80	15814
2,5	5,35	12	10,75	13023
3,0	5,13	14	11,20	11163

Çizelge 4.6. KOİ derişimi 45000 mg.L⁻¹ olan atıksu için 40 mA.cm⁻² akım yoğunluğundaki deney sonuçları

Zaman(saat)	Gerilim (V)	Sıcaklık (°C)	pH	KOI son (mg.L ⁻¹)
0	0	6	6,8	45000
0,5	10,08	15	8,40	19900
1	9,67	19	8,90	14925
1,5	6,93	19	9,46	12935
2	6,60	21	10,80	11940
2,5	10,90	18	12,15	10945
3,0	23,3	21	12,46	9955

Çizelge 4.7. KOİ derişimi 45000 mg.L⁻¹ olan atıksu için 75 mA.cm⁻² akım yoğunluğundaki deney sonuçları

Zaman(saat)	Gerilim (V)	Sıcaklık (°C)	pH	KOI son (mg.L ⁻¹)
0	0	9	6,8	45000
0,5	8,60	26	10,30	10945
1	8,48	23	11,80	9950
1,5	22,5	30	11,96	8955
2	23,2	26	12,15	7960
2,5	24,2	35	11,65	7200
3,0	23,0	35,	11,58	6169

Çizelge 4.8. KOİ derişimi 45000 mg.L⁻¹ olan atıksu için 20 mA.cm⁻² akım yoğunluğundaki deneysel çalışma sonucunda % giderim, enerji tüketimi, akım verimi değerleri

Zaman (saat)	KOİ giderimi (%)	Enerji tüketimi		Akım verimi
		kWh.kg ⁻¹	kWh.m ⁻³	
0,5	36,4	0,38	9,26	10,98
1	46,9	1,77	19,13	7,07
1,5	51,1	3,97	16,08	5,14
2	55,5	6,23	13,01	4,18
2,5	57,7	10,45	12,83	3,48
3,0	62,2	12,38	11,89	3,13

Çizelge 4.9. KOİ derişimi 45000 mg.L⁻¹ olan atıksu için 30 mA.cm⁻² akım yoğunluğundaki deneysel çalışma sonucunda % giderim, enerji tüketimi, akım verimi değerleri

Zaman (saat)	KOİ giderimi (%)	Enerji tüketimi		Akım verimi
		kWh.kg ⁻¹	kWh.m ⁻³	
0,5	48,3	0,46	10,06	14,57
1	54,5	4,16	20,39	8,22
1,5	59,7	7,53	28,21	6,00
2	64,9	10,59	35,34	4,89
2,5	71,1	12,99	42,03	4,29
3,0	75,2	16,43	48,44	3,78

Çizelge 4.10. KOİ derişimi 45000 mg.L⁻¹ olan atıksu için 40 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda ki deneysel çalışma sonucunda % giderim, enerji tüketimi, akım verimi değerleri

Zaman (saat)	KOİ giderimi (%)	Enerji tüketimi		Akım verimi
		kWh.kg ⁻¹	kWh.m ⁻³	
0,5	55,8	1,25	16,80	12,62
1	66,8	7,33	28,89	10,07
1,5	71,3	18,21	37,55	7,17
2	73,5	38,94	45,80	5,54
2,5	75,7	73,17	59,43	4,57
3,0	77,9	146,72	88,55	3,92

Çizelge 4.11. KOİ derişimi 45000 mg.L⁻¹ olan atıksu için 75 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda ki deneysel çalışma sonucunda % giderim, enerji tüketimi, akım verimi değerleri

Zaman (saat)	KOİ giderimi (%)	Enerji tüketimi		Akım verimi
		kWh.kg ⁻¹	kWh.m ⁻³	
0,5	75,7	0,79	26,88	19,68
1	77,9	27,42	53,38	10,13
1,5	80,1	98,09	123,69	6,94
2	82,3	170,95	196,19	5,35
2,5	84,0	270,46	271,81	4,37
3,0	86,3	340,17	343,69	3,74

Çizelge 4.12. KOİ derişimi 97000 mg.L⁻¹ olan atıksu için 20 mA.cm⁻² akım yoğunluğundaki deney sonuçları

Zaman(saat)	Gerilim (V)	Sıcaklık (°C)	pH	KOİ son (mg.L ⁻¹)
0	0	13	6,8	97000
0,5	3,84	11	7,07	61692
1	4,45	12,	7,06	55721
1,5	4,85	11	8,17	50746
2	5,67	11	8,69	46766
2,5	5,48	12	9,04	42786
3,0	4,14	12	9,10	41791

Çizelge 4.13. KOİ derişimi 97000 mg.L⁻¹ olan atıksu için 30 mA.cm⁻² akım yoğunluğundaki deney sonuçları

Zaman(saat)	Gerilim (V)	Sıcaklık (°C)	pH	KOİ son (mg.L ⁻¹)
0	0	10	6,8	97000
0,5	6,80	8	8,38	53731
1	7,10	11	8,79	51741
1,5	6,60	15	8,79	46766
2	6,43	11	9,45	42786
2,5	6,43	9	9,90	40796
3,0	6,57	10	10,87	34826

Çizelge 4.14. KOİ derişimi 97000 mg.L⁻¹ olan atıksu için 40 mA.cm⁻² akım yoğunluğundaki deney sonuçları

Zaman(saat)	Gerilim (V)	Sıcaklık (°C)	pH	KOİ son (mg.L ⁻¹)
0	0	8	6,8	97000
0,5	7,86	11	8,42	52736
1	7,20	15	9,40	49751
1,5	7,10	14	10,19	42786
2	7,60	13	11,52	38806
2,5	7,51	14	12,45	34826
3,0	17,65	17	12,70	33831

Çizelge 4.15. KOİ derişimi 97000 mg.L⁻¹ olan atıksu için 75 mA.cm⁻² akım yoğunluğundaki deney sonuçları

Zaman(saat)	Gerilim (V)	Sıcaklık (°C)	pH	KOI son (mg.L ⁻¹)
0	0	10	6,8	97000
0,5	12,38	19	9,13	42786
1	19,04	21	11,21	33831
1,5	17,9	22	12,07	29851
2	37,3	38	12,13	25871
2,5	27,1	38	12,20	24876
3,0	20,06	35	12,43	23881

Çizelge 4.16. KOİ derişimi 97000 mg.L⁻¹ olan atıksu için 20 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda ki deneysel çalışma sonucunda % giderim, enerji tüketimi, akım verimi değerleri

Zaman (saat)	KOİ giderimi (%)	Enerji tüketimi		Akım verimi
		kWh.kg ⁻¹	kWh.m ⁻³	
0,5	36,4	0,09	3,20	35,49
1	42,6	0,71	6,91	20,77
1,5	47,7	1,52	10,95	15,50
2	51,8	2,71	15,68	12,63
2,5	55,9	3,86	20,24	10,90
3,0	56,9	7,33	23,69	9,25

Çizelge 4.17. KOİ derişimi 97000 mg.L⁻¹ olan atıksu için 30 mA.cm⁻² akım yoğunluğundaki deneysel çalışma sonucunda % giderim, enerji tüketimi, akım verimi değerleri

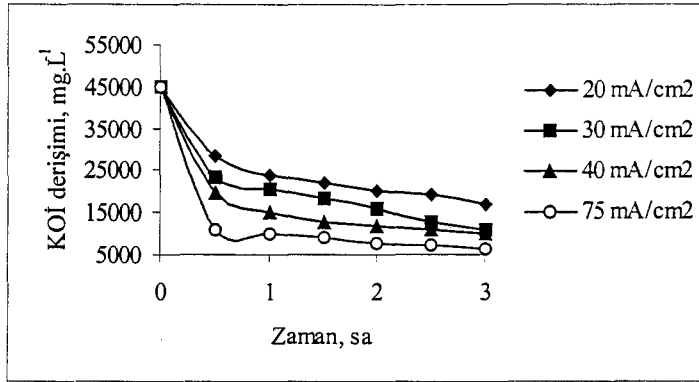
Zaman (saat)	KOİ giderimi (%)	Enerji tüketimi		Akım verimi
		kWh.kg ⁻¹	kWh.m ⁻³	
0,5	44,6	0,20	8,50	28,99
1	46,7	4,66	17,38	15,18
1,5	51,8	6,31	25,63	11,22
2	55,9	8,33	33,66	9,08
2,5	57,9	12,37	41,70	7,53
3,0	64,1	13,75	49,91	6,94

Çizelge 4.18. KOİ derişimi 97000 mg.L⁻¹ olan atıksu için 40 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda ki deneysel çalışma sonucunda % giderim, enerji tüketimi, akım verimi değerleri

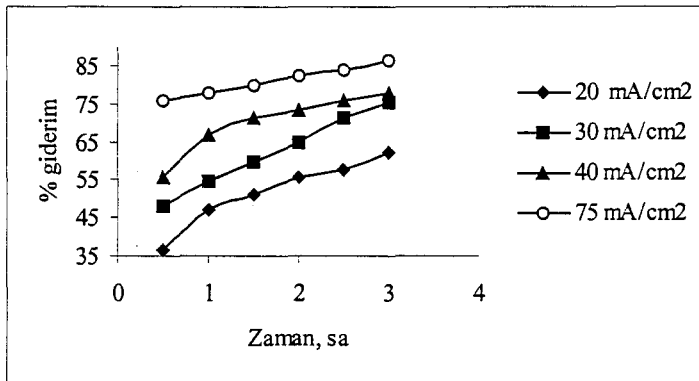
Zaman (saat)	KOİ giderimi (%)	Enerji tüketimi		Akım verimi
		kWh.kg ⁻¹	kWh.m ⁻³	
0,5	45,6	0,30	13,10	22,23
1	48,7	4,32	25,10	11,87
1,5	55,9	6,02	36,93	9,08
2	60,0	9,20	49,60	7,31
2,5	64,1	12,34	62,12	6,25
3,0	65,1	41,91	91,53	5,29

Çizelge 4.19. KOİ derişimi 97000 mg.L^{-1} olan atıksu için 75 mA.cm^{-2} akım yoğunluğunda ki deneysel çalışma sonucunda % giderim, enerji tüketimi, akım verimi değerleri

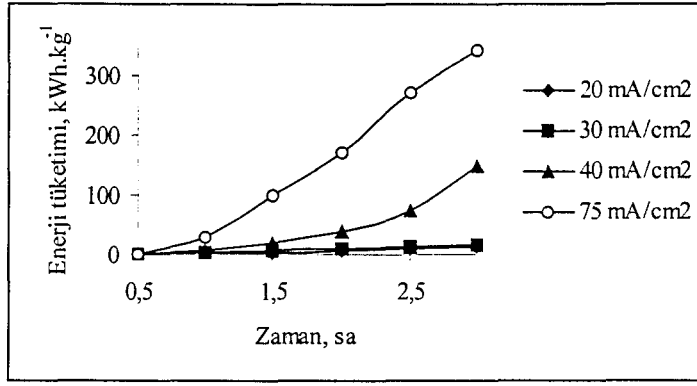
Zaman (saat)	KOİ giderimi (%)	Enerji tüketimi		Akım verimi
		kWh.kg^{-1}	kWh.m^{-3}	
0,5	55,9	0,71	38,69	14,53
1	65,1	7,36	98,19	8,46
1,5	69,2	21,41	154,13	6,00
2	73,3	50,70	270,69	4,76
2,5	74,4	135,81	355,38	3,87
3,0	75,4	198,82	418,06	3,27



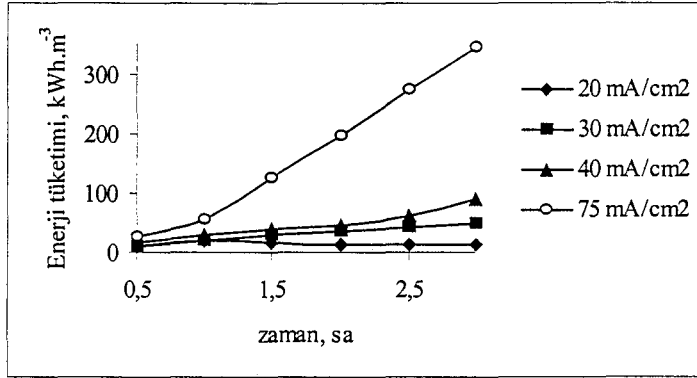
Şekil 4.6. Farklı akım yoğunluklarında KOİ derişiminin zamanla değişimi. KOİ: 45000 mg.L^{-1} , PAC: $0,5 \text{ g.L}^{-1}$, H_2O_2 : $26,36 \text{ g.L}^{-1}$



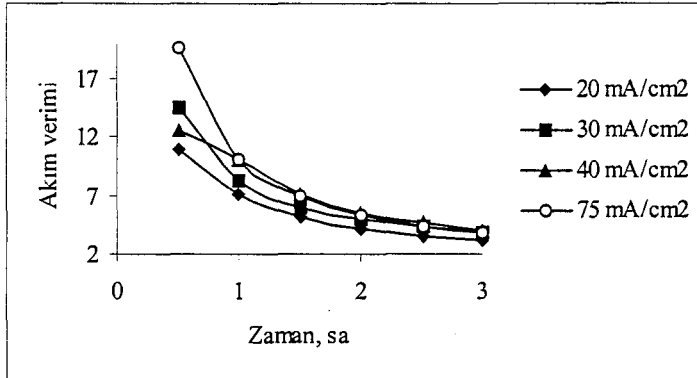
Şekil 4.7. Farklı akım yoğunluklarında % giderimin zamanla değişimi. KOİ: 45000 mg.L^{-1} , PAC: $0,5 \text{ g.L}^{-1}$, H_2O_2 : $26,36 \text{ g.L}^{-1}$



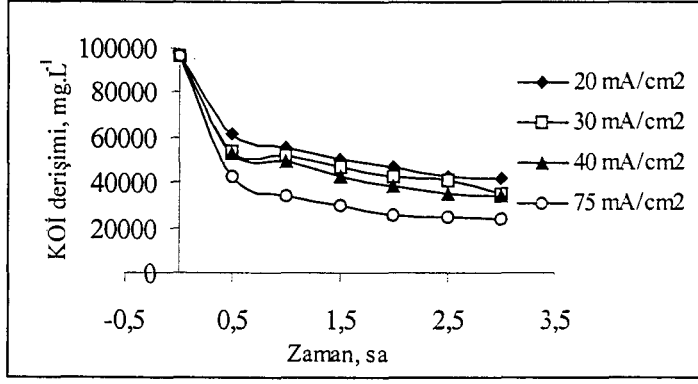
Şekil 4.8. Farklı akım yoğunluklarında kWh.kg⁻¹ cinsinden enerji tüketiminin zamanla değişimi. KOİ: 45000 mg.L⁻¹, PAC: 0,5 g.L⁻¹, H₂O₂: 26,36 g.L⁻¹



