

MERMER ENDÜSTRİSİ
ATIKSULARININ
ELEKTROKOAGÜLASYON YÖNTEMİYLE
ARITILMASI

Yüksek Lisans Tezi

Deniz ÖZTÜRK

Eskişehir 2018

**MERMER ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ
ELEKTROKOAGÜLASYON YÖNTEMİYLE ARITILMASI**

Deniz ÖZTÜRK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Yusuf YAVUZ

Eskişehir

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Mayıs 2018

Bu tez çalışması BAP Komisyonunca kabul edilen 1609F682 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Deniz ÖZTÜRK'ün '**Mermer Endüstrisi Atıksularının Elektrokoagülasyon Yöntemiyle Arıtılması**' başlıklı tezi **23/05/2018** tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek 'Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim- Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca, **Çevre Mühendisliği** Anabilim dalında, Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

<u>Jüri Üyeleri</u>	<u>Unvanı Adı Soyadı</u>	<u>İmza</u>
Üye (Tez Danışmanı)	: Prof. Dr. Yusuf YAVUZ
Üye	: Doç. Dr. Alime ÇITAK
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Filiz BAYRAKCI KAREL

Prof.Dr. Ersin YÜCEL
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET
MERMER ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ ELEKTROKOAGÜLASYON
YÖNTEMİ İLE ARITILMASI

Deniz ÖZTÜRK

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Teknolojileri Bilim Dalı

Anadolu Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Mayıs 2018

Danışman: Prof. Dr. Yusuf YAVUZ

Bu çalışmada, Eskişehir ilinde bulunan bir mermer işleme tesisinden alınan atıksular, Monopolar Fe-Fe (Demir), Monopolar Al-Al (Alüminyum), Monopolar Al-Fe (Alüminyum-Demir hibrit), Bipolar Fe-Fe (Demir), Bipolar Al-Al (Alüminyum), Bipolar Al-Fe (Alüminyum-Demir hibrit) elektrot tipleri ve geometrileri kullanılarak elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılmış; farklı akım yoğunluklarının, arıtma sürelerinin, destek elektrolit derişiminin ve başlangıç pH'nın arıtma üzerindeki etkileri incelenmiş ve maliyet hesaplamaları yapılmıştır. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'nde belirtilen deşarj kriterlerine göre yeterli arıtma verimin gerçekleştiği en ekonomik arıtma parametreleri; tüm elektrot tipleri ve geometrileri için 1 dk arıtma süresi ve 1 mA/cm² akım yoğunluğu olarak tespit edilmiştir. Çalışmada elde edilen verilere göre; tüm elektrotların çok yüksek düzeyde kirlilik giderimi sağladığı, en yüksek AKM giderimini Monopolar Al-Fe elektrotun (%99,40), en yüksek bulanıklık giderimini Monopolar Al-Al elektrotun (%99,91), en düşük enerji tüketimini Monopolar Al-Fe elektrotun (7,92x10⁻³ kWh/m³), en düşük işletme maliyetini Monopolar Fe-Fe elektrotun (9,73x10⁻¹ kr./m³) sağladığı ortaya çıkmıştır. Destek elektrolit kullanımının ve başlangıç pH'ını ayarlamanın olumlu bir katkısı gözlenmemiştir. Son olarak mermer atıksuyunun tüm elektrotlarla, ideal arıtma koşullarında, elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtılması sonrasında yağ gres, renk, KOİ, zeta potansiyeli parametreleri incelenmiş ve çamur tartımları yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda mermer atıksularının elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtılmasının; zaman ve para yönünden tasarruflu olduğu ve mevcut yöntemlere kıyasla iyi bir seçenek olduğu ortaya çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: Mermer Endüstrisi Atıksuyu, Elektrokoagülasyon, Elektrokimyasal Arıtım

ABSTRACT
TREATMENT OF MARBLE INDUSTRY WASTEWATER BY
ELECTROCOAGULATION METHOD

Deniz ÖZTÜRK

Department of Environmental Engineering
Program in Environmental Technologies
Anadolu University, Graduate School of Sciences, May 2018

Supervisor: Prof. Dr. Yusuf YAVUZ

In this study, wastewater taken from a marble processing plant in Eskişehir and treated with electrocoagulation method by using different electrode types and geometries such as Monopolar Fe-Fe (Iron), Monopolar Al-Al (Aluminum), Monopolar Al-Fe (Aluminum-Iron hybrid), Bipolar Fe-Fe (Iron), Bipolar Al-Al (Aluminum), Bipolar Al-Fe (Aluminum-Iron hybrid); the effects of different current densities, treatment times, support electrolyte concentration and initial pH on treatment were investigated and cost calculations were made. The most economical treatment parameters that have achieved sufficient treatment efficiency for the discharge criteria specified in the Water Pollution Control Regulation; 1 min treatment time and 1 mA/cm² current density for all electrode types and geometries. According to the data obtained in the study; very high level of pollution removal provided with all electrodes. Highest suspended solids (SS) removal provided with Monopolar Al-Fe electrode (%99,40), highest turbidity removal provided with Monopolar Al-Al electrode (%99,91), lowest energy consumption provided with Monopolar Al-Fe electrode ($7,92 \times 10^{-3}$ kWh / m³) and the lowest operating cost provided with Monopolar Fe-Fe electrode ($9,73 \times 10^{-1}$ kr./m³). A positive contribution of adjusting the initial pH and the use of the supporting electrolyte has not been observed. Finally, after electrocoagulation treatment with ideal treatment conditions with all electrodes; oil, grease, color, COD, zeta potential parameters were investigated and sludge weighings were made. As a result of the tests have done, the treatment of marble wastewater by electrocoagulation method is a good alternative to save time and money.

Keywords: Marble Industry Wastewater, Electrocoagulation, Electrochemical Treatment

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

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

.....

Deniz ÖZTÜRK

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmalarım sırasında desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, bilgisi ve deneyimleriyle bana ışık tutan değerli danışman hocam Prof. Dr. Yusuf YAVUZ'a ve önceki danışman hocam Prof. Dr. Ülker BAKIR ÖĞÜTVEREN'e;

Çalışmalarım süresince laboratuvarında benimle tecrübesini, bilgisini ve arkadaşlığını paylaşan, her konuda yol gösteren ve yardım eden Öğr. Gör. Esra GEREK'e, Arş. Gör. Güray EMİR'e, doktora öğrencisi Seval YILMAZ'a, doktora öğrencisi Mohammed OTHMAN'a;

Tez kapsamında yaptığım çalışmalara olan maddi katkılarından dolayı Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu'na ;

Hayatım boyunca her daim yanımda olan, sevgilerini, değerli bilgilerini, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyerek beni bu günlere getiren; aydınlık ve insani görüşleriyle, topluma yaptıkları katkılarla, halk sevgisini ve demokratik düşüncüyü ön plana çıkaran saygıdeğer-örnek davranışlarıyla bana ilham ve öğretmen olan canım babam Dr. Cem COŞKUN ve canım annem Dr. Nezahat COŞKUN'a; beni hiç yalnız bırakmayan, mutluluk kaynağım, dayanağım ve en yakın arkadaşlarım olan, bana yaşam enerjisi aşılayan ve sevgileriyle beni yücelten canım eşim Çevre Mühendisi Abdil ÖZTÜRK'e ve canım kardeşim Dr. Can COŞKUN'a; hayatıma anlam ve değer katan tüm dostlarıma ve sevgi dolu akrabalarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deniz ÖZTÜRK

Mayıs 2018

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xxi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxvii
1. GİRİŞ	1
2. MERMER ENDÜSTRİSİ	3
2.1. Mermer Endüstrisi Genel Bilgileri	3
2.2. Mermer İşleme Endüstrisi Üretim Sistemi	8
2.3. Mermer İşleme Endüstrisi Atıkları	11
2.4. Mermer İşleme Endüstrisi Atıksuları	12
3. ELEKTROKİMYASAL ARITIM YÖNTEMLERİ	17
3.1. Elektrokoksiasyon	17
3.2. Elektroflosasyon	18
3.3. Elektrokooğulasyon	19
4. KONU İLE İLGİLİ DAHA ÖNCE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR	22
5. MATERYAL VE YÖNTEM	24
5.1. Materyal	24
5.2. Yöntem	32
5.2.1. Elektrotların oluşturulması	32
5.2.2. Farklı elektrot tipi ve geometrilerinde akım yoğunluğu ve arıtma süresinin arıtıma etkisinin belirlenmesi	34
5.2.3. Destek elektrolit derişiminin arıtıma etkisi	36
5.2.4. Başlangıç pH'ının arıtıma etkisi	36
5.2.5. Çökelme süresi karşılaştırmaları	37
5.2.6. AKM analizi	37

5.2.7. Bulanıklık analizi	38
5.2.8. pH, elektriksel iletkenlik, sıcaklık ölçümü	38
5.2.9. Toplam Cr analizi	39
5.2.10. Yağ gres analizi	39
5.2.11. Renk analizi	40
5.2.12. KOİ analizi	40
5.2.13. Zeta potansiyeli analizi	41
5.2.14. Çamur tartımı	41
6. BULGULAR	42
6.1. Farklı Elektrot Tipi ve Geometrileri ile Yapılan Arıtmalarda Akım Yoğunluğunun Arıtıma Etkisi	42
6.1.1. Monopolar Fe-Fe elektrot ile yapılan çalışmalar	43
6.1.1.1. Monopolar Fe-Fe elektrot ile yapılan 1 dakika süreli çalışmalar	43
6.1.1.2. Monopolar Fe-Fe elektrot ile yapılan 3 dakika süreli çalışmalar	45
6.1.1.3. Monopolar Fe-Fe elektrot ile yapılan 5 dakika süreli çalışmalar	47
6.1.1.4. Monopolar Fe-Fe elektrot ile yapılan 10 dakika süreli çalışmalar	49
6.1.2. Monopolar Al-Al elektrot ile yapılan çalışmalar	51
6.1.2.1. Monopolar Al-Al elektrot ile yapılan 1 dakika süreli çalışmalar	51
6.1.2.2. Monopolar Al-Al elektrot ile yapılan 3 dakika süreli çalışmalar	53
6.1.2.3. Monopolar Al-Al elektrot ile yapılan 5 dakika süreli çalışmalar	55
6.1.2.4. Monopolar Al-Al elektrot ile yapılan 10 dakika süreli çalışmalar	57
6.1.3. Monopolar Al-Fe elektrot ile yapılan çalışmalar	59
6.1.3.1. Monopolar Al-Fe elektrot ile yapılan 1 dakika süreli çalışmalar	59
6.1.3.2. Monopolar Al-Fe elektrot ile yapılan 3 dakika süreli	

çalışmalar	61
6.1.3.3. Monopolar Al-Fe elektrot ile yapılan 5 dakika süreli çalışmalar	63
6.1.3.4. Monopolar Al-Fe elektrot ile yapılan 10 dakika süreli çalışmalar	65
6.1.4. Bipolar Fe-Fe elektrot ile yapılan çalışmalar	67
6.1.4.1. Bipolar Fe-Fe elektrot ile yapılan 1 dakika süreli çalışmalar	67
6.1.4.2. Bipolar Fe-Fe elektrot ile yapılan 3 dakika süreli çalışmalar	68
6.1.4.3. Bipolar Fe-Fe elektrot ile yapılan 5 dakika süreli çalışmalar	70
6.1.4.4. Bipolar Fe-Fe elektrot ile yapılan 10 dakika süreli çalışmalar	71
6.1.5. Bipolar Al-Al elektrot ile yapılan çalışmalar	73
6.1.5.1. Bipolar Al-Al elektrot ile yapılan 1 dakika süreli çalışmalar	73
6.1.5.2. Bipolar Al-Al elektrot ile yapılan 3 dakika süreli çalışmalar	74
6.1.5.3. Bipolar Al-Al elektrot ile yapılan 5 dakika süreli çalışmalar	76
6.1.5.4. Bipolar Al-Al elektrot ile yapılan 10 dakika süreli çalışmalar	77
6.1.6. Bipolar Al-Fe elektrot ile yapılan çalışmalar	79
6.1.6.1. Bipolar Al-Fe elektrot ile yapılan 1 dakika süreli çalışmalar	79
6.1.6.2. Bipolar Al-Fe elektrot ile yapılan 3 dakika süreli çalışmalar	80
6.1.6.3. Bipolar Al-Fe elektrot ile yapılan 5 dakika süreli çalışmalar	82
6.1.6.4. Bipolar Al-Fe elektrot ile yapılan 10 dakika süreli çalışmalar	83
6.2. Farklı Elektrot Tipi ve Geometrileri ile Yapılan Arıtmalarda Arıtma	

Süresinin Arıtıma Etkisi	85
6.3. Farklı Elektrot Tipi ve Geometrileri ile Yapılan Arıtımların Maliyet Hesapları	88
6.3.1. Enerji tüketimi ve enerji maliyeti	88
6.3.1.1. Enerji tüketimi karşılaştırmaları	99
6.3.2. Teorik elektrot maliyeti	102
6.3.3. Toplam maliyet	112
6.4. Destek Elektrolit Derişiminin Arıtıma ve Maliyete Etkisi	122
6.4.1. Monopolar Fe-Fe elektrot ile yapılan çalışmalar ve maliyet hesabı	123
6.4.2. Monopolar Al-Al elektrot ile yapılan çalışmalar ve maliyet hesabı	125
6.4.3. Monopolar Al-Fe elektrot ile yapılan çalışmalar ve maliyet hesabı	127
6.4.4. Bipolar Fe-Fe elektrot ile yapılan çalışmalar ve maliyet hesabı	129
6.4.5. Bipolar Al-Al elektrot ile yapılan çalışmalar ve maliyet hesabı	131
6.4.6. Bipolar Al-Fe elektrot ile yapılan çalışmalar ve maliyet hesabı	133
6.5. Başlangıç pH'ının Arıtıma ve Maliyete Etkisi	135
6.5.1. Monopolar Fe-Fe elektrot ile yapılan çalışmalar ve maliyet hesabı	137
6.5.2. Monopolar Al-Al elektrot ile yapılan çalışmalar ve maliyet hesabı	139
6.5.3. Monopolar Al-Fe elektrot ile yapılan çalışmalar ve maliyet hesabı	141
6.5.4. Bipolar Fe-Fe elektrot ile yapılan çalışmalar ve maliyet hesabı	143
6.5.5. Bipolar Al-Al elektrot ile yapılan çalışmalar ve maliyet hesabı	145
6.5.6. Bipolar Al-Fe elektrot ile yapılan çalışmalar ve maliyet hesabı	147
6.6. Çökelme Süresi Karşılaştırmaları	149
6.7. Toplam Krom Analizi	161
6.8. Yağ ve Gres Analizi	161
6.9. Renk Analizi	161
6.10. KOİ Analizi	162
6.11. Zeta Potansiyeli Analizi	163

6.12. Çamur Tartımı	163
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	164
KAYNAKÇA	168
EKLER	
ÖZGEÇMİŐ	

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Mermerlerin sınıflandırılması	4
Çizelge 2.2. Mermerlerin fiziksel ve mekanik özellikleri	5
Çizelge 2.3. Türkiye'nin mermer kaynakları	5
Çizelge 2.4. Dünyada mermer üretiminde önde gelen ülkeler ve üretim miktarları	7
Çizelge 2.5. Kıtalara göre bazı ülkelerin mermer varlıkları	7
Çizelge 2.6. Levha ve plakaların biçimsel özellikleri	9
Çizelge 2.7. Mermer işlenmesi için kullanılan makineler	9
Çizelge 2.8. Mermer atıklarının fiziksel ve kimyasal özellikleri	11
Çizelge 2.9. Bazı koagülantlar ve özellikleri	15
Çizelge 2.10. Mermer işleme endüstrisi atıksuları alıcı ortam deşarj standartları	16
Çizelge 3.1. Elektrokimyasal reaksiyonlarda anot ve katot özellikleri	17
Çizelge 3.2. Elektrokoagülasyon işleminde alüminyum ve demir elektrotlarla gerçekleşen tepkimeler	20
Çizelge 5.1. Ham atıksu karakterizasyonu	24
Çizelge 6.1. Akım şiddeti – akım yoğunluğu ilişkisi	42
Çizelge 6.2. Monopolar Fe-Fe elektrot, t=1 dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular	44
Çizelge 6.3. Monopolar Fe-Fe elektrot, t=3 dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular	46
Çizelge 6.4. Monopolar Fe-Fe elektrot, t=5 dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular	48
Çizelge 6.5. Monopolar Fe-Fe elektrot, t=10 dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular	50
Çizelge 6.6. Monopolar Al-Al elektrot, t=1 dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular	52
Çizelge 6.7. Monopolar Al-Al elektrot, t=3 dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular	54
Çizelge 6.8. Monopolar Al-Al elektrot, t=5 dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular	56

Çizelge 6.9.	Monopolar Al-Al elektrot, $t=10$ dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular	58
Çizelge 6.10.	Monopolar Al-Fe elektrot, $t=1$ dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular	60
Çizelge 6.11.	Monopolar Al-Fe elektrot, $t=3$ dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular	62
Çizelge 6.12.	Monopolar Al-Fe elektrot, $t=5$ dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular	64
Çizelge 6.13.	Monopolar Al-Fe elektrot, $t=10$ dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular	66
Çizelge 6.14.	Bipolar Fe-Fe elektrot, $t=1$ dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular	68
Çizelge 6.15.	Bipolar Fe-Fe elektrot, $t=3$ dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular	69
Çizelge 6.16.	Bipolar Fe-Fe elektrot, $t=5$ dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular	71
Çizelge 6.17.	Bipolar Fe-Fe elektrot, $t=10$ dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular	72
Çizelge 6.18.	Bipolar Al-Al elektrot, $t=1$ dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular	74
Çizelge 6.19.	Bipolar Al-Al elektrot, $t=3$ dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular	75
Çizelge 6.20.	Bipolar Al-Al elektrot, $t=5$ dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular	77
Çizelge 6.21.	Bipolar Al-Al elektrot, $t=10$ dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular	78
Çizelge 6.22.	Bipolar Al-Fe elektrot, $t=1$ dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular	80
Çizelge 6.23.	Bipolar Al-Fe elektrot, $t=3$ dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular	81
Çizelge 6.24.	Bipolar Al-Fe elektrot, $t=5$ dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular	83
Çizelge 6.25.	Bipolar Al-Fe elektrot, $t=10$ dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular	

	uygulanmasıyla elde edilen bulgular	84
Çizelge 6.26.	Monopolar Fe-Fe elektrot, t=1 dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti	90
Çizelge 6.27.	Monopolar Fe-Fe elektrot, t=3 dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti	90
Çizelge 6.28.	Monopolar Fe-Fe elektrot, t=5 dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti	91
Çizelge 6.29.	Monopolar Fe-Fe elektrot, t=10 dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti	91
Çizelge 6.30.	Monopolar Al-Al elektrot, t=1 dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti	92
Çizelge 6.31.	Monopolar Al-Al elektrot, t=3 dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti	92
Çizelge 6.32.	Monopolar Al-Al elektrot, t=5 dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti	93
Çizelge 6.33.	Monopolar Al-Al elektrot, t=10 dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti	93
Çizelge 6.34.	Monopolar Al-Fe elektrot, t=1 dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti	94
Çizelge 6.35.	Monopolar Al-Fe elektrot, t=3 dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti	94
Çizelge 6.36.	Monopolar Al-Fe elektrot, t=5 dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti	95
Çizelge 6.37.	Monopolar Al-Fe elektrot, t=10 dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti	95
Çizelge 6.38.	Bipolar Fe-Fe elektrot, t=1 dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti	96
Çizelge 6.39.	Bipolar Fe-Fe elektrot, t=3 dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti	96
Çizelge 6.40.	Bipolar Fe-Fe elektrot, t=5 dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti	96
Çizelge 6.41.	Bipolar Fe-Fe elektrot, t=10 dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti	96

Çizelge 6.42.	Bipolar Al-Al elektrot, t=1 dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti	97
Çizelge 6.43.	Bipolar Al-Al elektrot, t=3 dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti	97
Çizelge 6.44.	Bipolar Al-Al elektrot, t=5 dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti	97
Çizelge 6.45.	Bipolar Al-Al elektrot, t=10 dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti	97
Çizelge 6.46.	Bipolar Al-Fe elektrot, t=1 dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti	98
Çizelge 6.47.	Bipolar Al-Fe elektrot, t=3 dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti	98
Çizelge 6.48.	Bipolar Al-Fe elektrot, t=5 dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti	98
Çizelge 6.49.	Bipolar Al-Fe elektrot, t=10 dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti	98
Çizelge 6.50.	Monopolar Fe-Fe elektrot, t=1 dk; tüketilen elektrot kütlesi ve elektot tüketim maliyeti	103
Çizelge 6.51.	Monopolar Fe-Fe elektrot, t=3 dk; tüketilen elektrot kütlesi ve elektot tüketim maliyeti	103
Çizelge 6.52.	Monopolar Fe-Fe elektrot, t=5 dk; tüketilen elektrot kütlesi ve elektot tüketim maliyeti	104
Çizelge 6.53.	Monopolar Fe-Fe elektrot, t=10 dk; tüketilen elektrot kütlesi ve elektot tüketim maliyeti	104
Çizelge 6.54.	Monopolar Al-Al elektrot, t=1 dk; tüketilen elektrot kütlesi ve elektot tüketim maliyeti	105
Çizelge 6.55.	Monopolar Al-Al elektrot, t=3 dk; tüketilen elektrot kütlesi ve elektot tüketim maliyeti	105
Çizelge 6.56.	Monopolar Al-Al elektrot, t=5 dk; tüketilen elektrot kütlesi ve elektot tüketim maliyeti	106
Çizelge 6.57.	Monopolar Al-Al elektrot, t=10 dk; tüketilen elektrot kütlesi ve elektot tüketim maliyeti	106
Çizelge 6.58.	Monopolar Al-Fe elektrot, t=1 dk; tüketilen elektrot kütlesi	

	ve elektot tüketim maliyeti	107
Çizelge 6.59.	Monopolar Al-Fe elektrot, t=3 dk; tüketilen elektrot kütlesi ve elektot tüketim maliyeti	107
Çizelge 6.60.	Monopolar Al-Fe elektrot, t=5 dk; tüketilen elektrot kütlesi ve elektot tüketim maliyeti	108
Çizelge 6.61.	Monopolar Al-Fe elektrot, t=10 dk; tüketilen elektrot kütlesi ve elektot tüketim maliyeti	108
Çizelge 6.62.	Bipolar Fe-Fe elektrot, t=1 dk; tüketilen elektrot kütlesi ve elektot tüketim maliyeti	109
Çizelge 6.63.	Bipolar Fe-Fe elektrot, t=3 dk; tüketilen elektrot kütlesi ve elektot tüketim maliyeti	109
Çizelge 6.64.	Bipolar Fe-Fe elektrot, t=5 dk; tüketilen elektrot kütlesi ve elektot tüketim maliyeti	109
Çizelge 6.65.	Bipolar Fe-Fe elektrot, t=10 dk; tüketilen elektrot kütlesi ve elektot tüketim maliyeti	109
Çizelge 6.66.	Bipolar Al-Al elektrot, t=1 dk; tüketilen elektrot kütlesi ve elektot tüketim maliyeti	110
Çizelge 6.67.	Bipolar Al-Al elektrot, t=3 dk; tüketilen elektrot kütlesi ve elektot tüketim maliyeti	110
Çizelge 6.68.	Bipolar Al-Al elektrot, t=5 dk; tüketilen elektrot kütlesi ve elektot tüketim maliyeti	110
Çizelge 6.69.	Bipolar Al-Al elektrot, t=10 dk; tüketilen elektrot kütlesi ve elektot tüketim maliyeti	110
Çizelge 6.70.	Bipolar Al-Fe elektrot, t=1 dk; tüketilen elektrot kütlesi ve elektot tüketim maliyeti	111
Çizelge 6.71.	Bipolar Al-Fe elektrot, t=3 dk; tüketilen elektrot kütlesi ve elektot tüketim maliyeti	111
Çizelge 6.72.	Bipolar Al-Fe elektrot, t=5 dk; tüketilen elektrot kütlesi ve elektot tüketim maliyeti	111
Çizelge 6.73.	Bipolar Al-Fe elektrot, t=10 dk; tüketilen elektrot kütlesi ve elektot tüketim maliyeti	111
Çizelge 6.74.	Monopolar Fe-Fe elektrot, t=1 dk; toplam maliyet	113
Çizelge 6.75.	Monopolar Fe-Fe elektrot, t=3 dk; toplam maliyet	113

Çizelge 6.76.	Monopolar Fe-Fe elektrot, t=5 dk; toplam maliyet	114
Çizelge 6.77.	Monopolar Fe-Fe elektrot, t=10 dk; toplam maliyet	114
Çizelge 6.78.	Monopolar Al-Al elektrot, t=1 dk; toplam maliyet	115
Çizelge 6.79.	Monopolar Al-Al elektrot, t=3 dk; toplam maliyet	115
Çizelge 6.80.	Monopolar Al-Al elektrot, t=5 dk; toplam maliyet	116
Çizelge 6.81.	Monopolar Al-Al elektrot, t=10 dk; toplam maliyet	116
Çizelge 6.82.	Monopolar Al-Fe elektrot, t=1 dk; toplam maliyet	117
Çizelge 6.83.	Monopolar Al-Fe elektrot, t=3 dk; toplam maliyet	117
Çizelge 6.84.	Monopolar Al-Fe elektrot, t=5 dk; toplam maliyet	118
Çizelge 6.85.	Monopolar Al-Fe elektrot, t=10 dk; toplam maliyet	118
Çizelge 6.86.	Bipolar Fe-Fe elektrot, t=1 dk; toplam maliyet	119
Çizelge 6.87.	Bipolar Fe-Fe elektrot, t=3 dk; toplam maliyet	119
Çizelge 6.88.	Bipolar Fe-Fe elektrot, t=5 dk; toplam maliyet	119
Çizelge 6.89.	Bipolar Fe-Fe elektrot, t=10 dk; toplam maliyet	119
Çizelge 6.90.	Bipolar Al-Al elektrot, t=1 dk; toplam maliyet	120
Çizelge 6.91.	Bipolar Al-Al elektrot, t=3 dk; toplam maliyet	120
Çizelge 6.92.	Bipolar Al-Al elektrot, t=5 dk; toplam maliyet	120
Çizelge 6.93.	Bipolar Al-Al elektrot, t=10 dk; toplam maliyet	120
Çizelge 6.94.	Bipolar Al-Fe elektrot, t=1 dk; toplam maliyet	121
Çizelge 6.95.	Bipolar Al-Fe elektrot, t=3 dk; toplam maliyet	121
Çizelge 6.96.	Bipolar Al-Fe elektrot, t=5 dk; toplam maliyet	121
Çizelge 6.97.	Bipolar Al-Fe elektrot, t=10 dk; toplam maliyet	121
Çizelge 6.98.	Destek elektrolit derişimi deneylerinde kullanılan ham atıksu karakterizasyonu	122
Çizelge 6.99.	Destek elektrolit maliyetleri	123
Çizelge 6.100.	Monopolar Fe-Fe elektrot, destek elektrolit derişimi bulguları	123
Çizelge 6.101.	Monopolar Fe-Fe elektrot, destek elektrolit derişiminin arıtıma etkisi	124
Çizelge 6.102.	Monopolar Fe-Fe elektrot, destek elektrolit derişiminin enerji tüketimi ve maliyetine etkisi	124
Çizelge 6.103.	Monopolar Fe-Fe elektrot, destek elektrolit derişimi maliyetleri ve enerji maliyeti tasarruflarının karşılaştırması ...	125

Çizelge 6.104.	Monopolar Al-Al elektrot, destek elektrolit derişimi bulguları	125
Çizelge 6.105.	Monopolar Al-Al elektrot, destek elektrolit derişiminin arıtıma etkisi	126
Çizelge 6.106.	Monopolar Al-Al elektrot, destek elektrolit derişiminin enejî tüketimi ve maliyetine etkisi	126
Çizelge 6.107.	Monopolar Al-Al elektrot, destek elektrolit derişimi maliyetleri ve enejî maliyeti tasarruflarının karşılaştırması ...	127
Çizelge 6.108.	Monopolar Al-Fe elektrot, destek elektrolit derişimi bulguları	127
Çizelge 6.109.	Monopolar Al-Fe elektrot, destek elektrolit derişiminin arıtıma etkisi	128
Çizelge 6.110.	Monopolar Al-Fe elektrot, destek elektrolit derişiminin enejî tüketimi ve maliyetine etkisi	128
Çizelge 6.111.	Monopolar Al-Fe elektrot, destek elektrolit derişimi maliyetleri ve enejî maliyeti tasarruflarının karşılaştırması ...	129
Çizelge 6.112.	Bipolar Fe-Fe elektrot, destek elektrolit derişimi bulguları ...	129
Çizelge 6.113.	Bipolar Fe-Fe elektrot, destek elektrolit derişiminin arıtıma etkisi	130
Çizelge 6.114.	Bipolar Fe-Fe elektrot, destek elektrolit derişiminin enejî tüketimi ve maliyetine etkisi	130
Çizelge 6.115.	Bipolar Fe-Fe elektrot, destek elektrolit derişimi maliyetleri ve enejî maliyeti tasarruflarının karşılaştırması	131
Çizelge 6.116.	Bipolar Al-Al elektrot, destek elektrolit derişimi bulguları ...	131
Çizelge 6.117.	Bipolar Al-Al elektrot, destek elektrolit derişiminin arıtıma etkisi	132
Çizelge 6.118.	Bipolar Al-Al elektrot, destek elektrolit derişiminin enejî tüketimi ve maliyetine etkisi	132
Çizelge 6.119.	Bipolar Al-Al elektrot, destek elektrolit derişimi maliyetleri ve enejî maliyeti tasarruflarının karşılaştırması	133
Çizelge 6.120.	Bipolar Al-Fe elektrot, destek elektrolit derişimi bulguları ...	133
Çizelge 6.121.	Bipolar Al-Fe elektrot, destek elektrolit derişiminin arıtıma etkisi	134

Çizelge 6.122.	Bipolar Al-Fe elektrot, destek elektrolit derişiminin enejji tüketimi ve maliyetine etkisi	134
Çizelge 6.123.	Bipolar Al-Fe elektrot, destek elektrolit derişimi maliyetleri ve enejji maliyeti tasarruflarının karşılaştırması	135
Çizelge 6.124.	Başlangıç pH'ının değiştirilmesi deneylerinde kullanılan ham atıksu karakterizasyonu	136
Çizelge 6.125.	Başlangıç pH değiştirme maliyetleri	136
Çizelge 6.126.	Monopolar Fe-Fe elektrot, başlangıç pH'ı deney bulguları ...	137
Çizelge 6.127.	Monopolar Fe-Fe elektrot, başlangıç pH'ının arıtıma etkisi ..	137
Çizelge 6.128.	Monopolar Fe-Fe elektrot, başlangıç pH'ının enerji tüketimi ve maliyetine etkisi	138
Çizelge 6.129.	Monopolar Fe-Fe elektrot, başlangıç pH'ını düşürme maliyetleri ve enerji maliyeti tasarruflarının karşılaştırması ..	138
Çizelge 6.130.	Monopolar Al-Al elektrot, başlangıç pH'ı deney bulguları ...	139
Çizelge 6.131.	Monopolar Al-Al elektrot, başlangıç pH'ının arıtıma etkisi ..	139
Çizelge 6.132.	Monopolar Al-Al elektrot, başlangıç pH'ının enerji tüketimi ve maliyetine etkisi	140
Çizelge 6.133.	Monopolar Al-Al elektrot, başlangıç pH'ını düşürme maliyetleri ve enerji maliyeti tasarruflarının karşılaştırması ..	140
Çizelge 6.134.	Monopolar Al-Fe elektrot, başlangıç pH'ı deney bulguları ...	141
Çizelge 6.135.	Monopolar Al-Fe elektrot, başlangıç pH'ının arıtıma etkisi ...	141
Çizelge 6.136.	Monopolar Al-Fe elektrot, başlangıç pH'ının enerji tüketimi ve maliyetine etkisi	142
Çizelge 6.137.	Monopolar Al-Fe elektrot, başlangıç pH'ını düşürme maliyetleri ve enerji maliyeti tasarruflarının karşılaştırması ..	142
Çizelge 6.138.	Bipolar Fe-Fe elektrot, başlangıç pH'ı deney bulguları	143
Çizelge 6.139.	Bipolar Fe-Fe elektrot, başlangıç pH'ının arıtıma etkisi	143
Çizelge 6.140.	Bipolar Fe-Fe elektrot, başlangıç pH'ının enerji tüketimi ve maliyetine etkisi	144
Çizelge 6.141.	Bipolar Fe-Fe elektrot, başlangıç pH'ını düşürme maliyetleri ve enerji maliyeti tasarruflarının karşılaştırması	144
Çizelge 6.142.	Bipolar Al-Al elektrot, başlangıç pH'ı deney bulguları	145
Çizelge 6.143.	Bipolar Al-Al elektrot, başlangıç pH'ının arıtıma etkisi	145

Çizelge 6.144.	Bipolar Al-Al elektrot, başlangıç pH'nın enerji tüketimi ve maliyetine etkisi	146
Çizelge 6.145.	Bipolar Al-Al elektrot, başlangıç pH'ını düşürme maliyetleri ve enerji maliyeti tasarruflarının karşılaştırması	146
Çizelge 6.146.	Bipolar Al-Fe elektrot, başlangıç pH'ı deney bulguları	147
Çizelge 6.147.	Bipolar Al-Fe elektrot, başlangıç pH'nın arıtıma etkisi	147
Çizelge 6.148.	Bipolar Al-Fe elektrot, başlangıç pH'nın enerji tüketimi ve maliyetine etkisi	148
Çizelge 6.149.	Bipolar Al-Fe elektrot, başlangıç pH'ını düşürme maliyetleri ve enerji maliyeti tasarruflarının karşılaştırması	148
Çizelge 6.150.	Çökeltme süresi deneylerinde farklı elektrot tipi ve geometrilerinin gerilimleri ve çizelge numaraları	149
Çizelge 6.151.	Monopolar Fe-Fe elektrot, çökeltme süresi bulguları	150
Çizelge 6.152.	Monopolar Al-Al elektrot, çökeltme süresi bulguları	150
Çizelge 6.153.	Monopolar Al-Fe elektrot, çökeltme süresi bulguları	151
Çizelge 6.154.	Bipolar Fe-Fe elektrot, çökeltme süresi bulguları	151
Çizelge 6.155.	Bipolar Al-Al elektrot, çökeltme süresi bulguları	152
Çizelge 6.156.	Bipolar Al-Fe elektrot, çökeltme süresi bulguları	152
Çizelge 6.157.	Ham atıksu doğal çökeltme süresi bulguları	153
Çizelge 6.158.	Farklı elektrotlarla arıtılmış atıksuyun ham atıksuyla çökme sürelerine göre bulanıklık ve AKM karşılaştırmalarını gösteren şekillerin numaraları	154
Çizelge 6.159.	Yağ gres analizi	161
Çizelge 6.160.	Renk analizi	162
Çizelge 6.161.	KOİ analizi	162
Çizelge 6.162.	Zeta potansiyeti analizi	163
Çizelge 6.163.	Çamur tartımı değerleri	163

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Türkiye'nin mermer rezervleri	6
Şekil 2.2. Mermer işleme tesisi iş akım şeması (Atık, atıksu, temiz su döngüleri)	10
Şekil 2.3. Mermer işleme tesisi atıksularının fiziko-kimyasal arıtma yöntemi ile arıtılması	14
Şekil 2.4. Zeta potansiyeli, negatif yüklü tanecik ve durgun yük alanı	15
Şekil 3.1. Doğrudan ve dolaylı elektrooksidasyon	18
Şekil 3.2. Monopolar ve bipolar bağlantı şekilleri	21
Şekil 5.1. Güç kaynağı	24
Şekil 5.2. Elektrot plakaları (Soldan sağa sırasıyla; Demir elektrot, Alüminyum elektrot)	25
Şekil 5.3. Elektrot demetleri (Soldan sağasıra sırasıyla; M Fe-Fe, M Al-Al, M Al-Fe, B Fe-Fe, B Al-Al, B Al-Fe elektrot)	25
Şekil 5.4. Manyatik karıştırıcı	26
Şekil 5.5. Türbidimetre	27
Şekil 5.6. Süzme seti	27
Şekil 5.7. Etün (solda), hassas terazi (sağda)	28
Şekil 5.8. pH metre	28
Şekil 5.9. Termoreaktör (solda), Santrifüj cihazı (sağda)	29
Şekil 5.10. Zeta potansiyeli cihazı	29
Şekil 5.11. Yağ ve gres düzeneği ve su banyosu	30
Şekil 5.12. Renk tayini, Spektrofotometre	31
Şekil 5.13. Toplam Cr analizi, ICP cihazı	31
Şekil 5.14. Elektrot tipleri ve geometrileri	33
Şekil 5.15. Deneyleerde; elektrot tipi ve geometrisi, akım yoğunluğu, arıtma süresi kombinasyonları	34
Şekil 5.16. Elektrokoagülasyon deney düzeneği.....	35
Şekil 6.1. Monopolar Fe-Fe elektrot, t=1 dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi	43
Şekil 6.2. Monopolar Fe-Fe elektrot, t=1 dk; akım yoğunluğu, AKM	

	giderim ilişkisi	43
Şekil 6.3.	Monopolar Fe-Fe elektrot, t=3 dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi	45
Şekil 6.4.	Monopolar Fe-Fe elektrot, t=3 dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi	45
Şekil 6.5.	Monopolar Fe-Fe elektrot, t=5 dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi	47
Şekil 6.6.	Monopolar Fe-Fe elektrot, t=5 dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi	47
Şekil 6.7.	Monopolar Fe-Fe elektrot, t=10 dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi	49
Şekil 6.8.	Monopolar Fe-Fe elektrot, t=10 dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi	49
Şekil 6.9.	Monopolar Al-Al elektrot, t=1 dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi	51
Şekil 6.10.	Monopolar Al-Al elektrot, t=1 dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi	51
Şekil 6.11.	Monopolar Al-Al elektrot, t=3 dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi	53
Şekil 6.12.	Monopolar Al-Al elektrot, t=3 dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi	53
Şekil 6.13.	Monopolar Al-Al elektrot, t=5 dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi	55
Şekil 6.14.	Monopolar Al-Al elektrot, t=5 dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi	55
Şekil 6.15.	Monopolar Al-Al elektrot, t=10 dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi	57
Şekil 6.16.	Monopolar Al-Al elektrot, t=10 dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi	57
Şekil 6.17.	Monopolar Al-Fe elektrot, t=1 dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi	59
Şekil 6.18.	Monopolar Al-Fe elektrot, t=1 dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi	59

Şekil 6.19.	Monopolar Al-Fe elektrot, $t=3$ dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi	61
Şekil 6.20.	Monopolar Al-Fe elektrot, $t=3$ dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi	61
Şekil 6.21.	Monopolar Al-Fe elektrot, $t=5$ dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi	63
Şekil 6.22.	Monopolar Al-Fe elektrot, $t=5$ dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi	63
Şekil 6.23.	Monopolar Al-Fe elektrot, $t=10$ dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi	65
Şekil 6.24.	Monopolar Al-Fe elektrot, $t=10$ dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi	65
Şekil 6.25.	Bipolar Fe-Fe elektrot, $t=1$ dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi	67
Şekil 6.26.	Bipolar Fe-Fe elektrot, $t=1$ dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi	67
Şekil 6.27.	Bipolar Fe-Fe elektrot, $t=3$ dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi	68
Şekil 6.28.	Bipolar Fe-Fe elektrot, $t=3$ dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi	69
Şekil 6.29.	Bipolar Fe-Fe elektrot, $t=5$ dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi	70
Şekil 6.30.	Bipolar Fe-Fe elektrot, $t=5$ dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi	70
Şekil 6.31.	Bipolar Fe-Fe elektrot, $t=10$ dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi	71
Şekil 6.32.	Bipolar Fe-Fe elektrot, $t=10$ dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi	72
Şekil 6.33.	Bipolar Al-Al elektrot, $t=1$ dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi	73
Şekil 6.34.	Bipolar Al-Al elektrot, $t=1$ dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi	73
Şekil 6.35.	Bipolar Al-Al elektrot, $t=3$ dk; akım yoğunluğu, bulanıklık	

	giderim ilişkisi	74
Şekil 6.36.	Bipolar Al-Al elektrot, t=3 dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi	75
Şekil 6.37.	Bipolar Al-Al elektrot, t=5 dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi	76
Şekil 6.38.	Bipolar Al-Al elektrot, t=5 dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi	76
Şekil 6.39.	Bipolar Al-Al elektrot, t=10 dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi	77
Şekil 6.40.	Bipolar Al-Al elektrot, t=10 dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi	78
Şekil 6.41.	Bipolar Al-Fe elektrot, t=1 dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi	79
Şekil 6.42.	Bipolar Al-Fe elektrot, t=1 dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi	79
Şekil 6.43.	Bipolar Al-Fe elektrot, t=3 dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi	80
Şekil 6.44.	Bipolar Al-Fe elektrot, t=3 dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi	81
Şekil 6.45.	Bipolar Al-Fe elektrot, t=5 dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi	82
Şekil 6.46.	Bipolar Al-AlFe elektrot, t=5 dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi	82
Şekil 6.47.	Bipolar Al-Fe elektrot, t=10 dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi	83
Şekil 6.48.	Bipolar Al-Fe elektrot, t=10 dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi	84
Şekil 6.49.	Monopolar Fe-Fe elektrot, 1 mA/cm ² akım yoğunluğu; arıtım süresi AKM giderim verimi ilişkisi	85
Şekil 6.50.	Monopolar Al-Al elektrot, 1 mA/cm ² akım yoğunluğu; arıtım süresi AKM giderim verimi ilişkisi	86
Şekil 6.51.	Monopolar Al-Fe elektrot, 1 mA/cm ² akım yoğunluğu; arıtım süresi AKM giderim verimi ilişkisi	86

Şekil 6.52.	Bipolar Fe-Fe elektrot, 1 mA/cm ² akım yoğunluğu; arıtım süresi AKM giderim verimi ilişkisi	87
Şekil 6.53.	Bipolar Al-Al elektrot, 1 mA/cm ² akım yoğunluğu; arıtım süresi AKM giderim verimi ilişkisi	87
Şekil 6.54.	Bipolar Al-Fe elektrot, 1 mA/cm ² akım yoğunluğu; arıtım süresi AKM giderim verimi ilişkisi	88
Şekil 6.55.	Monopolar Fe-Fe elektrot, 1 dk, 3 dk, 5 dk, 10 dk arıtma süreleri; akım yoğunluğu enerji tüketimi ilişkisi	99
Şekil 6.56.	Monopolar Al-Al elektrot, 1 dk, 3 dk, 5 dk, 10 dk arıtma süreleri; akım yoğunluğu enerji tüketimi ilişkisi	99
Şekil 6.57.	Monopolar Al-Fe elektrot, 1 dk, 3 dk, 5 dk, 10 dk arıtma süreleri; akım yoğunluğu enerji tüketimi ilişkisi	100
Şekil 6.58.	Bipolar Fe-Fe elektrot, 1 dk, 3 dk, 5 dk, 10 dk arıtma süreleri; akım yoğunluğu enerji tüketimi ilişkisi	100
Şekil 6.59.	Bipolar Al-Al elektrot, 1 dk, 3 dk, 5 dk, 10 dk arıtma süreleri; akım yoğunluğu enerji tüketimi ilişkisi	101
Şekil 6.60.	Bipolar Al-Fe elektrot, 1 dk, 3 dk, 5 dk, 10 dk arıtma süreleri; akım yoğunluğu enerji tüketimi ilişkisi	101
Şekil 6.61	Monopolar Fe-Fe elektrot ile arıtılan atıksu ve ham atıksuyun çökme zamanına göre bulanıklık karşılaştırması	155
Şekil 6.62	Monopolar Al-Al elektrot ile arıtılan atıksu ve ham atıksuyun çökme zamanına göre bulanıklık karşılaştırması	155
Şekil 6.63	Monopolar Al-Fe elektrot ile arıtılan atıksu ve ham atıksuyun çökme zamanına göre bulanıklık karşılaştırması	156
Şekil 6.64	Bipolar Fe-Fe elektrot ile arıtılan atıksu ve ham atıksuyun çökme zamanına göre bulanıklık karşılaştırması	156
Şekil 6.65	Bipolar Al-Al elektrot ile arıtılan atıksu ve ham atıksuyun çökme zamanına göre bulanıklık karşılaştırması	157
Şekil 6.66	Bipolar Al-Fe elektrot ile arıtılan atıksu ve ham atıksuyun çökme zamanına göre bulanıklık karşılaştırması	157
Şekil 6.67	Monopolar Fe-Fe elektrot ile arıtılan atıksu ve ham atıksuyun çökme zamanına göre AKM karşılaştırması	158
Şekil 6.68	Monopolar Al-Al elektrot ile arıtılan atıksu ve ham atıksuyun	

	çökme zamanına göre AKM karşılaştırması	158
Şekil 6.69	Monopolar Al-Fe elektrot ile arıtılan atıksu ve ham atıksuyun çökme zamanına göre AKM karşılaştırması	159
Şekil 6.70	Bipolar Fe-Fe elektrot ile arıtılan atıksu ve ham atıksuyun çökme zamanına göre AKM karşılaştırması	159
Şekil 6.71	Bipolar Al-Al elektrot ile arıtılan atıksu ve ham atıksuyun çökme zamanına göre AKM karşılaştırması	160
Şekil 6.72	Bipolar Al-Fe elektrot ile arıtılan atıksu ve ham atıksuyun çökme zamanına göre AKM karşılaştırması	160

KISALTMALAR DİZİNİ

SKKY	: Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği
Fe	: Demir
Al	: Alüminyum
AKM	: Askıda Katı Madde
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
M	: Monopolar
B	: Bipolar
A	: Amper
W	: Watt
kWh	: Kilo Watt Saat
kr.	: kuruş
μ S	: Mikro Siemens
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu
mM	: Mili Molar
Na_2SO_4	: Sodyum Sülfat
Pt- Co	: Platinyum Kobalt
TS	: Türk Standardı
ISO	: Uluslararası Standart Teşkilatı
DAS	: Demir Amonyum Sülfat
dk	: Dakika
sn	: Saniye
sa	: Saat
NTU	: Nefelometrik Bulanıklık Birimi
t	: Süre

1. GİRİŞ

Türkiye, mermer rezervleri bakımından, küresel çaplı mermer sektöründe önemli bir yere sahiptir. Mermerler; dayanıklı olmaları, estetik özellikleri, üretim ve işleme kolaylıkları sebebiyle geniş bir yelpazede kullanım alanı bulmaktadır. Oldukça yaygın olarak kullanılan ve geniş bir endüstri oluşturmuş bu sektör, işletme ihtiyaçları doğrultusunda yüksek miktarda temiz su gereksinimi duymaktadır. Temiz su, mermer işleme tesislerinde makineleri soğutma amacıyla kullanıldığı gibi, makineleri, kesim sırasında ortaya çıkan mermer partiküllerinden korumakta da önemli bir rol oynamaktadır. Mermer işleme tesislerinde, işletme kapasitesiyle orantılı olarak ortaya çıkan günlük temiz su ihtiyacı, su döngüsü konusunda ekonomik yollar geliştirilmesini gerekli kılmıştır. Bu yüzden mermer işleme tesisleri, atıksularını kendi bünyelerinde arıtarak su geri kazanımı sağlamayı tercih etmektedir. Bu işlem aynı zamanda atıksuya karışan mermer tozlarının geri kazanımına da olanak sağlamaktadır. Mermer işleme tesislerinde atıksuya dönüşen suların büyük kısmı geri kazanıma dahil olsa da bir kısmı atıksu şebekesine deşarj edilmektedir. Mermer atıksuları içerisindeki partiküllerin yüksek çökelme meyilleri, yağ gres ve benzeri kirletici parametrelerin yüksek oranda olma olasılıkları, mermer atıksularını çevre açısından tehlikeli hale getirmektedir. Bu yüzden mermer atıksularının sağlanması gereken bir takım deşarj standartları bulunmaktadır.

Bu çalışmada; mermerlerin yapısı ve özellikleri, mermer endüstrisinin Türkiye ve dünyadaki yeri, mermer işleme endüstrisi üretim sistemi, mermer işleme endüstrisi atıkları, mermer işleme endüstrisi atıksuları, mermer işleme atıksularının arıtımında mevcut yöntemler ve mermer işleme endüstrisi atıksularının deşarj kriterleri incelenmiş ve mermer endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtılması konusunda deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Elektrokoagülasyon, elektrokimyasal arıtım yöntemlerinden bir tanesidir. Elektrokimyasal arıtım yöntemleri, elektrokimyasal reaksiyonlardan faydalanılarak gerçekleştirilen ileri arıtım prosesleridir. Elektrokimyasal arıtım yöntemleri; çok yönlü ve çevreyle uyumlu olması dolayısıyla son yıllarda atıksu arıtımlarında dikkat çekmektedir.

Mermer endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyonla arıtılmasını konu alan laboratuvar ölçekli deneylerde, farklı elektrot tipleri ve geometrilerinin, farklı akım yoğunluklarının, arıtma sürelerinin, destek elektrolit derişiminin ve başlangıç pH'ının

arıtım üzerindeki etkileri; AKM giderimi, bulanıklık giderimi, pH, sıcaklık, elektriksel iletkenlik gibi parametreler üzerinden incelenmiş ve enerji tüketimi, enerji maliyeti, elektrot maliyeti ve toplam işletme maliyeti hesaplamaları yapılmıştır.

Mermer endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyonla arıtılması deneylerinde; Monopolar Fe-Fe (Demir), Monopolar Al-Al (Alüminyum), Monopolar Al-Fe (Alüminyum-Demir hibrit), Bipolar Fe-Fe (Demir), Bipolar Al-Al (Alüminyum), Bipolar Al-Fe (Alüminyum-Demir hibrit) elektrot tipleri ve geometrileri kullanılmış ve bu elektrotlardan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Tüm elektrotlarla yapılan deneylerde parametrelerin etkisi ve maliyeti ortaya konduktan sonra, arıtım yönünden ve ekonomik yönden ideal koşullar belirlenmiş ve bu koşullarda yapılan elektrokoagülasyon çalışmaları sonucu mermer atıksularının; çökelme süreleri, yağ gres değerleri, zeta potansiyelleri, renk değerleri, KOİ değerleri, çamur miktarları gibi parametreleri de analiz edilmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda elektrokoagülasyonla arıtma yönteminin mermer atıksularının arıtılması için kullanımında; zaman ve para yönünden tasarruflu olduğu ve mevcut yöntemlere kıyasla iyi bir seçenek olduğu ortaya çıkmıştır. Elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtılan mermer atıksularının tüm deşarj kriterlerini sağladığı gözler önüne serilmiştir.

2. MERMER ENDÜSTRİSİ

2.1. Mermer Endüstrisi Genel Bilgileri

Mermerler, kimyasal açıdan kalsiyum karbonat (CaCO_3) oranı yüksek olan (%90-95) kayaların ısı, basınç ve zaman etkisi altında başkalaşım geçirerek kristalize bir yapıya sahip olması sonucunda ortaya çıkan bileşimlerdir [1, 2]. Ancak madde içeriğine ve cinsine bakılmaksızın; kimyasal değişime uğramadan işlenebilen, standartlara uygun büyüklüklerde bloklar olarak çıkarılabilen, kesim, parlatma, cila gibi işlemlere uygun, dekoratif kaplama taşına dönüşmeye müsait olan her tür taş ticari açıdan mermer olarak kabul edilmektedir [3]. Bu nedenle, mermerler aslında doğal taşların bir alt grubu olsa da, mermerler ve doğal taşlar ticari açıdan aynı anlamda kullanılmakta ve birçok alt sınıfa ayrılmaktadır [1]. Çizelge 2.1’de mermerlerin çeşitli şekillerde sınıflandırılması gösterilmiştir [2].

Mermerlerin yapısında, CaCO_3 dışında; MgCO_3 (Magnezyum karbonat), silis, silikat, mika vb. mineraller ve çeşitli metal oksitler bulunabilmektedir. Mermerin yapısında bulunan tüm bu maddeler, mermerin farklı renklerde olmasına olanak sağlamaktadır. Kalsiyum karbonat mermere; beyazımsı-krem rengi bir özellik kazandırırken, diğer maddeler özellikle de metal oksitler; turuncu, pembe, mavi, sarı, siyah gibi renklerde görünüm kazandırmaktadır [4]. Mermerlerin; fiziksel ve mekanik parametrelerini içeren temel standartlar Çizelge 2.2’de verilmiştir [5].

Mermer; dayanıklı olması, estetik özellikleri, üretim ve işleme kolaylıkları sebebiyle tarihi dönemlerden bu yana çeşitli kültürlerin içinde yer alarak birçok alanda kullanılmış ve medeniyetlerin gelişimine katkıda bulunmuştur. Günümüzde de mermerin geniş bir yelpazede kullanım alanı bulması sektörün önemini gözler önüne sermektedir. Mermerler; inşaat sektöründe iç ve dış cephelerin kaplanmasında, zemin döşemelerinde, basamak yapımında, taşıma sütunlarında, mezar taşı yapımında, heykelticilikte, dekoratif eşya yapımında, hediyelik eşyalarda, mutfaklarda, banyolarda ve mobilya sektörü ürünlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [1].

Çizelge 2.1. Mermerlerin sınıflandırılması

Sınıflandırma Biçimi	Sınıflar
Mineral Bileşim ve Oranlarına Göre	Mermer: %95 Kalsit (CaCO ₃) içerir. Masif yapıda taneli dokuya sahiptir. Kuvars ve mika gibi tali mineraller içerir.
	Kalkşist: %60-70 Kalsit içerir. Şisti yapıda ve yönlü dokuya sahiptir. Klorit, epidot, mika ve lepidolit gibi tali mineraller içerir.
	Spolen: %80 Kalsit içerir. Şisti yapıda ve yönlü dokuya sahiptir. Flonapit, tremotil, diopsit, plajiolklas ve gröna gibi tali mineraller içerir.
	Mermer-Skarn: %80-90 Kalsit içerir. Masif yapıda ve taneli dokuya sahiptir. Epidot, diopsit, gröna, olivin, plajiolklas gibi tali mineraller içerir.
Mineral Tane Boyutlarına Göre	İnce taneli mermerler: Tane boyutu 1mm'den küçük mermerlerdir.
	Orta taneli mermerler: Tane boyutu 1-5 mm arasında olan mermerlerdir.
	İri taneli mermerler: Tane boyutu 5 mm'den büyük olan mermerlerdir.
Yapı ve Dokularına Göre	Masif mermerler: Kompakt görümlü, ince ve iri tanelidir.
	Laminal mermerler: Renkli şerit görünümünde, ince tanelidir.
	Şisti mermerler: Yapraklı yapıda ve önemli miktarda mika içermektedir.
	Breşik mermerler: Kırıklanmış ve ikincil minerallerle dolgulanmış mermerlerdir.
Mineralojik Oluşumuna Göre	Sedimanter mermerler (Tortul mermerler): Bu tip mermerler, çeşitli kayaların parçalanıp taşınarak uygun bir ortamda birikip çimentolanması sonucu oluşan; konglomera, breş, puding ve suda erimiş halde bulunan kalsiyum ve magnezyum karbonatın, kimyasal ve fiziksel şartlarının değişmesi sonucunda oluşan; dolomit, alçıtaşı, kalker, traverten ve oniks mermerlerinden oluşurlar.
	Magmatik mermerler (Püskürük mermerler): Yer kabuğunun altındaki magmanın yeryüzüne çıkması veya yer kabuğuna sokulması sonucu oluşan; granit, siyenit, serpantin, diyabaz, bazalt, andezit, gabro gibi kayalardır.
	Metamorfik mermerler (Başkalaşmış mermerler): Kayaların çeşitli fiziksel ve kimyasal şartlar altında minerallerinin değişime uğraması sonucu oluşan kayalardır. Hakiki mermerler, gnays, şist, kuvarsit gibi kayalardır.
Ekonomik Şartlara Göre	Normal mermerler: Mermer, dolomit, konglomera gibi
	Sert mermerler: Granit, serpantin, diyabaz gibi
	Traverten ve oniks mermerler
Ticari Pazara ve Renge Göre	Bu sınıflandırma şeklinde mermer bulunduğu yerleşim yerine ve mermerin rengine göre sınıflandırılır. (Afyon Şeker, Gölpaazarı Bej, Marmara Beyazı gibi)

Çizelge 2.2. Mermerlerin fiziksel ve mekanik özellikleri

Parametre	Birim	Değer/Durum
Plaka Verme Durumu		İyi
Kenar-Köşe Kesilmesi		İyi
Cila Alma Durumu		İyi
Sertlik	(Mohs)	4
Yoğunluk	(g/cm ³)	2,71
Birim Hacim Ağırlık	(g/cm ³)	2,65
Atmosfer Basıncında Su Emme (TS EN 13755)	Kütlece (%)	-
	Hacimce (%)	0,82
Kaynar Suda Su Emme	Kütlece (%)	0,70
	Hacimce (%)	1,90
Basınç Direnci (TS EN 1926)	(Kgf/cm ²)(MPa)	128,82
Don Sonrası Basınç Direnci	(Kgf/cm ²)(MPa)	152,65
Don Kaybı	(%)	0,42
Darbe Direnci	(Kgf/cm ²)(MPa)	17,60
Eğilme Direnci	(Kgf/cm ²)(MPa)	7,00
Görünür Porozite	(%)	2,20
Doluluk Oranı	(%)	97,51
Gözeneklilik Derecesi	(%)	2,49
Ortalama Aşınma Direnci	(cm ³ /50 cm ²)	11,93

Türkiye, mermer rezervleri bakımından zengin bir ülke olarak kabul edilmektedir. Türkiye'nin, 5,1 milyar m³'lük toplam mermer rezervi sayesinde, tahmini 15 milyar m³ olan dünyadaki potansiyel mermer rezervlerinin, yaklaşık %33'üne sahip olduğu düşünülmektedir [6]. Türkiye'nin mermer kaynaklarına ilişkin sayısal veriler Çizelge 2.3'de verilmiştir [7].

Çizelge 2.3. Türkiye'nin Mermer Kaynakları

Kaynak	m ³	ton
Bilinen Kaynaklar	589x10 ⁶	1590x10 ⁶
Toplam Potansiyel	5161x10 ⁶	13934x10 ⁶

Türkiye’de mermer işleme ruhsatlarının bölgelerdeki dağılım oranı; %26 Marmara Bölgesi, %32 Ege Bölgesi, %22 İç Anadolu Bölgesi, %9 Akdeniz Bölgesi, %7 Karadeniz Bölgesi, %3 Doğu Anadolu Bölgesi ve %1 Güneydoğu Anadolu Bölgesidir [6]. Türkiye’de bulunan mermer rezervlerinin harita üzerindeki dağılımı Şekil 2.1’de verilmiştir [5].



Şekil 2.1. Türkiye'nin mermer rezervleri

Türkiye, sahip olduğu kalker içerikli doğal taşların zenginliği sebebiyle, küresel ölçekte doğal taş endüstrisinde önde gelen hammadde tedarikçilerindedir. Ayrıca işlenmiş doğal taş üretiminde de, küresel düzeyde ilk sıralarda konumlanmaktadır. Türkiye’de mermer işleme tesislerinin yıllık toplam plaka üretim kapasitesi yaklaşık 6,5 milyon m² civarındadır. Ancak henüz ülkenin doğal taş potansiyelinin küçük bir kısmı değerlendirilebilmektedir [7]. Dünyada mermer üretimi konusunda önde gelen ülkeler ve mermer üretim miktarları Çizelge 2.4’de verilmiştir [8]. Türkiye, mermercilik sektörü kapsamında dünya sıralamasında; üretim açısından 7, ihracat açısından 8. sıradadır [8].

Çizelge 2.4. *Dünyada mermer üretiminde önde gelen ülkeler ve üretim miktarları*

Ülke	Mermer Üretimi (Ton)
Çin	11000000
İtalya	8700000
İspanya	4500000
Hindistan	4500000
Brezilya	2000000
Güney Kore	2000000
Türkiye	1660500

Dünyadaki genel mermer rezervi durumu incelenecek olunursa; Alp-Himalaya kuşağında yer alan Portekiz, Yunanistan, İtalya, Pakistan, Türkiye, İran, İspanya gibi ülkelerde; mermer, oniks, kireçtaşı, traverten gibi karbonatlı kayalar yaygın olarak görülmektedir. Magmatik kayaç olarak da adlandırılan serttaş rezervlerine ise Norveç, Ukrayna, Hindistan, Rusya, Brezilya, Finlandiya, Güney Afrika, İspanya, Çin, Pakistan'da sıkça rastlanmaktadır [1]. Kıtalar içerisinde bazı ülkelerin mermer varlıkları Çizelge 2.5'de verilmiştir [1].

Çizelge 2.5. *Kıtalara göre bazı ülkelerin mermer varlıkları*

Kıta	Ülke	Mermer Varlıkları
Avrupa	İspanya	Kireçtaşı, mermer ve zengin açık pembe granit rezervleri
	İtalya	Zengin mermer, granit ve kireçtaşı rezervleri
	Portekiz	Kalker, mermer ve granit yatakları
	Yunanistan	Kalker, mermer ve serpantin yatakları
Asya	Çin	Değişik renk ve desenlerde kireçtaşı, mermer ve magmatik taş rezervleri
	Güney Kore	Değişik renk ve desenlerde kalker ve granit rezervleri
	Hindistan	Değişik renklerde kalker ve mermer, granit, gabro ve diyorit rezervleri
	Kuzey Kore	Değişik renk ve desenlerde kalker ve granit rezervleri
Afrika	Mısır-Sudan	Kalker, granit, siyenit, gabro ve diyorit yatakları
Amerika	Brezilya	Çok geniş granit rezervleri yanında kalker ve oniks
	Meksika	Oniks, traverten ve kalker rezervleri
Okyanusya	Avustralya	Çok farklı türlerde mermer rezervleri ve granit yatakları

2.2. Mermer İşleme Endüstrisi Üretim Sistemi

Mermer endüstrisi ürünleri, temel olarak iki aşamalı bir süreçten geçmektedir. İlk aşama mermer ocaklarındaki blokların üretimini, diğer aşama üretilen blokların mermer işleme fabrikalarında kesilip yontularak çeşitli işlemlere tabi tutulmasını kapsamaktadır [7]. Mermer blokları üretimi, 'Madencilik Sektörü' alt sektörü olan 'Taşocakçılığı ve Diğer Madencilik' kapsamında, 'Kum, Kil ve Taşocakçılığı' sınıfı ürün türleri arasında yer almaktadır [9]. Mermer bloklarının fabrikalarda işlenmesi ise 'İmalat Sektörü' kapsamına alınmaktadır [7].

Mermer işleme fabrikalarında üretim öncelikle iyi hammadde seçimi ile başlamaktadır. Bazı mermer fabrikaları, kendi mermer ocaklarından elde ettikleri mermer bloklarını kullanırken; bazı fabrikalar kendilerine ait olmayan mermer ocaklarından mermer blokları temin etmektedir [10]. Müşterilere arz edilecek nihai ürün kalitesi, işleme sokulacak mermer bloklarının kalitesiyle orantılı olarak değişmektedir [11]. Mermer işleme tesislerinde verimlilik; zamana, enerji tüketimine, makinelerin ve kullanılan teknolojinin üstünlüğüne ve kullanılan ham blokların standart kalitesine bağlı olmaktadır [11]. Kullanılacak ham blok seçimlerinde mermer bloklarının çıkarıldığı ocakların jeolojik yapısı göz önünde tutulmaktadır. Çatlak ve kırık yapıların fazla görüldüğü bir mermer ocağında, büyük boyutlu ve sağlam mermer blokların oranı düşük olmaktadır. Bu yüzden mermer blokları seçiminde, blokların çıkarıldığı mermer ocaklarının jeolojik parametreleri değerlendirilmektedir [11].

Kullanılacak ham bloklar seçildikten sonra, mermer ocaklarından işleme fabrikalarına getirilerek stoklanmaktadır [10]. Ham ürünler mermer işleme tesislerine; düzgün mermer blokları, düzgün olmayan mermer blokları ve blok olmayan iri mermer parçaları olarak üç farklı şekilde gelmektedir. Geometrik açıdan istenilen şekillerde olmayan ham ürünler; sayalama işleminden geçirilerek yüzeyleri düzgünleştirilmekte veya fazla iri blokların boyutları küçültülmektedir [12].

Mermer blokları işlenmeye uygun biçimlere getirildikten sonra, yarı mamul ürünlerin üretimi için sokulacakları kesim hatları seçilmektedir. Hat seçiminde; blok boyutları, blok özellikleri ve piyasa ihtiyaçlarına göre üretilmek istenen ürün göz önüne alınmaktadır [10].

Mermer işleme fabrikaları iki farklı kesim hattı bulundurmaktadır. Bunlardan birisi levha hattıdır. Levha hattı, hattın başında bulunan ana makinenin adı olan 'katrak' hattı olarak da isimlendirilmektedir [10]. Bu hatta şömine, masa vb. ürünlerin yapımına

uygun parçalar üretilmektedir [13]. Diğer hat ise plaka (fayans) hattıdır. Plaka hattı da, hattın başında bulunan ana makinenin adı olan ‘ST’ hattı olarak isimlendirilmektedir [10]. Bu hatta döşeme-yapı malzemesi olmaya uygun parçalar üretilmektedir [13]. Yarı mamul olarak üretilen levha ve plakaların biçimsel özellikleri (farkları) Çizelge 2.6’da verilmiştir [12].

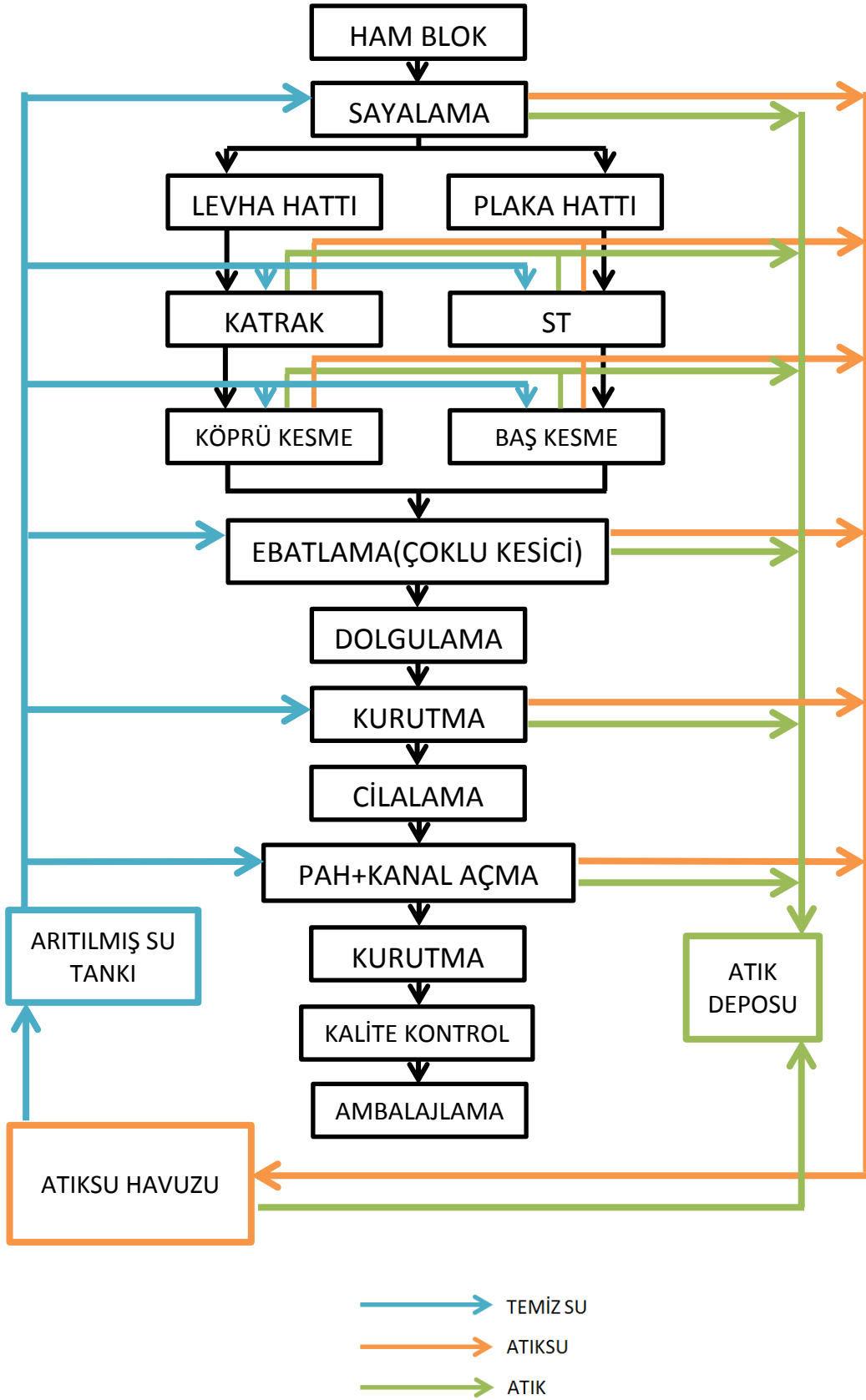
Çizelge 2.6. Levha ve plakaların biçimsel özellikleri

Levha	Plaka
1-4 cm kalınlığında, birbirlerine paralel kesilmiş yüzeyli, genişliği belirli, uzunluğu kesilen blok boyutuna göre değişen (minimum 100-120 cm, ortalama 240-330 cm), yaklaşık olarak dikdörtgen şekilli, yarı mamul mermer ürünüdür. Levha kalınlığı 8 cm’i aştığında kalın levha olarak adlandırılmaktadır.	Levha ile aynı şekle sahip olan fakat genişliği 15-65 cm arasında sınırlı, uzunluğu blok boyu ile sınırlı, genellikle düzensiz blokların kesimiyle elde edilen, levha türevi yarı mamul mermer ürünüdür. Plakalar kesildiğinde fayanslar oluşturulmaktadır.