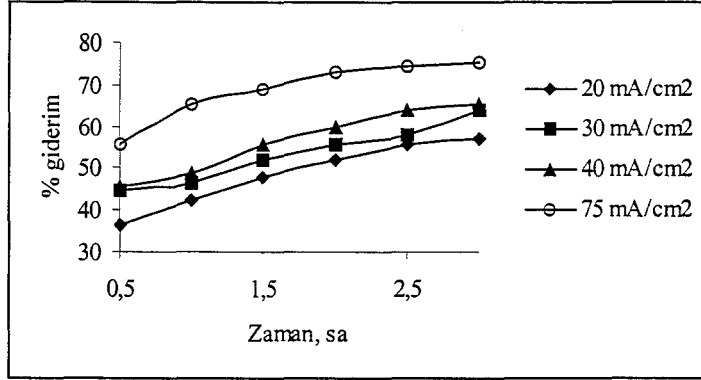
Şekil 4.9. Farklı akım yoğunluklarında kWh.m⁻³ cinsinden enerji tüketiminin zamanla değişimi. KOİ: 45000 mg.L⁻¹, PAC: 0,5 g.L⁻¹, H₂O₂: 26,36 g.L⁻¹



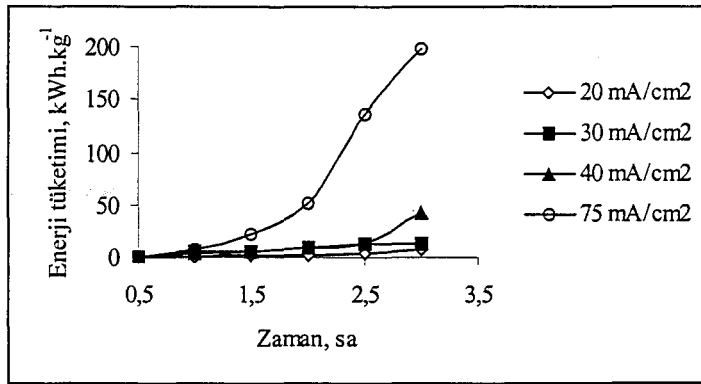
Şekil 4.10. Farklı akım yoğunluklarında akım veriminin zamanla değişimi. KOİ: 45000 mg.L⁻¹, PAC: 0,5 g.L⁻¹, H₂O₂: 26,36 g.L⁻¹



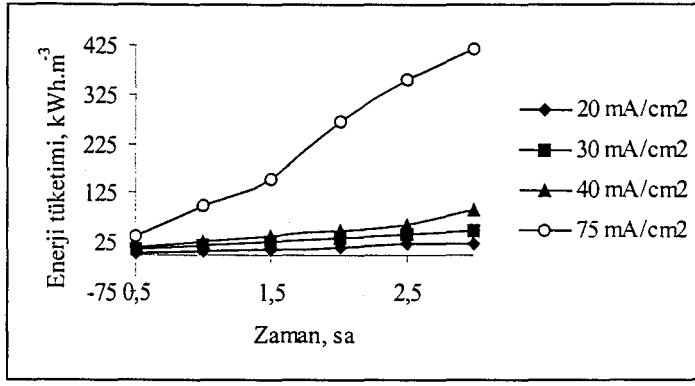
Şekil 4.11. Farklı akım yoğunluklarında KOİ derişiminin zamanla değişimi. KOİ: 97000 mg.L⁻¹, PAC: 0,5 g.L⁻¹, H₂O₂: 26,36 g.L⁻¹



Şekil 4.12. Farklı akım yoğunluklarında % giderimin zamanla değişimi. KOİ: 97000 mg.L⁻¹, PAC: 0,5 g.L⁻¹, H₂O₂: 26,36 g.L⁻¹

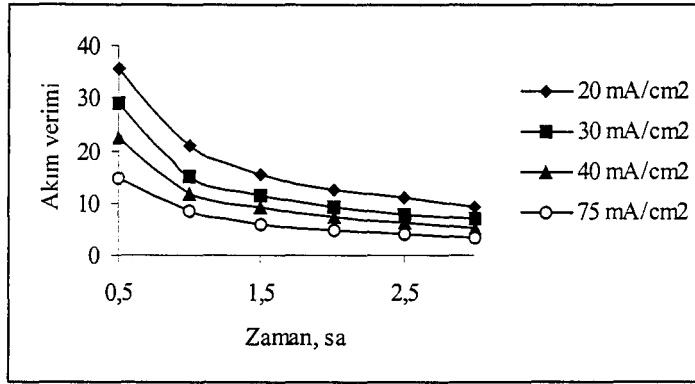


Şekil 4.13. Farklı akım yoğunluklarında kWh.kg⁻¹ cinsinden enerji tüketiminin zamanla değişimi. KOİ: 97000 mg.L⁻¹, PAC: 0,5 g.L⁻¹, H₂O₂: 26,36 g.L⁻¹



Şekil 4.14. Farklı akım yoğunluklarında kWh.m⁻³ cinsinden enerji tüketiminin zamanla değişimi.

KOİ: 97000 mg.L⁻¹, PAC: 0,5 g.L⁻¹, H₂O₂: 26,36 g.L⁻¹



Şekil 4.15. Farklı akım yoğunluklarında akım veriminin zamanla değişimi. KOİ: 97000 mg.L⁻¹,

PAC: 0,5 g.L⁻¹, H₂O₂: 26,36 g.L⁻¹

4.2.3. Başlangıç derişiminin etkisinin incelendiği deney sonuçları

Elektrokoagülasyonun 3 saat süreyle yürütüldüğü deneysel çalışmalarda başlangıç KOİ derişimi 97000mg.L⁻¹ ve 45000 mg.L⁻¹ olan atık sular için elde edilen deneysel sonuçlar Çizelge 4.20.-4.23'te verilmiştir. Farklı başlangıç derişimlerinde % giderim, enerji tüketimi ve akım verimi değerleri Çizelge 4.24.-4.27'de zamanla değişimleri de Şekil 4.16.-4.35.'te verilmiştir.

Çizelge 4.20. 20 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda elde edilen deneysel sonuçlar. PAC: 0,5 g.L⁻¹,
H₂O₂: 13,18 g.L⁻¹

Zaman (sa)	Başlangıç KOİ Derişimi (mg.L ⁻¹)	Gerilim (V)	Sıcaklık (°C)	pH	KOI son (mg.L ⁻¹)
0,5	45000	7,41	7	8,21	28606
	97000	3,84	11	7,07	61692
1	45000	7,89	11	8,77	23885
	97000	4,45	12	7,06	55721
1,5	45000	4,97	12	8,98	22000
	97000	4,85	11	8,17	50746
2	45000	5,44	13	9,35	20000
	97000	5,67	11	8,69	46766
2,5	45000	4,82	13	9,90	19048
	97000	5,48	12	9,04	42786
3	45000	4,69	13	10,10	17020
	97000	4,14	12	9,10	41791

Çizelge 4.21. 30 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda elde edilen deneysel sonuçlar. PAC: 0,5 g.L⁻¹,
H₂O₂: 13,18 g.L⁻¹

Zaman (sa)	Başlangıç KOİ Derişimi (mg.L ⁻¹)	Gerilim (V)	Sıcaklık (°C)	pH	KOI son (mg.L ⁻¹)
0,5	45000	8,05	10	8,20	23256
	97000	6,80	8	8,38	53731
1	45000	8,26	15	9,00	20465
	97000	7,10	11	8,79	51741
1,5	45000	6,26	12	9,45	18140
	97000	6,60	15	8,79	46766
2	45000	5,70	12	9,80	15814
	97000	6,43	11	9,45	42786
2,5	45000	5,35	12	10,75	13023
	97000	6,43	9	9,90	40796
3	45000	5,13	14	11,20	11163
	97000	6,57	10	10,87	34826

Çizelge 4.22. 40 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda elde edilen deneysel sonuçlar. PAC: 0,5 g.L⁻¹,
H₂O₂: 13,18 g.L⁻¹

Zaman (sa)	Başlangıç KOİ Derişimi (mg.L ⁻¹)	Gerilim (V)	Sıcaklık (°C)	pH	KOI son (mg.L ⁻¹)
0,5	45000	10,08	15	8,40	19900
	97000	7,86	11	8,42	52736
1	45000	9,67	19	8,90	14925
	97000	7,20	15	9,40	49751
1,5	45000	6,93	19	9,46	12935
	97000	7,10	14	10,19	42786
2	45000	6,60	21	10,80	11940
	97000	7,60	13	11,52	38806
2,5	45000	10,90	18	12,15	10945
	97000	7,51	14	12,45	34826
3	45000	23,3	21	12,46	9955
	97000	17,65	17	12,70	33831

Çizelge 4.23. 75 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda elde edilen deneysel sonuçlar. PAC: 0,5 g.L⁻¹, H₂O₂: 13,18 g.L⁻¹

Zaman (sa)	Başlangıç KOİ Derişimi (mg.L ⁻¹)	Gerilim (V)	Sıcaklık (°C)	pH	KOI son (mg.L ⁻¹)
0,5	45000	8,60	26	10,30	10945
	97000	12,38	19	9,13	42786
1	45000	8,48	23	11,80	9950
	97000	19,04	21	11,21	33831
1,5	45000	22,5	30	11,96	8955
	97000	17,9	22	12,07	29851
2	45000	23,2	26	12,15	7960
	97000	37,3	38	12,13	25871
2,5	45000	24,2	35	11,65	7200
	97000	27,1	38	12,20	24876
3	45000	23,0	35	11,58	6169
	97000	20,06	35	12,43	23881

Çizelge 4.24. 20 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda %giderim, enerji tüketimi, akım verimi değerleri

Zaman (sa)	Başlangıç KOİ Derişimi (mg.L ⁻¹)	KOİ giderimi (%)	Enerji tüketimi		Akım verimi
			kWh.kg ⁻¹	kWh.m ⁻³	
0,5	45000	36,4	0,38	9,26	10,98
	97000	36,4	0,09	3,20	35,49
1	45000	46,9	1,77	19,13	7,07
	97000	42,6	0,71	6,91	20,77
1,5	45000	51,1	3,97	16,08	5,14
	97000	47,7	1,52	10,95	15,50
2	45000	55,5	6,23	13,01	4,18
	97000	51,8	2,71	15,68	12,63
2,5	45000	57,7	10,45	12,83	3,48
	97000	55,9	3,86	20,24	10,90
3	45000	62,2	12,38	11,89	3,13
	97000	56,9	7,33	23,69	9,25

Çizelge 4.25. 30 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda %giderim, enerji tüketimi, akım verimi değerleri

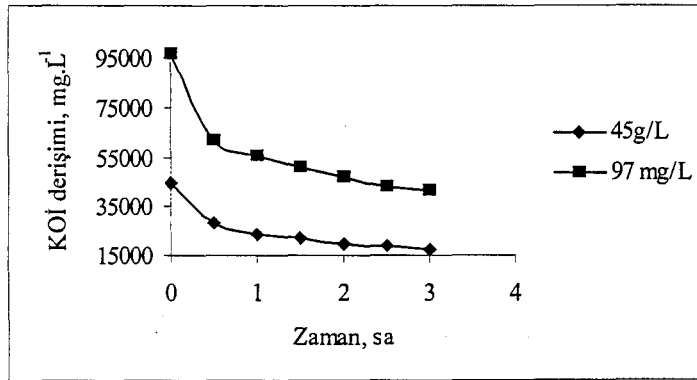
Zaman (sa)	Başlangıç KOİ Derişimi (mg.L ⁻¹)	KOİ giderimi (%)	Enerji tüketimi		Akım verimi
			kWh.kg ⁻¹	kWh.m ⁻³	
0,5	45000	48,3	0,46	10,06	14,57
	97000	44,6	0,20	8,50	28,99
1	45000	54,5	4,16	20,39	8,22
	97000	46,7	4,66	17,38	15,18
1,5	45000	59,7	7,53	28,21	6,00
	97000	51,8	6,31	25,63	11,22
2	45000	64,9	10,59	35,34	4,89
	97000	55,9	8,33	33,66	9,08
2,5	45000	71,1	12,99	42,03	4,29
	97000	57,9	12,37	41,70	7,53
3	45000	75,2	16,43	48,44	3,78
	97000	64,1	13,75	49,91	6,94

Çizelge 4.26. 40 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda %giderim, enerji tüketimi, akım verimi değerleri

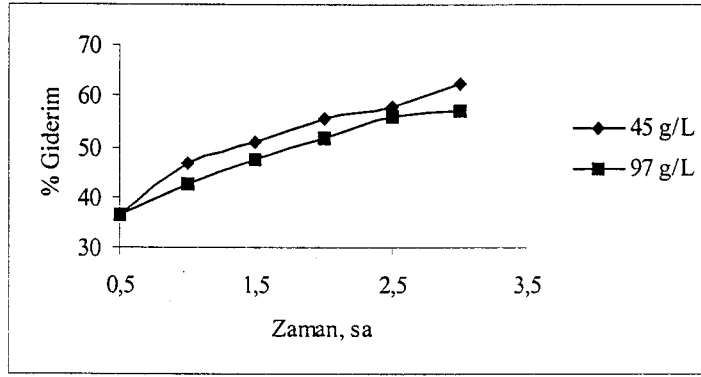
Zaman (sa)	Başlangıç KOİ Derişimi (mg.L ⁻¹)	KOİ giderimi (%)	Enerji tüketimi		Akım verimi
			kWh.kg ⁻¹	kWh.m ⁻³	
0,5	45000	55,8	1,25	16,80	12,62
	97000	45,6	0,30	13,10	22,23
1	45000	66,8	7,33	28,89	10,07
	97000	48,7	4,32	25,10	11,87
1,5	45000	71,3	18,21	37,55	7,17
	97000	55,9	6,02	36,93	9,08
2	45000	73,5	38,94	45,80	5,54
	97000	60,0	9,20	49,60	7,31
2,5	45000	75,7	73,17	59,43	4,57
	97000	64,1	12,34	62,12	6,25
3	45000	77,9	146,72	88,55	3,92
	97000	65,1	41,91	91,53	5,29

Çizelge 4.27. 75 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda %giderim, enerji tüketimi, akım verimi değerleri

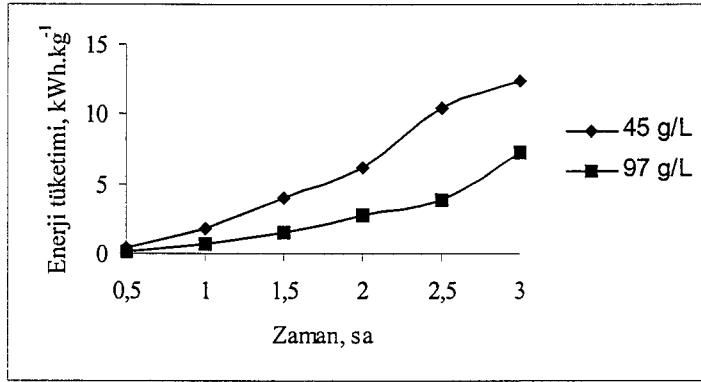
Zaman (sa)	Başlangıç KOİ Derişimi (mg.L ⁻¹)	KOİ giderimi (%)	Enerji tüketimi		Akım verimi
			kWh.kg ⁻¹	kWh.m ⁻³	
0,5	45000	75,7	0,79	26,88	19,68
	97000	55,9	0,71	38,69	14,53
1	45000	77,9	27,42	53,38	10,13
	97000	65,1	7,36	98,19	8,46
1,5	45000	80,1	98,09	123,69	6,94
	97000	69,2	21,41	154,13	6,00
2	45000	82,3	170,95	196,19	5,35
	97000	73,3	50,70	270,69	4,76
2,5	45000	84,0	270,46	271,81	4,37
	97000	74,4	135,81	355,38	3,87
3	45000	86,3	340,17	343,69	3,74
	97000	75,4	198,82	418,06	3,27



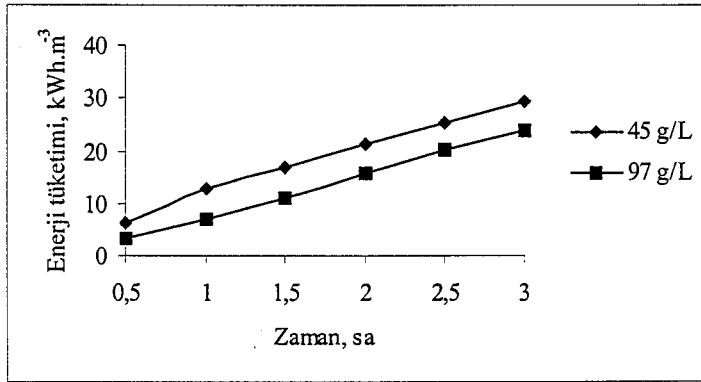
Şekil 4.16. 20 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda KOİ derişiminin başlangıç KOİ derişimi ile değişimi. PAC: 0,5 g.L⁻¹, H₂O₂: 26,36 g.L⁻¹



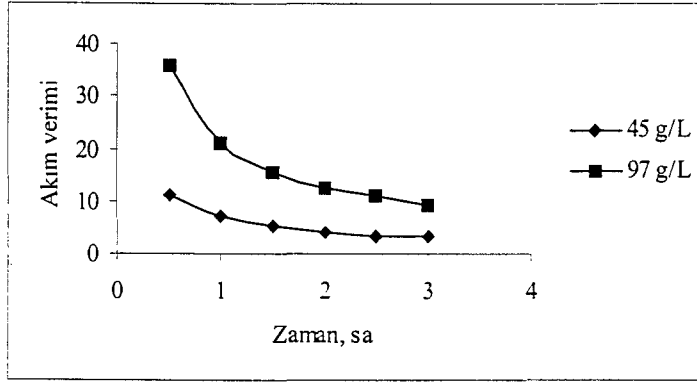
Şekil 4.17. 20 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile % giderimin zamanla değişimi. PAC: 0,5 g.L⁻¹, H₂O₂: 26,36 g.L⁻¹



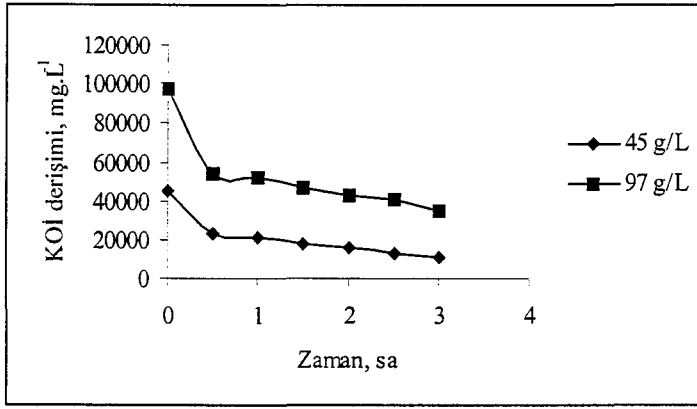
Şekil 4.18. 20 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile kWh.kg⁻¹ cinsinden enerji tüketiminin zamanla değişimi. PAC: 0,5 g.L⁻¹, H₂O₂: 26,36 g.L⁻¹



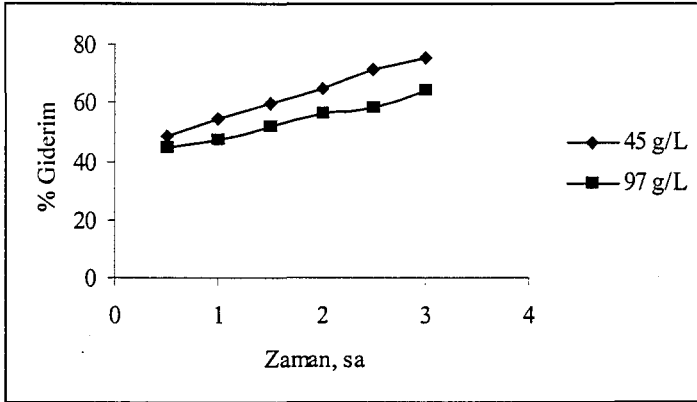
Şekil 4.19. 20 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile kWh.m⁻³ cinsinden enerji tüketiminin zamanla değişimi. PAC: 0,5 g.L⁻¹, H₂O₂: 26,36 g.L⁻¹



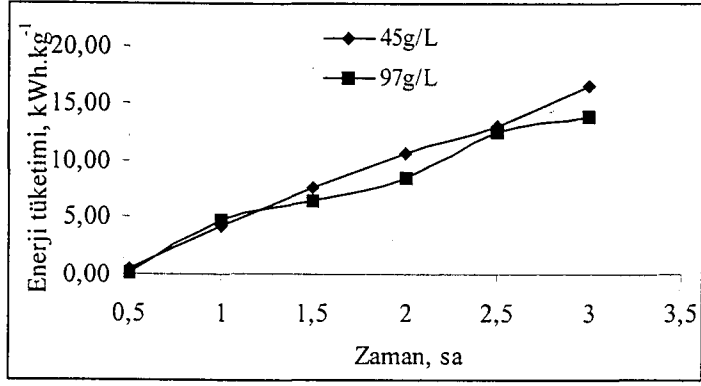
Şekil 4.20. 20 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile akım veriminin zamanla değişimi. PAC: 0,5 g.L⁻¹, H₂O₂: 26,36 g.L⁻¹



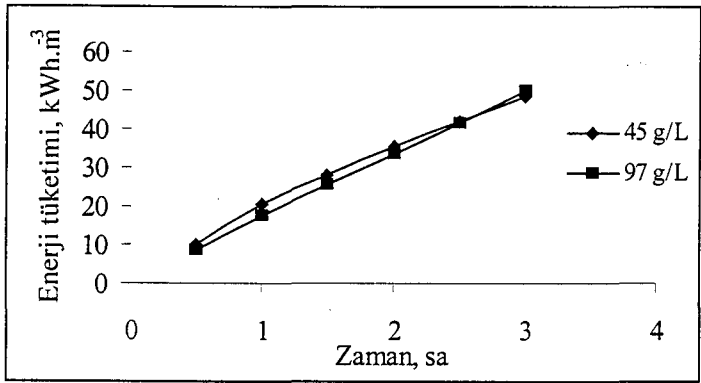
Şekil 4.21. 30 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile KOİ derişiminin zamanla değişimi. PAC: 0,5 g.L⁻¹, H₂O₂: 26,36 g.L⁻¹



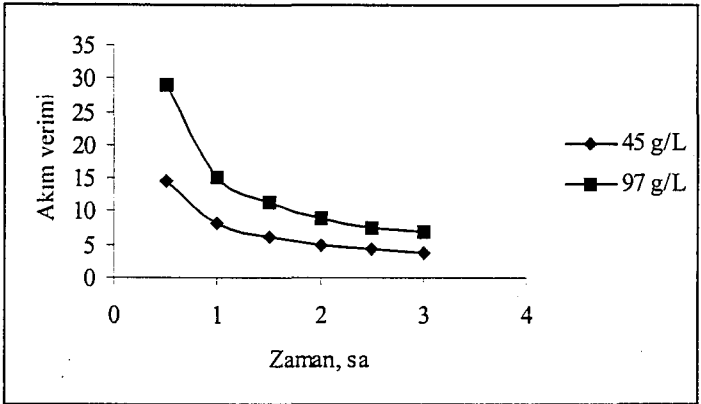
Şekil 4.22. 30 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile % giderimin zamanla değişimi. PAC: 0,5 g.L⁻¹, H₂O₂: 26,36 g.L⁻¹



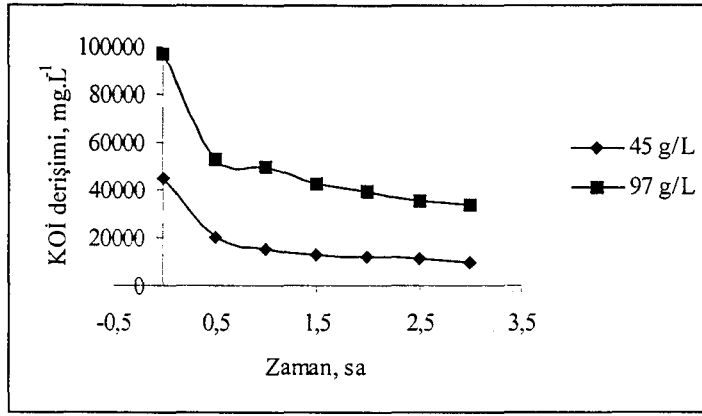
Şekil 4.23. 30 mA.cm^{-2} akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile kWh.kg^{-1} cinsinden enerji tüketiminin zamanla değişimi. PAC: $0,5 \text{ g.L}^{-1}$, H_2O_2 : $26,36 \text{ g.L}^{-1}$



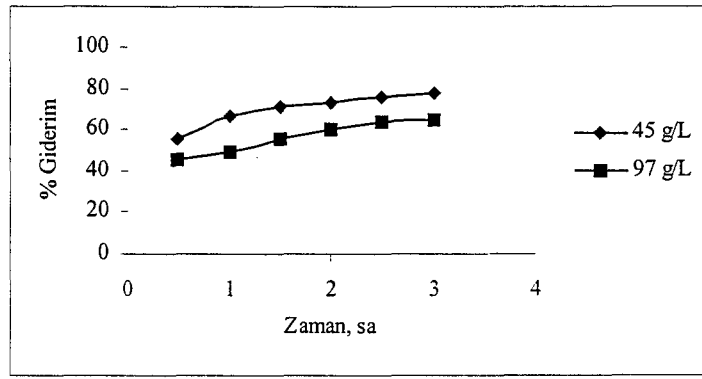
Şekil 4.24. 30 mA.cm^{-2} akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile kWh.m^{-3} cinsinden enerji tüketiminin zamanla değişimi. PAC: $0,5 \text{ g.L}^{-1}$, H_2O_2 : $26,36 \text{ g.L}^{-1}$



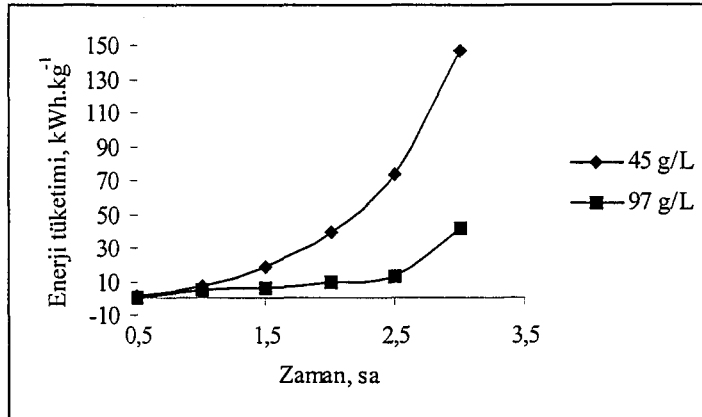
Şekil 4.25. 30 mA.cm^{-2} akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile akım veriminin zamanla değişimi. PAC: $0,5 \text{ g.L}^{-1}$, H_2O_2 : $26,36 \text{ g.L}^{-1}$



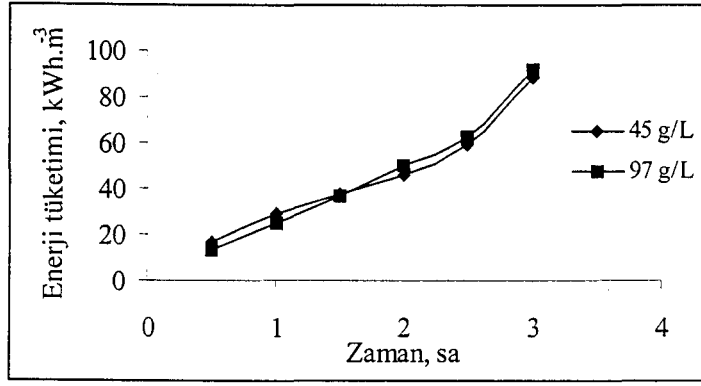
Şekil 4.26. 40 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile KOİ derişiminin zamanla değışimi. PAC: 0,5 g.L⁻¹, H₂O₂: 26,36 g.L⁻¹



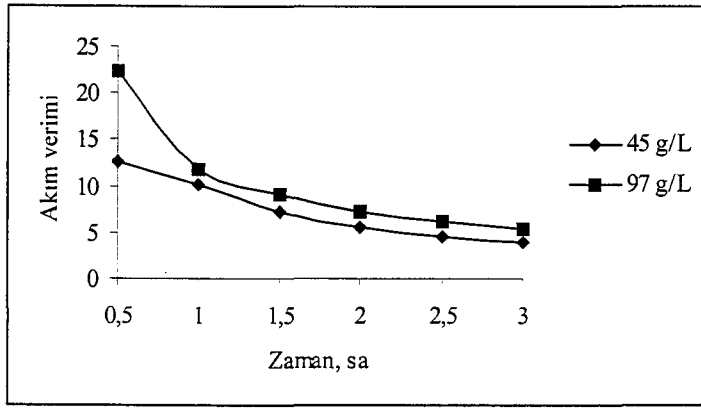
Şekil 4.27. 40 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile % giderimin zamanla değışimi. PAC: 0,5 g.L⁻¹, H₂O₂: 26,36 g.L⁻¹