Mermer blokları; levha veya plaka (fayans) olarak kesildikten sonra, kullanma amacına ve ihtiyaca göre özel kesim boyutlarında ebatlandırılmaktadır (boyutlandırma işlemi). Kesim işlemi sırasında mermer yüzeyinde oluşan pürüzler, daha sonra çeşitli yüzey işleme teknikleri (honlama, kumlama, su jeti, çekiçleme vb.), dolgulama, cilalama ve köşelere pah kırma (kenar çekme) gibi işlemlere sokulmakta ve pürüzsüz nihai ürün oluşturulmaktadır [12, 13]. Mermer işlenmesi sırasında kullanılan temel makineler Çizelge 2.7’de verilmiştir [12, 13, 14]. Mermer kesim-işleme hatlarını , atık, atıksu ve temiz su döngülerini gösteren mermer işleme tesisi iş akım şeması Şekil 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.7. Mermer işlenmesi için kullanılan makineler

Mermer İşleme Makineleri
Katnak makinesi
ST makinesi
Köprü kesme makinesi
Dikey ve yatay yarma makinesi
Pah kırma makinesi
Baş kesme makinesi
Ebatlama makinesi
Cilalama makinesi
Kurutma makinesi



Şekil 2.2. Mermer işleme tesisi iş akım şeması (Atık, atıksu, temiz su döngüleri)

2.3. Mermer İşleme Endüstrisi Atıkları

Mermer işleme tesislerinde, ham blokların nihai ürüne dönüştürülmesi sırasında üretim kaybı olarak oluşan mermer toz ve parçaları, mermer atıkları olarak nitelendirilmektedir [13]. Mermerin işlenmesi sırasında ham bloktan; mermerin yapısından dolayı oluşan doğal kayıplar ve mermerin işlenmesi (kesilmesi) sırasında oluşan kayıplar olarak %30-%60 oranında mermer atığı çıkmaktadır [13, 15]. Mermer atıklarının fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 2.8’de verilmiştir [16].

Çizelge 2.8. Mermer atıklarının fiziksel ve kimyasal özellikleri

Mermer Atıklarının Fiziksel Özellikleri	
Parametre	Durum/Değer
Kütle Yoğunluk (g/cc)	1,3-1,5
Gerçek Yoğunluk (g/cc)	3,6
Partikül Boyut Dağılımı (μm)	45-300 (< 365)
Yüzey Alanı (m^2/gr)	6,7
Nem (%)	8
Mermer Atıklarının Kimyasal Özellikleri	
Parametre	Test Değeri (%)
Tutuşma Kaybı	40,6
MgO	20,6
CaO	29,8
SiO ₂	8,5
Fe ₂ O ₃	1,3
Al ₂ O ₃	1,3
CO ₂	38,6
Na ₂ CO ₃	<0,01
Potas	<0,01

Mermer atıkları; çevresel anlamda ciddi sıkıntılara yol açacak partikül boyut-davranış özellikleri göstermektedir. Toprağa döküldüğünde, partiküllerin küçük boyutlarda olması nedeniyle, toprak gözenekleri tıkanmakta, toprağın su geçirgenlik kapasitesi düşmekte, bitki gelişimi ve toprak verimliliği olumsuz etkilenmektedir. Mermer atıklarının suya karışması durumunda, partiküllerinin yüksek derecede suda çökmeye meyilli olması nedeniyle, alıcı su ortamında ışık geçirgenliği azalmakta, su kalitesi düşmekte, suda birikme yaparak su ekosistemine zarar vermekte, nehir ve göl gibi alıcı ortamlarda biriktiğinde alıcı ortam su depolama kapasitesi azalmaktadır.

Mermer atıklarının kuru hali ise, havada uçuşma yaparak insan sağlığını olumsuz etkilemekte, mermer fabrikalarında bulunan makinelere zarar vermektedir [16].

Mermer atıklarının çevrede neden olduğu tüm bu sorunlara çözüm olarak, mermer atıkları için çeşitli kullanım alanları geliştirilmektedir. Mermer atıklarının yeniden değerlendirildiği kullanım alanlarına örnek olarak; beton agregası olarak kullanımı, sıva katkı malzemesi olarak kullanımı, asit nötrleştirmede kullanımı, dolgu malzemesi olarak kullanımı, suni mermer üretiminde kullanımı, seramik endüstrisinde kullanımı, çimento endüstrisinde kullanımı, boya endüstrisinde kullanımı, asidik tarımsal alanlarda kalsiyumlu gübre olarak kullanımı, soda üretiminde kullanımı, demir yolu zemin malzemesi olarak kullanımı gösterilebilir [15, 16, 17, 18].

Mermer atıkları işleme tesislerinde hem parça olarak hem de toz olarak oluşmaktadır. Parça atıklar tesisin belirli bir noktasında toplanarak, talep üzerine satılırken; makinelerden çıkan toz atıklar ise makine soğutma suları ile atıksu halinde uzaklaştırılmakta ve arıtılmış sudan arıtma çamuru olarak geri kazanılmaktadır. Bu şekilde çevresel problemlerin önüne geçilmekte ve kaynaklardan tasarruf edilmiş olmaktadır [18].

2.4. Mermer İşleme Endüstrisi Atıksuları

Mermer işleme fabrikalarında kesme, cilalama, yüzey işleme gibi proseslerde yüksek miktarda temiz su kullanımı ihtiyacı vardır. Kesme işlemlerinde; hem ortaya çıkan yüksek testere sıcaklıklarını soğutmak için, hem de mermer partiküllerinin kesici ünitelere zarar vermemesi için sistemde sürekli olarak bol miktarda su kullanılmaktadır. Temiz su kullanımı, partikülleri kesme ünitelerinden uzaklaştırarak makinelerin ömrünü korumada büyük rol oynamaktadır [12, 13]. Bazı kesme işlemlerinde mermer çeşidine bağlı olarak aşındırıcı tepkimeler oluşmaktadır. Bu işlemlerden çıkan atıksuların pH'ı düşük olmakta ve buna bağlı olarak metal aksamlar korozyona uğramaktadır. Bu durumun önüne geçebilmek için suya kireç ilave edilmektedir [12].

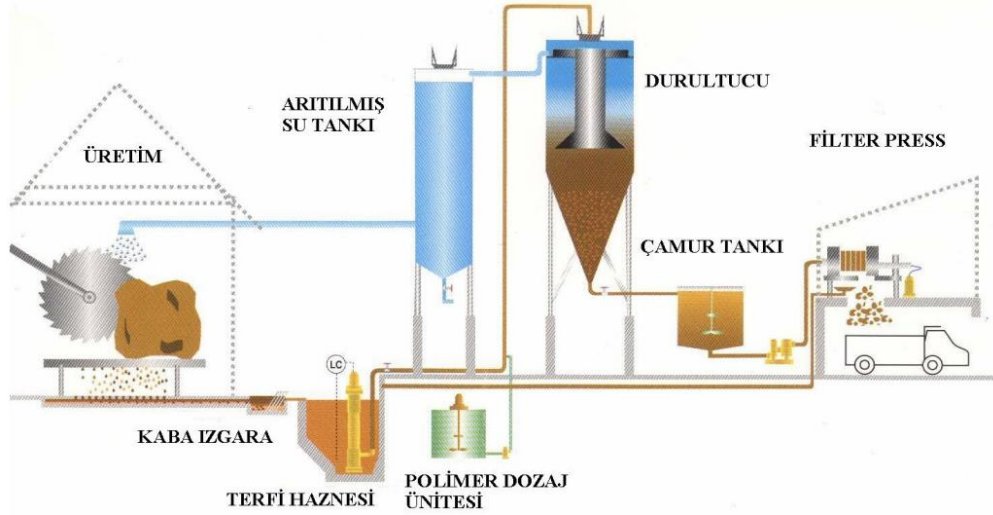
Orta kapasiteli mermer işleme tesislerinde günlük 50-150 m³ temiz su tüketilmektedir [19]. Tesislerde soğutma suyu olarak kullanılan atıksular tesis içerisinde geri kazanılmakta ve tekrar kullanılmaktadır [12]. Tesis içinde kullanılan suyun %20'si işlemler sırasında su kaybına uğramaktadır [19].

Tesislerde mermer atıksularının geri kazanımı için doğal çökeltme işlemleri (ardışık havuz sistemleri) kullanılması sonucunda; havuzların kısa sürelerde tortu ile

dolması ve sık temizlenme gerekliliği, fazladan işçi istihdamı gerektirmesi, havuzdan alınan suyun yeterli derecede temizlenmemiş olarak çıkmasından dolayı suyun makinelerde yeniden kullanımlarında makinelerin ömrünün kısalması ve mermer işleme kalitesinin düşmesi gibi sıkıntılar gözlenmektedir. Özellikle yüksek kapasiteli mermer işleme tesislerinde suyun döngü hızının da yüksek olması gerekliliği doğmakta ve doğal çökeltme işleminde suyun kullanıma hazır olma hızı yüksek kapasiteli mermer işleme tesisleri için oldukça yetersiz kalmaktadır. Doğal çökeltim işleminin verimlilik açısından yetersiz kalması mermer işleme tesislerinde atıksu arıtma ünitesinin kurulmasını gerekli kılmaktadır [20, 21].

Arıtma işlemi, su tasarrufu sağladığı gibi mermer tozlarının geri kazanımına da olanak sağlamaktadır. Makinelere gönderilecek soğutma sularının temiz olması, partiküllerden arınmış olması, su pH'ının uygun olması makinelerin ömrünü uzattığı gibi mermer işleme kalitesini de arttırmaktadır [12].

Mermer işleme tesislerinde atıksuların arıtılması için kullanılan en yaygın yöntem fiziko-kimyasal arıtma işlemidir [13]. Fiziko-kimyasal yöntemle arıtma işlemi, atıksuya kimyasal ilave edilerek koagülasyon (pıhtılaştırma), flokülasyon (yumaklaştırma) ve çökeltim proseslerinin oluşturulması sürecidir [20]. Fiziko-kimyasal arıtmada; kesme, yıkama gibi işlemlerden çıkan atıksular ön çökeltme işlemlerinden geçirilmekte ve çöktürme tankına aktarılmaktadır. Çöktürme tankındaki atıksuya, partikül çökme hızını artıracak koagülant-flokülant kimyasallar ilave edilerek sistemde karıştırma işlemi yapılmaktadır. Karıştırma işleminin ardından atıksu; oluşan flokların çökmesi için dinlendirilmektedir. Çökeltme işlemi sonrasında tank dibinde biriken çamur, ön çamur karıştırma ünitesine aktarılmakta ve ardından susuzlaştırma işlemi için filtreprese gönderilmektedir. Bu işlem sırasında atıksuyun büyük bir kısmı geri kazanılmakta, bir miktar atıksu da bertaraf edilerek dış atıksu kanalına gönderilmektedir [22]. Mermer işleme tesisi atıksularının fiziko-kimyasal arıtma yöntemi ile arıtılması Şekil 2.3'de gösterilmiştir [23].

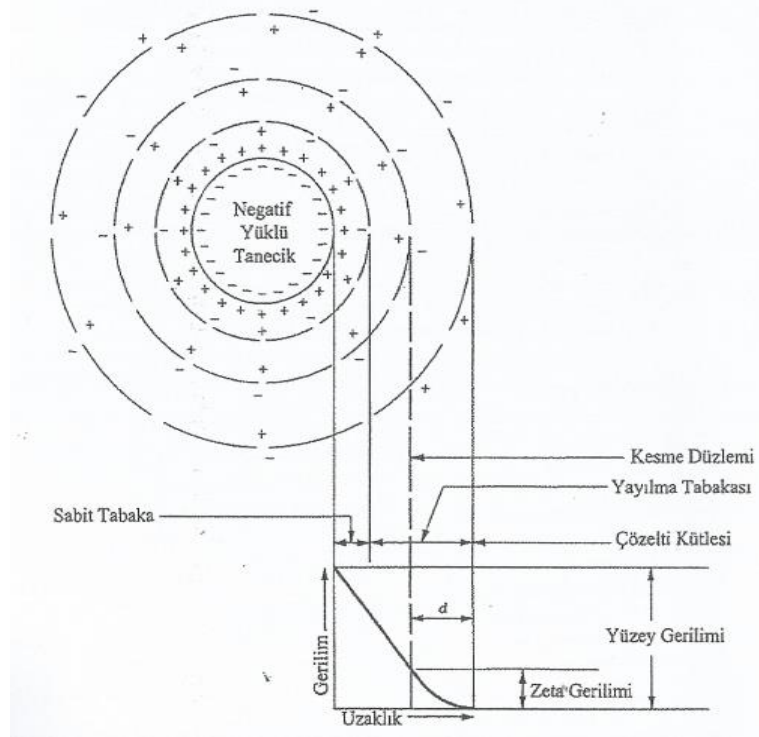


Şekil 2.3. Mermer işleme tesisi atıksularının fiziko-kimyasal arıtma yöntemi ile arıtılması

Koagülasyon, flokülasyon ve kimyasal çöktürme; yüksek miktarda askıda katı madde içeren endüstriyel atıksularda katı parçacıkların sudan ayrıştırılması için kullanılmaktadır. Koagülasyon, atıksu içerisindeki dağınık ve küçük yapıdaki askıda partiküllerin, elektrik yük dengelerine bağlı askıda kalma özelliklerinin kararsızlaştırılması amacıyla atıksuya dışarıdan koagülant eklenmesi ve hızlıca karıştırılması işlemidir. Flokülasyon, kararlı yapısı bozulmuş partiküllerin, bir araya gelerek yumaklaşması amacıyla, atıksuyun yavaşça karıştırılması işlemidir. Kimyasal çöktürme, koagülasyon ve flokülasyon sonrası atıksudaki istenmeyen iyonların-flokların çökeltilmesi işlemidir [24].

Atıksulardaki askıda taneciklere, itme ve çekme kuvvetleri olarak iki çeşit kuvvet etki etmektedir. Çekme kuvveti, askıdaki partiküllerin kısa süreli yakınlaşmalarını sağlayan Van der Waals kuvveti etkisiyle oluşmaktadır. İtme kuvveti ise, askıdaki partiküllerin durgun yük (elektrostatik) kuvveti etkisiyle oluşmaktadır. Bu kuvvetlerin büyüklükleri zeta potansiyeli (zeta gerilimi) ile ölçülmektedir. Zeta potansiyeli, kesme yüzeyindeki elektrostatik gerilimdir. Elektrostatik gerilim yani zeta potansiyeli, askıdaki partiküllerin kararlılıklarını gösteren ve taneciklerin sahip oldukları yükün bir ölçüsü olan önemli bir parametredir. Zeta potansiyeli 0'dan uzaklaştıkça (yük arttıkça), askıda partiküller arasındaki itme kuvveti artmakta ve bu da taneciklerin askıda olma kararlılığını yükseltmektedir. Zeta potansiyeli 0'a yaklaştıkça taneciklerin çökme potansiyeli artmakta ve arıtma verimi yükselmektedir. Mermer tanecikleri, kil tanecikleri vb. doğal inorganik partiküller genellikle (-) yüklüdür. Askıda tanecikler içeren atıksulara kimyasal koagülant ilavesi, yüklü tanecik ve koagülantın bir araya

gelerek yük dengelerinin bozulması sonucu zeta potansiyelinin 0'a yaklaştırılması, yani partiküller arası itme kuvvetlerinin azaltılarak çökeltme potansiyellerinin artırılması amacı ile yapılmaktadır. Negatif yüklü tanecik ve durgun yük alanının temsil edildiği zeta potansiyeli Şekil 2.4'de gösterilmiştir [24].



Şekil 2.4. Zeta potansiyeli, negatif yüklü tanecik ve durgun yük alanı

Atıksuların koagülasyon ile arıtılmasında alüminyum tuzları, demir tuzları, kireç ve polielektrolitler başlıca koagülantlardır. Bazı koagülantların özellikleri Çizelge 2.9'da verilmiştir [19].

Çizelge 2.9. Bazı koagülantlar ve özellikleri

Koagülant Adı	Özellikler
Alüminyum Sülfat ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$)	Temini ve uygulanması kolaydır. En çok kullanılan koagülanttır. Kireçten daha az çamur üretir. Etkili olduğu pH aralığı 6,5-7,5'tir. Suya ilave çözülmüş katı bırakır.
Demir Klorür ($FeCl_3$)	4 -11 pH aralığında etkilidir. Alüminyum sülfatın iki katı alkalinite oluşturur. İlave çözülmüş katı oluşturur.
Sodyum Alüminat ($Na_2Al_2O_4$)	Sert sular için oldukça etkilidir. Genellikle düşük dozlarda ve alüminyum sülfatla birlikte kullanılır. Yüksek maliyetlidir. Yumuşak sular için uygun değildir.
Polialüminyum Klorür	Bazı uygulamalarda flok yoğunluğu alüminyum sülfata kıyasla daha yoğun olmaktadır ve alüminyum sülfattan daha hızlı çöker. Sık kullanılmaz ve kullanımı ile ilgili geniş bilgi yoktur.

Mermer işleme tesislerinde atıksuların arıtılması için kullanılan bir başka yöntem hidrosiklonlarla ayırma yöntemidir. Hidrosiklon, santrifüj prensibiyle devamlı çalışarak partiküllerin çökeltme hızlarını arttıran konik şekilli bir cihazdır. Merkez kaç ve merkezciil kuvvetlerle çöken partiküller, cihazın alt kısmında yer alan çıkış açıklığından geçerek sudan uzaklaştırılmaktadır [21].

Mermer işleme tesislerinde atıksuların arıtılması için kullanılan bir diğer yöntem de çapraz akışlı mikrofiltrasyon yöntemidir. Çapraz akışlı mikrofiltrasyon; mikro gözenekli bir membrandan (nominal gözenek boyutu 0,1-1,0 pm), orta dereceli basınç altında süspansiyon geçişinin sağlandığı, aşağı akışlı sıvı-katı ayırma yöntemidir. Süspansiyonda bulunan kolloid, mikropartikül, mikroorganizma ve makromoleküller bu yöntemle etkin bir şekilde uzaklaştırılmaktadır. Ancak çapraz akışlı mikrofiltrasyon yönteminde, atıksuda bulunan AKM, zamanla membran üzerinde birikerek, geçirgenlik konusunda sıkıntı yaratabilmektedir [25].

Mermer işleme endüstrisi atıksuları, Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY) Ekler Tablo 7.5’de belirtilen (Maden Sanayii Çimento, Taş Kırma, Karo, Plaka İmalatı, Mermer İşleme, Toprak Sanayii ve Benzerleri) şartları sağlaması halinde, alıcı ortama deşarj edilebilmektedir. Mermer işleme endüstrisi atıksularınının alıcı ortama deşarj standartları Çizelge 2.10’da belirtilmiştir [26].

Çizelge 2.10. Mermer işleme endüstrisi atıksuları alıcı ortam deşarj standartları

Parametre	Birim	Kompozit Numune 2 saatlik	Kompozit Numune 24 saatlik
ASKIDA KATI MADDE (AKM)	(mg/L)	100	-
KROM (CR ⁺⁶)	(mg/L)	0,3	-
YAĞ VE GRES	(mg/L)	10	-
pH	-	6-9	6-9
RENK	(Pt-Co)	280	260

3. ELEKTROKİMYASAL ARITIM YÖNTEMLERİ

Elektrokimya, elektrik enerjisi kullanılarak kimyasal reaksiyonların oluşturulması ile ilgilenen bilim dalıdır. Elektrokimyasal reaksiyonlar, elektrolit (iletken elektroliz çözeltisi) içinde hareket eden yüklü taneciklerin (iyonik bileşiklerin) anot ve katot elektrotlarda yükseltgendiği ya da indirgendiği heterojen yapıya iyon transferi reaksiyonlarıdır. Anot ve katot özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir [27].

Çizelge 3.1. Elektrokimyasal reaksiyonlarda anot ve katot özellikleri

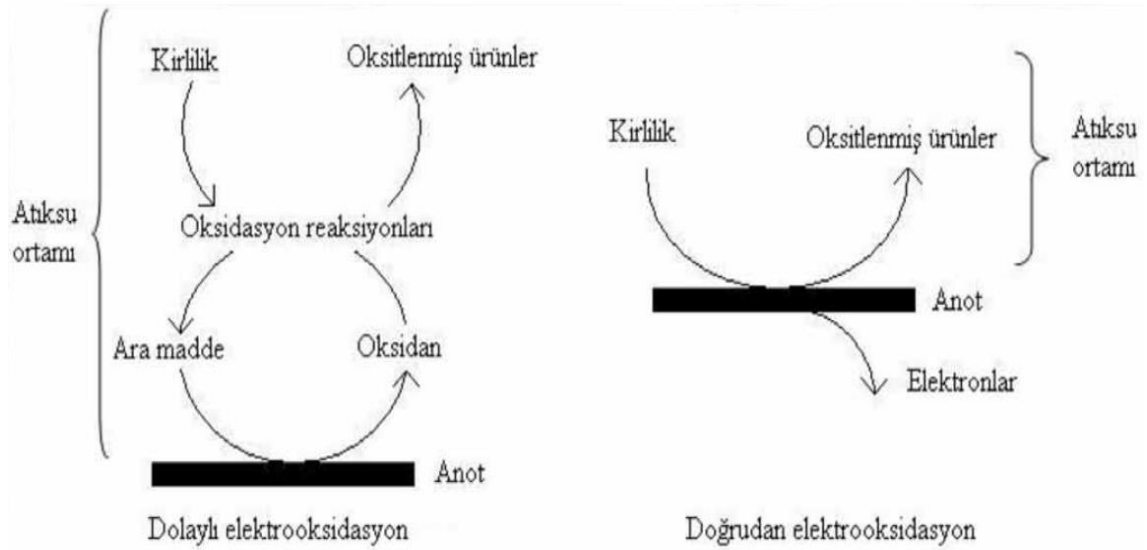
Anot	Katot
Anot elektron verir.	Katot elektron alır.
Anotta yükseltgenme olur.	Katotta indirgenme olur.
Anotta çözünme olur.	Katotta birikme olur.
Anotta oksijen çıkışı gözlenir. $2\text{H}_2\text{O}+4\text{e}^- \rightarrow \text{O}_2\uparrow +4\text{H}^+$	Katotta hidrojen çıkışı gözlenir. $2\text{H}_2\text{O}+2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\uparrow +4\text{OH}^-$

Elektrokimyasal arıtım yöntemleri, elektrokimyasal reaksiyonlardan faydalanılarak gerçekleştirilen ve koagülasyon, flotasyon, adsorbsiyon, absorpsiyon, çöktürme gibi süreçleri içeren ileri arıtım prosesleridir. Elektrokimyasal arıtım yöntemleri; çok yönlü ve çevreyle uyumlu olması dolayısıyla son yıllarda atıksu arıtımlarında dikkat çekmektedir. Elektrokimyasal arıtım yöntemleri 3 ayrı başlıkta incelenmektedir. Bunlar elektrooksidasyon, elektroflotasyon ve elektrokoagülasyon yöntemleridir. Bu yöntemler ayrı ayrı uygulanabildikleri gibi birden fazla yöntemin bir arada uygulanması da mümkün olmaktadır. Elektrokimyasal arıtımda; elektrot tipi, akım, gerilim, pH, sıcaklık gibi parametreler sisteme etki etmektedir [28]. Elektrot olarak genellikle demir, alüminyum, titanyum, elmas, grafit, çelik gibi metal, karbon ya da yarı iletken malzemeler kullanılmaktadır [27, 29].

3.1. Elektrooksidasyon

Elektrooksidasyon (elektrokimyasal yükseltgeme) yöntemi, çözünmeyen metal/metaloksit elektrotlardan elektrik akımı geçmesi sonucu ortaya çıkan gazlar ile (O_2 ve H_2) atıksudaki kirletici iyonların oksidasyona uğratarak, kolay parçalanabilen organik bileşiklere ya da CO_2 ve H_2O gibi nihai ürünlere dönüştürülmesi prensibi ile gerçekleştirilmektedir. Elektrooksidasyon yönteminde etkin elektrot anottur ve bütün tepkimeler elektron kaybı ile gerçekleşmektedir [28].

Elektrooksidasyon reaksiyonları sırasında organik maddeler doğrudan ya da dolaylı olarak oksitlenebilmektedir [30]. Doğrudan oksidasyon sırasında, kirletici maddeler anot elektrot yüzeyinde birikmekte ve kirletici, elektron transferi sonrası yükseltgenerek giderilmektedir [31]. Dolaylı oksidasyon sırasında ise, elektrot üzerinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonların ardından anodik olarak üretilen radikaller (klor, ozon, hidrojen peroksit, hipoklorit vb.) elektrolite dağılmakta; kirleticiler, elektrolitteki bu radikaller ile tepkimeye girerek yükseltgenmekte ve giderilmektedir [32, 33]. Doğrudan ve dolaylı elektrooksidasyon yöntemleriyle kirleticilerin parçalanması Şekil 3.1’de verilmiştir [32].



Şekil 3.1 Doğrudan ve dolaylı elektrooksidasyon

Elektrooksidasyon yönteminde; elektrot tipi ve yüzey alanı, akım yoğunluğu, arıtma süresi, pH, sıcaklık ve elektriksel iletkenlik arıtma verimini ve maliyeti etkileyen parametrelerdir. Elektrooksidasyon proseslerinde genellikle titanyum, alüminyum oksit, platin gibi elektrotlar kullanılmaktadır [30].

3.2. Elektroflotasyon

Elektroflotasyonla arıtma yöntemi, elektrotlardan elektrik akımı geçmesi sonucu ortaya çıkan gaz kabarcıklarının (katotta H₂ ve anotta O₂ gaz çıkışı) kirleticileri tutarak atıksu yüzeyine çıkarması ve bu şekilde kirleticilerin atıksudan uzaklaştırılması prensibiyle gerçekleşmektedir [28, 32]. Bu yöntem, çoğunlukla diğer elektrokimyasal arıtım yöntemleri ile birlikte kullanılmaktadır [28].

Elektroflotasyon yönteminde, elektrot tipi ve yüzey alanı, akım yoğunluğu, reaktör tipi, pH, sıcaklık vb. parametreler arıtma verimini ve maliyeti etkilemektedir. Elektroflotasyon yöntemi; düşük yoğunluklu emülsiyonlar, yağ, askıda katı madde ve KOİ gideriminde etkilidir [28].

3.3. Elektrokoagülasyon

Elektrokoagülasyon yöntemi, en çok tercih edilen elektrokimyasal arıtma yöntemidir [28]. Elektrokoagülasyonun koagülasyondan farkı; atıksuya dışarıdan koagülant eklenerek kirleticilerin (-) yüklü elektrik dengelerinin kararsızlaştırılarak çöktürülmesi yerine; elektrik akımına maruz kalan elektrotların, suyla tepkimeye girmeleri ve metal hidroksitlere dönüşmeleri ile, kirleticilerin (-) yüklü elektrik dengelerinin kararsızlaştırılması ve metal hidroksitlerin kirleticileri tutarak (adsorbe ederek) çökmesi yoluyla kirleticilerin atıksudan uzaklaştırılmasıdır [24, 28, 29]. Yani askıda katı maddeler ve elektrotlarda meydana gelen metal hidroksitler temas ettiğinde, (-) yüklü kirleticiler nötrleşerek birbirlerini itme davranışını bırakmakta ve birleşerek flok oluşturmaya, çökmeye veya yüzeye çıkmaya meyilli hale gelmektedir [28]. Metal hidroksitlerin oluşumu sırasında elektrotlardan küçük boyutlu gaz kabarcıkları çıkmakta ve bu durum elektrokoagülasyon sırasında elektroflotasyon gerçekleşmesine de neden olmaktadır. Dolayısıyla elektrokoagülasyon prosesi; adsorbsiyon, koagülasyon, sedimentasyon ve flotasyon süreçleri içeren çok yönlü bir arıtma yöntemidir [30].

Elektrokoagülasyon yönteminin koagülasyon yöntemine göre bazı üstünlükleri bulunmaktadır. Elektrokoagülasyonda; kimyasal koagülant ekleme gerekliliği bulunmadığından işletmesi daha kolay gerçekleşmektedir, düzenek kullanımı daha kolaydır, küçük boyutlu askıda taneciklerin yük nötrlemesi ve gideriminde koagülasyona göre daha etkilidir ve elektokoagülasyonda koagülasyona oranla daha az miktarda ve daha kararlı yapıda çamur oluşmaktadır [28].

Elektrokoagülasyon sırasında oluşan koagülant maddeler, anot elektrotta gerçekleşen tepkimeler ile meydana gelmektedir. Bu durum, bir süre sonra, elektrot yüzeyinde tabaka oluşumuna veya aşınmalara neden olmaktadır. Elektrotları dengeli ve verimli tüketmek amacıyla işletme süresince belli aralıklarla elektrot kutuplarının değiştirilmesi elektrotların ömrünü uzatmaktadır [34].

Elektrokoagülasyon yönteminde, elektrot tipi ve yüzey alanı, akım yoğunluğu, pH, sıcaklık, elektriksel iletkenlik vb. parametreler arıtma verimini ve maliyeti etkilemektedir.

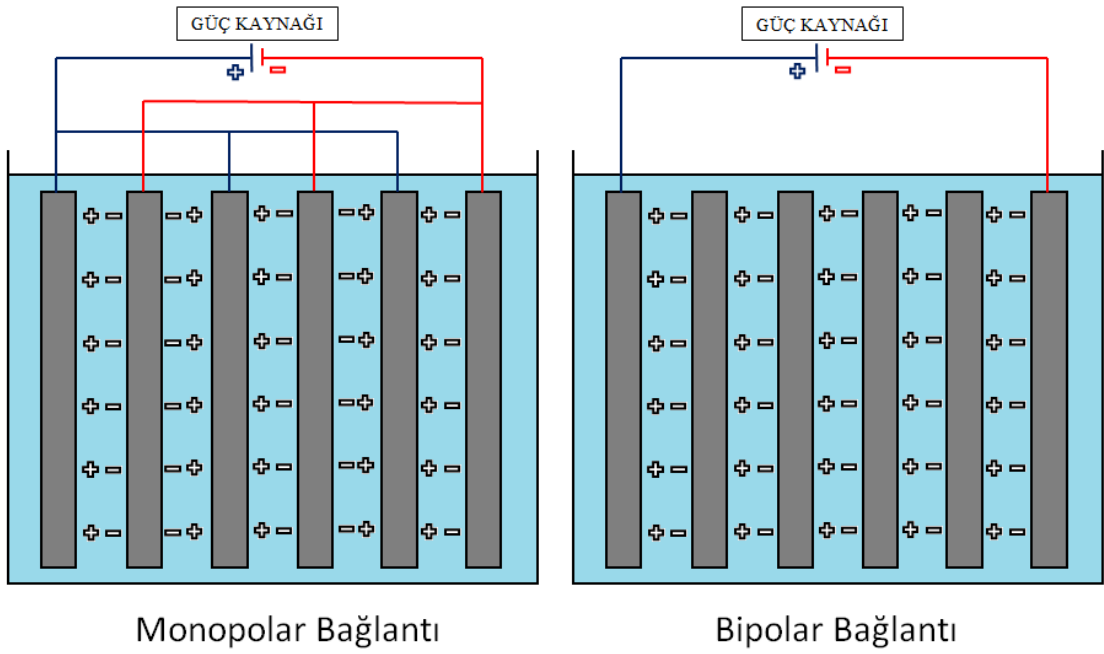
Elektrokoagülasyon yönteminde en sık kullanılan elektrot çeşitleri; ucuz, etkili ve kolay ulaşılabilir olmalarından dolayı, demir ve alüminyum elektrotlardır. Elektrokoagülasyon sırasında alüminyum ve demir elektrotlarla gerçekleşen tepkimeler Çizelge 3.2’de verilmiştir. Demir elektrotlarla olan tepkimeler iki ayrı mekanizma olarak gerçekleşmektedir [35, 36].