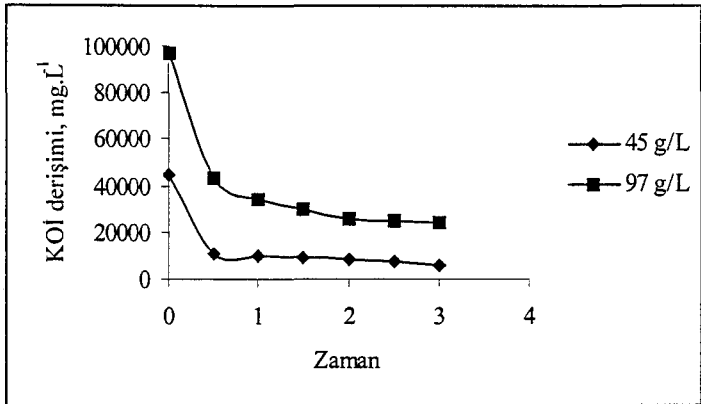
Şekil 4.28. 40 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile kWh.kg⁻¹ cinsinden enerji tüketiminin zamanla değışimi. PAC: 0,5 g.L⁻¹, H₂O₂: 26,36 g.L⁻¹



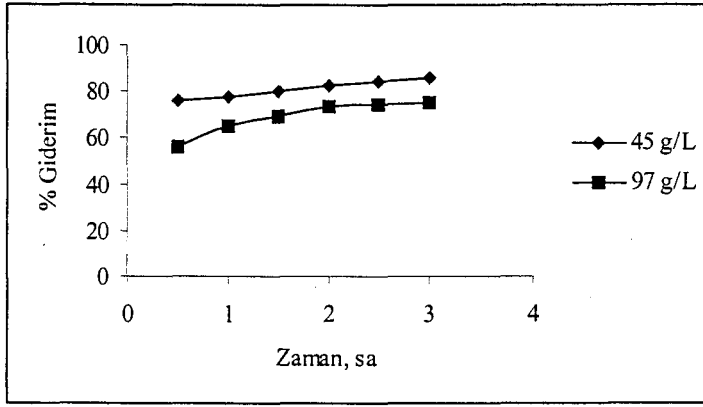
Şekil 4.29. 40 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile kWh.m⁻³ cinsinden enerji tüketiminin zamanla değişimi. PAC: 0,5 g.L⁻¹, H₂O₂: 26,36 g.L⁻¹



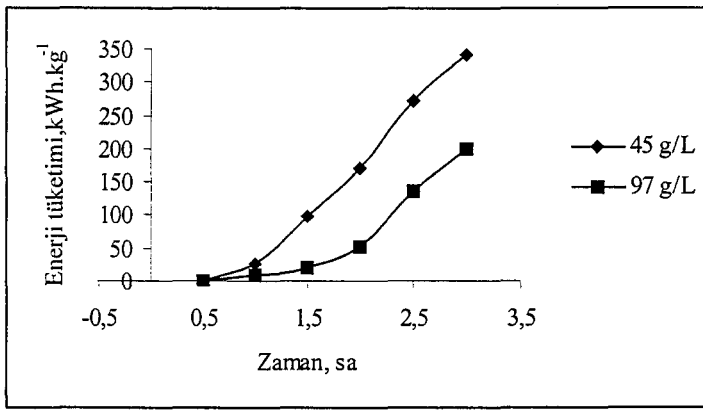
Şekil 4.30. 40 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile akım veriminin zamanla değişimi. PAC: 0,5 g.L⁻¹, H₂O₂: 26,36 g.L⁻¹



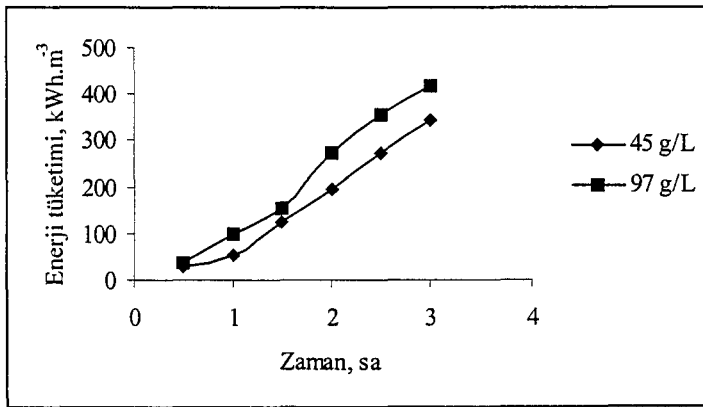
Şekil 4.31. 75 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile KOİ derişiminin zamanla değişimi. PAC: 0,5 g.L⁻¹, H₂O₂: 26,36 g.L⁻¹



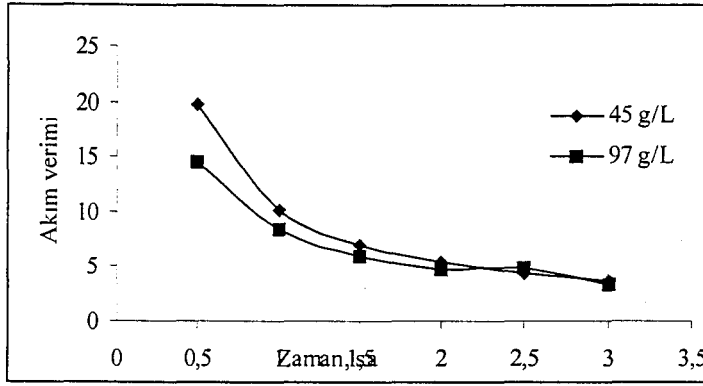
Şekil 4.32. 75 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile % giderimin zamanla değişimi. PAC: 0,5 g.L⁻¹, H₂O₂: 26,36 g.L⁻¹



Şekil 4.33. 75 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile kWh.kg⁻¹ cinsinden enerji tüketiminin zamanla değişimi. PAC: 0,5 g.L⁻¹, H₂O₂: 26,36 g.L⁻¹



Şekil 4.34. 75 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile kWh.m⁻³ cinsinden enerji tüketiminin zamanla değişimi. PAC: 0,5 g.L⁻¹, H₂O₂: 26,36 g.L⁻¹



Şekil 4.35. 75 mA.cm^{-2} akım yoğunluğunda başlangıç KOİ derişimi ile akım veriminin zamanla değişimi. PAC: $0,5 \text{ g.L}^{-1}$, H_2O_2 : $26,36 \text{ g.L}^{-1}$

Başlangıç KOİ derişimi 45000 mg.L^{-1} olan atık su için giderim verimi (Şekil 4.32), enerji tüketimi (Şekil 4.34) ve akım verimi değerleri (Şekil 4.35) daha iyi olmaktadır.

4.2.4. Destek elektrolit derişiminin etkisinin incelendiği deney sonuçları

Destek elektrolit olarak H_2O_2 'in kullanılması durumu :

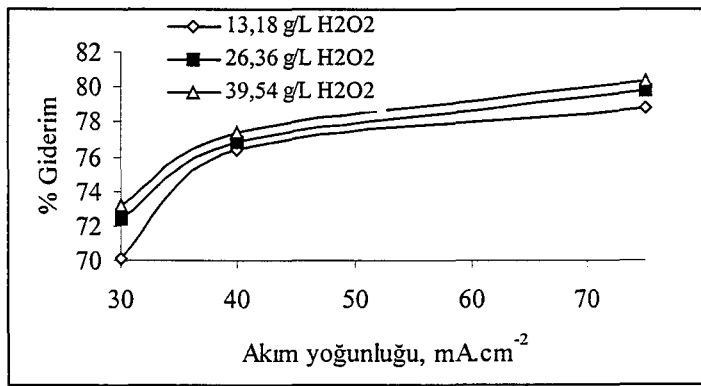
Demir reaktörde Başlangıç KOİ derişimi 45000 mg.L^{-1} olan 1 g.L^{-1} PAC içeren zeytinyağı endüstrisi atıksuyunun 30 mA.cm^{-2} , 40 mA.cm^{-2} , 75 mA.cm^{-2} akım yoğunluklarında farklı H_2O_2 derişimleri için elde edilen sonuçlar Çizelge 4.28.'de, Çizelge 4.29.'da da % giderim akım verimi ve enerji tüketim değerlerinin H_2O_2 derişimi ile değişimi Şekil 4.36.-4.38.'de verilmiştir. Yapılan çalışmada süre 1 saat ve reaktör anot, karıştıracı pedal katottur.

Çizelge 4.28. Farklı akım yoğunluklarında H₂O₂ derişimi etkisinin incelendiği deney sonuçları. C₀: 45000 mg.L⁻¹, Demir reaktör: anot, PAC: 1 g.L⁻¹

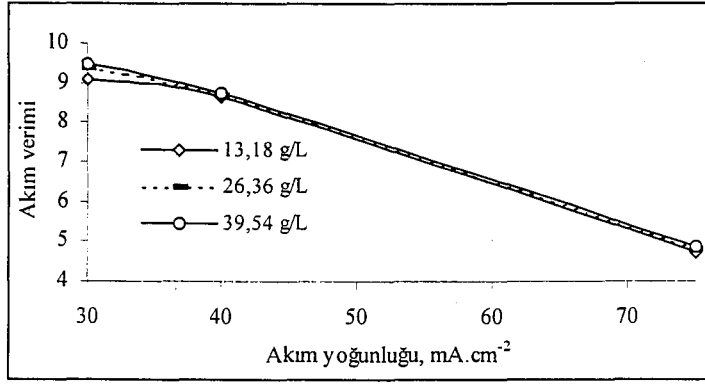
Akım Yoğunluğu (mA.cm ⁻²)	H ₂ O ₂ Derişimi (g.L ⁻¹)	KOI Derişimi (mg.L ⁻¹)	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (°C)
30	13,18	12276	4,80	9,54	12
	26,36	11938	4,80	8,40	25
	39,54	10280	5,51	7,90	20
40	13,18	10774	9,60	9,88	18
	26,36	10633	8,51	10,10	18
	39,54	10352	7,45	11,73	24
75	13,18	9694	16,5	10,70	21
	26,36	9257	16	11,12	21
	39,54	8995	11,95	11,95	28

Çizelge 4.29. Farklı akım yoğunluklarında H₂O₂ derişimi etkisinin incelendiği %giderim, enerji tüketimi ve akım verimi değerleri

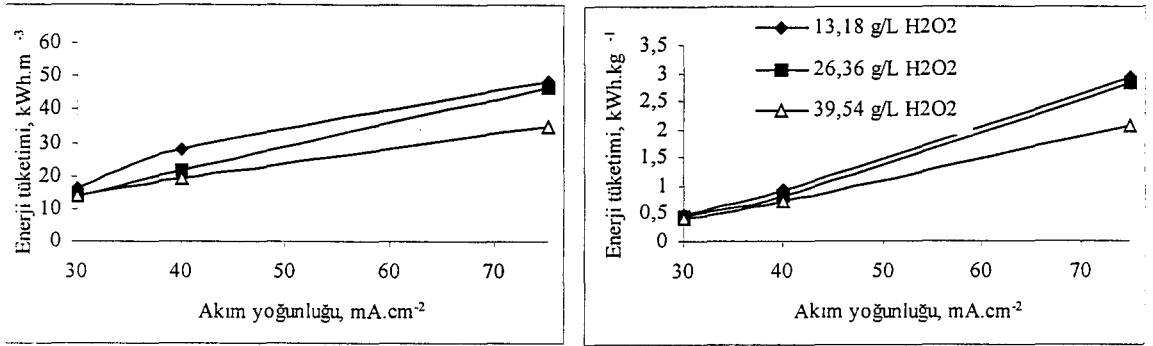
Akım Yoğunluğu (mA.cm ⁻²)	H ₂ O ₂ Derişimi (g.L ⁻¹)	KOİ giderimi (%)	Enerji tüketimi		Akım Verimi
			kWh.g ⁻¹	kWh.m ⁻³	
30	13,18	70,15	0,49	14,00	9,07
	26,36	72,46	0,43	14,00	9,36
	39,54	73,22	0,40	16,07	9,46
40	13,18	76,44	0,93	28,00	8,64
	26,36	76,78	0,81	18,99	8,68
	39,54	77,40	0,72	21,73	8,75
75	13,18	78,83	2,92	48,13	4,75
	26,36	79,78	2,80	46,67	4,81
	39,54	80,35	2,07	34,85	4,85



Şekil 4.36. %Giderimin H₂O₂ derişimi ile değişimi. PAC: 1 g.L⁻¹, Demir reaktör: Anot, C₀: 45000 mg.L⁻¹



Şekil 4.37. Akım veriminin H₂O₂ derişimi ile değişimi. PAC: 1 g.L⁻¹, Demir reaktör: Anot, C₀: 45000 mg.L⁻¹



Şekil 4.38. Enerji tüketiminin H₂O₂ derişimi ile değişimi. PAC: 1 g.L⁻¹, Demir reaktör: Anot, C₀: 45000 mg.L⁻¹

Demir reaktörde, reaktör anotken başlangıç KOİ'si 45000 mg.L⁻¹ olan atık suyun 30 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda H₂O₂ ve PAC ilavesinin etkisini belirlemek üzere yapılan çalışmalardan elde edilen deneysel sonuçlar Çizelge 4.30.-4.34.'de, % giderim, enerji tüketimi ve akım verimi değerleri Çizelge 4.35-4.39.'da verilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda son KOİ derişiminin, % giderimin, enerji tüketiminin ve akım veriminin polielektrolit ve H₂O₂ ilavesi ile değişimi Şekil 4.39-.4.43.'te gösterilmiştir. Yapılan çalışmada süre 3 saat ve reaktör anot, karıştırıcı pedal katottur.

Çizelge 4.30. 30 mA.cm² akım yoğunluğunda yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

Zaman(saat)	Gerilim (V)	Sıcaklık (°C)	pH	KOI son (mg.L ⁻¹)
0	0	12	6,8	45000
0,5	4,0	6	9,96	32035
1	3,95	8	12,72	26382
1,5	3,98	8	12,86	24723
2	4,12	10	13,37	23115
2,5	7,45	12	13,42	21105
3,0	8,10	18	13,16	20000

Çizelge 4.31. 30 mA.cm² akım yoğunluğunda yapılan deneysel çalışmanın sonuçları. PAC: 0,5 g.L⁻¹

Zaman(saat)	Gerilim (V)	Sıcaklık (°C)	pH	KOI son (mg.L ⁻¹)
0	0	12	6,8	45000
0,5	4,32	10	10,40	27500
1	5,20	6	10,98	23750
1,5	5,12	7	11,49	22500
2	8,35	9	12,52	21250
2,5	8,40	12	12,63	20625
3,0	8,66	22	12,41	20000

Çizelge 4.32. 30 mA.cm² akım yoğunluğunda yapılan deneysel çalışmanın sonuçları. H₂O₂: 13,18 g.L⁻¹

Zaman(saat)	Gerilim (V)	Sıcaklık (°C)	pH	KOI son (mg.L ⁻¹)
0	0	8	6,8	45000
0,5	4,97	9	9,95	27500
1	5,05	10	10,11	25000
1,5	5,19	11	10,46	21250
2	5,30	11	11,48	20000
2,5	5,33	11	12,42	17500
3,0	5,45	11	12,55	16250

Çizelge 4.33. 30 mA.cm² akım yoğunluğunda yapılan deneysel çalışmanın sonuçları. H₂O₂: 26,36 g.L⁻¹

Zaman(saat)	Gerilim (V)	Sıcaklık (°C)	pH	KOI son (mg.L ⁻¹)
0	0	9	6,8	45000
0,5	8,13	7	8,50	25000
1	8,14	11	8,84	22750
1,5	8,44	12	9,04	18765
2	9,73	16	9,40	13953
2,5	10,22	15	9,99	13024
3,0	9,73	16	11,11	12790

Çizelge 4.34. 30 mA.cm² akım yoğunluğunda yapılan deneysel çalışmanın sonuçları. PAC: 0,5 g.L⁻¹ H₂O₂: 26,36 g.L⁻¹

Zaman(saat)	Gerilim (V)	Sıcaklık (°C)	pH	KOI son (mg.L ⁻¹)
0	0	10	6,8	45000
0,5	8,05	10	8,20	23256
1	8,26	15	9,00	20465
1,5	6,26	12	9,45	18140
2	5,70	12	9,80	15814
2,5	5,35	12	10,75	13023
3,0	5,13	14	11,20	11163

Çizelge 4.35. 30 mA.cm² akım yoğunluğunda yapılan deneysel çalışmanın % giderim, enerji tüketimi ve akım verimi değerleri

Zaman (saat)	KOİ giderimi (%)	Enerji tüketimi		Akım verimi
		kWh.kg ⁻¹	kWh.m ⁻³	
0,5	28,8	0,39	5,00	8,69
1	44,4	1,26	9,94	6,69
1,5	45,06	3,87	14,91	4,53
2	48,2	6,20	20,06	3,63
2,5	53,1	7,84	29,38	3,20
3,0	55,6	13,80	39,50	2,79

Çizelge 4.36. 30 mA.cm² akım yoğunluğunda yapılan deneysel çalışmanın % giderim, enerji tüketimi ve akım verimi değerleri. PAC: 0,5 g.L⁻¹

Zaman (saat)	KOİ giderimi (%)	Enerji tüketimi		Akım verimi
		kWh.kg ⁻¹	kWh.m ⁻³	
0,5	38,9	0,31	5,40	11,73
1	47,2	2,04	11,90	7,12
1,5	50	7,16	18,30	5,03
2	52,8	15,51	28,74	3,98
2,5	54,2	32,31	39,24	3,27
3,0	55,6	49,63	50,06	2,79

Çizelge 4.37. 30 mA.cm² akım yoğunluğunda yapılan deneysel çalışmanın % giderim, enerji tüketimi ve akım verimi değerleri. H₂O₂: 13,18 g.L⁻¹

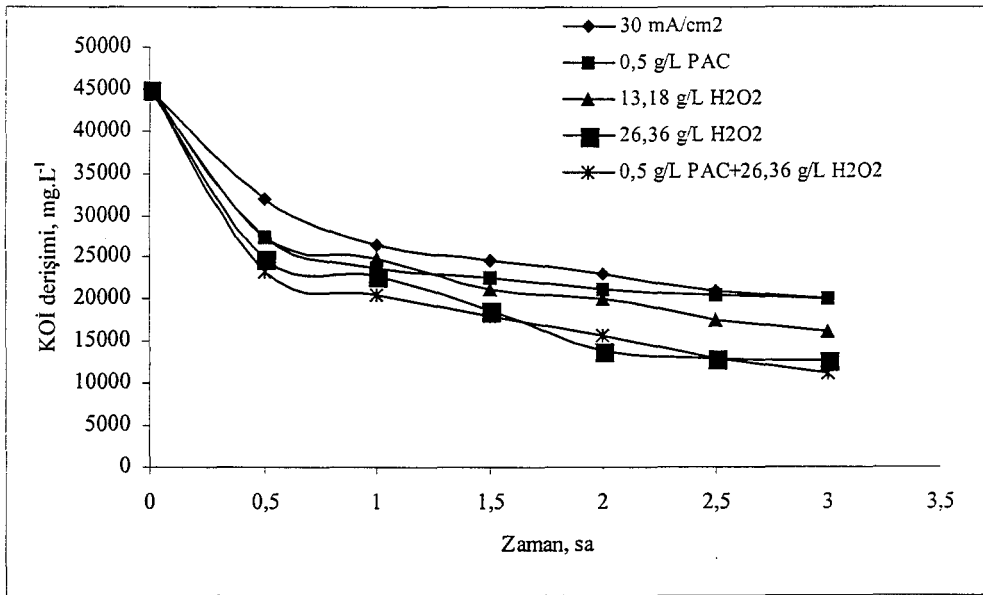
Zaman (saat)	KOİ giderimi (%)	Enerji tüketimi		Akım verimi
		kWh.kg ⁻¹	kWh.m ⁻³	
0,5	38,9	0,35	6,21	11,73
1	44,0	2,88	12,53	6,63
1,5	52,8	4,61	19,01	5,31
2	55,6	9,91	25,64	4,19
2,5	61,1	12,58	32,30	3,69
3,0	63,9	18,02	39,11	3,21

Çizelge 4.38. 30 mA.cm² akım yoğunluğunda yapılan deneysel çalışmanın % giderim, enerji tüketimi ve akım verimi değerleri. H₂O₂: 26,36 g.L⁻¹

Zaman (saat)	KOİ giderimi (%)	Enerji tüketimi		Akım verimi
		kWh.kg ⁻¹	kWh.m ⁻³	
0,5	44,4	0,51	10,60	13,39
1	50	5,03	20,34	7,54
1,5	58,3	7,68	30,89	5,86
2	69,0	10,21	43,05	5,20
2,5	71,1	23,96	55,83	4,29
3,0	71,6	75,93	67,99	3,60

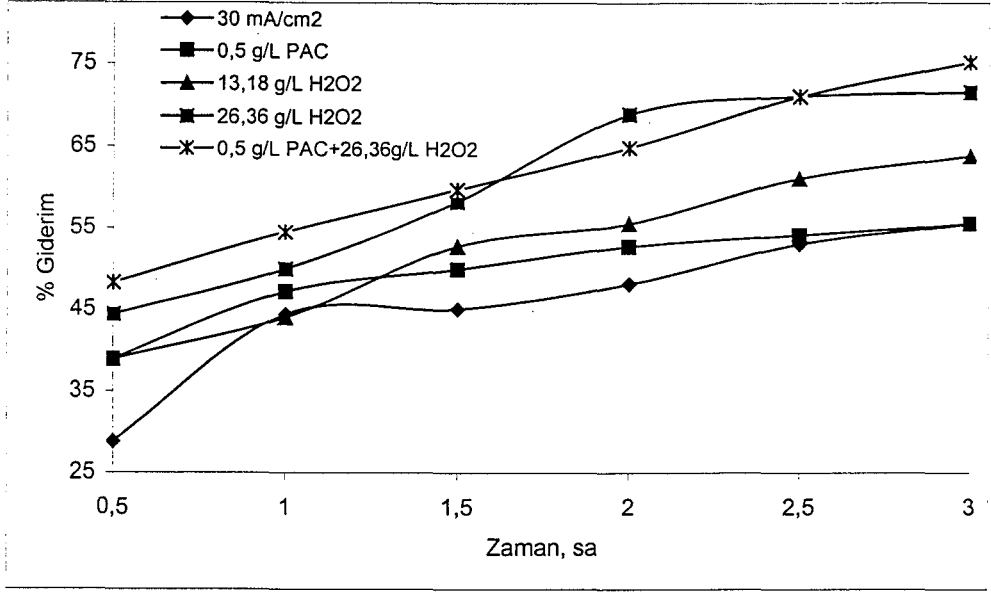
Çizelge 4.39. 30 mA.cm² akım yoğunluğunda yapılan deneysel çalışmanın % giderim, enerji tüketimi ve akım verimi değerleri. PAC: 0,5 g.L⁻¹ H₂O₂: 26,36 g.L⁻¹

Zaman (saat)	KOİ giderimi (%)	Enerji tüketimi		Akım verimi
		kWh.kg ⁻¹	kWh.m ⁻³	
0,5	48,3	0,46	10,06	14,57
1	54,5	4,16	20,39	8,22
1,5	59,7	7,53	28,21	6,00
2	64,9	10,59	35,34	4,89
2,5	71,1	12,99	42,03	4,29
3,0	75,2	16,43	48,44	3,78

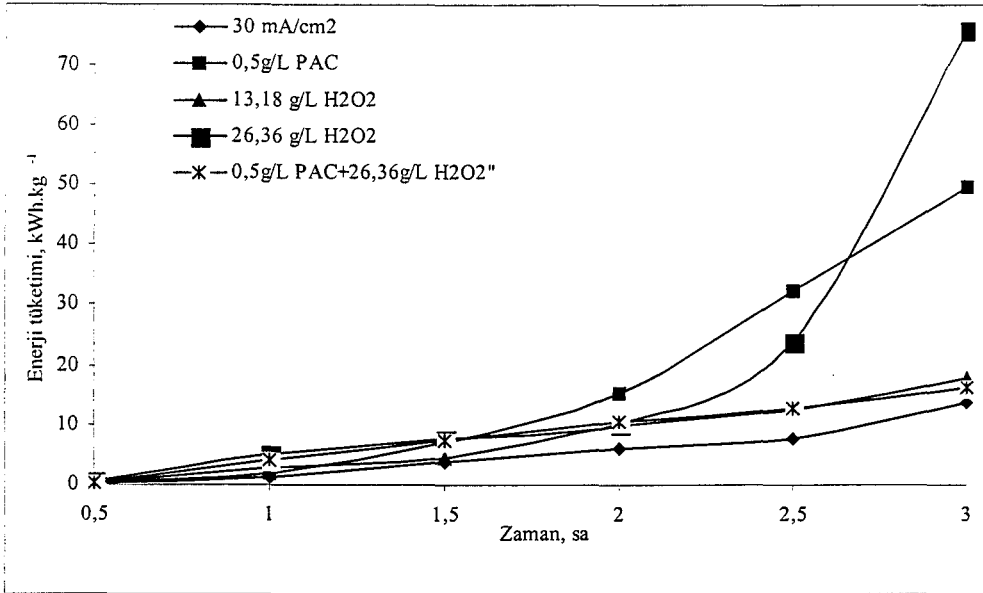


Şekil 4.39. Polielektrolit ve destek elektrolit deişimlerine göre KOİ derişiminin zamanla değişimi.

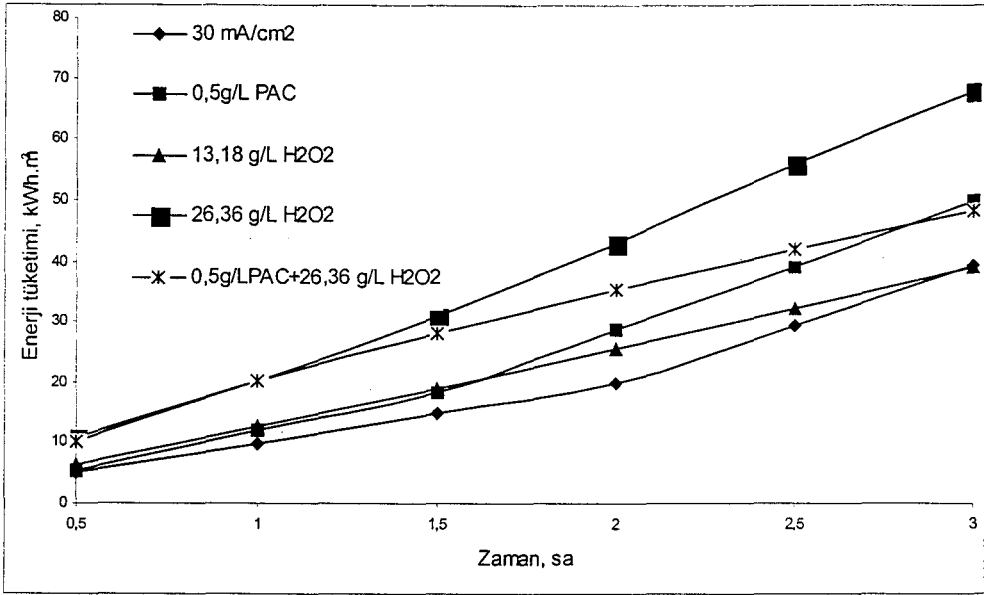
Akım yoğunluğu: 30 mA.cm⁻²



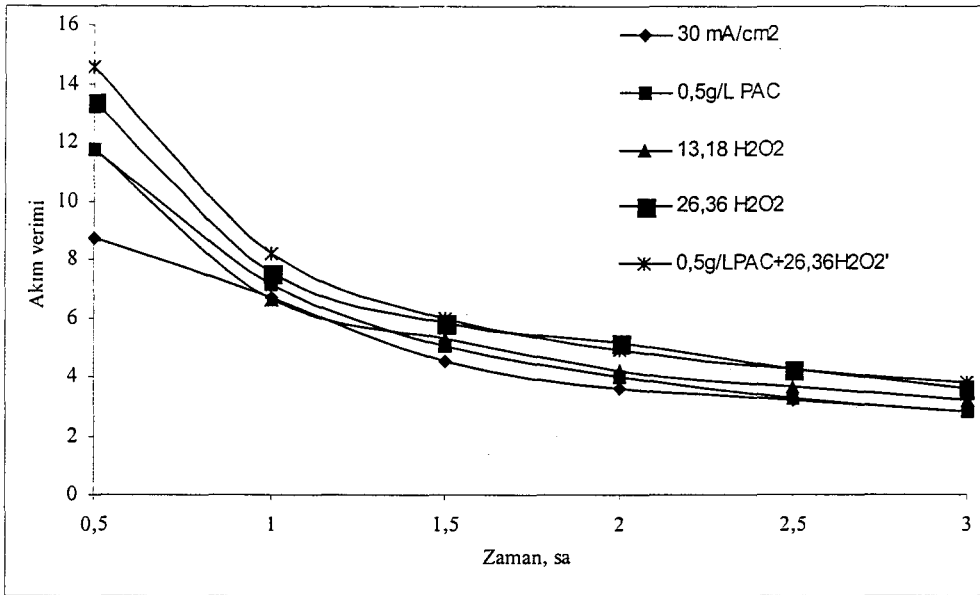
Şekil 4.40. Polielektrolit ve destek elektrolit derişimlerine göre % giderimin zamanla değişimi. Akım yoğunluğu: 30 mA.cm⁻²



Şekil 4.41. Polielektrolit ve destek elektrolit derişimlerine göre kWh.kg⁻¹ cinsinden enerji tüketiminin zamanla değişimi. Akım yoğunluğu: 30 mA.cm⁻²



Şekil 4.42. Polielektrolit ve destek elektrolit derişimlerine göre kWh.m³ cinsinden enerji tüketiminin zamanla değişimi. Akım yoğunluğu: 30 mA.cm⁻²



Şekil 4.43. Polielektrolit ve destek elektrolit derişimlerine göre akım veriminin zamanla değişimi. Akım yoğunluğu: 30 mA.cm⁻²

Destek elektrolit olarak NaCl'ün kullanılması durumu :

Demir reaktör için başlangıç KOİ'si 97000 mg.L⁻¹ ve 0,5 g.L⁻¹APA içeren zeytinyağı endüstrisi atık suyunun, 20 mA.cm⁻² akım yoğunluğu için farklı sodyum

klorür derişimlerinde deneysel çalışmaların sonuçları izelge 4.40.'da, %giderim, enerji tüketime ve akım verimi değerleri 4.41'de değişimleri de Şekil 4.44-4.46.'da verilmiştir. Yapılan çalışmada süre 1 saat ve reaktör katot karışırıcı pedal anot ve başlangıç pH'sı 6,5'tir.