Çizelge 3.2. Elektrokoagülasyon işleminde alüminyum ve demir elektrotlarla gerçekleşen tepkimeler

Alüminyum elektrot ile oluşan tepkimeler	
$Al_{(katı)} \longrightarrow Al^{+3}_{(aq)} + 3e^{-}$	(3.1)
$Al^{+3}_{(aq)} + 3H_2O_{(sıvı)} \longrightarrow Al(OH)_{3(katı)} + 3H^{+}$	(3.2)
$nAl(OH)_{3(katı)} \longrightarrow Al_n(OH)_{3n(katı)}$	(3.3)
Demir elektrot ile oluşan tepkimeler	
1. Reaksiyon mekanizması	
$4Fe_{(katı)} \longrightarrow 4Fe^{+2}_{(aq)} + 8e^{-}$	(3.4)
$4Fe^{+2}_{(aq)} + 10H_2O_{(sıvı)} + O_{2(g)} \longrightarrow 4Fe(OH)_{3(katı)} + 8H^{+}_{(aq)}$	(3.5)
$8H^{+}_{(aq)} + 8e^{-} \longrightarrow 4H_{2(g)}$	(3.6)
Tüm Tepkime:	
$4Fe_{(katı)} + 10H_2O_{(sıvı)} + O_{2(g)} \longrightarrow 4Fe(OH)_{3(katı)} + 4H_{2(g)}$	(3.7)
2. Reaksiyon mekanizması	
$Fe_{(katı)} \longrightarrow Fe^{+2}_{(aq)} + 2e^{-}$	(3.8)
$Fe^{+2}_{(aq)} + 2OH^{-}_{(aq)} \longrightarrow Fe(OH)_{2(katı)}$	(3.9)
$2H_2O_{(sıvı)} + 2e^{-} \longrightarrow H_{2(g)} + 2OH^{-}_{(aq)}$	(3.10)
Tüm tepkime:	
$Fe_{(katı)} + 2H_2O_{(sıvı)} \longrightarrow Fe(OH)_{2(katı)} + H_{2(g)}$	(3.11)

Elektrokoagülasyon işlemlerinde elektrotlar monopolar veya bipolar olacak şekilde bağlanmaktadır. Monopolar, bir elektrotun iki geniş yüzeyinin de aynı yükü taşıması; bipolar, bir elektrotun iki geniş yüzeyinin zıt yükler taşıması olarak tanımlanmaktadır. Bir elektrotun monopolar ya da bipolar olması, bağlantı şekli

aracılığıyla yönetilmektedir. Yan yana paralel olarak dizilmiş elektrotlarda, ardışık elektrotların her birinin güç kaynağına zıt kutuplu olacak şekilde bağlanması monopolar bağlantı şeklini meydana getirmektedir. Yan yana paralel olarak dizilmiş elektrotlarda, sadece dışta kalan iki elektrotun güç kaynağına zıt kutuplu olacak şekilde bağlanması sonucu iç kısımdaki elektrotların her birine ait (+) ve (-) yüklerin elektrotun iki yüzeyde gruplanması bipolar bağlantı şeklini meydana getirmektedir. Monopolar ve bipolar bağlantı biçimleri Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Monopolar ve bipolar bağlantı şekilleri

4. KONU İLE İLGİLİ DAHA ÖNCE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde mermer endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılması konusunda, atıksu ve arıtma işlemi benzerliği yönünden ilişkilendirilebilecek bazı çalışmalar incelenmiştir.

- Elektrokoagülasyon yoluyla mermer atıksularından askıda katı ve bulanıklık giderimi ile ilgili yapılan bir çalışmada, monopolar paralel ve monopolar seri bağlantılı olarak alüminyum elektrotlar ve demir elektrotlar kullanılmış, bağlantı şekli ve elektrot türlerinin kirlilik giderimindeki etkisi incelenmiştir. pH, elektriksel iletkenlik ve elektroliz süreleri gibi parametreler optimize edilerek askıda katı ve bulanıklık giderimleri tespit edilmiştir. pH'ın 9, elektriksel iletkenliğin 15 A/m^2 , elektroliz süresinin 2 dk olarak optimum koşulların yakalandığı monopolar seri ve paralel bağlı Al elektrotlarla %100 askıda katı giderimi elde edilmiştir. pH'ın 8, elektriksel iletkenliğin 10 ve 20 A/m^2 , elektroliz süresinin 2 dk olarak optimum koşulların yakalandığı monopolar seri ve paralel bağlı Fe elektrotlarla sırasıyla %99,94 ve %99,86 askıda katı giderimi elde edilmiştir. Sonuçlara göre iki elektrot tipinin ve iki bağlantı şeklinin de mermer atıksularından askıda katı ve bulanıklık gideriminde yüksek derecede etkili olduğu, işletme maliyeti açısından paralel bağlantılı Al elektrotun, seri bağlı Al elektrot ve demir elektrotun tüm bağlantı şekillerine kıyasla en ucuz seçenek olduğu gözlenmiştir [37].

- Elektrokoagülasyon ve kimyasal koagülasyon yöntemleri ile mermer işleme atıksularının arıtılmasının ekonomik analizi konulu bir çalışmada, mermer işleme atıksularından AKM gideriminde elektrokoagülasyon ve kimyasal koagülasyon proseslerinin maliyet analizleri yapılmış ve karşılaştırılmıştır. Elektrokoagülasyon prosesinde Al ve Fe elektrotlar monopolar paralel ve monopolar seri olarak bağlanmış, kimyasal koagülasyon proseslerinde $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ koagülantları kullanılmıştır. Elektrokoagülasyon prosesinde işletme maliyetleri, monopolar paralel ve monopolar seri bağlı Al ve monopolar paralel ve monopolar seri bağlı Fe elektrot bağlantı sistemleri için sırasıyla $0,0594$, $0,1809$, $0,1104$ ve $0,0962 \text{ \$/m}^3$ olarak hesaplanırken, $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ koagülantlarının kullanıldığı kimyasal koagülasyon prosesleri için sırasıyla $0,31$, $0,09$, $0,05$ ve $0,13 \text{ \$/m}^3$ olarak hesaplanmıştır. AKM giderimi için en düşük maliyet; monopolar paralel

bağlantılı Al elektrotla yapılan elektrokoagülasyon prosesi ve $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ koagülantının kullanıldığı kimyasal koagülasyon prosesi sonucu elde edilmiştir [38].

- Andezit işleme atıksuyunun fizikokimyasal arıtımı ile ilgili bir çalışmada, andezit işleme tesisi atıksuyundan bulanıklık gideriminde fizikokimyasal yöntemlerin etkileri incelenmiştir. Koagülasyon proseslerinde; Alüminyum sülfat ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$), sodyum alüminat (NaAlO_2), polialüminyum klorür ($\text{Al}(\text{OH})_3$), demir(3) klorür (FeCl_3), flokülasyon proseslerinde %40'lık ve %30'luk yüksek ve orta molekül ağırlıklı anyonik flokülant, %40'lık orta ve yüksek molekül ağırlıklı katyonik flokülant ve noniyonik flokülant kullanılmıştır. Koagülasyon için en uygun koagülant, 240 mg/L doz, 60 saniye karıştırma süresi, 20 dakika çökeltme süresi, 60 rpm karıştırma hızı ve 6.5 pH'da %98'lik bulanıklık giderim verimi ile FeCl_3 , flokülasyon için de 11 mg/L doz, 30 saniye karıştırma süresi, 10 dakika çökeltme süresi, 30 rpm karıştırma hızı ve 8 pH'da %98'lik bulanıklık giderim verimiyle Y.M.A anyonik flokülant olarak belirlenmiştir. Andezit işleme atıksuyunun arıtımında; %98 gibi yüksek bulanıklık giderim verimi, 64.67 NTU bulanıklık değeri ve en uygun proses Y.M.A anyonik flokülant kullanılarak uygulanan flokülasyon prosesi olarak belirlenmiştir [19].

- Seramik endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılması ile ilgili bir çalışmada akım yoğunluğu, elektrot tipi ve destek elektrolit derişiminin seramik endüstrisi atıksuyundan kirlilik giderimine olan etkileri incelenmiştir. Monopolar Al ve monopolar Fe elektrotlar kullanılarak yapılan çalışmalarda %99 AKM giderimi, %80 Kadminyum giderimi, %86 Çinko giderimi, %99 Kurşun giderimi gerçekleştirilmiştir. Zeta potansiyelinin -20,6 mV'den, -6,02 mV'ye düşürüldüğü tespit edilmiştir. Enerji ve elektrot maliyetleri de göz önüne alınarak en uygulanabilir arıtma koşullarının Fe elektrot ile 1 mA/cm^2 akım yoğunluğu olduğu tespit edilmiştir [39].

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. Materyal

Mermer endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılması için yapılan deneysel çalışmalarda, Eskişehir ilinde bulunan bir mermer işleme fabrikasının deşarj noktasından çıkan, arıtıma tabi tutulmamış mermer işleme atıksuyu numuneleri kullanılmıştır. Atıksu karakterizasyonu Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Ham atıksu karakterizasyonu

Parametre	Değer
Bulanıklık	7000 – 10700 NTU
AKM	2700 – 6840 mg/L
pH	7,38 – 8,67
Sıcaklık	14,4 – 23,3 C°
Elektriksel İletkenlik	543 – 1006 μ S/cm
Yağ Gres	12 mg/L
Zeta Potansiyeli	-4,84 mV
KOİ	37,05 mg/L
Renk	10,684 Pt-Co
Toplam Cr	0,124 μ g/L

Elektrokoagülasyon deneyleri yapılırken kullanılan düzenekte güç kaynağı olarak 230 V girişli 0-80 V/0-5 A çıkışlı Statron (type 3262) marka cihaz kullanılmıştır. Cihazın fotoğrafı Şekil 5.1.’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Güç kaynağı

Deneyler yapılırken elektrot tipi ve geometrisi açısından altı farklı elektrot demeti kullanılmıştır. Tüm elektrot plakaları 4cmx6cmx3mm boyutlarındadır. Elektrot plakalarının fotoğrafı Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.2. Elektrot plakaları (Soldan sağa sırasıyla; Demir elektrot, Alüminyum elektrot)

Monopolar Demir - Demir (M Fe-Fe) elektrot demeti için 6 adet demir plaka, Monopolar Alüminyum – Alüminyum (M Al-Al) elektrot demeti için 6 adet alüminyum plaka, Monopolar Alüminyum – Demir (M Al-Fe) elektrot demeti için 3 adet alüminyum ve 3 adet demir plaka, Bipolar Demir – Demir (B Fe-Fe) elektrot demeti için 6 adet demir plaka, Bipolar Alüminyum – Alüminyum (B Al-Al) elektrot demeti için 6 adet alüminyum plaka, Bipolar Alüminyum – Demir (B Al-Fe) elektrot demeti için 3 adet alüminyum ve 3 adet demir plaka kullanılmıştır. Elektrot demetlerinin fotoğrafları Şekil 5.3’de verilmiştir.



Şekil 5.3. Elektrot demetleri (Soldan sağa sırasıyla; M Fe-Fe, M Al-Al, M Al-Fe, B Fe-Fe, B Al-Al, B Al-Fe elektrot)

Her bir elektrot demeti oluşturulurken elektrotlar dışında 2 adet vida (iletken), 4 adet somun, elektrik kabloları, serum lastiği, 12 adet conta, 2 adet metal pul (iletken) kullanılmıştır. Monopolar bağlantılı elektrot demetlerinde metal plakalar kullanılarak ardışık elektrotların farklı yüklerle yükleneceği şekilde bağlantı sağlanmıştır. Deneyler sırasında elektrot demetini bütet standına asmak için yalıtkan bir askı kullanılmıştır.

Elektrokoagülasyon deneyleri sırasında reaktör olarak 500 ml beher, karıştırıcı olarak Falc Instruments marka manyetik karıştırıcı ve manyetik balık kullanılmıştır. Manyetik karıştırıcının fotoğrafı şekil 5.4'de verilmiştir. Güç kaynağı ve elektrot demetleri arası elektrik iletimi bağlantı kabloları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elektrotların dengeli aşınmasını sağlamak amacıyla her deneyde, kabloların elektrot bağlantı noktaları değiştirilerek, elektrot kutupları değiştirilmiştir.



şekil 5.4. Manyetik karıştırıcı

Destek elektrolit olarak Merck marka Na_2SO_4 (Sodyum Sülfat, susuz, Extra püre) kullanılmıştır.

Başlangıç pH'nın ayarlandığı deneylerde başlangıç pH'ı Merck marka HCl (Hidroklorik Asit, 37,0% Analitik Kalite) kullanılarak ayarlanmıştır.

Bulanıklık ölçümü için Scientific, Inc. (Micro 100 Turbidimeter) marka türbidimetre kullanılmıştır. Türbidimetrenin fotoğrafı şekil 5.5'de verilmiştir.



Şekil 5.5. Türbidimetre

AKM analizleri sırasında Sartorius marka süzme seti, Ecocell marka etüv, Ohaus marka hassas terazi, desikatör ve GF/A Whatman Glass Microfiber Filters marka 47 mm filtre kağıdı kullanılmıştır. Süzme setinin fotoğrafı Şekil 5.6’da, etüv ve hassas terazinin fotoğrafı Şekil 5.7’de verilmiştir.



Şekil 5.6. Süzme seti



Şekil 5.7. Etiv (solda) , hassas terazi (sağda)

pH, sıcaklık ve elektriksel iletkenlik ölçümleri için Thermo Scientific marka pH metre kullanılmıştır. pH metrenin fotoğrafı Şekil 5.8’de verilmiştir.



Şekil 5.8. pH metre

KOİ analizleri için Merck Spectroquant TR 420 marka termoreaktör, Nüve NF 800R marka santrifüj cihazı, KOİ kimyasalları ve cam malzemeler kullanılmıştır. Termoreaktör ve santrifüj cihazının fotoğrafı Şekil 5.9’da verilmiştir.



Şekil 5.9. Termoreaktör (solda), Santrifüj cihazı (sağda)

Zeta Potansiyeli analizi için Malvern Zetaseizer Nano ZS cihazı kullanılmıştır. Zeta Potansiyeli analiz cihazının fotoğrafı Şekil 5.10’da verilmiştir.



Şekil 5.10. Zeta Potansiyeli cihazı

Yağ ve gres tayini için Saha marka yağ ve gres düzeneği, Julabo F32 marka su banyosu, Na₂SO₄ (Sodyum Sülfat, susuz, Extra püre), Merck marka Hexane (N-Hexane Emplura), kaba filtre kağıdı (50 gr/m² 40x40), Ecocell marka etüv, Ohaus marka hassas terazi, desikatör kullanılmıştır. Yağ ve gres düzeneği ve su banyosunun fotoğrafı Şekil 5.11’de verilmiştir.



Şekil 5.11. Yağ ve gres düzeneği ve su banyosu

Renk tayini için kaba filtre kağıdı (50 gr/m² 40x40), Thermo Scientific marka pH metre, cam süzme seti, Shimadzu UV-2550 marka Spektrofotometre cihazı kullanılmıştır. Spektrofotometre cihazının fotoğrafı Şekil 5.12’de verilmiştir.



Şekil 5.12. Renk tayini, Spektrofotometre

Cr^{+6} analizi için Agilent 8800 ICP QQQ marka ICP cihazıyla toplam Cr analizi gerçekleştirilmiştir. ICP cihazının fotoğrafı Şekil 5.13’de verilmiştir.



Şekil 5.13. Toplam Cr analizi, ICP cihazı

Çamur tartımı için Ecocell marka etüv, Ohaus marka hassas terazi ve desikatör kullanılmıştır.

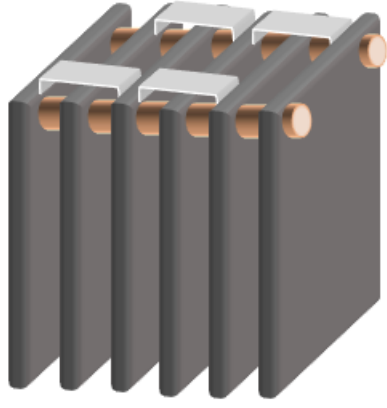
5.2. Yöntem

Mermer endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılması konulu deneysel çalışmalarda; farklı elektrot tipi ve geometrilerinin, akım yoğunluğunun, arıtım süresinin, destek elektrolit derişimi ve farklı başlangıç pH'larının; mermer atıksuyunun elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtılmasına olan etkileri incelenmiştir.

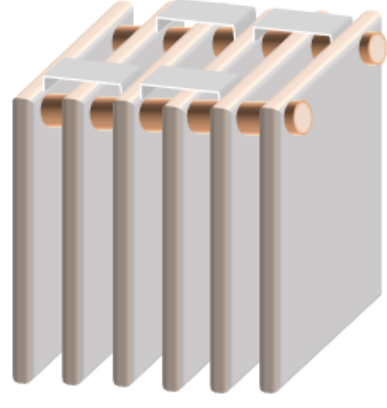
Arıtım deneylerinde ideal koşullar yakalanana kadar yapılan denemelerde hızlı kıyaslamalar yapmak amacıyla arıtım sonrasında pH, sıcaklık, elektriksel iletkenlik, bulanıklık ve AKM parametre değerleri ölçülmüştür. Bu parametreler Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'nde (SKKY) belirtilen deşarj standartları ile karşılaştırılarak, bu şartların sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmiştir. Öte yandan ölçülen parametreler deneylerin birbirleriyle kıyaslanması açısından da yol göstermiştir. Parametreler yoluyla arıtım verimi kıyaslamaları ve yapılan maliyet analizleri yoluyla da maliyet kıyaslamaları yapılarak arıtım için ideal koşullar yakalanmaya çalışılmıştır.

5.2.1. Elektrotların oluşturulması

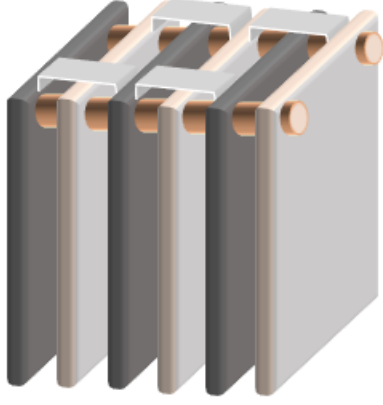
Elektrokoagülasyon deneylerine geçilmeden önce arıtımı sağlayacak elektrot demetleri oluşturulmuştur. Bir elektrot demetinde 6 adet plaka kullanılmıştır. Her elektrot demetinde, ikişer adet vida, plakaları bir arada tutan iskeleti oluşturmaktadır. 4cmx6cmx3mm boyutlarında demir (Fe) ve alüminyum (Al) plakaların üzerine 2 adet uygun büyüklükte delik açılmıştır. Bu delikler, üzerine serum lastiği geçirilmiş vidanın sığabileceği bir büyüklükte oluşturulmuştur. Her vidada iki elektrot arasına bir yalıtkan conta gelecek şekilde dizilim yapılmıştır. Vidaların uç kısımlarına elektrik akış yönüne uygun gelecek şekilde 1'er adet metal pul yerleştirilmiştir. Vidaların metal pul konmamış diğer uçlarına da 1'er adet yalıtkan conta yerleştirilmiştir. Bu dizilim sağlandıktan sonra vidaların uçlarına somunlar takılarak sistemin sabit kalmasını sağlayacak şekilde sıkıştırılmıştır. Monopolar bağlı elektrot demetlerinde üst kısımda, 1-3-5 numaralı plakaların birbirine, 2-4-6 numaralı plakaların birbirine (6 adet plaka yan yana geldiğinde bir ucu 1 numara, diğer ucu 6 numara diye düşünülerek) elektrik akışını sağlayacak şekilde metal levha ile köprüler oluşturulmuştur.



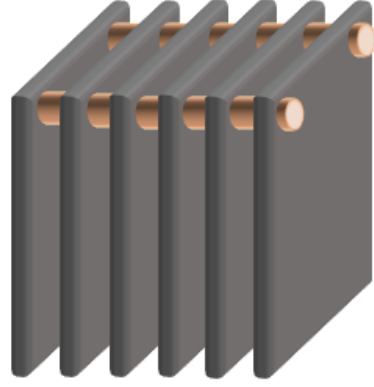
Monopolar Fe-Fe elektrot



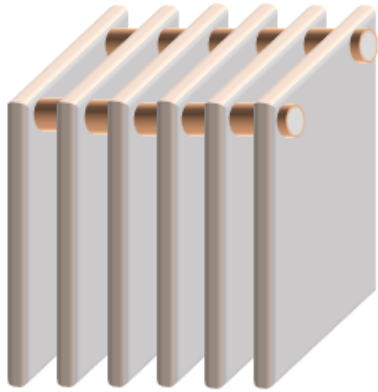
Monopolar Al-Al elektrot



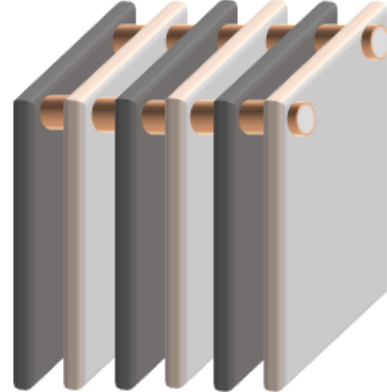
Monopolar Al-Fe elektrot



Bipolar Fe-Fe elektrot



Bipolar Al-Al elektrot



Bipolar Al-Fe elektrot

Şekil 5.14. Elektrot tipleri ve geometrileri

Şekil 5.14’de demir ve alüminyum plakaların yan yana getirilmesiyle oluşturulmuş elektrot demetleri verilmiştir. Koyu renkli plakalar demir plakaları, açık renkli plakalar alüminyum plakaları temsil etmektedir.

5.2.2. Farklı elektrot tipi ve geometrilerinde akım yoğunluğu ve arıtma süresinin arıtma etkisinin belirlenmesi

Çalışmanın ilk aşamasında, akım yoğunluğu ve arıtma süresinin arıtma etkisini belirlemek amacıyla, hazırlanan elektrot demetleri ile farklı akım yoğunluklarında 1 dk, 3 dk, 5 dk, 10 dk arıtma sürelerinde elektrokoagülasyon prosesi gerçekleştirilmiştir. Arıtma süresi uzunlukları ve akım yoğunlukları belirlenirken daha önce yapılan benzer çalışmalardan faydalanılmıştır. Yapılan deneylerde uygulanan; elektrot tipi ve geometrisi, akım yoğunluğu ve arıtma süresi kombinasyonları Şekil 5.15’de şematik olarak gösterilmiştir.

MONOPOLAR FE-FE ELEKTROT		BİPOLAR FE-FE ELEKTROT	
1 DK SÜRE	1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 mA/cm ² akım yoğunluğu	1 DK SÜRE	1, 3, 5, 10 mA/cm ² akım yoğunluğu
3 DK SÜRE	1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 mA/cm ² akım yoğunluğu	3 DK SÜRE	1, 3, 5, 10 mA/cm ² akım yoğunluğu
5 DK SÜRE	1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 mA/cm ² akım yoğunluğu	5 DK SÜRE	1, 3, 5, 10 mA/cm ² akım yoğunluğu
10 DK SÜRE	1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 mA/cm ² akım yoğunluğu	10 DK SÜRE	1, 3, 5, 10 mA/cm ² akım yoğunluğu
MONOPOLAR AL-AL ELEKTROT		BİPOLAR AL-AL ELEKTROT	
1 DK SÜRE	1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 mA/cm ² akım yoğunluğu	1 DK SÜRE	1, 3, 5, 10 mA/cm ² akım yoğunluğu
3 DK SÜRE	1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 mA/cm ² akım yoğunluğu	3 DK SÜRE	1, 3, 5, 10 mA/cm ² akım yoğunluğu
5 DK SÜRE	1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 mA/cm ² akım yoğunluğu	5 DK SÜRE	1, 3, 5, 10 mA/cm ² akım yoğunluğu
10 DK SÜRE	1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 mA/cm ² akım yoğunluğu	10 DK SÜRE	1, 3, 5, 10 mA/cm ² akım yoğunluğu
MONOPOLAR AL-FE ELEKTROT		BİPOLAR AL-FE ELEKTROT	
1 DK SÜRE	1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 mA/cm ² akım yoğunluğu	1 DK SÜRE	1, 3, 5, 10 mA/cm ² akım yoğunluğu
3 DK SÜRE	1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 mA/cm ² akım yoğunluğu	3 DK SÜRE	1, 3, 5, 10 mA/cm ² akım yoğunluğu
5 DK SÜRE	1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 mA/cm ² akım yoğunluğu	5 DK SÜRE	1, 3, 5, 10 mA/cm ² akım yoğunluğu
10 DK SÜRE	1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 mA/cm ² akım yoğunluğu	10 DK SÜRE	1, 3, 5, 10 mA/cm ² akım yoğunluğu

Şekil 5.15. Deneylerde; elektrot tipi ve geometrisi, akım yoğunluğu, arıtma süresi kombinasyonları

Bipolar bağlantılı elektrotlarla arıtım sırasında, bağlantı geometrisi dolayısıyla oluşan yüksek dirençten ötürü, düşük akım yoğunluklarında bile reaktördeki gerilim

yüksek olmaktadır. Bu nedenle bipolar bağlantılı elektrotlarla yapılan arıtmalarda en fazla 10 mA/cm² akım yoğunluğuna ulaşılabilmektedir.

Deneysel gerçekleştirilirken, elektrokoagülasyon prosesi için kurulan düzenekte reaktör olarak beher kullanılmıştır. Beherin içine arıtılacak miktarda atıksu eklenmiş ve manyetik balık atılmıştır. Beher manyetik karıştırıcı üzerine yerleştirilmiştir. Elektrot demeti bir kordon yardımı ile büret askısına asılmış ve uygun yüksekliğe ayarlanmıştır. Uygun yükseklik, elektrot demetinin reaktöre istenen miktarda daldırılması ile belirlenmiştir. Ardından elektrot demetinde vidaların somun takılan uçlarına yerleştirilen elektrik tellerine biri anot biri katot olacak şekilde bağlantı kabloları takılmıştır. Bağlantı kablolarının diğer uçları güç kaynağına takılmış ve cihaz dikkatlice açılmıştır. Güç kaynağının üzerinde yer alan panelden uygun akım ayarlanarak tepkime başlatılmıştır. Elektrokoagülasyon deneyi için oluşturulan deney düzeneği Şekil 5.16’da verilmiştir.



Şekil 5.16. Elektrokoagülasyon deney düzeneği

Tüm deneyler sırasında her elektrot demetinin aktif elektrot yüzey alanı 100 cm² (EK 1) ve tek seferde arıtılan su miktarı 400 ml’dir. Deneyler sırasında kullanılan atıksu oldukça heterojen bir yapıya sahip olduğundan, her deney grubunda kullanılan ham

atıksuyun pH, sıcaklık, elektriksel iletkenlik, bulanıklık, AKM ölçümleri deney öncesi tekrar yapılmıştır. Her elektrot demeti için, farklı akım yoğunluklarında ve arıtma sürelerinde gerçekleştirilen deneyler sırasında oluşan gerilimler kaydedilmiştir. Arıtılan atıksular 1 saat çökmesi için bekletilmiş ardından pH, sıcaklık, elektriksel iletkenlik, bulanıklık ve AKM parametreleri ölçülmüştür. Bulanıklık ve AKM için giderim verimleri hesaplanmıştır. Ortaya çıkan veriler birbirleriyle karşılaştırılmış ve SKKY’de belirtilen deşarj standartlarına uygunluğu kontrol edilmiştir. Elde edilen verilerde işletme maliyeti hesapları yapılmış ve deneyler ekonomik olarak da birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

5.2.3. Destek elektrolit derişiminin arıtıma etkisi

Çalışmanın bu bölümünde, destek elektrolit derişiminin arıtıma etkisini belirlemek amacıyla, önceki deneylerde belirlenen ideal akım yoğunluğu ve arıtma sürelerinde gerçekleştirilecek arıtımlar öncesinde, reaktördeki atıksulara farklı derişimlerde (0 mM, 0,5 mM, 1 mM ve 3mM) Na_2SO_4 eklenmiş ve her elektrot tipi ve geometrisi ile elektrokoagülasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Elektrokoagülasyon işlemleri sonrasında atıksular, 1 saat çökmesi için bekletilmiş ardından atıksuların gerilim, pH, sıcaklık, elektriksel iletkenlik, bulanıklık, AKM parametreleri ölçülmüş, AKM ve bulanık giderim verimleri hesaplanmıştır. Ortaya çıkan verilerin SKKY’de belirtilen deşarj standartlarına uygunluğu kontrol edilmiştir. Deneyler sırasında oluşan enerji tüketimi maliyetleri hesaplanarak destek elektrolit derişiminin artmasıyla ortaya çıkan enerji maliyeti tasarrufları ortaya konmuştur. Tasarruf edilen enerji maliyetleri, o tasarrufu sağlayan derişimdeki destek elektrolit maliyeti ile kıyaslanarak, destek elektrolit kullanımının işletme maliyeti açısından avantaj sağlayıp sağlamadığı incelenmiştir.

5.2.4. Başlangıç pH’ının arıtıma etkisi

Çalışmanın bu bölümünde, başlangıç pH’ının arıtıma etkisini belirlemek amacıyla, önceki deneylerde belirlenen ideal akım yoğunluğu ve arıtma sürelerinde gerçekleştirilecek arıtımlar öncesinde, reaktördeki atıksuların pH’ları, HCl kullanılarak 6 ve 3 e ayarlanmış ve bunların yanında bir de doğal pH’lı atıksu kullanılarak, her elektrot tipi ve geometrisi ile elektrokoagülasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Elektrokoagülasyon işlemleri sonrasında atıksular, 1 saat çökmesi için bekletilmiş ardından atıksuların gerilim, pH, sıcaklık, elektriksel iletkenlik, bulanıklık, AKM

parametreleri ölçülmüş, AKM ve bulanık giderim verimleri hesaplanmıştır. Ortaya çıkan verilerin SKKY'de belirtilen deşarj standartlarına uygunluğu kontrol edilmiştir. Deneyler sırasında oluşan enerji tüketimi maliyetleri hesaplanarak başlangıç pH'ının düşürülmesiyle ortaya çıkan enerji maliyeti tasarrufları ortaya konmuştur. Tasarruf edilen enerji maliyetleri, o tasarrufu sağlayan miktardaki HCl maliyeti ile kıyaslanarak, başlangıç pH'ını düşürmenin işletme maliyeti açısından avantaj sağlayıp sağlamadığı incelenmiştir.

5.2.5. Çökelme Süresi Karşılaştırmaları

Çalışmanın bu bölümünde farklı elektrot tipi ve geometrileriyle ideal akım yoğunluğu ve arıtma sürelerinde arıtılan mermer atıksularının, arıtmadan hemen sonraki 1 saat içerisinde belli dakikalardaki (0 dk, 5 dk, 10 dk, 15 dk, 20 dk, 30 dk, 40 dk, 45 dk, 50 dk, 60 dk) çökelme durumları incelenmiştir. Diğer yandan arıtılmamış ham atıksu da doğal çökelmeye bırakılmış, belli dakikalarda (0 dk, 5 dk, 10 dk, 15 dk, 20 dk, 30 dk, 40 dk, 45 dk, 50 dk, 60 dk, 75 dk, 90 dk, 105 dk, 120 dk, 135 dk, 150 dk, 165 dk, 180 dk, 195 dk, 210 dk, 225 dk, 240 dk, 255 dk, 270 dk, 285 dk, 300 dk) numuneler alınarak çökelme derecesi tespit edilmiştir. Arıtım uygulanmış atıksuların çökelme durumları ile ham atıksuyun çökelme durumu, bulanıklık ve AKM parametreleri üzerinden karşılaştırılmış ve ne kadar süre sonra AKM deşarj standartlarını karşıladıklarına bakılmıştır.

5.2.4. AKM analizi

AKM tayininde öncelikle kullanılacak filtre kağıtları, etüvde 1 saat bekletilerek sabit tartıma getirilmiştir. 1 saatin sonunda desikatörde soğutularak hassas terazide tartılmıştır. Tartılan filtre kağıtları süzme cihazına dikkatlice yerleştirilmiş ve vakum pompası çalıştırılmıştır. Su örneği filtreden geçirilmiş ve su örneğinin bulunduğu kap saf su ile çalkalanmıştır. Çalkalama suyu da filtreden geçirilmiştir. Süzülme işlemi sona erdiğinde, filtre kağıdı süzme setinden çıkarılmış ve etüve konmuştur. Filtre kağıtları, etüvde 103- 105 C^o'de 1 saat boyunca kurutulmuş ve ardından desikatöre alınmıştır. Filtre kağıtları tamamen soğuduktan sonra ikinci kez hassas terazide tartılmıştır. Tartımlar sonucunda elde edilen veriler, Formül 5.1'de yerine konmuş ve AKM hesabı yapılmıştır.

$$AKM \text{ (mg/L)} = (a-b)/V \quad (5.1)$$

a= İkinci tartım değeri (mg)

b= İlk tartım değeri (mg)

V= Filtreden geçirilen numune hacmi (L)

AKM giderim verimleri Formül 5.2'ye göre hesaplanmıştır.

$$AKM \text{ giderimi (\%)} = [(C_o - C) / C_o] \times 100 \quad (5.2)$$

C_o = Ham atıksuyun AKM değeri (mg/L)

C= Ölçülen numunenin AKM değeri (mg/L)

5.2.5. Bulanıklık analizi

Bulanıklık ölçümlerinin yapıldığı bulanıklık cihazı; bulanıklığı nefelometrik yöntemle, yani atıksudaki partiküllerden yansıyan ışığı ölçerek, okumaktadır. Bulanıklık analizlerinden önce bulanıklık cihazı kalibre edilmiştir. Bulanıklık ölçümü yapılacak olan atıksulardan yaklaşık 25 ml numune alınarak bulanıklık cihazına ait küvete dökülmüştür. Küvetin kapağı sıkıca kapatılarak, cihazın haznesine yerleştirilmiştir. Cihazın bulanıklık okuması beklenmiş ve okunan değerler NTU (Nefelometrik Bulanıklık Birimi) cinsinden kaydedilmiştir.

Bulanıklık giderim verimleri Formül 5.3'e göre hesaplanmıştır.

$$\text{Bulanıklık giderimi (\%)} = [(C_o - C) / C_o] \times 100 \quad (5.3)$$

C_o = Ham atıksuyun bulanıklık değeri (NTU)

C= Ölçülen numunenin bulanıklık değeri (NTU)

5.2.6. pH, elektriksel iletkenlik, sıcaklık ölçümü

pH ölçümlerinin yapıldığı pH metre, aynı zamanda elektriksel iletkenliği ve sıcaklığı ölçebilmektedir. pH ölçümlerinden önce pH metre kalibre edilmiştir. pH metrenin pH, sıcaklık ve elektriksel iletkenlik ölçen problemleri sırasıyla saf sudan geçirilerek okuma yapılacak olan atıksuların içine daldırılmıştır. Cihaz ekranındaki değerler sabitlenene kadar beklenmiş ve sabitlenen değerler kaydedilmiştir. Problemler saf suyla temizlenerek diğer kullanım için hazırlanmıştır.