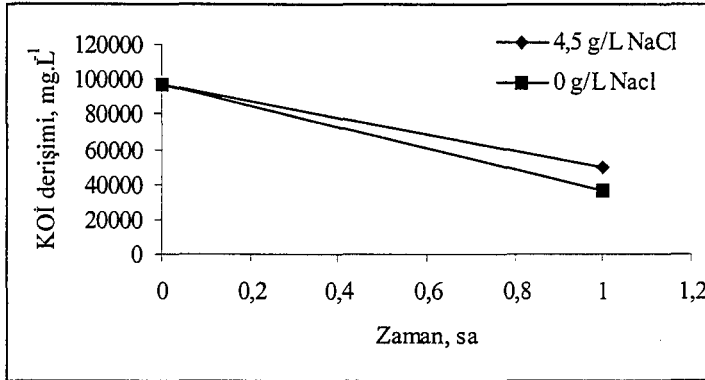
Çizelge 4.40. Farklı akım yoğunluklarında NaCl derişiminin etkisinin incelendiği deney sonuçları.

C_0 : 97000 mg.L⁻¹, Demir reaktör: katot, APA: 0,5 g.L⁻¹

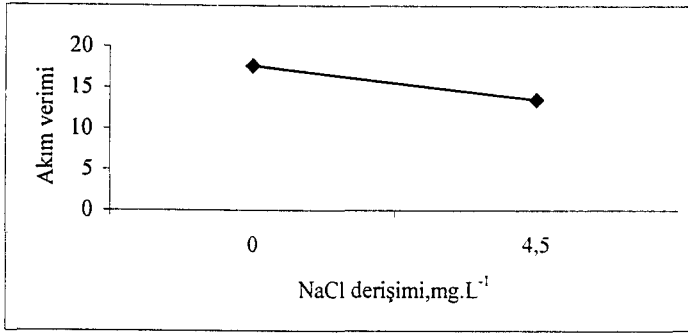
NaCl derişimi (g.L ⁻¹)	KOI (mg.l ⁻¹)	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (°C)
4,5	50000	10,88	9,21	30
0	36000	25,6	8,50	12

Çizelge 4.41. Farklı akım yoğunluklarında NaCl derişiminin etkisinin incelendiği %giderim, enerji tüketime akım verimi değerleri

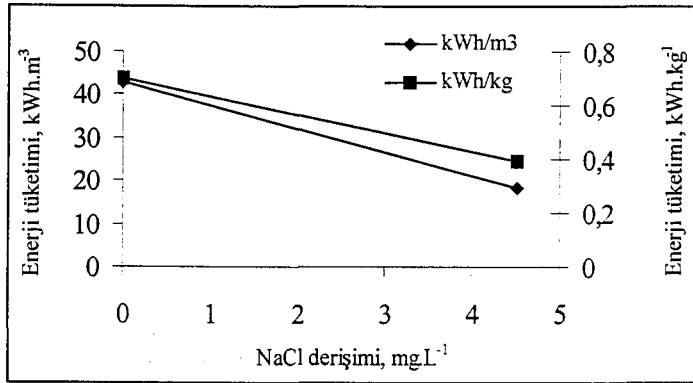
NaCl derişimi (g.L ⁻¹)	KOİ Giderimi (%)	Enerji tüketime		Akım Verimi
		kWh.kg ⁻¹	kWh.m ⁻³	
4,5	48,50	0,39	18,13	13,51
0	62,91	0,70	42,67	17,53



Şekil 4.44. Giderimin NaCl derişimi ile değişimi. PAC: 0,5 g.L⁻¹, Demir reaktör: Katot, C_0 : 97000 mg.L⁻¹



Şekil 4.45. Giderimin NaCl derişimi ile değişimi. PAC: 0,5 g.L⁻¹, Demir reaktör: Katot, C₀: 97000 mg.L⁻¹



Şekil 4.46. Enerji tüketimi NaCl derişimi ile değişimi. PAC: 0,5 g.L⁻¹, Demir reaktör: Katot, C₀: 97000 mg.L⁻¹

0,5 g.L⁻¹ PAC ve 26,36 g.L⁻¹ H₂O₂ derişiminde giderim verimi (Şekil 4.45), enerji tüketimi (Şekil 4.46), ve akım verimi (Şekil 4.48) değerleri daha iyi olmaktadır.

4.2.5. Polielektrolit derişiminin etkisinin incelendiği deney sonuçları

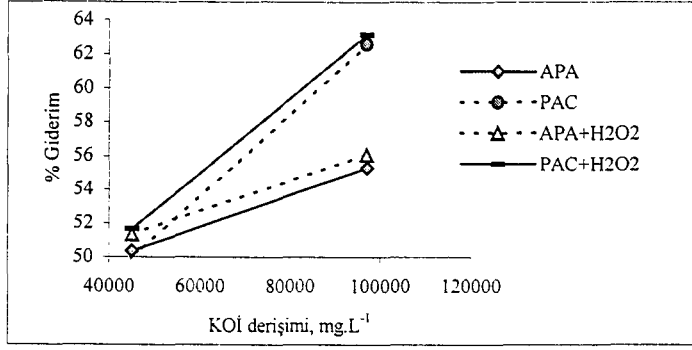
Alüminyum reaktör için başlangıç KOİ'si 97000 mg.L⁻¹ ve 45000 mg.L⁻¹ olan zeytinyağı endüstrisi atık suyunun, 20 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda PAC, APA ve farklı derişimlerdeki H₂O₂ için deneysel çalışmaların sonuçları Çizelge 4.42.'de, Çizelge 4.43'te de % giderim, enerji tüketimleri ve akım verimi değerleri polielektrolit derişimi ile değişimleri de Şekil 4.47.-4.49.'da verilmiştir. verilmiştir. Yapılan çalışmada süre 1 saat ve reaktör anot karıştırıcı pedal katot ve Başlangıç pH'sı 5,5'tir .

Çizelge 4.42. 20 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda farklı polielektrolit etkisinin incelendiği %giderim, enerji tüketimi akım verimi değerleri

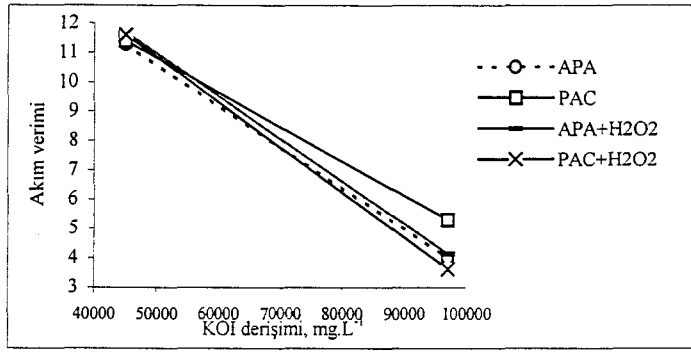
Baslangıç KOİ Derişimi (mg.L ⁻¹)	Polielektrolit	KOI (mg.L ⁻¹)	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (°C)
97000	0,5 g.l ⁻¹ PAC	36249	2,4	8,60	13
	0,5 g.l ⁻¹ APA	42600	3,18	9,54	4
	0,5 g.l ⁻¹ PAC+ 1,32 g.l ⁻¹ H ₂ O ₂	42900	2,49	8,40	4
	0,5 g.l ⁻¹ APA+ 1,32 g.l ⁻¹ H ₂ O ₂	35734	2,18	6,10	4
45000	0,5 g.l ⁻¹ PAC	22524	2,72	8,97	7
	0,5 g.l ⁻¹ APA	22300	3,50	8,70	12
	0,5 g.l ⁻¹ PAC + 1,32 g.l ⁻¹ H ₂ O ₂	21747	3,33	8,37	7
	0,5 g.l ⁻¹ APA + 1,32 g.l ⁻¹ H ₂ O ₂	21900	4,30	8,50	4

Çizelge 4.43. 20 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda farklı polielektrolit kullanılması durumunda %giderim, enerji tüketimi ve akım verimi değerleri

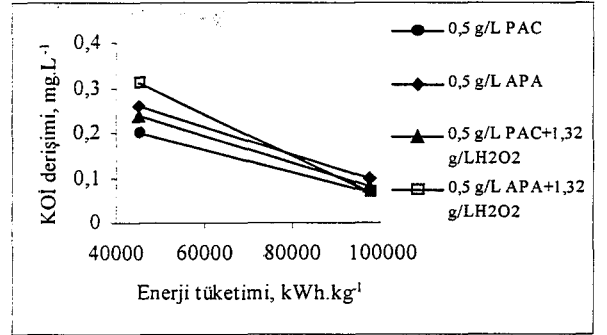
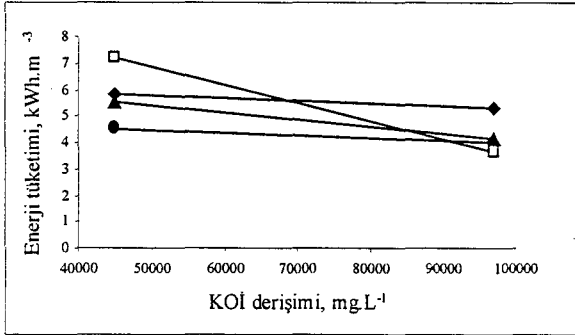
Baslangıç KOİ Derişimi (mg.L ⁻¹)	Polielektrolit	KOİ Giderimi (%)	Enerji tüketimi		Akım Verimi
			kWh.kg ⁻¹	kWh.m ⁻³	
97000	0,5 g.l ⁻¹ PAC	62,63	0,07	4,00	30,53
	0,5 g.l ⁻¹ APA	55,3	0,10	5,30	26,96
	0,5 g.l ⁻¹ PAC+ 1,32 mg.l ⁻¹ H ₂ O ₂	63,16	0,08	4,15	30,79
	0,5 g.l ⁻¹ APA+ 1,32 g.l ⁻¹ H ₂ O ₂	56,1	0,07	3,63	27,35
45000	0,5 g.l ⁻¹ PAC	49,94	0,20	4,53	11,30
	0,5 g.l ⁻¹ APA	50,38	0,26	5,83	11,39
	0,5 g.l ⁻¹ PAC + 1,32 g.l ⁻¹ H ₂ O ₂	51,67	0,24	5,55	11,69
	0,5 g.l ⁻¹ APA + 1,32 g.l ⁻¹ H ₂ O ₂	51,33	0,31	7,17	11,61



Şekil 4.47. Elektrolit olarak PAC ve APA'nın kullanımının akım verimine etkisi. Alüminyum reaktör: Anot



Şekil 4.48. Elektrolit olarak PAC ve APA'nın kullanımının akım verimine etkisi. Alüminyum reaktör: Anot



Şekil 4.49. Elektrolit olarak PAC ve APA'nın kullanımının enerji tüketimine etkisi. Alüminyum reaktör: Anot

Elektrolit olarak 0,5 g.L⁻¹ derişiminde PAC kullanılması aynı derişimde APA kullanılması durumuna göre giderim verimi (Şekil 4.47), akım verimi (Şekil 4.48) ve enerji tüketimi (Şekil 4.49) değerleri daha iyi olmaktadır.

4.2.6. Alüminyum reaktörün etkisinin incelendiği deney sonuçları

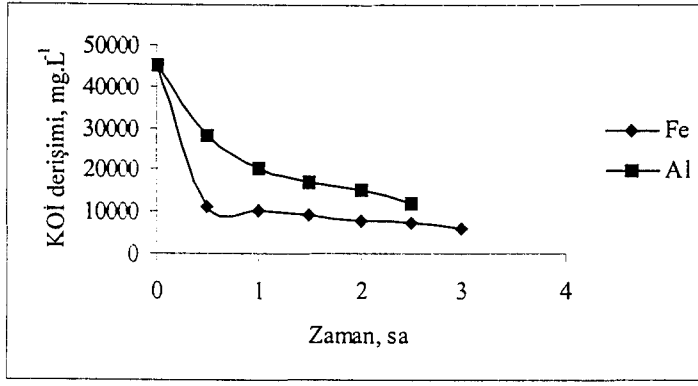
Çalışmanın bu bölümünde başlangıç KOİ'si 45000 mg.L^{-1} olan atıksu için en iyi polielektrolit ve H_2O_2 şartları olarak belirlenen $0,5 \text{ g.L}^{-1}$ PAC ve $26,36 \text{ g.L}^{-1}$ H_2O_2 ilavesi ile 75 mA.cm^{-2} akım yoğunluğunda elektrokoagülasyona tabi tutulmuştur. Demir ve alüminyum reaktörler için elde edilen veriler Çizelge 4.44.'te bu deneye ait % giderim, enerji tüketimi ve akım verimi değerleri de Çizelge 4.45'te verilmiştir. Aynı şartlarda KOİ derişimi, % giderim, enerji tüketimi ve akım verimi değerlerinin alüminyum ve demir reaktör olması durumunda zamanla değişimleri Şekil 4.50.-4.54.' verilmektedir.

Çizelge 4.44. Demir ve alüminyum reaktör için deneysel çalışmaların sonuçları.Reaktör: Anot, PAC: $0,5 \text{ g.L}^{-1}$, H_2O_2 : $26,36 \text{ g.L}^{-1}$

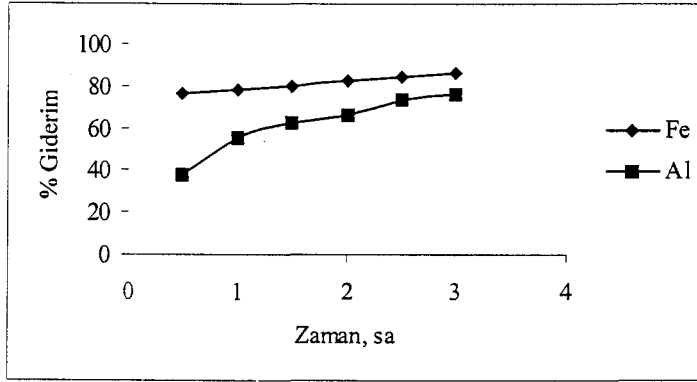
Elektrot malzemesi	Zaman(saat)	Gerilim (V)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	pH	KOI son (mg.L^{-1})
Fe	0,5	8,60	26	10,30	10945
Al		9,5	19	10,05	28141
Fe	1,0	8,48	23	11,80	9950
Al		10,3	21	1032	20101
Fe	1,5	22,5	30	11,96	8955
Al		15,9	28	10,36	17085
Fe	2,0	23,2	26	12,15	7960
Al		25,4	35	10,31	15075
Fe	2,5	24,2	35	11,65	7200
Al		35,5	36	10,19	12000
Fe	3,0	23,0	35,	11,58	6169
Al		25,4	37	10,43	10668

Çizelge 4.45. Demir ve alüminyum reaktör için %giderim,Enerji tüketimi ve akım verimi değerleri

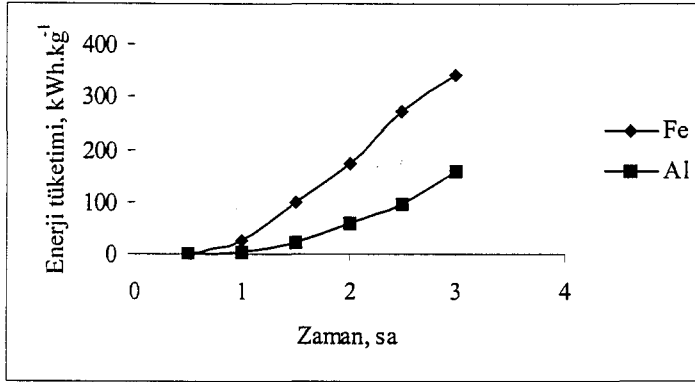
Elektrot malzemesi	Zaman(saat)	KOİ Giderimi (%)	Enerji tüketimi		Akım verimi
			kWh.kg^{-1}	kWh.m^{-3}	
Fe	0,5	75,7	0,79	26,88	19,68
Al		37,5	0,43	29,69	4,52
Fe	1,0	77,9	27,42	53,38	10,13
Al		77,9	27,42	53,38	10,13
Fe	1,5	80,1	98,09	123,69	6,94
Al		62,0	20,91	111,56	2,49
Fe	2,0	82,3	170,95	196,19	5,35
Al		66,5	60,40	190,94	2,01
Fe	2,5	84,0	270,46	271,81	4,37
Al		73,3	96,48	301,88	1,77
Fe	3,0	86,3	340,17	343,69	3,74
Al		76,3	156,07	381,25	1,53



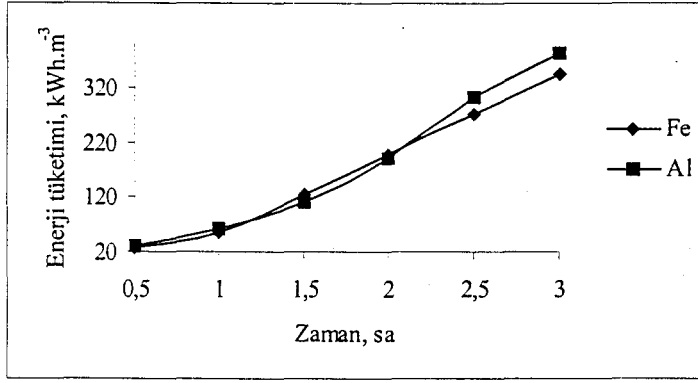
Şekil 4.50. Elektrot malzemesi ile KOİ derişiminin zamanla değişimi



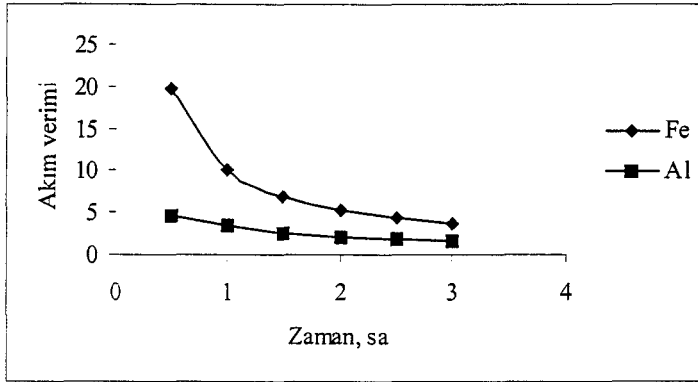
Şekil 4.51. Elektrot malzemesi ile giderimin zamanla değişimi



Şekil 4.52. Elektrot malzemesi ile kWh.kg⁻¹ cinsinden enerji tüketiminin zamanla değişimi



Şekil 4.53. Elektrot malzemesi ile kWh.m⁻³ cinsinden enerji tüketiminin zamanla değişimi



Şekil 4.54. Elektrot malzemesi ile akım veriminin zamanla değişimi

Elektrot malzemesi olarak demir kullanılması durumunda giderim verimi (Şekil 4.51) ve akım verimi değerleri (Şekil 4.54) daha iyi olmaktadır.

5. SONUÇLAR

Yapılan çalışmalarda zeytinyağı endüstrisi atıksuyunun içindeki organik maddenin elektrokoagülasyon ile uzaklaştırılabileceği sonucuna varılmış, parametrelerin etkisi aşağıda verilmiştir.

Akım yoğunluğunun etkisi

Deney süresinin üç saat olduğu durumlarda elde edilen sonuçlardan görüldüğü gibi KOİ giderim hızı ilk yarım saatlik süre içerisinde hızlı gerçekleşmekte ve süre ilerledikçe KOİ giderim hızı başlangıçta yüksek organik kirlilik nedeniyle giderim hızı yüksek olmakta, kirlilik derişimi azaldıkça hızda düşmektedir.

Akım yoğunluğu arttıkça son KOİ derişimi azalmakta, böylece giderim yüzdesi artmaktadır (Şekil 4.6.-4.7.). Genel olarak elektron aktarımıyla gerçekleşen elektrokimyasal süreçlerde akımla birlikte giderimin artması beklenen bir durumdur. Akım yoğunluğundaki artışla birlikte giderim veriminin artması akım veriminde de artışa neden olmaktadır (Şekil 4.10.).

Başlangıç derişiminin etkisi

Başlangıç derişiminin etkisinin incelendiği deney sonuçlarına göre başlangıç derişiminin artması ile birlikte % giderim değerleri düşmektedir (Şekil 4.21). Ancak başlangıç KOİ derişiminin yüksek olduğu durumda giderim hızı artmaktadır(Şekil 4.20). Akım verimi de kütle aktarım kontrollü sistemlerde olduğu gibi başlangıç KOİ derişiminin artması ile artmakta ve zamanla azalmaktadır (Şekil 4.24). Başlangıç derişiminin yüksek olduğu durumda uzaklaştırılan madde miktarının artmasıyla spesifik enerji tüketimi daha düşük olmaktadır(Şekil 4.32.,4.33.,4.37,4.38). Suyun 1 m⁻³ ü için tüketilen enerji miktarı her iki derişimde çok farklı olmaktadır.

Polaritenin etkisi

Reaktörün anot ve katot olduğu durumlar karşılaştırıldığında reaktörün katot olduğu durumda anot olduğu durumdan daha fazla giderim (Şekil 4.41.) ve akım verimine ulaşılan (Şekil 4.42.) enerji tüketimi çok daha yüksek olmaktadır (Şekil 4.43.). Bunun nedeni, reaktör katot iken yaklaşık 10 kat daha fazla gerilim farkı oluşmaktadır.

Destek elektrolit derişiminin etkisi

H₂O₂ kullanımının etkisi

Bu çalışmada 13,18 g.L⁻¹ ve 26,36 g.L⁻¹ H₂O₂ destek elektrolit ilavesi ile fenton ajanı olarak etkin olan OH⁻ radikallerinin derişimi artırılmıştır. Bunun sonucunda daha yüksek giderim değerlerine ulaşılmıştır (Şekil 4.45). Aynı zamanda H₂O₂ derişiminin artması akım veriminin artmasına (Şekil 4.48) yol açmıştır. Bu bize elektrokimyasal giderimin yanında kimyasal gideriminde gerçekleştiğini göstermektedir.

NaCl kullanımının etkisi

4,5 g.L⁻¹ derişiminde NaCl eklenmesi durumunda % giderimde bir düşüş olmaktadır (Şekil 4.52). Bunun nedeni KOİ derişiminin belirlenmesi sırasında Cl⁻ iyonlarının girişim yapması sonucu değerlerin yüksek çıkması olabilir. Akım veriminde de düşüş görülmektedir (Şekil 4.53). Bunun yanında enerji tüketiminin NaCl derişiminin artması ile iletkenliğin artması ve gerilim farkının azalmasıdır (Şekil 4.54).

Polielektrolitin etkisi

Bu çalışmada 0,5 g.L⁻¹ PAC ve 0,5 g.L⁻¹ APA olmak üzere iki farklı polielektrolit kullanılmıştır. Bir saatlik deneylerde atıksuya PAC eklenmesi

durumunda APA eklenmesi durumuna göre daha fazla giderim sağlanmıştır (Şekil 4.55). Aynı zamanda PAC kullanılması ile akım verimi de artmış (Şekil 4.56) enerji tüketimi ise azalmıştır (Şekil 4.57). Üç saatlik deneylerde PAC'ın olmadığı ve olduğu durumlar incelenmiş ve olduğu koşullarda deneylerin son yarım saatlik bölümünün dışında KOİ giderim hızının, % giderimin ve akım veriminin arttığı görülmektedir (Şekil 4.44, 4.45).

Elektrot malzemesinin etkisi

Çalışmamızda demir ve alüminyum reaktör kullanılmıştır. Demir ve alüminyum reaktörle başlangıç derişimi 97000 mg.L^{-1} ve 45000 mg.L^{-1} KOİ başlangıç derişimleri ile yapılan deneysel çalışmalarda demir reaktörde alüminyum reaktöre göre daha yüksek giderim değerleri elde edilmiştir (Şekil 4.64). Bunun sebebi demir reaktörde giderimin artmasını sağlayan Fenton tepkimesinin gerçekleşmesidir. Ayrıca demir reaktörde uygulanan gerilimin daha az olmasıyla alüminyum reaktöre göre enerji tüketimi azalmaktadır (Şekil 4.61, 4.62),

Sonuç ve öneriler

Yapılan deneylerde gerçek atıksularla çalışılarak, organik yükün bir göstergesi olan KOİ'nin elektrokoagülasyon yöntemi ile giderimi incelenmiş, %86 oranında giderime ulaşılmıştır. Ayrıca koagülasyon süresince anotta biriken maddeler, anotun aktivitesi yani sisteme giren demir ya da alüminyum miktarını düşürerek ve anot yüzeyinde meydana gelecek doğrudan yükseltgemeyi de engelleyerek giderimi olumsuz etkilemişlerdir.

Yapılan bu çalışmada maliyet konusunda kesin bir sonuca ulaşma zorluğu açıktır. Pilot ölçekte yapılacak çalışmalar ışığında yapılacak maliyet analizleri ile giderim açısından etkin olduğu sonucuna varılan elektrokimyasal yöntemlerin ekonomik açıdan da diğer yöntemlerle karşılaştırılması mümkün olabilecektir.

KAYNAKLAR

1. KAVAKLI, M., *Zeytinyağı üretiminden kaynaklanan çevre sorunları ve seçenekli arıtım çözüm yaklaşımları*, 1. Zeytinyağı Üretiminde Çevre Sorunları ve Çözümleri Uluslararası Çalıştayı Bildiriler Kitabı, Balıkesir, 109-120, (2002).
2. <http://www.maden.org.tr/yeni3/yayinlar/ra>
3. COŞKUN, M.B., *Zeytinyağı işletmelerindeki atıksuların işletme içerisinde değerlendirilmesine yönelik bir uygulama örneği*, Mersin Üniversitesi Ulusal Sanayi- Çevre Sempozyumu ve Sergisi Bildiriler Kitabı, HiltonSA, Mersin, 41-51, (2001).
4. FİLİBELİ, A. ve BÜYÜKKAMACI, M., *Karasuyun anaerobik biyolojik yöntemlerle arıtılabilirliğinin değerlendirilmesi*, 1. Zeytinyağı Üretiminde Çevre Sorunları ve Çözümleri Uluslararası Çalıştayı Bildiriler Kitabı, Balıkesir, 67-76, (2002).
5. OKTAY Z., AKDENİZ C. ve HEPBAŞLI A., *Prina üretiminin ülkemizdeki durumu ve alternatif enerji kaynağı olarak değerlendirme olanakları*, 1. Zeytinyağı Üretiminde Çevre Sorunları ve Çözümleri Uluslararası Çalıştayı Bildiriler Kitabı, Balıkesir, 223-235, (2002).
6. <http://www.aeri.org.tr/TEAEBAKIS/TEAE%20BAKIS%20I/Zeytin.pdf>
7. NEGRO, M., SOLANO, J. ve LUISA, M., *Laboratory composting assays of the solid residue resulting from the flocculation of oil mill wastewater witht different lignocellulosic residue*, Compost Science & Utilization, 4, 62-72, (1996)
8. OKTAV, E. ve ÖZER, A., *Zeytinyağı endüstrisi atıksularının özellikleri ve arıtım alternatifleri*, 1. Zeytinyağı Üretiminde Çevre Sorunları ve Çözümleri Uluslararası Çalıştayı Bildiriler Kitabı, Balıkesir, 51-65, (2002).
9. AKAL SOLMAZ, S. K. ve ÜSTÜN, G. E., *Zeytinyağı üretiminden kaynaklanan karasuyun özellikleri ve arıtma seçenekleri*, 1. Zeytinyağı Üretiminde Çevre Sorunları ve Çözümleri Uluslararası Çalıştayı Bildiriler Kitabı , Balıkesir, 331-344, (2002).