5.2.7. Toplam Cr analizi

Cr⁺⁶ analizi için, ölçüm yapılacak olan atıksular filtreden geçirilmiş ve ICP cihazıyla toplam Cr analizi gerçekleştirilmiştir. Meydana gelebilecek girişimlere engel olmak amacıyla cihaz, Helyum modunda çalıştırılmıştır. Kromun toplam atomik kütlesi yaklaşık 52 u'dur. Kromun toplam kütlesine benzer kütleye sahip poliatomik girişimlere Helyum gazı gönderildiğinde, bu girişimlerin stabilitesi bozulmaktadır ve cihazın dedektörü, krom benzerliği gösteren poliatomik yapıları elimine ederek, daha doğru bir kalibrasyon ile sonuç vermektedir.

5.2.8. Yağ gres analizi

Yağ gres analizi için, analizi yapılacak olan atıksudan 100 ml numune alınarak, alt musluk akışı kapalı durumdaki ayırma hunisine dökülmüştür. Boşalmış numune kabı içerisine 30 ml Hekzan dökülmüş ve iyice çalkalandıktan sonra ayırma hunisine eklenmiştir. Ayırma hunisi, üst kapağı kapatılarak iyice çalkalandıktan sonra ayırma hunisi içindeki çözeltinin katmanlara ayrılması beklenmiştir. Çözelti katmanlara ayrıldıktan sonra ayırma hunisinin alt musluğu açılmış ve alt katmanda kalan su, numune kabına geri alınmıştır. Ayırma hunisinin altına huni yerleştirilmiş ve huninin geniş ağzına kaba filtre koyulmuştur. Kaba filtrenin üzerine toz halinde 10 g Na₂SO₄ eklenmiştir. Huninin dar ağzı, darası alınmış bir damıtma şişesinin ağzına yerleştirilmiştir. Ayırma hunisinde geride kalmış olan sıvı, huniden geçirilerek damıtma şişesinin içine alınmıştır. Numune kabına geri alınan suyun, ayırma hunisinde hekzanla yıkanması işlemi birkaç kez tekrar edildikten sonra distilasyon işlemine geçilmiştir. Damıtma şişesi sıcak su banyosunda 85C^o'de Hekzan tamamen buharlaşmaya kadar bekletilmiş ve buharlaşan Hekzan, ayrı bir kaptaki soğutularak tekrar sıvı hale getirilmiştir. Hekzanı buharlaşan damıtma şişesi, distilasyon düzeneğinden ayrılarak etüve konmuştur. Damıtma şişesi etüve 105 C^o'de 1 saat bekletilmiş ve desikatöre alınarak tamamen soğuması beklenmiştir. Soğuyan şişenin tartımı yapılmış ve okunan değer kaydedilmiştir. Elde edilen veriler, Formül 5.4'e yerleştirilmiş ve yağ gres miktarı hesaplanmıştır.

$$\text{Yağ gres (mg/L)} = (m_2 - m_1) / V \quad (5.4)$$

m_1 = İlk tartım değeri (mg)

m_2 = İkinci tartım değeri (mg)

V = İşlemden geçirilen numune hacmi (L)

5.2.9. Renk analizi

Renk analizi için, renk analizi yapılacak atıksulardan 100 ml numune alınarak kaba filtreden geçirilmiştir. Filtreden geçirilen atıksular sırasıyla, renk okuması yapacak olan spektrofotometrenin kuvvetlerine doldurulmuş ve cihazda okuma yapılmıştır. Okunan renk değerleri kaydedilmiştir.

5.2.10. KOİ analizi

KOİ analizi, TS 2789 ISO 6060 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. KOİ analizi yapılacak olan atıksulardan 1 ml'lik numuneler alınarak KOİ tüplerine aktarılmıştır. KOİ tüplerine aktarılan numuneler üzerine 0,5 ml potasyum dikromat ve 1,5 ml gümüş sülfat-sülfirik asit çözeltisi eklenmiştir. KOİ tüplerinin ağızları sıkıca kapatılmış ve tüpler termoreaktöre alınarak 150 C°'de 2 saat bekletilmiştir. 2 saatin sonunda tüpler termoreaktörden çıkarılmış ve soğumaları beklenmiştir. Soğuyan tüplere 4,5 ml saf su eklenmiş ve tüpler erlenlere boşaltılmıştır. Erlenlerdeki sıvının üzerine 2 damla ferroin indikatörü damlatılmış ve DAS (demir amonyum sülfat) ile, sıvıda yeşilden kırmızıya renk dönüşümü gözleninceye kadar, titrasyon yapılmıştır. Saf su yani şahit için de aynı işlemler gerçekleştirilmiştir. Titrasyon sırasında sarf edilen DAS miktarları kaydedilmiş ve Formül 5.5 ve Formül 5.6'da yerlerine konarak KOİ değerleri hesaplanmıştır.

$$C = 2,4 / V_o \quad (5.5)$$

$$\text{KOİ (mg/L)} = [(A - B) \times C \times 8000] / V \quad (5.6)$$

V_o = Standardizasyonda sarfedilen DAS miktarı (ml)

C = DAS çözeltisi molaritesi (M)

A = Şahit için sarfedilen DAS miktarı (ml)

B = Numune için sarfedilen DAS miktarı (ml)

V = KOİ'si ölçülen numune miktarı (ml)

5.2.10. Zeta potansiyeli analizi

Zeta potansiyeli değeri sudaki parçacıkların çökelme potansiyelini ortaya koymaktadır. Zeta potansiyeli analizi için, analiz yapılacak olan atıksu numuneleri, zeta potansiyeli cihazının ölçüm küvetine, içinde hava kalmayacak şekilde doldurulmuş ve küvetin kapakları kapatıldıktan sonra küvet cihazın haznesine yerleştirilmiştir. Hazne kapağı kapatılmış ve cihazın bağlı olduğu bilgisayardan program çalıştırılmıştır. Cihazın okuma yapması beklenmiş ve okunan değerler kaydedilmiştir.

5.2.11. Çamur tartımı

Çamur tartımı için, darası alınan beherlerde bulunan 400 ml'lik atıksular, iyice ökelene kadar dinlendirilmiş, beherin üst kısmından berrak su atıldıktan sonra kalan tortulu kısım, etüvde buharlaştırılmıştır. Buharlaştırıldıktan sonra, beherler tekrar tartılmıştır. Bu tartımda elde edilen değerlerden beher daraları çıkarılarak, atıksuların çamur miktarları mg/400 ml cinsinden hesaplanmıştır.

6. BULGULAR

6.1. Farklı Elektrot Tipi ve Geometrileri ile Yapılan Arıtmalarda Akım Yoğunluğunun Arıtıma Etkisi

Mermer atıksuyunun elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılmasında her bir elektrot tipi ve geometrisi için farklı akım yoğunluklarının ve farklı elektroliz sürelerinin arıtıma etkisi incelenmiştir.

Deneyler sırasıyla; Monopolar Fe-Fe, Monopolar Al-Al, Monopolar Al-Fe, Bipolar Fe-Fe, Bipolar Al-Al, Bipolar Al-Fe elektrot demetleriyle gerçekleştirilmiştir. Tüm deneyler sırasında her elektrot demetinin aktif elektrot yüzey alanı 100 cm² (EK 1) ve tek seferde arıtılan su miktarı 400 ml'dir. Her bir elektrot demeti için Çizelge 6.1'de belirtilen akım şiddetleri 1 dk, 3 dk, 5 dk ve 10 dk deney sürelerinde uygulanmıştır. Uygulanan akım şiddetlerine karşılık gelen akım yoğunlukları Çizelge 6.1'de mA/cm² cinsinden gösterilmiştir.

Çizelge 6.1. Akım şiddeti – akım yoğunluğu ilişkisi

Akım Şiddeti (A)	Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)
0,1	1
0,2	2
0,3	3
0,4	4
0,5	5
1,0	10
1,5	15
2,0	20
2,5	25
3,0	30
3,5	35
4,0	40

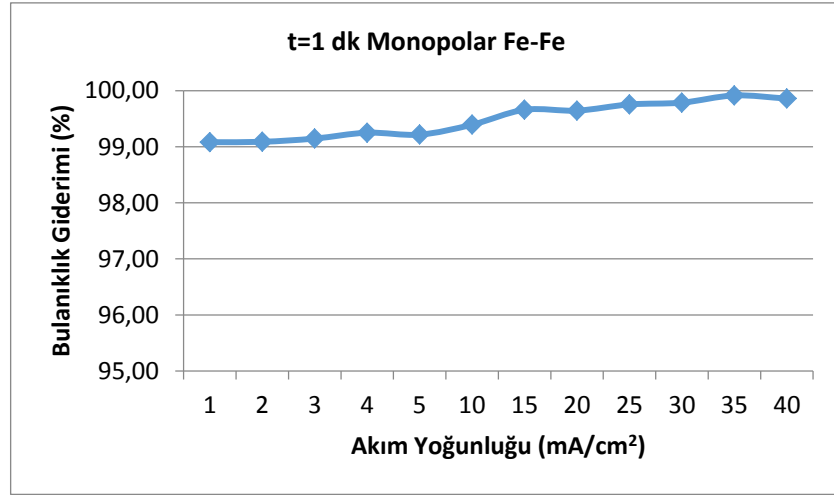
Deneyler sırasında kullanılan atıksu oldukça heterojen bir yapıya sahip olduğundan her deney grubunda kullanılan ham atıksuyun pH, sıcaklık, elektriksel iletkenlik, bulanıklık, AKM ölçümleri deney öncesi tekrar yapılmıştır. Her elektrot demeti için farklı akım yoğunluklarında ve arıtma sürelerinde gerçekleştirilen deneyler sırasında oluşan potansiyel farklar kaydedilmiş ve gerilim belirlenmiştir. Arıtılan atıksular 1 saat bekletilmiş ardından pH, sıcaklık, elektriksel iletkenlik, bulanıklık ve AKM parametreleri ölçülmüştür. Bulanıklık ve AKM için giderim verimleri hesaplanmıştır.

6.1.1. Monopolar Fe-Fe elektrot ile yapılan çalışmalar

6.1.1.1. Monopolar Fe-Fe elektrot ile yapılan 1 dakika süreli çalışmalar

Farklı akım yoğunluklarının 1 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulanıklık giderimi sonuçları

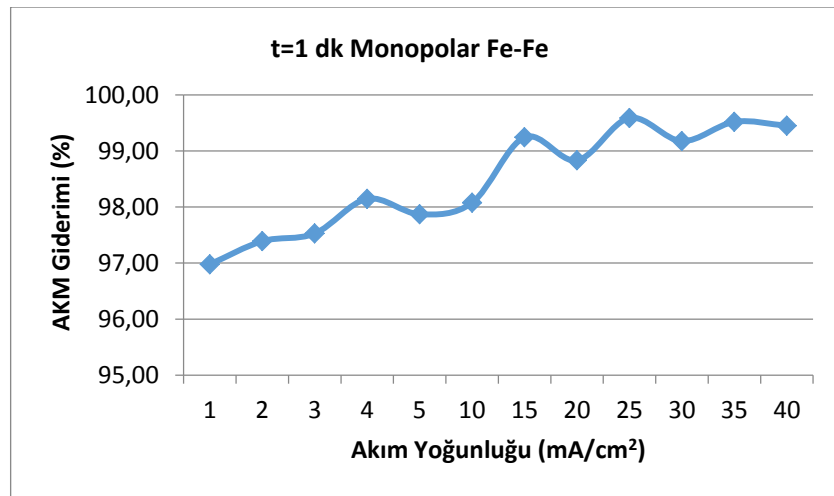
Monopolar Fe-Fe elektrot ile 1 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı bulanıklık giderimleri Şekil 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1. Monopolar Fe-Fe elektrot, t=1 dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 1 dakika uygulanmasıyla elde edilen AKM giderimi sonuçları

Monopolar Fe-Fe elektrot ile 1 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı AKM giderimi Şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.2. Monopolar Fe-Fe elektrot, t=1 dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 1 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulgular

Monopolar Fe-Fe elektrot ile 1 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinde farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2. *Monopolar Fe-Fe elektrot, t=1 dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular*

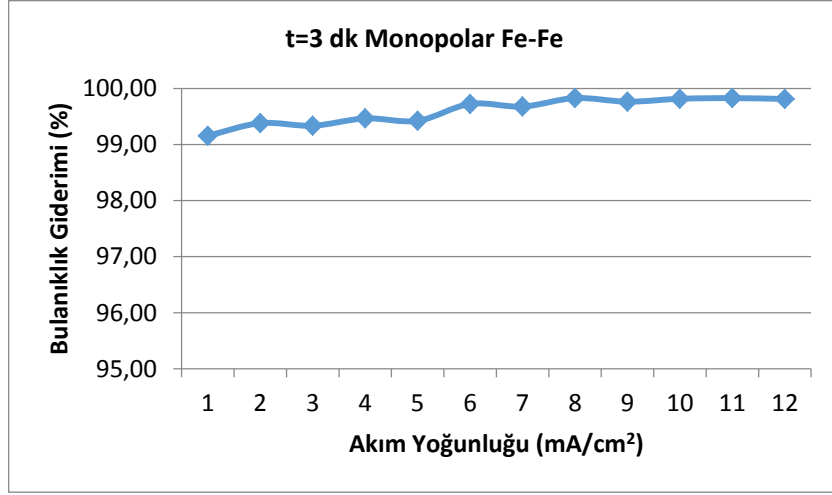
Akım Yoğunluğu (mA/cm²)	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM (mg/L)	AKM Giderimi (%)
1	2,00	7,83	18,0	785	92,3	99,08	88	96,98
2	3,20	7,72	17,9	802	91,6	99,09	76	97,39
3	3,60	7,98	17,9	786	85,8	99,15	72	97,53
4	4,25	7,74	18,0	830	75,3	99,25	54	98,15
5	4,95	8,42	18,0	801	78,7	99,22	62	97,87
10	9,05	7,67	17,8	847	60,9	99,39	56	98,08
15	11,25	9,13	18,2	760	34,2	99,66	22	99,24
20	13,80	7,73	18,4	808	35,7	99,64	34	98,83
25	17,85	9,39	18,4	765	24,6	99,76	12	99,59
30	19,30	7,31	18,6	787	21,4	99,79	24	99,18
35	23,10	9,24	18,8	754	8,5	99,92	14	99,52
40	23,10	7,93	19,1	808	14,1	99,86	16	99,45

Ham Atıksu Karakterizasyonu; Bulanıklık 10050 NTU, AKM 2912 mg/L, pH 8,09, Sıcaklık 17,7 C°, Elektriksel İletkenlik 815 µS/cm

6.1.1.2. Monopolar Fe-Fe elektrot ile yapılan 3 dakika süreli çalışmalar

Farklı akım yoğunluklarının 3 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulanıklık giderimi sonuçları

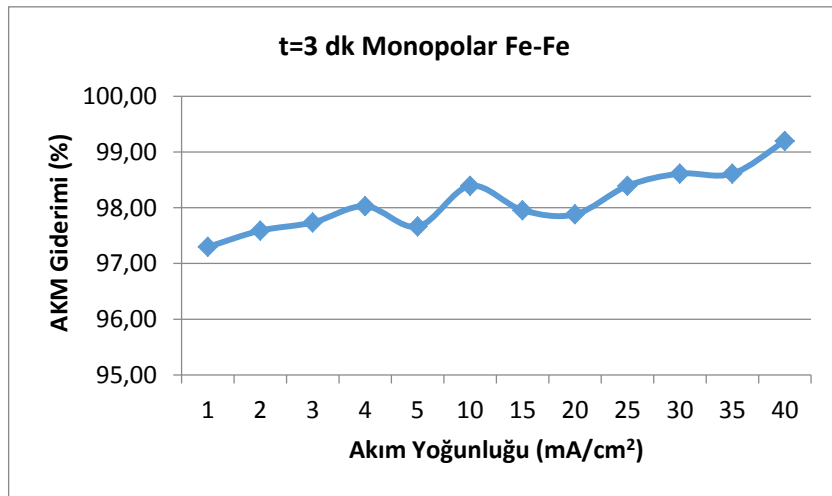
Monopolar Fe-Fe elektrot ile 3 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı bulanıklık giderimleri Şekil 6.3’de verilmiştir.



Şekil 6.3. Monopolar Fe-Fe elektrot, $t=3$ dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 3 dakika uygulanmasıyla elde edilen AKM giderimi sonuçları

Monopolar Fe-Fe elektrot ile 3 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı AKM giderimi Şekil 6.4’de verilmiştir.



Şekil 6.4. Monopolar Fe-Fe elektrot, $t=3$ dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 3 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulgular

Monopolar Fe-Fe elektrot ile 3 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinde farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular Çizelge 6.3'de verilmiştir.

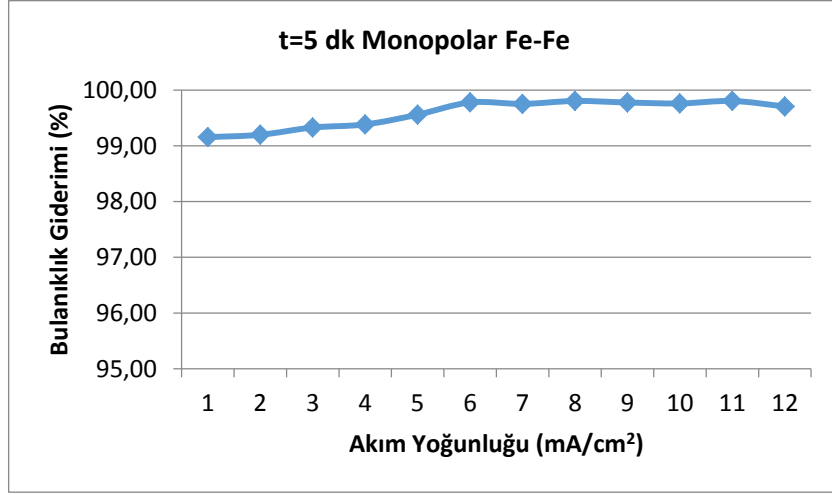
Çizelge 6.3. Monopolar Fe-Fe elektrot, $t=3$ dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular

Akım Yoğunluğu (mA/cm²)	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM (mg/L)	AKM Giderimi (%)
1	2,25	7,15	14,8	831	84,6	99,16	74	97,30
2	3,25	7,50	14,6	807	62,1	99,38	66	97,59
3	3,60	7,48	14,7	828	66,6	99,34	62	97,74
4	4,55	8,09	14,9	827	53,6	99,47	54	98,03
5	4,90	7,67	15,0	826	57,8	99,42	64	97,66
10	8,65	9,04	15,1	764	27,6	99,72	44	98,39
15	11,60	7,62	15,8	790	32,3	99,68	56	97,95
20	15,05	9,29	16,5	697	17,2	99,83	58	97,88
25	17,75	8,47	17,0	745	23,6	99,76	44	98,39
30	22,20	9,59	18,0	652	18,5	99,82	38	98,61
35	22,65	8,58	18,7	711	17,2	99,83	38	98,61
40	28,10	9,34	19,9	633	18,8	99,81	22	99,20
Ham Atıksu Karakterizasyonu; Bulanıklık 10030 NTU, AKM 2738 mg/L, pH 8,24, Sıcaklık 15,6 C°, Elektriksel İletkenlik 836 µS/cm								

6.1.1.3. Monopolar Fe-Fe elektrot ile yapılan 5 dakika süreli çalışmalar

Farklı akım yoğunluklarının 5 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulanıklık giderimi sonuçları

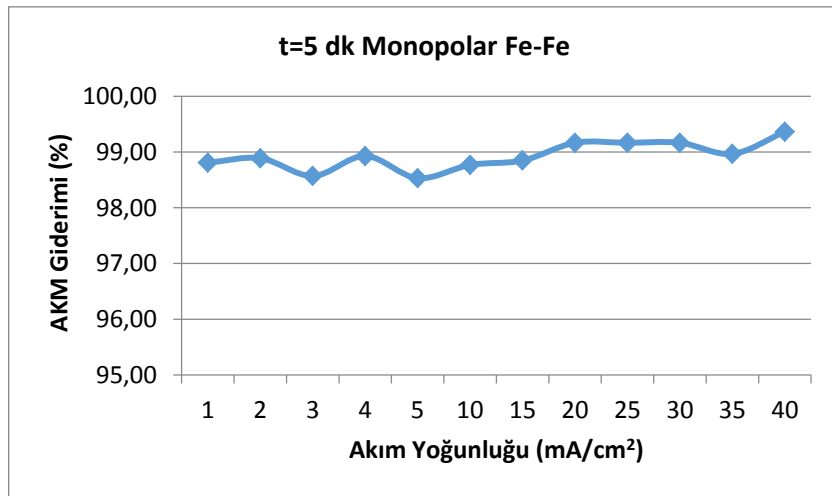
Monopolar Fe-Fe elektrot ile 5 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı bulanıklık giderimleri Şekil 6.5’de verilmiştir.



Şekil 6.5. Monopolar Fe-Fe elektrot, t=5 dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 5 dakika uygulanmasıyla elde edilen AKM giderimi sonuçları

Monopolar Fe-Fe elektrot ile 5 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı AKM giderimi Şekil 6.6’da verilmiştir.



Şekil 6.6. Monopolar Fe-Fe elektrot, t=5 dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 5 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulgular

Monopolar Fe-Fe elektrot ile 5 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinde farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular Çizelge 6.4'de verilmiştir.

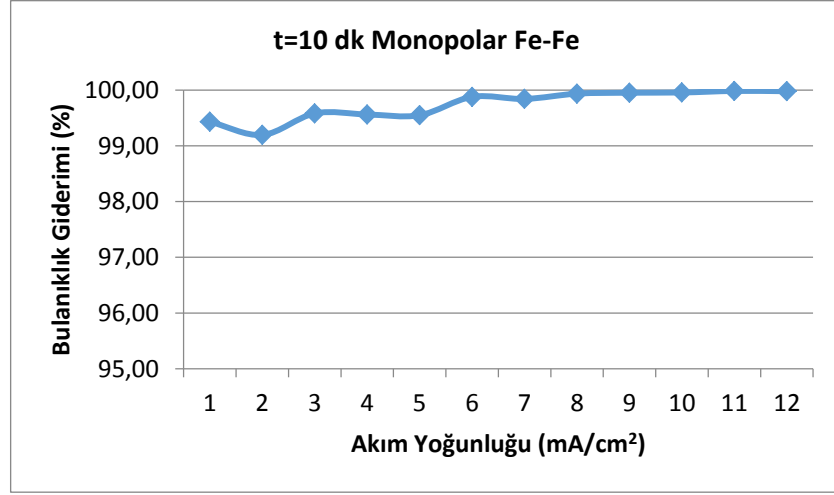
Çizelge 6.4. *Monopolar Fe-Fe elektrot, t=5 dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular*

Akım Yoğunluğu (mA/cm²)	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM (mg/L)	AKM Giderimi (%)
1	1,80	7,31	16,9	862	90,1	99,16	60	98,81
2	2,55	8,07	16,8	785	85,5	99,20	56	98,89
3	3,35	7,23	17,0	821	71,6	99,33	72	98,57
4	4,25	8,20	17,3	801	65,7	99,38	54	98,93
5	5,45	7,37	17,4	833	47,0	99,56	74	98,53
10	8,30	9,10	17,9	732	23,6	99,78	62	98,77
15	11,00	8,87	18,6	710	26,4	99,75	58	98,85
20	14,35	9,49	19,7	676	20,8	99,81	42	99,17
25	16,70	9,08	20,4	683	23,7	99,78	42	99,17
30	19,80	9,42	21,5	631	25,5	99,76	42	99,17
35	20,85	9,10	22,3	643	20,8	99,81	52	98,97
40	24,25	9,09	23,7	610	31,3	99,71	32	99,36
Ham Atıksu Karakterizasyonu; Bulanıklık 10670 NTU, AKM 5036 mg/L, pH 7,82, Sıcaklık 16,5 C°, Elektriksel İletkenlik 874 µS/cm								

6.1.1.4. Monopolar Fe-Fe elektrot ile yapılan 10 dakika süreli çalışmalar

Farklı akım yoğunluklarının 10 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulanıklık giderimi sonuçları

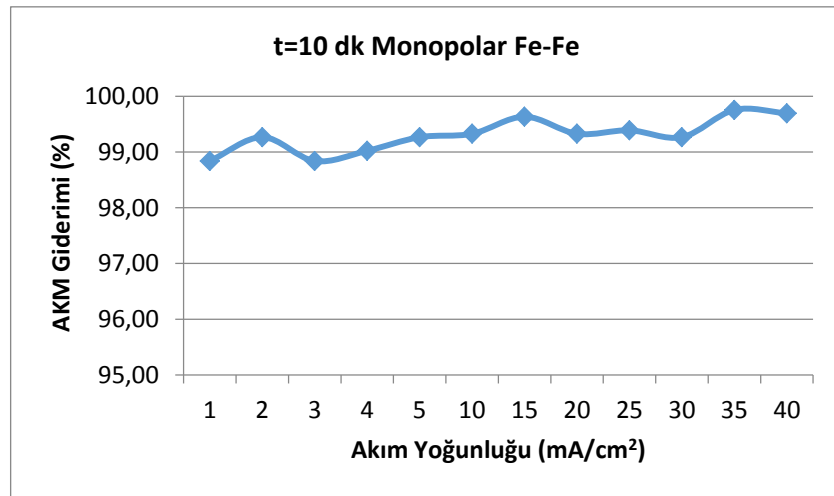
Monopolar Fe-Fe elektrot ile 10 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı bulanıklık giderimleri Şekil 6.7’de verilmiştir.



Şekil 6.7. Monopolar Fe-Fe elektrot, t=10 dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 10 dakika uygulanmasıyla elde edilen AKM giderimi sonuçları

Monopolar Fe-Fe elektrot ile 10 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı AKM giderimi Şekil 6.8’de verilmiştir.



Şekil 6.8. Monopolar Fe-Fe elektrot, t=10 dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 10 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulgular

Monopolar Fe-Fe elektrot ile 10 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinde farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular Çizelge 6.5'de verilmiştir.

Çizelge 6.5. Monopolar Fe-Fe elektrot, $t=10$ dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular

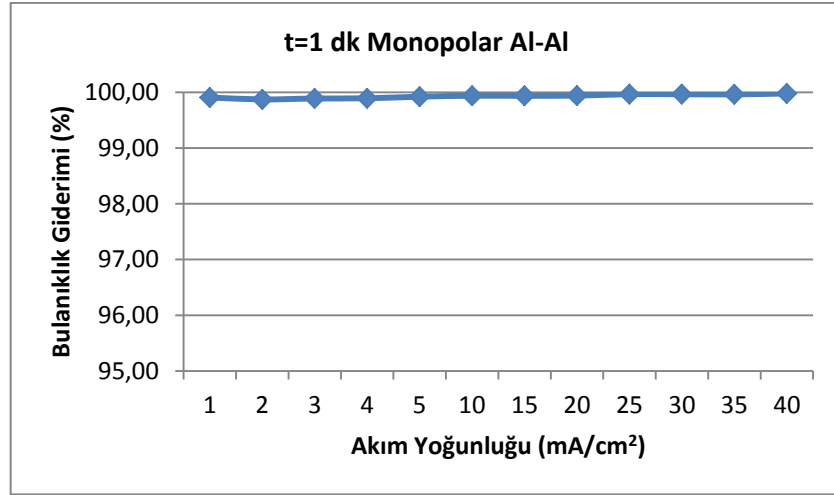
Akım Yoğunluğu (mA/cm²)	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM (mg/L)	AKM Giderimi (%)
1	1,70	7,55	18,3	829	58,10	99,43	38	98,84
2	3,15	7,38	18,3	812	82,30	99,20	24	99,27
3	4,60	7,72	18,5	763	42,80	99,58	38	98,84
4	5,85	8,21	18,7	726	44,80	99,56	32	99,02
5	5,75	8,40	18,8	726	46,10	99,55	24	99,27
10	9,10	9,38	19,3	648	12,40	99,88	22	99,33
15	12,35	9,28	20,9	621	16,20	99,84	12	99,63
20	14,55	9,31	22,5	584	6,52	99,94	22	99,33
25	16,80	9,34	23,2	577	4,82	99,95	20	99,39
30	18,45	9,36	24,4	580	4,40	99,96	24	99,27
35	20,30	9,28	26,2	573	1,54	99,98	8	99,76
40	23,45	9,19	26,6	568	2,09	99,98	10	99,69
Ham Atıksu Karakterizasyonu; Bulanıklık 10240 NTU, AKM 3272 mg/L, pH 7,92, Sıcaklık 18,1 C°, Elektriksel İletkenlik 870 µS/cm								

6.1.2. Monopolar Al-Al elektrot ile yapılan çalışmalar

6.1.2.1. Monopolar Al-Al elektrot ile yapılan 1 dakika süreli çalışmalar

Farklı akım yoğunluklarının 1 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulanıklık giderimi sonuçları

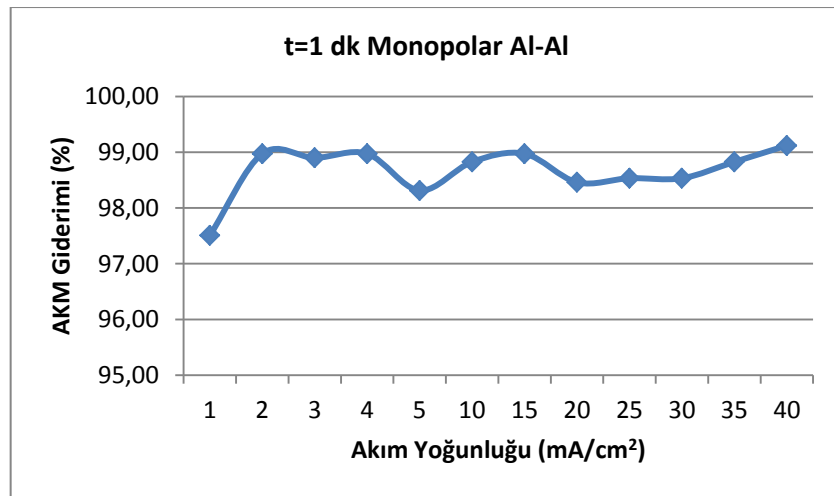
Monopolar Al-Al elektrot ile 1 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı bulanıklık giderimleri Şekil 6.9'da verilmiştir.



Şekil 6.9. Monopolar Al-Al elektrot, $t=1$ dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 1 dakika uygulanmasıyla elde edilen AKM giderimi sonuçları

Monopolar Al-Al elektrot ile 1 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı AKM giderimi Şekil 6.10'da verilmiştir.



Şekil 6.10. Monopolar Al-Al elektrot, $t=1$ dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 1 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulgular

Monopolar Al-Al elektrot ile 1 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinde farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular Çizelge 6.6'da verilmiştir.

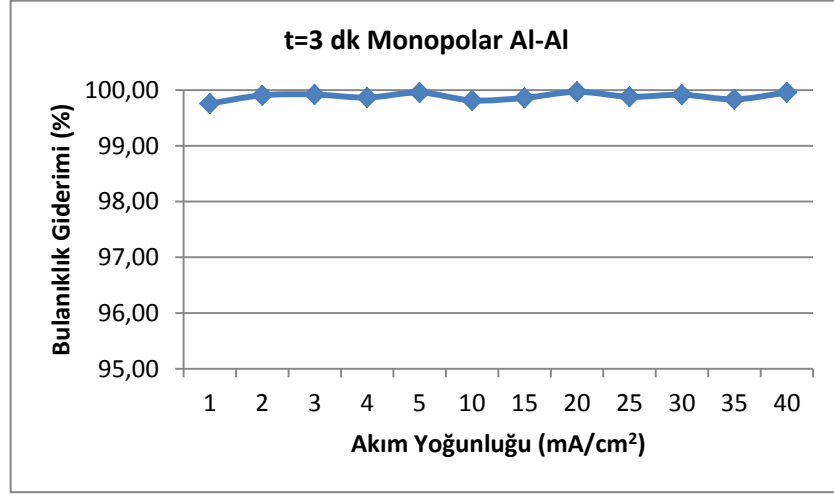
Çizelge 6.6. *Monopolar Al-Al elektrot, t=1 dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular*

Akım Yoğunluğu (mA/cm²)	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM (mg/L)	AKM Giderimi (%)
1	2,00	8,12	14,3	878	9,37	99,91	68	97,51
2	2,65	8,12	13,6	873	12,80	99,87	28	98,97
3	3,15	8,11	14,1	871	11,20	99,89	30	98,90
4	3,70	8,06	13,8	869	10,80	99,89	28	98,97
5	4,50	8,00	13,5	877	7,87	99,92	46	98,31
10	7,50	7,96	14,3	860	6,20	99,94	32	98,83
15	10,30	8,10	14,9	849	6,33	99,94	28	98,97
20	12,85	7,79	15,1	845	5,94	99,94	42	98,46
25	16,05	7,77	15,9	831	3,38	99,97	40	98,53
30	18,25	7,59	16,7	829	3,50	99,97	40	98,53
35	19,90	7,52	17,1	817	3,76	99,96	32	98,83
40	22,90	7,90	18,1	801	2,08	99,98	24	99,12
Ham Atıksu Karakterizasyonu; Bulanıklık 10100 NTU, AKM 2728 mg/L, pH 8,04, Sıcaklık 15,5 C°, Elektriksel İletkenlik 938 µS/cm								

6.1.2.2. Monopolar Al-Al elektrot ile yapılan 3 dakika süreli çalışmalar

Farklı akım yoğunluklarının 3 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulanıklık giderimi sonuçları

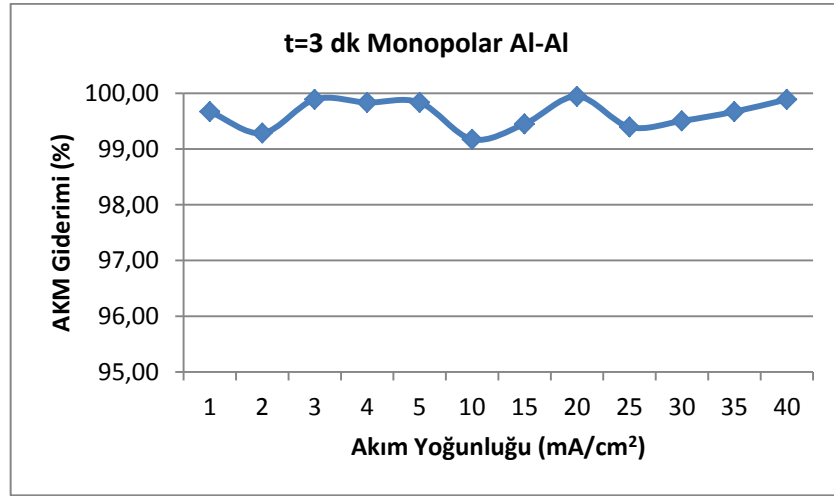
Monopolar Al-Al elektrot ile 3 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı bulanıklık giderimleri Şekil 6.11’de verilmiştir.



Şekil 6.11. Monopolar Al-Al elektrot, $t=3$ dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 3 dakika uygulanmasıyla elde edilen AKM giderimi sonuçları

Monopolar Al-Al elektrot ile 3 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı AKM giderimi Şekil 6.12’de verilmiştir.



Şekil 6.12. Monopolar Al-Al elektrot, $t=3$ dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 3 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulgular

Monopolar Al-Al elektrot ile 3 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinde farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular Çizelge 6.7'de verilmiştir.

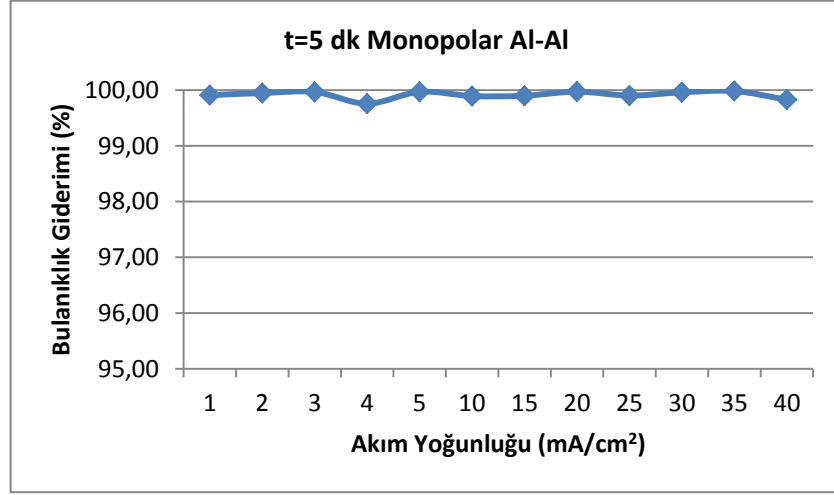
Çizelge 6.7. Monopolar Al-Al elektrot, $t=3$ dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular

Akım Yoğunluğu (mA/cm²)	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM (mg/L)	AKM Giderimi (%)
1	2,05	7,42	22,7	884	17,40	99,76	12	99,67
2	2,15	7,74	22,8	868	6,71	99,91	26	99,29
3	2,65	7,83	22,9	870	5,72	99,92	4	99,89
4	3,35	7,90	23,0	856	9,65	99,87	6	99,84
5	3,80	7,90	23,1	853	3,18	99,96	6	99,84
10	5,70	7,87	23,2	817	13,30	99,82	30	99,18
15	8,40	7,68	23,8	789	10,03	99,86	20	99,45
20	11,05	7,93	24,4	773	2,15	99,97	2	99,95
25	12,75	8,02	24,6	761	8,60	99,88	22	99,40
30	15,00	7,87	25,3	730	6,00	99,92	18	99,51
35	18,30	8,09	26,2	744	11,90	99,83	12	99,67
40	20,40	8,39	26,2	703	3,12	99,96	4	99,89
Ham Atıksu Karakterizasyonu; Bulanıklık 7200 NTU, AKM 3638 mg/L, pH 8,26, Sıcaklık 22,5 C°, Elektriksel İletkenlik 903 µS/cm								

6.1.2.3. Monopolar Al-Al elektrot ile yapılan 5 dakika süreli çalışmalar

Farklı akım yoğunluklarının 5 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulanıklık giderimi sonuçları

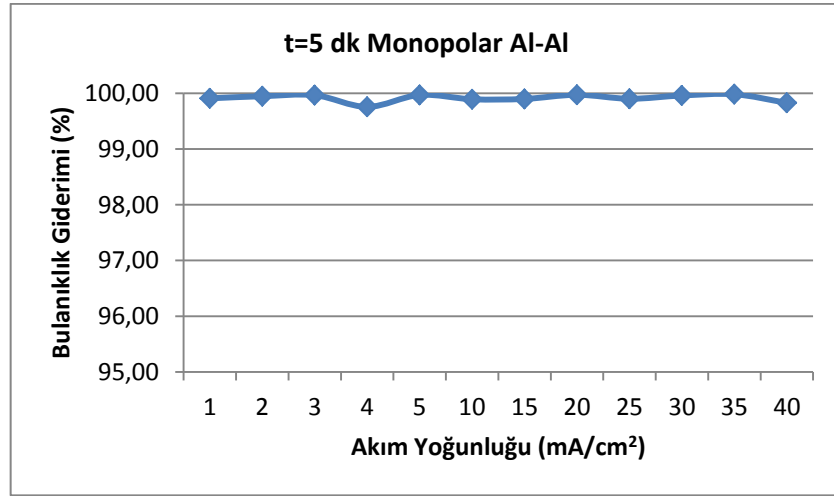
Monopolar Al-Al elektrot ile 5 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı bulanıklık giderimleri Şekil 6.13’de verilmiştir.



Şekil 6.13. Monopolar Al-Al elektrot, t=5 dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 5 dakika uygulanmasıyla elde edilen AKM giderimi sonuçları

Monopolar Al-Al elektrot ile 5 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı AKM giderimi Şekil 6.14’de verilmiştir.



Şekil 6.14. Monopolar Al-Al elektrot, t=5 dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 5 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulgular

Monopolar Al-Al elektrot ile 5 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinde farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular Çizelge 6.8'de verilmiştir.

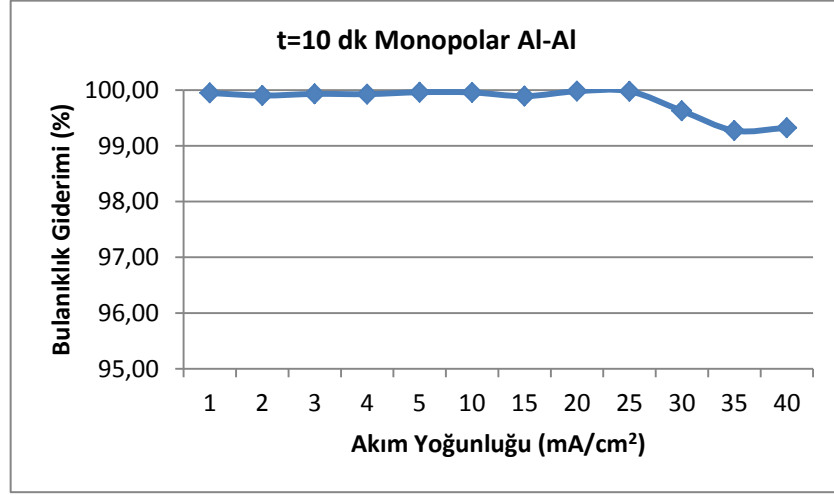
Çizelge 6.8. Monopolar Al-Al elektrot, $t=5$ dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular

Akım Yoğunluğu (mA/cm²)	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM (mg/L)	AKM Giderimi (%)
1	2,15	7,16	22,7	871	8,48	99,91	20	99,48
2	2,00	7,78	22,8	845	4,88	99,95	22	99,43
3	2,25	8,06	23,0	827	3,17	99,97	10	99,74
4	3,15	8,12	23,1	819	22,70	99,76	14	99,64
5	3,55	8,10	23,4	812	2,83	99,97	14	99,64
10	6,30	7,97	23,6	753	10,00	99,89	34	99,12
15	8,75	7,94	24,5	718	9,44	99,90	18	99,53
20	11,25	8,17	25,2	701	2,47	99,97	4	99,90
25	13,20	8,34	25,6	685	9,16	99,90	12	99,69
30	15,45	8,45	26,5	665	3,71	99,96	24	99,38
35	17,60	8,50	27,7	655	1,64	99,98	20	99,48
40	20,10	8,54	28,5	644	16,00	99,83	20	99,48
Ham Atıksu Karakterizasyonu; Bulanıklık 9330 NTU, AKM 3842 mg/L, pH 8,28, Sıcaklık 22,6 C°, Elektriksel İletkenlik 876 µS/cm								

6.1.2.4. Monopolar Al-Al elektrot ile yapılan 10 dakika süreli çalışmalar

Farklı akım yoğunluklarının 10 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulanıklık giderimi sonuçları

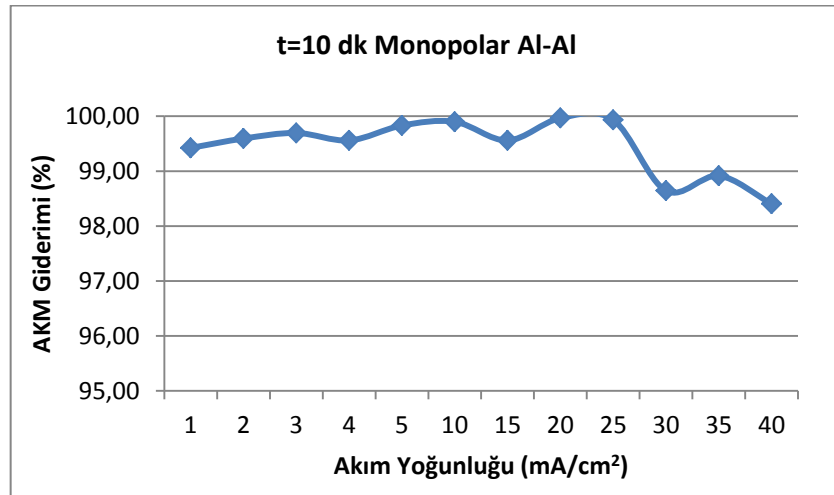
Monopolar Al-Al elektrot ile 10 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı bulanıklık giderimleri Şekil 6.15’de verilmiştir.



Şekil 6.15. Monopolar Al-Al elektrot, t=10 dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 10 dakika uygulanmasıyla elde edilen AKM giderimi sonuçları

Monopolar Al-Al elektrot ile 10 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı AKM giderimi Şekil 6.16’da verilmiştir.



Şekil 6.16. Monopolar Al-Al elektrot, t=10 dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 10 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulgular

Monopolar Al-Al elektrot ile 10 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinde farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular Çizelge 6.9'da verilmiştir.

Çizelge 6.9. Monopolar Al-Al elektrot, $t=10$ dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular

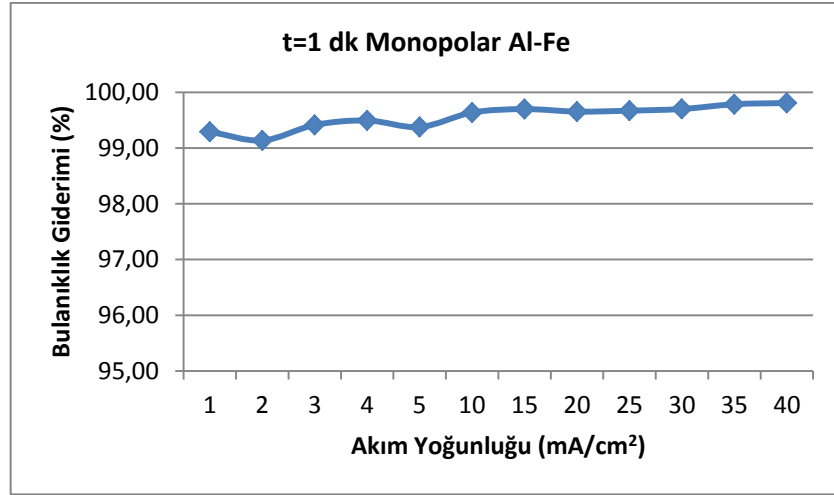
Akım Yoğunluğu (mA/cm²)	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM (mg/L)	AKM Giderimi (%)
1	2,25	8,01	23,2	867	4,60	99,95	34	99,42
2	2,10	8,30	23,3	858	8,64	99,90	24	99,59
3	2,65	8,31	23,4	846	6,04	99,93	18	99,69
4	2,90	8,45	23,6	813	6,41	99,93	26	99,56
5	3,85	8,32	23,9	788	3,39	99,96	10	99,83
10	6,45	8,52	24,5	720	3,71	99,96	6	99,90
15	8,50	8,65	27,1	658	9,65	99,89	26	99,56
20	10,95	8,73	27,7	646	1,81	99,98	2	99,97
25	13,10	8,77	28,4	691	1,96	99,98	4	99,93
30	16,10	8,63	30,3	662	33,00	99,63	80	98,64
35	17,05	8,49	31,9	666	64,30	99,27	64	98,91
40	18,95	8,36	32,8	704	59,90	99,32	94	98,41
Ham Atıksu Karakterizasyonu; Bulanıklık 8850 NTU, AKM 5898 mg/L, pH 8,07, Sıcaklık 23,3 C°, Elektriksel İletkenlik 1006 µS/cm								

6.1.3. Monopolar Al-Fe elektrot ile yapılan çalışmalar

6.1.3.1. Monopolar Al-Fe elektrot ile yapılan 1 dakika süreli çalışmalar

Farklı akım yoğunluklarının 1 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulanıklık giderimi sonuçları

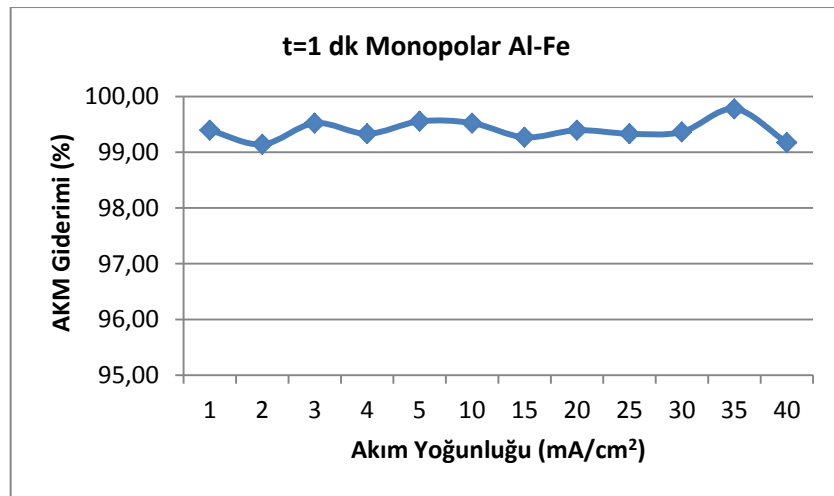
Monopolar Al-Fe elektrot ile 1 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı bulanıklık giderimleri Şekil 6.17’de verilmiştir.



Şekil 6.17. Monopolar Al-Fe elektrot, t=1 dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 1 dakika uygulanmasıyla elde edilen AKM giderimi sonuçları

Monopolar Al-Fe elektrot ile 1 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı AKM giderimi Şekil 6.18’de verilmiştir.



Şekil 6.18. Monopolar Al-Fe elektrot, t=1 dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 1 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulgular

Monopolar Al-Fe elektrot ile 1 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinde farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular Çizelge 6.10'da verilmiştir.

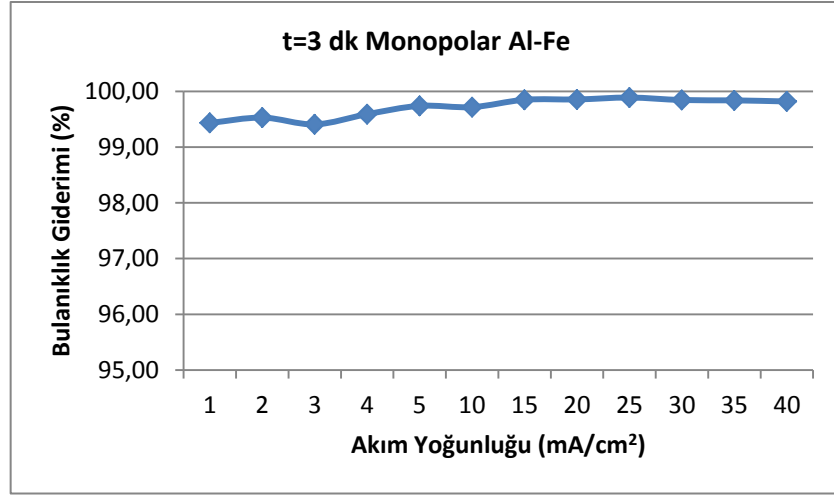
Çizelge 6.10. Monopolar Al-Fe elektrot, $t=1$ dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular

Akım Yoğunluğu (mA/cm²)	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM (mg/L)	AKM Giderimi (%)
1	1,90	7,95	14,6	916	69,80	99,29	38	99,40
2	3,00	7,89	14,5	908	85,20	99,14	54	99,14
3	3,80	7,86	14,6	909	57,80	99,41	30	99,52
4	4,60	7,87	14,6	905	49,90	99,49	42	99,33
5	5,20	7,86	14,7	901	61,40	99,38	28	99,55
10	8,45	7,82	14,7	895	35,80	99,64	30	99,52
15	11,45	7,76	15,0	869	29,70	99,70	46	99,27
20	13,10	7,74	15,2	860	34,10	99,65	38	99,40
25	15,70	7,70	15,6	837	32,50	99,67	42	99,33
30	18,45	7,70	15,6	826	29,50	99,70	40	99,36
35	21,50	7,70	16,2	813	21,10	99,79	14	99,78
40	23,65	7,71	16,6	802	18,90	99,81	52	99,17
Ham Atıksu Karakterizasyonu; Bulanıklık 9870 NTU, AKM 6288 mg/L, pH 7,83, Sıcaklık 15,2 C°, Elektriksel İletkenlik 910 µS/cm								

6.1.3.2. Monopolar Al-Fe elektrot ile yapılan 3 dakika süreli çalışmalar

Farklı akım yoğunluklarının 3 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulanıklık giderimi sonuçları

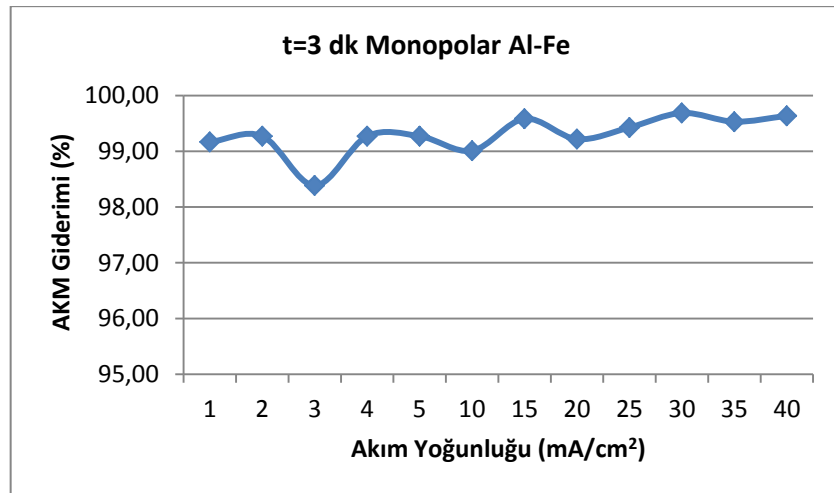
Monopolar Al-Fe elektrot ile 3 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı bulanıklık giderimleri Şekil 6.19'da verilmiştir.



Şekil 6.19. Monopolar Al-Fe elektrot, t=3 dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 3 dakika uygulanmasıyla elde edilen AKM giderimi sonuçları

Monopolar Al-Fe elektrot ile 3 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı AKM giderimi Şekil 6.20'de verilmiştir.



Şekil 6.20. Monopolar Al-Fe elektrot, t=3 dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 3 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulgular

Monopolar Al-Fe elektrot ile 3 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinde farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular Çizelge 6.11’de verilmiştir.

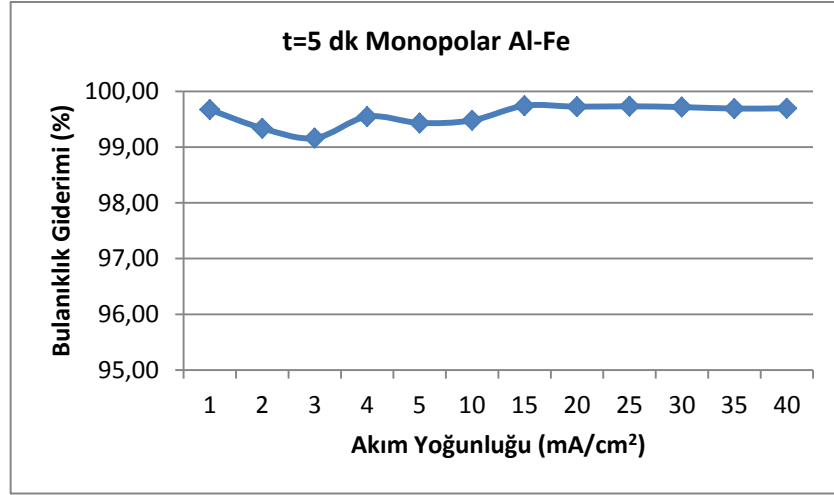
Çizelge 6.11. *Monopolar Al-Fe elektrot, t=3 dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular*

Akım Yoğunluğu (mA/cm²)	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM (mg/L)	AKM Giderimi (%)
1	2,75	8,00	14,2	898	46,70	99,43	32	99,17
2	2,90	7,98	14,3	892	38,80	99,53	28	99,27
3	3,65	7,96	14,4	884	48,80	99,41	62	98,39
4	4,25	7,67	14,5	885	33,70	99,59	28	99,27
5	4,60	7,71	14,6	873	21,40	99,74	28	99,27
10	8,05	7,60	15,0	828	23,30	99,72	38	99,01
15	10,40	7,68	15,5	806	12,40	99,85	16	99,58
20	13,50	7,47	16,0	780	11,90	99,86	30	99,22
25	16,05	7,43	16,6	764	9,16	99,89	22	99,43
30	18,30	7,22	17,4	731	12,80	99,84	12	99,69
35	20,35	7,55	18,3	714	13,30	99,84	18	99,53
40	22,70	7,61	18,8	700	14,90	99,82	14	99,64
Ham Atıksu Karakterizasyonu; Bulanıklık 8250 NTU, AKM 3842 mg/L, pH 8,07, Sıcaklık 14,4 C°, Elektriksel İletkenlik 903 µS/cm								

6.1.3.3. Monopolar Al-Fe elektrot ile yapılan 5 dakika süreli çalışmalar

Farklı akım yoğunluklarının 5 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulanıklık giderimi sonuçları

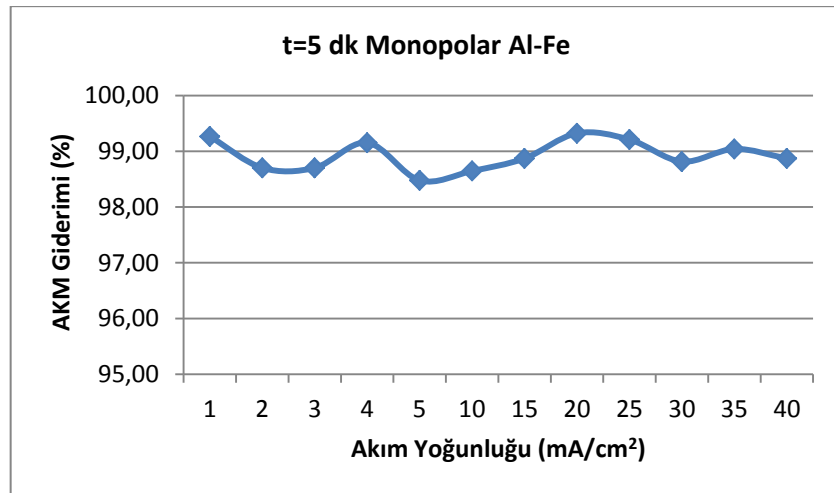
Monopolar Al-Fe elektrot ile 5 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı bulanıklık giderimleri Şekil 6.21’de verilmiştir.



Şekil 6.21. Monopolar Al-Fe elektrot, t=5 dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 5 dakika uygulanmasıyla elde edilen AKM giderimi sonuçları

Monopolar Al-Fe elektrot ile 5 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı AKM giderimi Şekil 6.22’de verilmiştir.



Şekil 6.22. Monopolar Al-Fe elektrot, t=5 dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 5 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulgular

Monopolar Al-Fe elektrot ile 5 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinde farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular Çizelge 6.12’de verilmiştir.

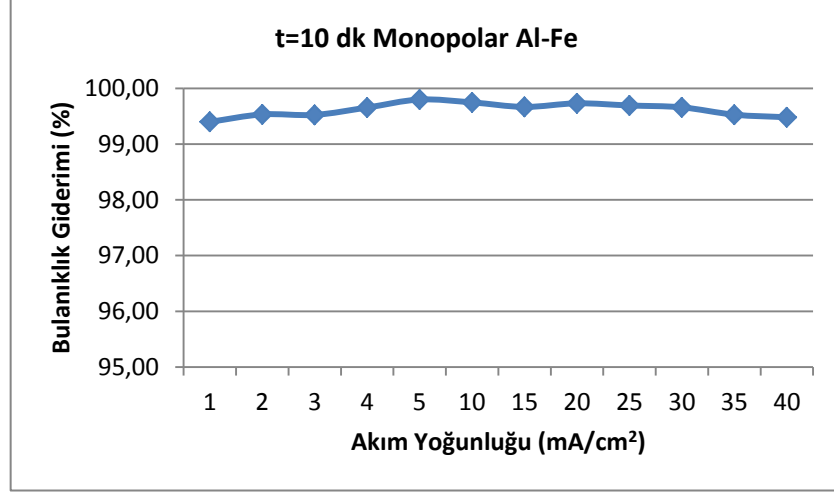
Çizelge 6.12. *Monopolar Al-Fe elektrot, t=5 dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular*

Akım Yoğunluğu (mA/cm²)	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM (mg/L)	AKM Giderimi (%)
1	1,75	7,95	14,6	915	23,00	99,67	26	99,27
2	2,45	7,84	14,7	897	46,50	99,34	46	98,70
3	3,10	7,88	14,8	889	58,90	99,16	46	98,70
4	3,80	7,89	15,0	872	31,80	99,55	30	99,15
5	4,55	7,84	15,2	864	39,80	99,43	54	98,48
10	7,60	7,83	15,6	811	36,50	99,48	48	98,65
15	11,20	7,57	16,5	737	18,10	99,74	40	98,87
20	14,10	7,76	17,5	691	19,30	99,73	24	99,32
25	17,00	7,80	18,5	687	18,80	99,73	28	99,21
30	18,95	8,36	19,7	666	19,80	99,72	42	98,82
35	20,15	8,66	20,9	620	21,70	99,69	34	99,04
40	25,10	8,55	21,2	621	21,30	99,70	40	98,87
Ham Atıksu Karakterizasyonu; Bulanıklık 7030 NTU, AKM 3548 mg/L, pH 8,06, Sıcaklık 14,7 C°, Elektriksel İletkenlik 906 µS/cm								

6.1.3.4. Monopolar Al-Fe elektrot ile yapılan 10 dakika süreli çalışmalar

Farklı akım yoğunluklarının 10 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulanıklık giderimi sonuçları

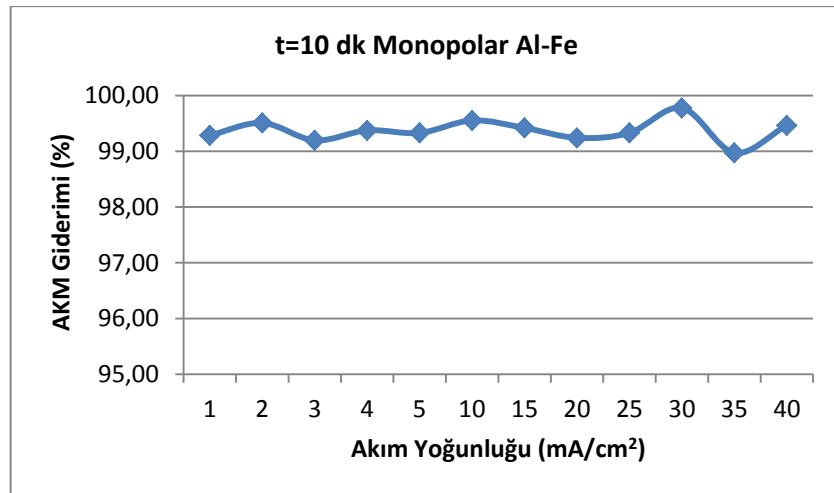
Monopolar Al-Fe elektrot ile 10 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı bulanıklık giderimleri Şekil 6.23’de verilmiştir.



Şekil 6.23. Monopolar Al-Fe elektrot, t=10 dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 10 dakika uygulanmasıyla elde edilen AKM giderimi sonuçları

Monopolar Al-Fe elektrot ile 10 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı AKM giderimi Şekil 6.24’de verilmiştir.



Şekil 6.24. Monopolar Al-Fe elektrot, t=10 dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 10 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulgular

Monopolar Al-Fe elektrot ile 10 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinde farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular Çizelge 6.13’de verilmiştir.

Çizelge 6.13. Monopolar Al-Fe elektrot, $t=10$ dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular

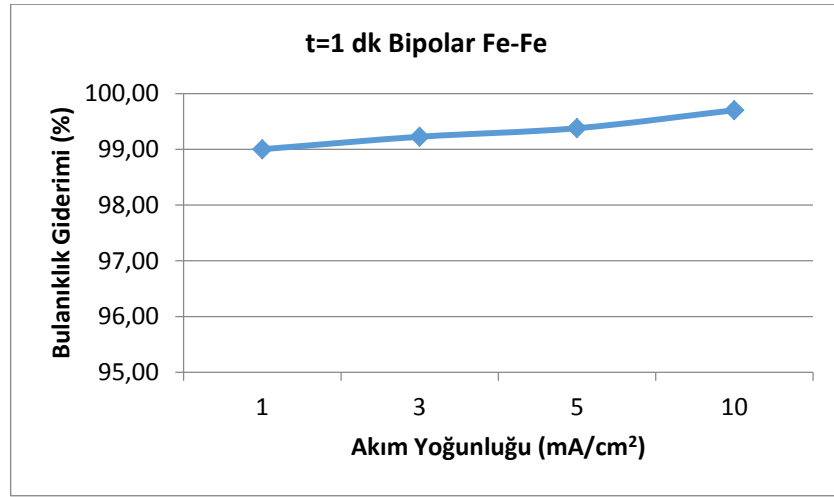
Akım Yoğunluğu (mA/cm²)	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM (mg/L)	AKM Giderimi (%)
1	2,25	7,64	18,7	833	55,60	99,40	32	99,29
2	2,45	7,78	19,1	839	43,20	99,53	22	99,51
3	3,50	7,96	19,4	776	44,00	99,52	36	99,20
4	4,15	7,72	19,6	833	31,80	99,66	28	99,38
5	4,85	7,59	19,8	752	18,50	99,80	30	99,33
10	8,05	7,41	20,7	706	23,30	99,75	20	99,55
15	10,45	7,79	22,3	657	30,80	99,67	26	99,42
20	13,10	8,08	23,9	623	24,80	99,73	34	99,24
25	16,25	8,62	24,9	577	28,40	99,69	30	99,33
30	17,60	8,54	26,2	590	31,50	99,66	10	99,78
35	19,75	8,84	29,5	578	43,70	99,53	46	98,97
40	21,20	9,19	29,8	571	48,00	99,48	24	99,46
Ham Atıksu Karakterizasyonu; Bulanıklık 9260 NTU, AKM 4482 mg/L, pH 8,08, Sıcaklık 19,1 C°, Elektriksel İletkenlik 872 µS/cm								

6.1.4. Bipolar Fe-Fe elektrot ile yapılan çalışmalar

6.1.4.1. Bipolar Fe-Fe elektrot ile yapılan 1 dakika süreli çalışmalar

Farklı akım yoğunluklarının 1 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulanıklık giderimi sonuçları

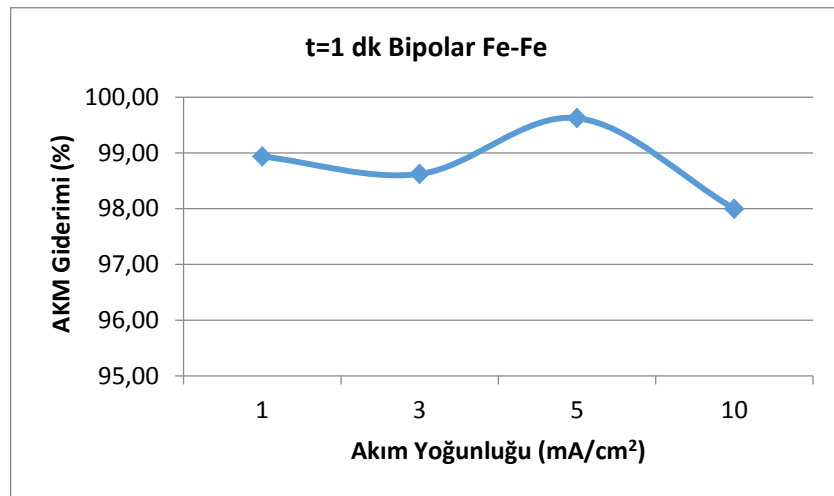
Bipolar Fe-Fe elektrot ile 1 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı bulanıklık giderimleri Şekil 6.25’de verilmiştir.



Şekil 6.25. Bipolar Fe-Fe elektrot, t=1 dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 1 dakika uygulanmasıyla elde edilen AKM giderimi sonuçları

Bipolar Fe-Fe elektrot ile 1 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı AKM giderimi Şekil 6.26’da verilmiştir.