10. ŞENGÜL, F., OKTAV, E. ve ÇATALKAYA Ç. E., *Zeytinyağı üretim prosesine bağlı olarak oluşan karasuyun kirlilik karakteristikleri ve arıtım teknolojileri*, 1. Zeytinyağı Üretiminde Çevre Sorunları ve Çözümleri Uluslararası Çalıştay Bildiriler Kitabı , Balıkesir, 35-49, (2002).
11. KESTİOĞLU, K., YONAR, T. ve AKAL SOLMAZ, S. K., *Zeytin karasuyunun çevresel etkileri ve bertaraf koşullarının araştırılması*, 1. Zeytinyağı Üretiminde Çevre Sorunları ve Çözümleri Uluslararası Çalıştay Bildiriler Kitabı , Balıkesir, 315-320, (2002).
12. KOYUNCU, İ. ve TOPACIK, D., *Zeytinyağı endüstrisi atıksularının arıtılmasında membran teknolojisi uygulamalarının değerlendirilmesi*, 1. Zeytinyağı Üretiminde Çevre Sorunları ve Çözümleri Uluslararası Çalıştay Bildiriler Kitabı, Balıkesir, 179-189, (2002).
13. <http://www.nf-2000.org/publca/q30011a1.pdf>
14. YETGİN, F. ve GÖKÇAY, C. F., *Zeytinyağı atıksularının arıtılması*, 1. Zeytinyağı Üretiminde Çevre Sorunları ve Çözümleri Uluslararası Çalıştay Bildiriler Kitabı, Balıkesir, 77-96, (2002).
15. ROBLES, A., LUCAS, R., ALVAREZ, C. ve GALVEZ, A., *Biomass production and detoxification of wastewater from the olive oil industry by strains of Penicillium Isolated from wastewater disposal ponds*, *Bioresource Technology*, **74**, 217-221, (2000).
16. FADIL, K., CHAHLAOUI, A., OUAHBI, A., ZAID, A. ve BORJA, R., *Aerobic biodegradation and detoxification of wastewaters from the olive oil industry*, *International Biodeterioration and Biodegradation*, **51**, 37-41, (2003).
17. GARCIA, G., PENA, J. P.R., VENCESLADA, B. J. L., MARTİN, M. A., SANTOS, M. A. M. ve GOMEZ, E. R., *Removal of phenol compounds from olive mill wastewater using Phanerochaete chrysosporium, Aspergillus niger, Aspergillus terreus and Geotrichum candidum*, *Process Biochemistry*, **51**, 751-758, (2000).
18. HAMDİ, M. ve GARCIA, J. L., *Comparison Between anaerobic filter and anaerobic contact process for fermented olive mill wastewaters*, *Bioresource Technology*, **38**, 23-29, (1991).

19. VASSILEV, N., FENICE, M., FEDERICI, F. ve AZCON, R., *Olive mill waster water treatment by immobilized cells of Aspergillus niger and its enrichment with soluble phosphate*, Process Biochemistry, **32**, 617-620, (1997).
20. GARRIDO, S. E. H., NIETO, L. M., RUBIO, F. C. ve CORMENZANA, A. R., *Kinetics of aerobic treatment of olive-mill wastewater (OMW) with Aspergillus terreus*, Process Biochemistry, **37**, 1169-1176, (2002).
21. ETTAYEBI, K., ERRACHIDI, F., JAMAI, L., TAHRI-JOUTI, M. A., SENDIDE, K. ve ETTAYEBI, M., *Biodegradation of polyphenols with immobilized Candida tropicalis under metabolic induction*, FEMS Microbiology Letters, **223**, 215-219, (2003).
22. ASSAS, N., AYED, L., MAROUANI, L. ve HAMDI, M., *Decolorization of fresh and stored-black olive mill wastewaters by Geotrichum candidum*, Biochemistry, **38**, 361-365, (2003).
23. EHALIOTIS, C., PAPADOPOULOU, K., KOTSOU, M., MARI, I. ve BALIS, C., *Adaptation and population dynamics of Azotobacter vinelandii during aerobic biological treatment of olive-mill wastewater*, FEMS Microbiology Ecology, **30**, 301-311, (1999).
24. FLOURI, F., SOTIRCHOS, D., IOANNIDOU, S. ve BALIS, C., *Decolorization of olive oil mill liquid wastes by chemical and biological means*, International Biodeterioration & Biodegradation, **38**, 189-192, (1996).
25. TSIOLPAS, A., DIMOU, D., ICONOMOU, D. ve AGGELIS, G., *Phenolic removal in olive mill wastewater by strains of Pleurotus spp. in respect to phenol oxidase (laccase) activity*, Bioresource Technology, **84**, 251-257, (2002).
26. AGGELIS, G., ICONOMOU, D., CHRISTOU, M., BOKAS, D., KOTZAILIAS, S., CHRISTOU, G., TSAGOU, V. ve PAPANIKOLAOU, S., *Phenolic removal in a model olive oil mill wastewater using Pleurotus ostreatus in bioreactor cultures and biological evaluation of the process*, Water Research, **37**, 3897-3904, (2003).

27. SCIOLI, C. ve VOLLARO, L., *The use of Yarrowia lipolytica to reduce pollution in olive mill wastewaters*, Water Research, **31**, 2520-2524, (1997).
28. PAPADELLI, M., ROUSSIS, A., PAPADOPOULOU, K., VENIERAKI, A., CHATZIPAVLIDIS, I., KATINAKIS, P. ve BALLIS, K., *Biochemical and molecular characterization of an Azotobacter vinelandii strain with respect to its ability to grow and fix nitrogen in olive mill wastewater*, International Biodeterioration & Biodegradation, **38**, 179-181, (1996).
29. LINARES, A., CABA, J. M., DE LA RUBIA, T. F. L. ve MARTINEZ, J., *Detoxification of semisolid olive-mill wastes and pine-chip mixtures using Phanerochaete flavido-alba*, Chemosphere, **51**, 887-893, (2003).
30. DALIS, D., ANAGNOSTIDIS, K., LOPEZ, A., LETSIOU, I. ve HARTMANN, L., *Anaerobic digestion of total raw olive-oil wastewater in a two-stage pilot-plant up-Flow and fixed-bed bioreactors*, Bioresource Technology, **57**, 237-243, (1996).
31. MARQUES, I. P., *Anaerobic digestion treatment of olive mill wastewater for effluent re-use in irrigation*, FEBS Letters, **496**, 6-11, (2001).
32. ERGUDER, T. H., GUVEN, E. ve DEMIRER, G. N., *Anaerobic treatment of olive mill wastes in batch reactors*, Process Biochemistry, **36**, 243-248, (2000).
33. BECCARI, M., BONEMAZZI, F., MAJONE, M. ve RICCARDI, C., *Interaction between acidogenesis and methanogenesis in the anaerobic treatment of olive oil mill effluents*, Water Research, **30**, 183-189, (1996).
34. ANDREOZZI, R., LONGO, G., MAJONE, M. ve MODESTI, G., *Integrated treatment of olive oil mill effluents (ome): study of ozonation coupled with anaerobic digestion*, Water Research, **32**, 2357-2364, (1998).
35. BECCARI, M., MAJONE, M., RICCARDI, C., SAVARESE, F. ve TORRISI, L., *integrated treatment of olive oil mill effluents: effect of chemical and physical pretreatment on anaerobic treatability*, Water Science and Technology, **40**, 347-355, (1999).

36. TURANO, E., CURCIO, S., DE Paola, G. M., CALABRO, V. ve IORIO, G., *An integrated centrifugation-ultrafiltration system in the treatment of olive mill wastewater*, Journal of Membrane Science, **209**, 519-533, (2002).
37. CANEPA, P., MARIGNETTI, N., ROGNONI, U. ve CALGARI, S., *Olive mills wastewater treatment by combined membrane processes*, Water Research, **22**, 1491-1494, (1988).
38. BORSANI, R. ve FERRANDO, B., *Ultrafiltration plant for olive vegetation waters by polymeric membrane batteries*, Desalination, **108**, 281-286, (1996).
39. ISRAILIDES, C. J., VLYSSIDES, A. G., MOURAFETI, V. N. ve KARVOUNI, G., *Olive oil wastewater treatment with the use of an electrolysis system*, "Bioresource Technology", **61**, 163-170, (1997).
40. İNAN, H., ŞİMŞEK, H., KARPUZCU, M. ve DİMOGLO, A., *Elektrokimyasal yöntemler ile zeytinyağı endüstrisi karasuyunun arıtılabilirliği*, 1. Zeytinyağı Üretiminde Çevre Sorunları ve Çözümleri Uluslararası Çalışmayı Bildiriler Kitabı , Balıkesir, 167-178, (2002).
41. İNAN, H., ŞİMŞEK, H., KARPUZCU, M. ve DİMOGLO, A., *Olive oil mill wastewater treatment by means of electrocoagulation*, Separation and Purification Technology, Articles in Press, 1-9, (2003).
42. VLYSSIDES, A. G., KARLI, P. K. ve ZORPAS, A. A., *Electrochemical oxidation of noncyanide strippers wastes*, Environmental International, **25**, 663-670, (1999).
43. LONGHI, P., VODOPIVEC, B. ve FIORI, G., *Electrochemical treatment of olive oil mill wastewater*, Annali di Chimica, **91**, 169-174, (2001).
44. MASAO, S., TAKAMASA, K., KUNIO, S., QUAN, Z. J. ve KOZO, K., *Oxidative degradation of aqueous phenol effluent with electrogenerated fenton's reagent*, Journal of chemical Engineering of Japan, **19**, 513-518, (1986).
45. İNESTA, J., MICHAUD, P. A., PANIZZA, M., CERSOLA, G., ALDAZ, A. ve COMNINELLIS, CH., *Electrochemical oxidation of phenol at boron-doped diamond electrode*, Electrochimica, **46**, 3573-3578, (2001).

46. PANIZZA, M., MICHAUD, P. A., CERISOLA, G. ve COMNINELLIS, CH., *Electrochemical treatment of wastewaters containing organic pollutants on boron-doped diamond electrodes: prediction of specific energy consumption and required electrode area*, *Electrochemistry Communication*, **3**, 336-339, (2001).
47. DE SUCRE, S. ve WATKINSON, A. P., *Anodic oxidation of phenol for waste water treatment*, *Canadian Journal of Chemical Engineering*, **59**, 52-59, (1981).
48. CHIN, D. T. ve CHENG, C. Y., *Oxidation of phenol with ac electrolysis*, *Journal of the Electrochemical Society*, **132**, 2605-2611, (1985).
49. COMNINELLIS, CH. VE PULGARIN, C., *Electrochemical oxidation of phenol for wastewater treatment using SnO₄ anodes*, *Journal Applied Electrochemistry*, **23**, 108-12, (1993).
50. [http: www.europa.eu.int/comm/enviroment/pubs/studies.htm](http://www.europa.eu.int/comm/enviroment/pubs/studies.htm)
51. İPEKOĞLU, N., *Katı atıkların kompostlaştırılması, katı atık tanımı, toplanması ve uzaklaştırılması*, Kurs Notları, Boğaziçi Üniversitesi, 6, İstanbul, (1990).

EK 1

ANOT YÜZEY ALANI HESABI

Anot Yüzey Alanı Hesabı

Reaktör anotken Anot Yüzey Alanı hesabı

Reaktör 10 cm çapında 10 cm yüksekliğinde silindirik yapıdadır. Çalışılan su 300 ml hacminde olduğu için reaktör anotken ıslak alandan anotun alanı hesaplanır.

$$\text{Anot alanı} = A_{\text{taban}} + A_{\text{yanal}}$$

$$\text{Anot alanı} = \pi x \frac{D^2}{4} + 2x \pi x dxh$$

$$\text{Anot alanı} = 3,14x \frac{10^2}{4} + 2x3,14x5x3$$

$$\text{Anot alanı} = 78,5 + 94,2$$

$$\text{Anot alanı} = 172,7$$

Karıştırıcı Pedal Anotken Anot Yüzey Alanı Hesabı

Karıştırıcı pedallar 2,5 cm eninde 5 cm boyunda iki adet plakadan oluşmaktadır. Karıştırıcı pedallar Anotken, anot alanı.

$$\text{Anotalanı} = 2 * (h * l)$$

$$\text{Anotalanı} = 2 * (2,5\text{cm} * 5\text{cm})$$

$$\text{Anot Alanı} = 2 * 12,5 \text{ cm}^2$$

$$\text{Anot alanı} = 25 \text{ cm}^2$$

EK 2

ÖRNEK HESAPLAMALAR

Yüzde Giderim Hesabı

Çizelge 4.32'den alınan demir reaktörde 45000 mg.L⁻¹ KOİ derişimine sahip atık su için 0,5 g.L⁻¹ PAC, 26,36 g.L⁻¹ H₂O₂ derişiminde ve 30 mA.cm⁻² akım yoğunluğundaki %giderim hesabı eşitlik 4.1. kullanılarak hesaplanmıştır

$$\%Giderim = \frac{(C_0 - C)}{C_0} * 100$$

$$\%Giderim = \frac{(45000 - 11163)}{45000} * 100$$

$$\% Giderim = 75,2$$

Akım Verimi Hesabı

Çizelge 4.31. ve 4.36.'ten alınan demir reaktörde 45000 mg.L⁻¹ KOİ derişimine sahip atık su için 0,5 g.L⁻¹ PAC, 26,36 g.L⁻¹ H₂O₂ derişiminde ve 30 mA.cm⁻² akım yoğunluğundaki akım verimi hesabı eşitlik 4.2. kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Akım verimi} = \frac{\text{Giderim} \times C_0 \times F \times V_{\text{çözeltili}}}{I \times t}$$

Çizelge 4.9

$$\text{Akım verimi} = \frac{45000 \text{mg.L}^{-1} \times \frac{\text{g}}{10 \text{ mg}}}{0,752 \times \frac{32 \text{g.mol}^{-1}}{96500 \text{A.s.mol}^{-1}} \times 0,3 \text{L}} \times 0,75 \text{A} \times 3600 \text{s}$$

$$\text{Akım verimi} = 3,78$$

Enerji Tüketimi Hesabı

Çizelge 4.36.'ten alınan demir reaktörde 45000 mg.L⁻¹ KOİ derişimine sahip atık su için 0,5 g.L⁻¹ PAC, 26,36 g.L⁻¹ H₂O₂ derişiminde ve 30 mA.cm⁻²

akım yoğunluğundaki enerji tüketimi hesabı eşitlik 4.3. kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Enerji tüketimi(Wh.m}^{-3}\text{)} = \frac{VxIxt}{V_{\text{çözelti}}}$$

$$\text{Enerji tüketimi(Wh.m}^{-3}\text{)} = \frac{5,13V * 0,75A * 0,5sa}{0,3L \frac{m^3}{1000L}}$$

$$\text{Enerji tüketimi} = 6413 \text{Wh} \times \frac{1kWh}{1000Wh}$$

$$\text{Enerji tüketimi} = 6,41 \text{ kWh.m}^{-3}$$

$$\text{Enerji tüketimi(kWh.g}^{-1}\text{)} = \frac{VxIxt}{(C_0 - C)xV_{\text{reaktör}}}$$

$$\text{Enerji tüketimi(kWh.mg}^{-1}\text{)} = \frac{5,13V * 0,75A * 0,5sa}{(13023 \text{mg.L}^{-1} - 11163 \text{mg.L}^{-1}) * 0,3L}$$

$$\text{Enerji tüketimi} = 0,00344 \text{ Wh.mg}^{-1}$$

$$\text{Enerji tüketimi} = 3,44 \text{ kWh.kg}^{-1}$$