Şekil 6.26. Bipolar Fe-Fe elektrot, t=1 dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 1 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulgular

Bipolar Fe-Fe elektrot ile 1 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinde farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular Çizelge 6.14’de verilmiştir.

Çizelge 6.14. *Bipolar Fe-Fe elektrot, t=1 dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular*

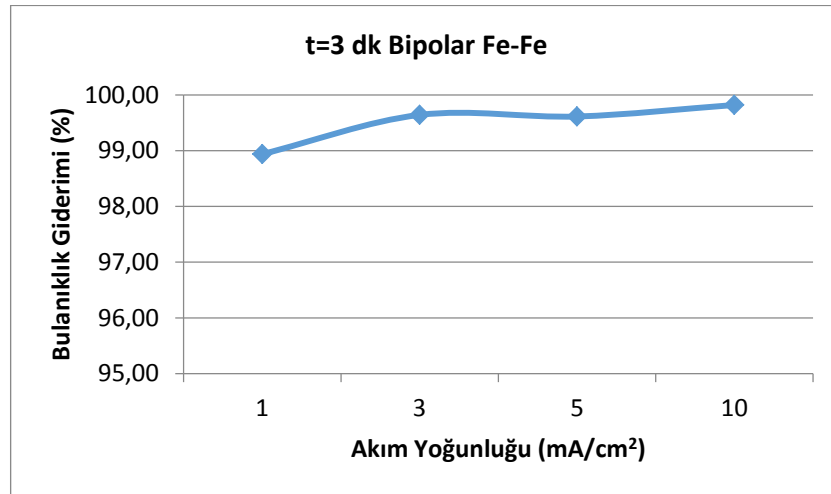
Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM (mg/L)	AKM Giderimi (%)
1	9,45	7,92	19,7	847	85,2	99,00	34	98,94
3	27,05	8,11	19,4	803	66,1	99,23	44	98,62
5	42,80	7,99	19,6	812	53	99,38	12	99,62
10	74,75	8,48	20,6	738	25,4	99,70	64	98,00

Ham Atıksu Karakterizasyonu; Bulanıklık 8540 NTU, AKM 3196 mg/L, pH 8,19, Sıcaklık 19,1 C°, Elektriksel İletkenlik 838 µS/cm

6.1.4.2. Bipolar Fe-Fe elektrot ile yapılan 3 dakika süreli çalışmalar

Farklı akım yoğunluklarının 3 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulanıklık giderimi sonuçları

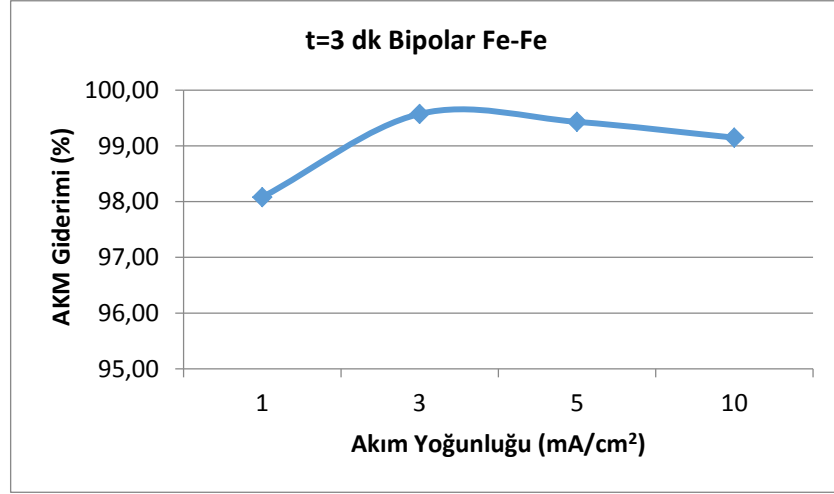
Bipolar Fe-Fe elektrot ile 3 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı bulanıklık giderimleri Şekil 6.27’de verilmiştir.



Şekil 6.27. *Bipolar Fe-Fe elektrot, t=3 dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi*

Farklı akım yoğunluklarının 3 dakika uygulanmasıyla elde edilen AKM giderimi sonuçları

Bipolar Fe-Fe elektrot ile 3 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı AKM giderimi Şekil 6.28’da verilmiştir.



Şekil 6.28. Bipolar Fe-Fe elektrot, t=3 dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 3 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulgular

Bipolar Fe-Fe elektrot ile 3 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinde farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular Çizelge 6.15’de verilmiştir.

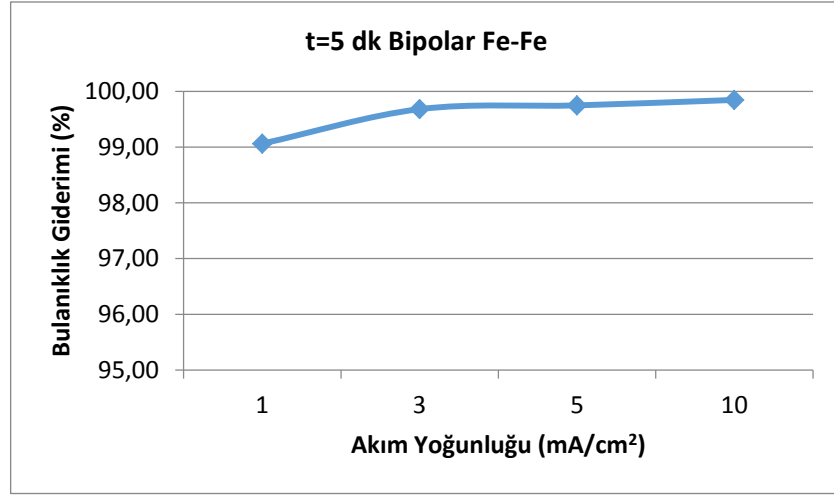
Çizelge 6.15. Bipolar Fe-Fe elektrot, t=3 dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM (mg/L)	AKM Giderimi (%)
1	8,85	8,01	19,7	833	75,5	98,94	54	98,08
3	22,75	8,38	19,9	780	25,5	99,64	12	99,57
5	34,15	8,52	20,3	790	27,5	99,61	16	99,43
10	57,80	9,28	21,4	724	12,8	99,82	24	99,15
Ham Atıksu Karakterizasyonu; Bulanıklık 7120 NTU, AKM 2814 mg/L, pH 8,25, Sıcaklık 19,8 C°, Elektriksel İletkenlik 826 µS/cm								

6.1.4.3. Bipolar Fe-Fe elektrot ile yapılan 5 dakika süreli çalışmalar

Farklı akım yoğunluklarının 5 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulanıklık giderimi sonuçları

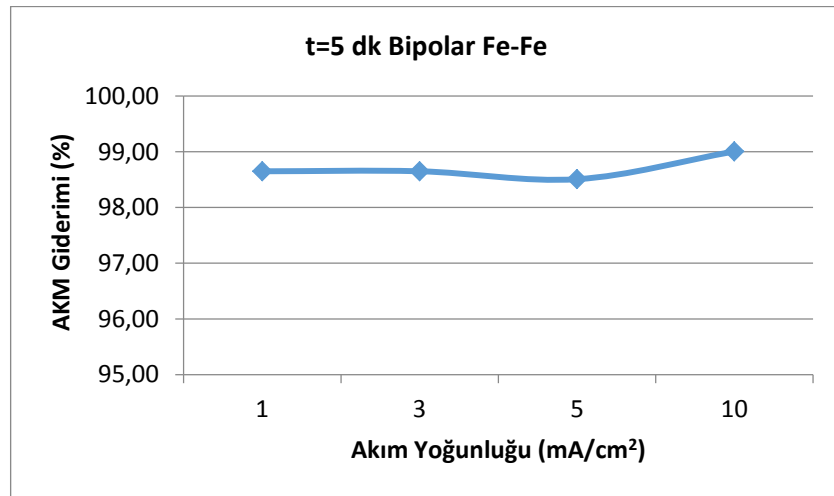
Bipolar Fe-Fe elektrot ile 5 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı bulanıklık giderimleri Şekil 6.29’da verilmiştir.



Şekil 6.29. Bipolar Fe-Fe elektrot, t=5 dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 5 dakika uygulanmasıyla elde edilen AKM giderimi sonuçları

Bipolar Fe-Fe elektrot ile 5 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı AKM giderimi Şekil 6.30’da verilmiştir.



Şekil 6.30. Bipolar Fe-Fe elektrot, t=5 dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 5 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulgular

Bipolar Fe-Fe elektrot ile 5 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinde farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular Çizelge 6.16'da verilmiştir.

Çizelge 6.16. *Bipolar Fe-Fe elektrot, t=5 dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular*

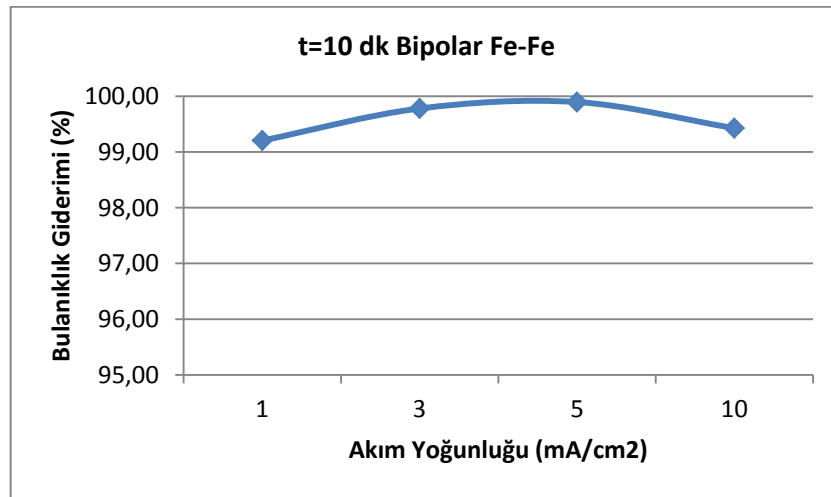
Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM (mg/L)	AKM Giderimi (%)
1	11,00	8,03	19,8	701	66,7	99,06	38	98,65
3	26,45	8,55	20,1	734	22,7	99,68	38	98,65
5	40,70	9,30	20,7	709	17,9	99,75	42	98,51
10	57,60	9,13	22,1	663	10,9	99,85	28	99,00

Ham Atıksu Karakterizasyonu; Bulanıklık 7120 NTU, AKM 2814 mg/L, pH 8,25, Sıcaklık 19,8 C°, Elektriksel İletkenlik 826 µS/cm

6.1.4.4. Bipolar Fe-Fe elektrot ile yapılan 10 dakika süreli çalışmalar

Farklı akım yoğunluklarının 10 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulanıklık giderimi sonuçları

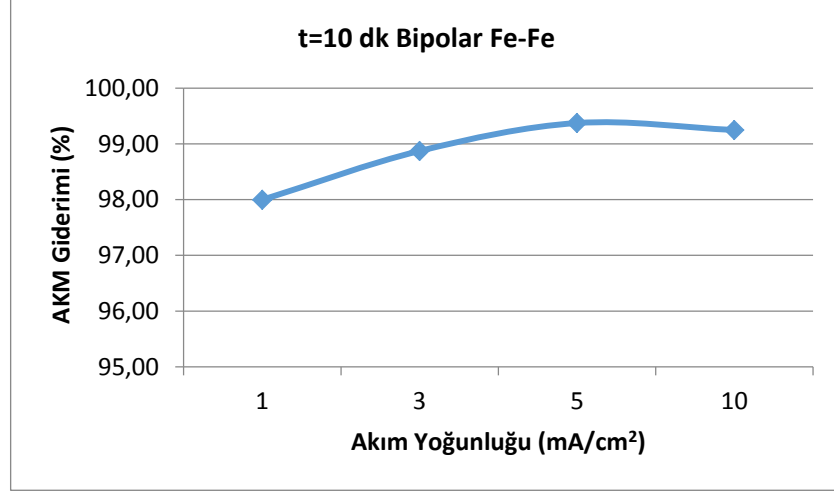
Bipolar Fe-Fe elektrot ile 10 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı bulanıklık giderimleri Şekil 6.31'de verilmiştir.



Şekil 6.31. *Bipolar Fe-Fe elektrot, t=10 dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi*

Farklı akım yoğunluklarının 10 dakika uygulanmasıyla elde edilen AKM giderimi sonuçları

Bipolar Fe-Fe elektrot ile 10 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı AKM giderimi Şekil 6.32’de verilmiştir.



Şekil 6.32. Bipolar Fe-Fe elektrot, t=10 dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 10 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulgular

Bipolar Fe-Fe elektrot ile 10 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinde farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular Çizelge 6.17’de verilmiştir.

Çizelge 6.17. Bipolar Fe-Fe elektrot, t=10 dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM (mg/L)	AKM Giderimi (%)
1	10,45	7,70	19,3	754	67,9	99,20	64	98,00
3	27,45	9,18	20,2	647	18,8	99,78	36	98,87
5	47,35	9,37	22,1	582	8,95	99,90	20	99,37
10	67,15	8,86	26,1	569	48,9	99,43	24	99,25

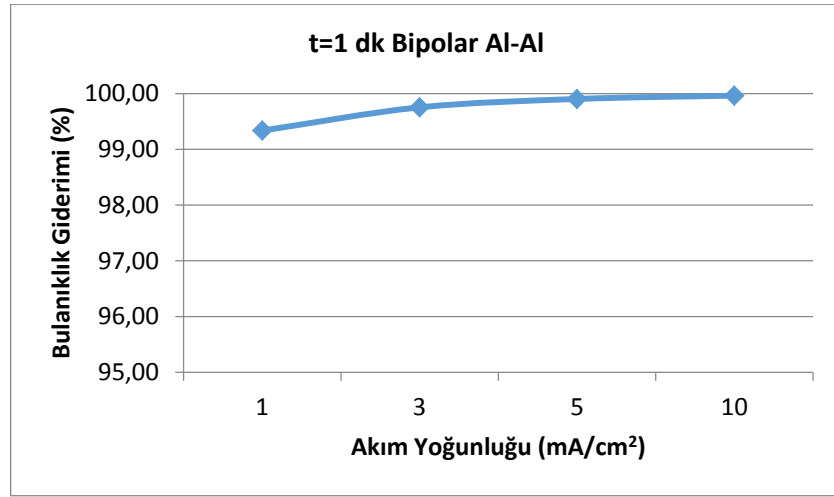
Ham Atıksu Karakterizasyonu; Bulanıklık 8540 NTU, AKM 3196 mg/L, pH 8,19, Sıcaklık 19,1 C°, Elektriksel İletkenlik 838 µS/cm

6.1.5. Bipolar Al-Al elektrot ile yapılan çalışmalar

6.1.5.1. Bipolar Al-Al elektrot ile yapılan 1 dakika süreli çalışmalar

Farklı akım yoğunluklarının 1 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulanıklık giderimi sonuçları

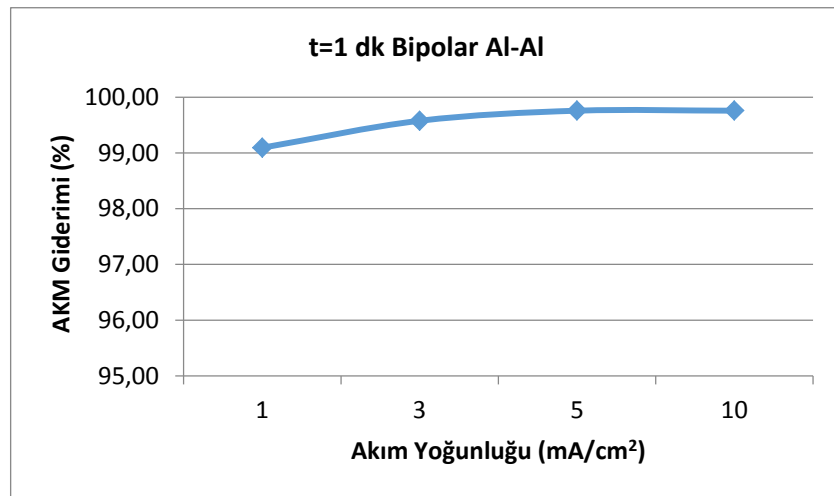
Bipolar Al-Al elektrot ile 1 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı bulanıklık giderimleri Şekil 6.33’de verilmiştir.



Şekil 6.33. Bipolar Al-Al elektrot, $t=1$ dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 1 dakika uygulanmasıyla elde edilen AKM giderimi sonuçları

Bipolar Al-Al elektrot ile 1 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı AKM giderimi Şekil 6.34’de verilmiştir.



Şekil 6.34. Bipolar Al-Al elektrot, $t=1$ dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 1 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulgular

Bipolar Al-Al elektrot ile 1 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinde farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular Çizelge 6.18’de verilmiştir.

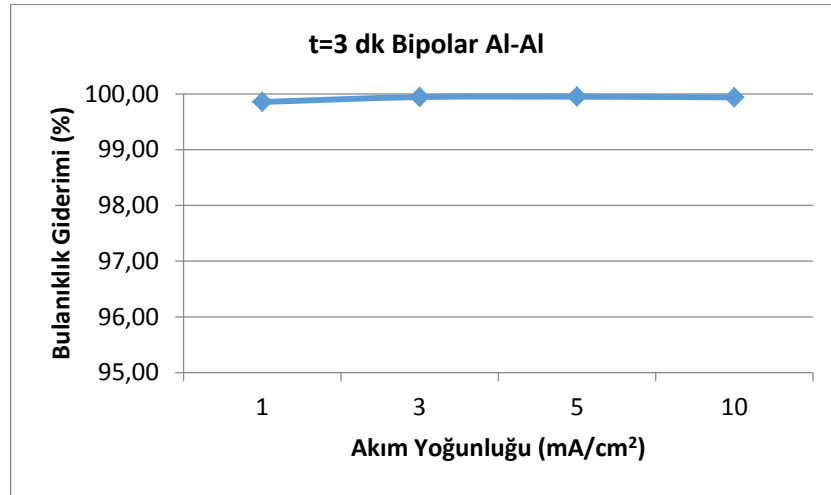
Çizelge 6.18. Bipolar Al-Al elektrot, $t=1$ dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM (mg/L)	AKM Giderimi (%)
1	13,25	8,62	17,7	690	65,2	99,34	60	99,09
3	32,80	8,66	18,1	685	24,3	99,75	28	99,58
5	51,90	8,54	18,1	680	9,46	99,90	16	99,76
10	80,80	8,46	18,7	681	3,5	99,96	16	99,76
Ham Atıksu Karakterizasyonu; Bulanıklık 9840 NTU, AKM 6624 mg/L, pH 8,46, Sıcaklık 17,4 C°, Elektriksel İletkenlik 696 µS/cm								

6.1.5.2. Bipolar Al-Al elektrot ile yapılan 3 dakika süreli çalışmalar

Farklı akım yoğunluklarının 3 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulanıklık giderimi sonuçları

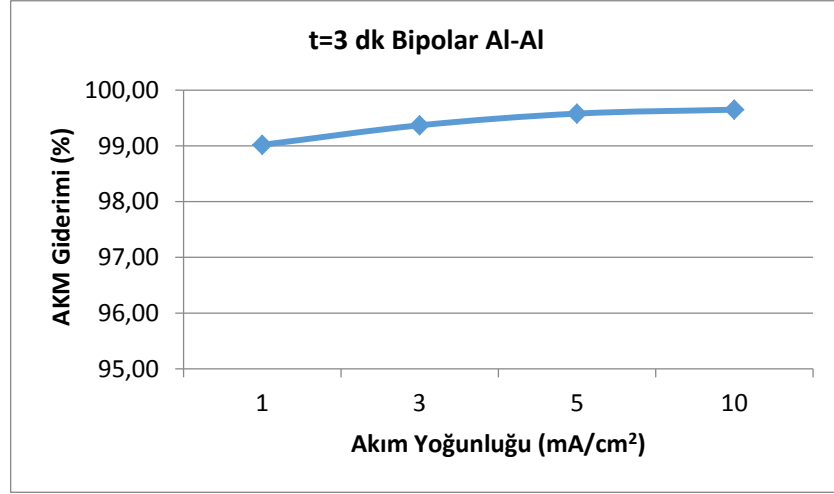
Bipolar Al-Al elektrot ile 3 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı bulanıklık giderimleri Şekil 6.35’de verilmiştir.



Şekil 6.35. Bipolar Al-Al elektrot, $t=3$ dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 3 dakika uygulanmasıyla elde edilen AKM giderimi sonuçları

Bipolar Al-Al elektrot ile 3 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı AKM giderimi Şekil 6.36'da verilmiştir.



Şekil 6.36. Bipolar Al-Al elektrot, t=3 dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 3 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulgular

Bipolar Al-Al elektrot ile 3 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinde farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular Çizelge 6.19'da verilmiştir.

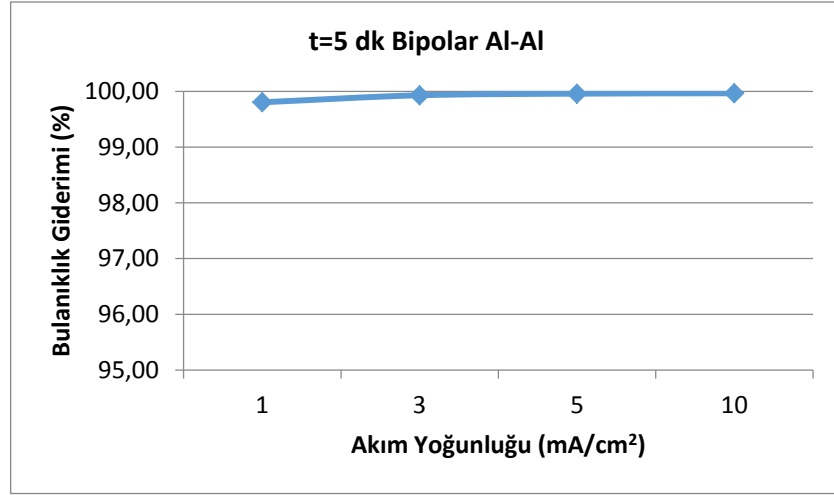
Çizelge 6.19. Bipolar Al-Al elektrot, t=3 dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM (mg/L)	AKM Giderimi (%)
1	12,05	8,64	18,8	785	10,3	99,86	28	99,02
3	30,10	8,50	18,4	742	3,99	99,94	18	99,37
5	47,15	8,30	19,4	726	3,51	99,95	12	99,58
10	80,80	8,26	20,9	695	4,41	99,94	10	99,65
Ham Atıksu Karakterizasyonu; Bulanıklık 7170 NTU, AKM 2854 mg/L, pH 8,37, Sıcaklık 17,9 C°, Elektriksel İletkenlik 798 µS/cm								

6.1.5.3. Bipolar Al-Al elektrot ile yapılan 5 dakika süreli çalışmalar

Farklı akım yoğunluklarının 5 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulanıklık giderimi sonuçları

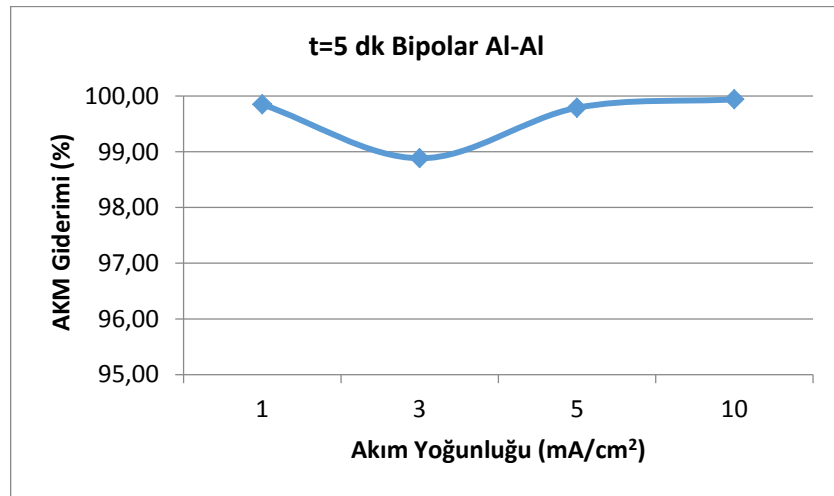
Bipolar Al-Al elektrot ile 5 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı bulanıklık giderimleri Şekil 6.37’de verilmiştir.



Şekil 6.37. Bipolar Al-Al elektrot, t=5 dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 5 dakika uygulanmasıyla elde edilen AKM giderimi sonuçları

Bipolar Al-Al elektrot ile 5 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı AKM giderimi Şekil 6.38’de verilmiştir.



Şekil 6.38. Bipolar Al-Al elektrot, t=5 dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 5 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulgular

Bipolar Al-Al elektrot ile 5 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinde farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular Çizelge 6.20’de verilmiştir.

Çizelge 6.20. Bipolar Al-Al elektrot, $t=5$ dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular

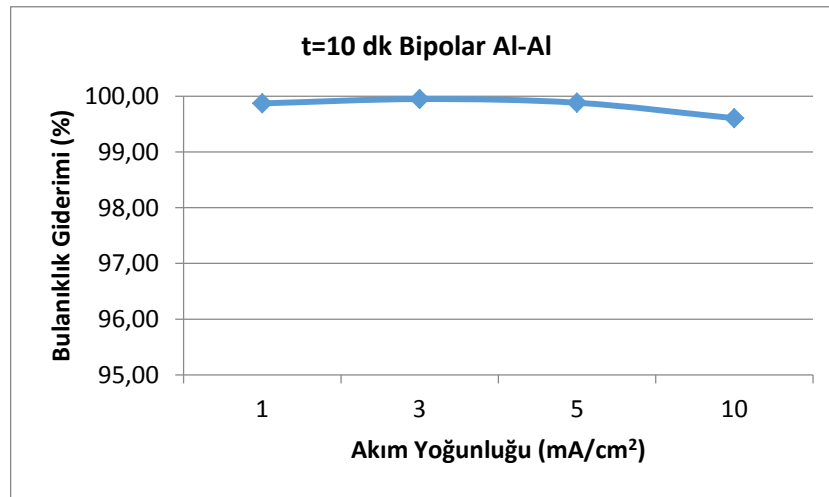
Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM (mg/L)	AKM Giderimi (%)
1	14,85	8,48	17,6	622	19,2	99,80	10	99,85
3	34,70	8,42	18,3	603	6,87	99,93	74	98,88
5	57,00	8,42	19,6	610	4,05	99,96	14	99,79
10	80,80	8,64	22,5	594	3,36	99,97	4	99,94

Ham Atıksu Karakterizasyonu; Bulanıklık 9840 NTU, AKM 6624 mg/L, pH 8,46, Sıcaklık 17,4 C°, Elektriksel İletkenlik 696 µS/cm

6.1.5.4. Bipolar Al-Al elektrot ile yapılan 10 dakika süreli çalışmalar

Farklı akım yoğunluklarının 10 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulanıklık giderimi sonuçları

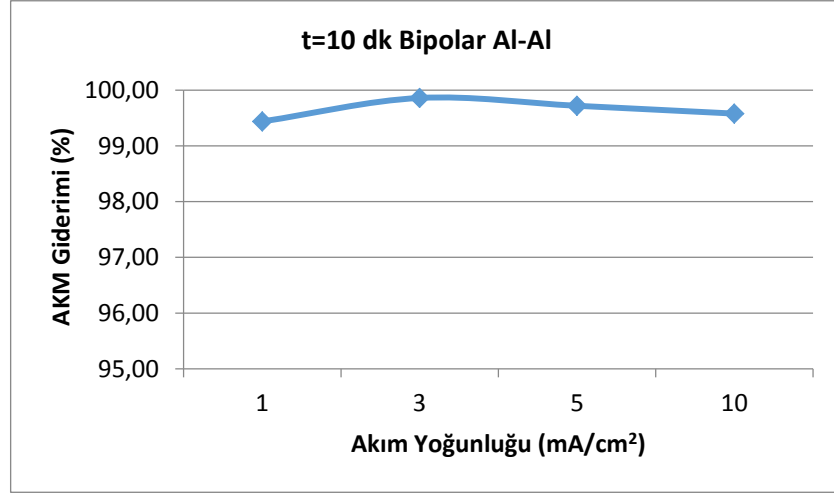
Bipolar Al-Al elektrot ile 10 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı bulanıklık giderimleri Şekil 6.39’da verilmiştir.



Şekil 6.39. Bipolar Al-Al elektrot, $t=10$ dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 10 dakika uygulanmasıyla elde edilen AKM giderimi sonuçları

Bipolar Al-Al elektrot ile 10 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı AKM giderimi Şekil 6.40’da verilmiştir.



Şekil 6.40. Bipolar Al-Al elektrot, t=10 dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 10 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulgular

Bipolar Al-Al elektrot ile 10 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinde farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular Çizelge 6.21’de verilmiştir.

Çizelge 6.21. Bipolar Al-Al elektrot, t=10 dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM (mg/L)	AKM Giderimi (%)
1	14,15	7,78	18,1	676	9,19	99,87	16	99,44
3	30,60	7,92	19,1	653	3,66	99,95	4	99,86
5	47,35	8,06	21,8	619	8,36	99,88	8	99,72
10	75,70	8,31	27,5	625	28,3	99,61	12	99,58

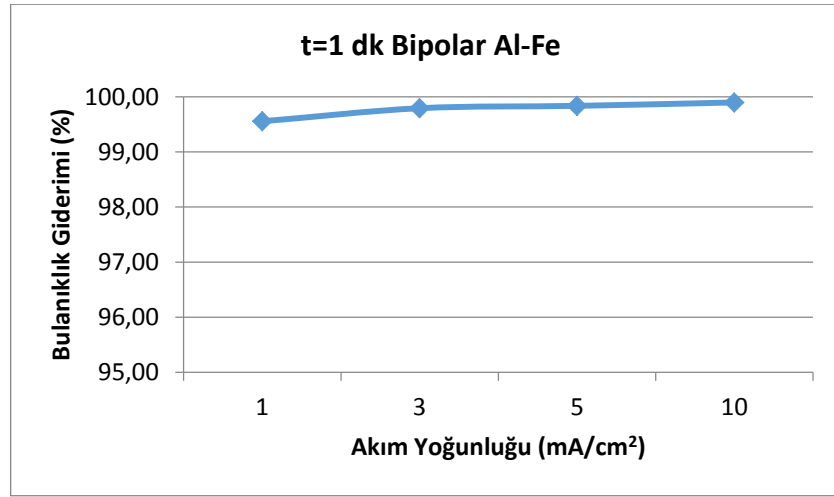
Ham Atıksu Karakterizasyonu; Bulanıklık 7170 NTU, AKM 2854 mg/L, pH 8,37, Sıcaklık 17,9 C°, Elektriksel İletkenlik 798 µS/cm

6.1.6. Bipolar Al-Fe elektrot ile yapılan çalışmalar

6.1.6.1. Bipolar Al-Fe elektrot ile yapılan 1 dakika süreli çalışmalar

Farklı akım yoğunluklarının 1 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulanıklık giderimi sonuçları

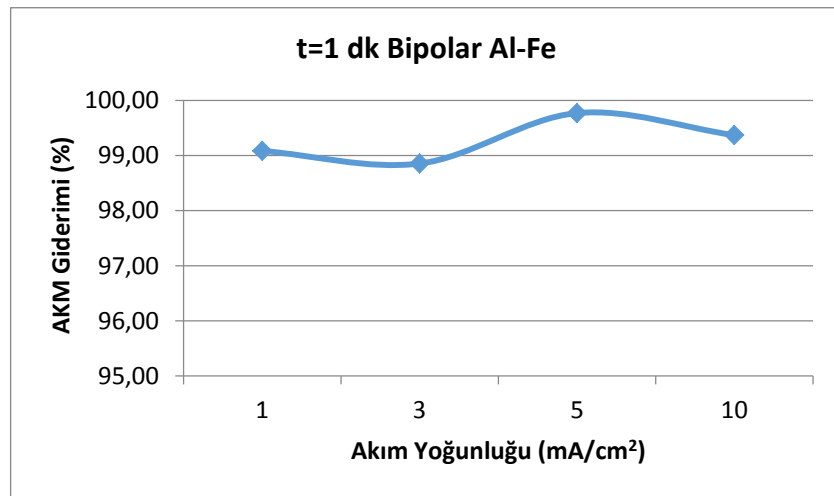
Bipolar Al-Fe elektrot ile 1 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı bulanıklık giderimleri Şekil 6.41’de verilmiştir.



Şekil 6.41. Bipolar Al-Fe elektrot, $t=1$ dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 1 dakika uygulanmasıyla elde edilen AKM giderimi sonuçları

Bipolar Al-Fe elektrot ile 1 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı AKM giderimi Şekil 6.42’de verilmiştir.



Şekil 6.42. Bipolar Al-Fe elektrot, $t=1$ dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 1 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulgular

Bipolar Al-Fe elektrot ile 1 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinde farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular Çizelge 6.22’de verilmiştir.

Çizelge 6.22. Bipolar Al-Fe elektrot, $t=1$ dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular

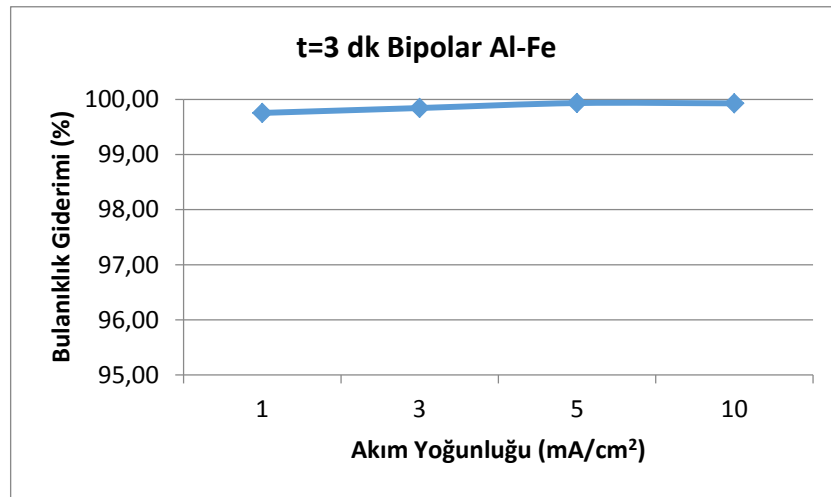
Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM (mg/L)	AKM Giderimi (%)
1	11,10	8,56	19,9	689	39,1	99,56	32	99,08
3	28,75	8,40	19,6	693	18,2	99,79	40	98,86
5	45,60	8,26	19,9	699	14,4	99,84	8	99,77
10	80,80	8,12	20,7	680	8,97	99,90	22	99,37

Ham Atıksu Karakterizasyonu; Bulanıklık 8820 NTU, AKM 3494 mg/L, pH 8,67, Sıcaklık 19,2 C°, Elektriksel İletkenlik 728 µS/cm

6.1.6.2. Bipolar Al-Fe elektrot ile yapılan 3 dakika süreli çalışmalar

Farklı akım yoğunluklarının 3 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulanıklık giderimi sonuçları

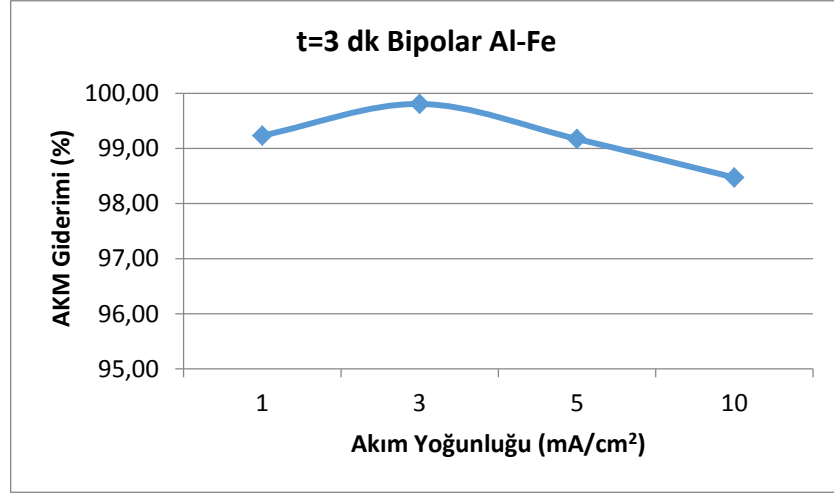
Bipolar Al-Fe elektrot ile 3 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı bulanıklık giderimleri Şekil 6.43’de verilmiştir.



Şekil 6.43. Bipolar Al-Fe elektrot, $t=3$ dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 3 dakika uygulanmasıyla elde edilen AKM giderimi sonuçları

Bipolar Al-Fe elektrot ile 3 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı AKM giderimi Şekil 6.44’de verilmiştir.



Şekil 6.44. Bipolar Al-Fe elektrot, t=3 dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 3 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulgular

Bipolar Al-Fe elektrot ile 3 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinde farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular Çizelge 6.23’de verilmiştir.

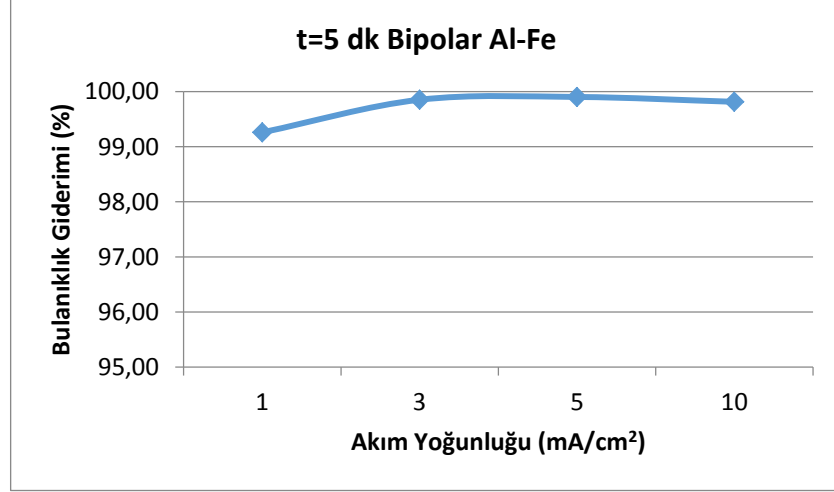
Çizelge 6.23. Bipolar Al-Fe elektrot, t=3 dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM (mg/L)	AKM Giderimi (%)
1	11,33	8,23	20,0	700	18,6	99,76	24	99,24
3	30,18	8,08	20,0	683	11,8	99,85	6	99,81
5	53,40	7,84	20,8	640	4,95	99,94	26	99,17
10	80,85	7,78	22,6	604	5,36	99,93	48	98,47
Ham Atıksu Karakterizasyonu; Bulanıklık 7620 NTU, AKM 3142 mg/L, pH 8,28, Sıcaklık 19,3 C°, Elektriksel İletkenlik 576 µS/cm								

6.1.6.3. Bipolar Al-Fe elektrot ile yapılan 5 dakika süreli çalışmalar

Farklı akım yoğunluklarının 5 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulanıklık giderimi sonuçları

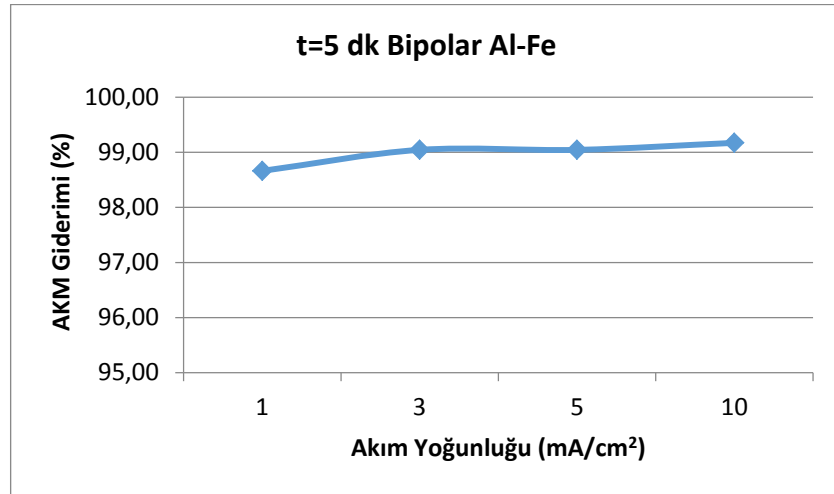
Bipolar Al-Fe elektrot ile 5 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı bulanıklık giderimleri Şekil 6.45’de verilmiştir.



Şekil 6.45. Bipolar Al-Fe elektrot, t=5 dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 5 dakika uygulanmasıyla elde edilen AKM giderimi sonuçları

Bipolar Al-Fe elektrot ile 5 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı AKM giderimi Şekil 6.46’da verilmiştir.



Şekil 6.46. Bipolar Al-Fe elektrot, t=5 dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi

6.1.6.3.3. Farklı akım yoğunluklarının 5 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulgular

Bipolar Al-Fe elektrot ile 5 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinde farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular Çizelge 6.24’de verilmiştir.

Çizelge 6.24. Bipolar Al-Fe elektrot, $t=5$ dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular

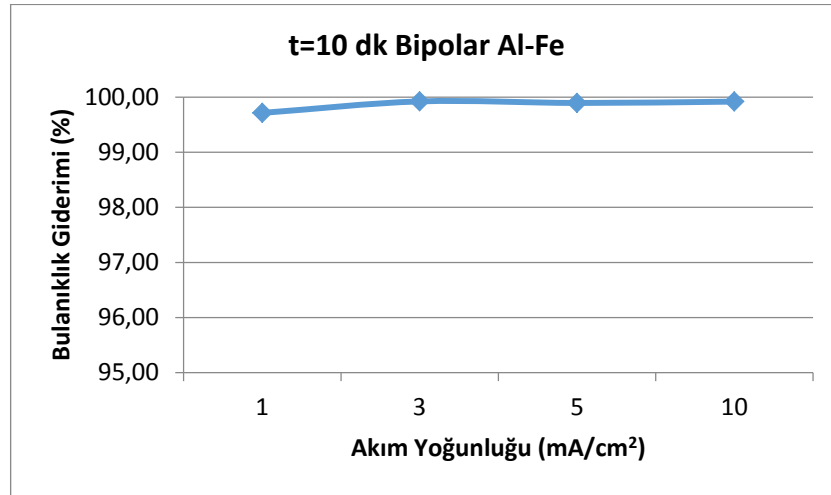
Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM (mg/L)	AKM Giderimi (%)
1	12,40	8,50	19,4	589	56,3	99,26	42	98,66
3	27,60	8,09	19,9	566	11,2	99,85	30	99,05
5	48,85	8,01	21,0	571	7,37	99,90	30	99,05
10	76,30	8,39	24,0	543	14,1	99,81	26	99,17

Ham Atıksu Karakterizasyonu; Bulanıklık 7620 NTU, AKM 3142 mg/L, pH 8,28, Sıcaklık 19,3 C°, Elektriksel İletkenlik 576 µS/cm

6.1.6.4. Bipolar Al-Fe elektrot ile yapılan 10 dakika süreli çalışmalar

Farklı akım yoğunluklarının 10 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulanıklık giderimi sonuçları

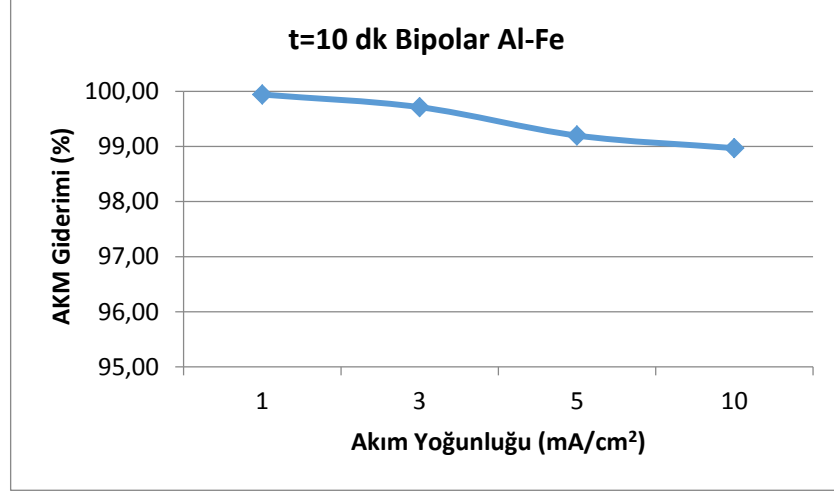
Bipolar Al-Fe elektrot ile 10 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı bulanıklık giderimleri Şekil 6.47’de verilmiştir.



Şekil 6.47. Bipolar Al-Fe elektrot, $t=10$ dk; akım yoğunluğu, bulanıklık giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 10 dakika uygulanmasıyla elde edilen AKM giderimi sonuçları

Bipolar Al-Fe elektrot ile 10 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen akım yoğunluğuna bağlı AKM giderimi Şekil 6.48’de verilmiştir.



Şekil 6.48. Bipolar Al-Fe elektrot, t=10 dk; akım yoğunluğu, AKM giderim ilişkisi

Farklı akım yoğunluklarının 10 dakika uygulanmasıyla elde edilen bulgular

Bipolar Al-Fe elektrot ile 10 dk sürdürülen elektrokoagülasyon deneylerinde farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular Çizelge 6.25’de verilmiştir.

Çizelge 6.25. Bipolar Al-Fe elektrot, t=10 dk; farklı akım yoğunluklarının uygulanmasıyla elde edilen bulgular

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM (mg/L)	AKM Giderimi (%)
1	14,63	8,58	19,8	544	25,1	99,72	2	99,94
3	29,88	8,32	20,7	525	6,74	99,92	10	99,71
5	47,80	8,60	23,1	493	9,2	99,90	28	99,20
10	72,93	8,90	27,9	495	7,04	99,92	36	98,97

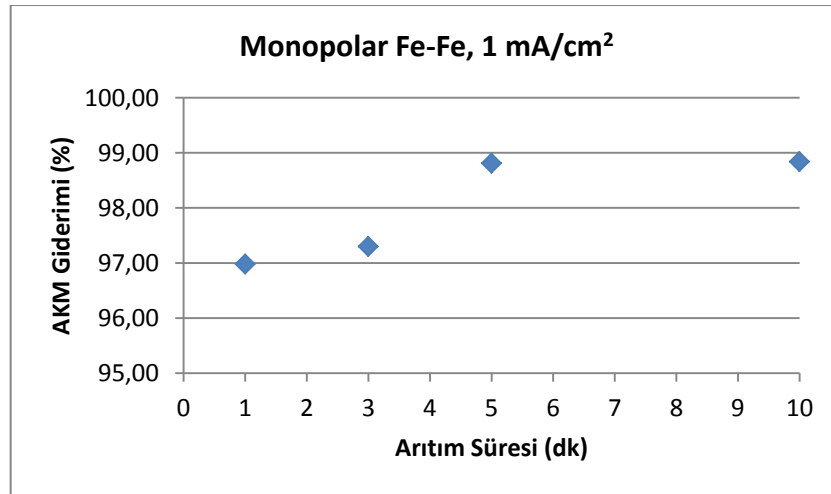
Ham Atıksu Karakterizasyonu; Bulanıklık 8820 NTU, AKM 3494 mg/L, pH 8,67, Sıcaklık 19,2 C°, Elektriksel İletkenlik 728 µS/cm

6.2. Farklı Elektrot Tipi ve Geometrileri ile Yapılan Arıtmalarda Arıtma Süresinin Arıtma Etkisi

Mühendislik prensipleri gereği; yeterli verime sahip mümkün olan en ekonomik uygulama seçeneği, en ideal seçenektir. Bu çalışmada verim yeterliliği sınırını SKKY’de belirtilen deşarj standartları oluşturmaktadır. Kirlilik parametre değerleri, deşarj standartları değerlerinin altında olan çalışmalar yeterli giderim verimine sahip olarak değerlendirilmektedir. Bu açıdan bakıldığında her elektrot tipi ve geometrisi, 1 mA/cm² akım yoğunluğunda yeterli giderim verimine sahiptir. Yüksek akım yoğunlukları enerji tüketiminin artmasına ve maliyetin yükselmesine neden olmaktadır. Öte yandan sürenin uzaması; elektrot ve enerji tüketimlerini artırarak işletme maliyetinin artmasına neden olmakta, daha büyük tank hacmi gerektireceğinden arıtma sistemi kurulum maliyetlerini yükseltmektedir.

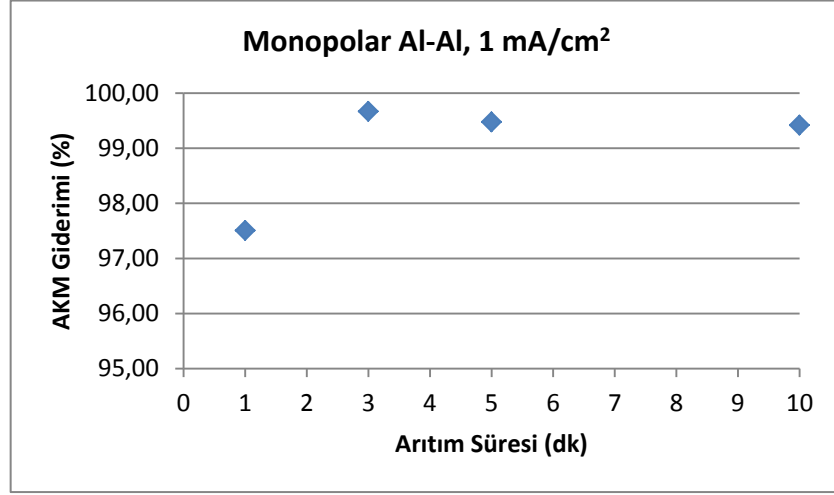
Çalışmanın bu bölümünde her elektrot tipi ve geometrisi için 1 mA/cm² akım yoğunluğunda, arıtma süresine bağlı olarak değişen AKM giderim verimleri gösterilmiştir.

1 mA/cm² akım yoğunluğunda Monopolar Fe-Fe elektrot ile yapılan elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen arıtma süresine bağlı AKM giderim değişimi Şekil 6.49’da verilmiştir.



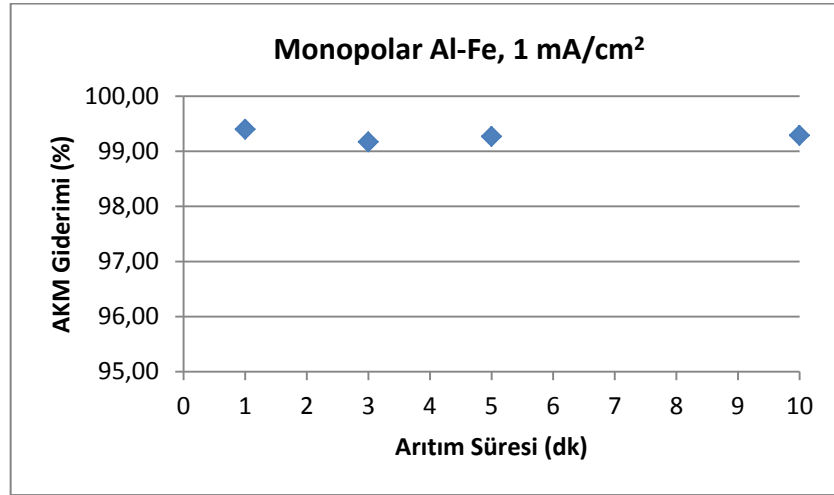
Şekil 6.49. Monopolar Fe-Fe elektrot, 1 mA/cm² akım yoğunluğu; arıtma süresi AKM giderim verimi ilişkisi

1 mA/cm² akım yoğunluğunda Monopolar Al-Al elektrot ile yapılan elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen arıtma süresine bağlı AKM giderim değişimi Şekil 6.50’de verilmiştir.



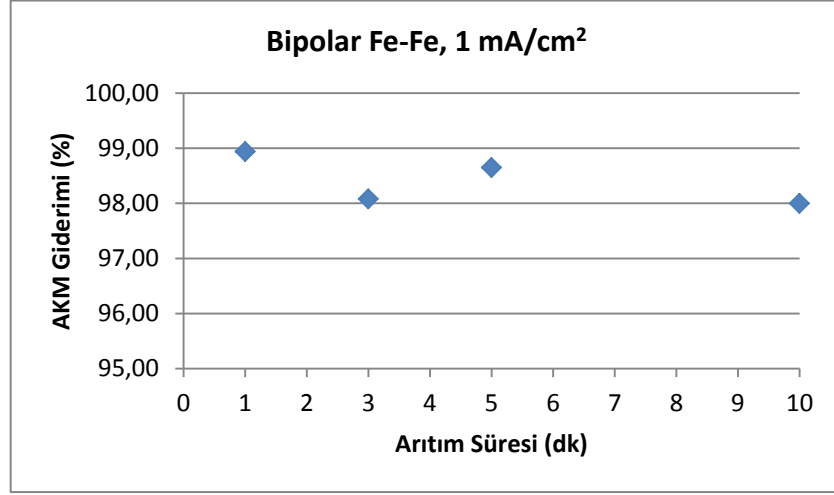
Şekil 6.50. Monopolar Al-Al elektrot, 1 mA/cm² akım yoğunluğu; arıtım süresi AKM giderim verimi ilişkisi

1 mA/cm² akım yoğunluğunda Monopolar Al-Fe elektrot ile yapılan elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen arıtım süresine bağlı AKM giderim değişimi Şekil 6.51’de verilmiştir.



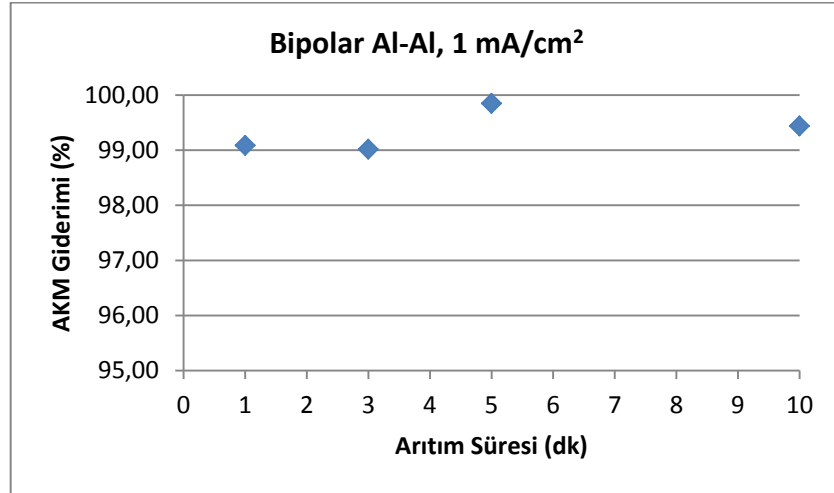
Şekil 6.51. Monopolar Al-Fe elektrot, 1 mA/cm² akım yoğunluğu; arıtım süresi AKM giderim verimi ilişkisi

1 mA/cm² akım yoğunluğunda Bipolar Fe-Fe elektrot ile yapılan elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen arıtma süresine bağlı AKM giderim değişimi Şekil 6.52’de verilmiştir.



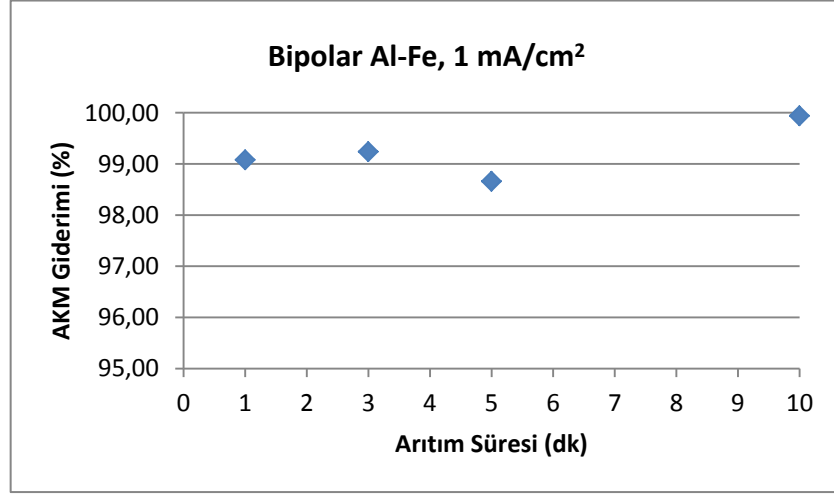
Şekil 6.52. Bipolar Fe-Fe elektrot, 1 mA/cm² akım yoğunluğu; arıtım süresi AKM giderim verimi ilişkisi

1 mA/cm² akım yoğunluğunda Bipolar Al-Al elektrot ile yapılan elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen arıtma süresine bağlı AKM giderim değişimi Şekil 6.53’de verilmiştir.



Şekil 6.53. Bipolar Al-Al elektrot, 1 mA/cm² akım yoğunluğu; arıtım süresi AKM giderim verimi ilişkisi

1 mA/cm² akım yoğunluğunda Bipolar Al-Fe elektrot ile yapılan elektrokoagülasyon deneylerinden elde edilen arıtma süresine bağlı AKM giderim değişimi Şekil 6.54'de verilmiştir.



Şekil 6.54. Bipolar Al-Fe elektrot, 1 mA/cm² akım yoğunluğu; arıtım süresi AKM giderim verimi ilişkisi

6.3. Farklı Elektrot Tipi ve Geometrileri ile Yapılan Arıtmaların Maliyet Hesapları

Bu bölümde, işletme maliyeti hakkında fikir sahibi olmak ve deneyler arası ekonomik kıyaslamalar yapmak amacıyla deneylerin maliyet hesapları yapılmıştır.

6.3.1. Enerji tüketimi ve enerji maliyeti

Her deney için akım şiddeti ve gerilimlerin çarpımıyla ortalama güç hesaplamaları yapılmış ve 400 ml hacimli atıksuların arıtım sürelerine bağlı olarak kWh cinsinden enerji tüketimleri hesaplanmıştır. Daha sonra bulunan 400 ml hacimli atıksu arıtmalarının enerji tüketimlerinden yola çıkarak 1 m³ atıksuyun arıtımı ile oluşan enerji tüketimleri hesaplanmıştır. Enerji tüketimi hesaplaması detaylı olarak EK 3'de gösterilmiştir.

1m³ hacimli atıksuların arıtımı için hesaplanan enerji tüketimlerinin, EPDK resmi web sitesinde açıklanan birim enerji fiyatıyla çarpılmayla enerji maliyetleri bulunmuştur. EPDK resmi web sitesinde 01/04/2018 tarihinden itibaren geçerli olan ve 29.03.2018 tarihinde açıklanan 7773 sayılı elektrik tüketim tarifesine göre sanayiciler için perakende tek zamanlı enerji bedeli 22,9814 kr./ kWh'dır [40]. Enerji maliyeti hesaplaması detaylı olarak EK 4'de gösterilmiştir.

İlerleyen sayfalarda farklı akım yoğunluklarında, 1 dk, 3 dk, 5 dk ve 10 dk arıtma süreleri ve Monopolar Fe-Fe, Monopolar Al-Al, Monopolar Al-Fe, Bipolar Fe-Fe, Bipolar Al-Al, Bipolar Al-Fe elektrot tipleri ve geometrileri ile gerçekleştirilen elektrokoagülasyon deneylerinin enerji tüketimi ve enerji maliyeti çizelgeleri gösterilmiştir.

Çizelge 6.26. Monopolar Fe-Fe elektrot, $t=1$ dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)
1	2,00	$8,33 \times 10^{-3}$	$1,92 \times 10^{-1}$
2	3,20	$2,67 \times 10^{-2}$	$6,13 \times 10^{-1}$
3	3,60	$4,50 \times 10^{-2}$	1,03
4	4,25	$7,08 \times 10^{-2}$	1,63
5	4,95	$1,03 \times 10^{-1}$	2,37
10	9,05	$3,77 \times 10^{-1}$	8,67
15	11,25	$7,03 \times 10^{-1}$	16,16
20	13,80	1,15	26,43
25	17,85	1,86	42,73
30	19,30	2,41	55,44
35	23,10	3,37	77,42
40	23,10	3,85	88,48

Çizelge 6.27. Monopolar Fe-Fe elektrot, $t=3$ dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)
1	2,25	$2,81 \times 10^{-2}$	$6,46 \times 10^{-1}$
2	3,25	$8,13 \times 10^{-2}$	1,87
3	3,60	$1,35 \times 10^{-1}$	3,10
4	4,55	$2,28 \times 10^{-1}$	5,23
5	4,90	$3,06 \times 10^{-1}$	7,04
10	8,65	1,08	24,85
15	11,60	2,18	49,98
20	15,05	3,76	86,47
25	17,75	5,55	$1,27 \times 10^2$
30	22,20	8,33	$1,91 \times 10^2$
35	22,65	9,91	$2,28 \times 10^2$
40	28,10	14,05	$3,23 \times 10^2$

Çizelge 6.28. Monopolar Fe-Fe elektrot, $t=5$ dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)
1	1,80	$3,75 \times 10^{-2}$	$8,62 \times 10^{-1}$
2	2,55	$1,06 \times 10^{-1}$	2,44
3	3,35	$2,09 \times 10^{-1}$	4,81
4	4,25	$3,54 \times 10^{-1}$	8,14
5	5,45	$5,68 \times 10^{-1}$	13,05
10	8,30	1,73	39,74
15	11,00	3,44	79,00
20	14,35	5,98	$1,37 \times 10^2$
25	16,70	8,70	$2,00 \times 10^2$
30	19,80	12,38	$2,84 \times 10^2$
35	20,85	15,20	$3,49 \times 10^2$
40	24,25	20,21	$4,64 \times 10^2$

Çizelge 6.29. Monopolar Fe-Fe elektrot, $t=10$ dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)
1	1,70	$7,08 \times 10^{-2}$	1,63
2	3,15	$2,63 \times 10^{-1}$	6,03
3	4,60	$5,75 \times 10^{-1}$	13,21
4	5,85	$9,75 \times 10^{-1}$	22,41
5	5,75	1,20	27,53
10	9,10	3,79	87,14
15	12,35	7,72	$1,77 \times 10^2$
20	14,55	12,13	$2,79 \times 10^2$
25	16,80	17,50	$4,02 \times 10^2$
30	18,45	23,06	$5,30 \times 10^2$
35	20,30	29,60	$6,80 \times 10^2$
40	23,45	39,08	$8,98 \times 10^2$

Çizelge 6.30. Monopolar Al-Al elektrot, $t=1$ dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)
1	2,00	$8,33 \times 10^{-3}$	$1,92 \times 10^{-1}$
2	2,65	$2,21 \times 10^{-2}$	$5,08 \times 10^{-1}$
3	3,15	$3,94 \times 10^{-2}$	$9,05 \times 10^{-1}$
4	3,70	$6,17 \times 10^{-2}$	1,42
5	4,50	$9,38 \times 10^{-2}$	2,15
10	7,50	$3,13 \times 10^{-1}$	7,18
15	10,30	$6,44 \times 10^{-1}$	14,79
20	12,85	1,07	24,61
25	16,05	1,67	38,42
30	18,25	2,28	52,43
35	19,90	2,90	66,69
40	22,90	3,82	87,71

Çizelge 6.31. Monopolar Al-Al elektrot, $t=3$ dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)
1	2,05	$2,56 \times 10^{-2}$	$5,89 \times 10^{-1}$
2	2,15	$5,38 \times 10^{-2}$	1,24
3	2,65	$9,94 \times 10^{-2}$	2,28
4	3,35	$1,68 \times 10^{-1}$	3,85
5	3,80	$2,38 \times 10^{-1}$	5,46
10	5,70	$7,13 \times 10^{-1}$	16,37
15	8,40	1,58	36,20
20	11,05	2,76	63,49
25	12,75	3,98	91,57
30	15,00	5,63	$1,29 \times 10^2$
35	18,30	8,01	$1,84 \times 10^2$
40	20,40	10,20	$2,34 \times 10^2$

Çizelge 6.32. Monopolar Al-Al elektrot, $t=5$ dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)
1	2,15	$4,48 \times 10^{-2}$	1,03
2	2,00	$8,33 \times 10^{-2}$	1,92
3	2,25	$1,41 \times 10^{-1}$	3,23
4	3,15	$2,63 \times 10^{-1}$	6,03
5	3,55	$3,70 \times 10^{-1}$	8,50
10	6,30	1,31	30,16
15	8,75	2,73	62,84
20	11,25	4,69	$1,08 \times 10^2$
25	13,20	6,88	$1,58 \times 10^2$
30	15,45	9,66	$2,22 \times 10^2$
35	17,60	12,83	$2,95 \times 10^2$
40	20,10	16,75	$3,85 \times 10^2$

Çizelge 6.33. Monopolar Al-Al elektrot, $t=10$ dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)
1	2,25	$9,38 \times 10^{-2}$	2,15
2	2,10	$1,75 \times 10^{-1}$	4,02
3	2,65	$3,31 \times 10^{-1}$	7,61
4	2,90	$4,83 \times 10^{-1}$	11,11
5	3,85	$8,02 \times 10^{-1}$	18,43
10	6,45	2,69	61,76
15	8,50	5,31	$1,22 \times 10^2$
20	10,95	9,13	$2,10 \times 10^2$
25	13,10	13,65	$3,14 \times 10^2$
30	16,10	20,13	$4,63 \times 10^2$
35	17,05	24,86	$5,71 \times 10^2$
40	18,95	31,58	$7,26 \times 10^2$

Çizelge 6.34. Monopolar Al-Fe elektrot, $t=1$ dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)
1	1,90	$7,92 \times 10^{-3}$	$1,82 \times 10^{-1}$
2	3,00	$2,50 \times 10^{-2}$	$5,75 \times 10^{-1}$
3	3,80	$4,75 \times 10^{-2}$	1,09
4	4,60	$7,67 \times 10^{-2}$	1,76
5	5,20	$1,08 \times 10^{-1}$	2,49
10	8,45	$3,52 \times 10^{-1}$	8,09
15	11,45	$7,16 \times 10^{-1}$	16,45
20	13,10	1,09	25,09
25	15,70	1,64	37,58
30	18,45	2,31	53,00
35	21,50	3,14	72,06
40	23,65	3,94	90,59

Çizelge 6.35. Monopolar Al-Fe elektrot, $t=3$ dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)
1	2,75	$3,44 \times 10^{-2}$	$7,90 \times 10^{-1}$
2	2,90	$7,25 \times 10^{-2}$	1,67
3	3,65	$1,37 \times 10^{-1}$	3,15
4	4,25	$2,13 \times 10^{-1}$	4,88
5	4,60	$2,88 \times 10^{-1}$	6,61
10	8,05	1,01	23,13
15	10,40	1,95	44,81
20	13,50	3,38	77,56
25	16,05	5,02	$1,15 \times 10^2$
30	18,30	6,86	$1,58 \times 10^2$
35	20,35	8,90	$2,05 \times 10^2$
40	22,70	11,35	$2,61 \times 10^2$

Çizelge 6.36. Monopolar Al-Fe elektrot, $t=5$ dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)
1	1,75	$3,65 \times 10^{-2}$	$8,38 \times 10^{-1}$
2	2,45	$1,02 \times 10^{-1}$	2,35
3	3,10	$1,94 \times 10^{-1}$	4,45
4	3,80	$3,17 \times 10^{-1}$	7,28
5	4,55	$4,74 \times 10^{-1}$	10,89
10	7,60	1,58	36,39
15	11,20	3,50	80,43
20	14,10	5,88	$1,35 \times 10^2$
25	17,00	8,85	$2,03 \times 10^2$
30	18,95	11,84	$2,72 \times 10^2$
35	20,15	14,69	$3,38 \times 10^2$
40	25,10	20,92	$4,81 \times 10^2$

Çizelge 6.37. Monopolar Al-Fe elektrot, $t=10$ dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)
1	2,25	$9,38 \times 10^{-2}$	2,15
2	2,45	$2,04 \times 10^{-1}$	4,69
3	3,50	$4,38 \times 10^{-1}$	10,05
4	4,15	$6,92 \times 10^{-1}$	15,90
5	4,85	1,01	23,22
10	8,05	3,35	77,08
15	10,45	6,53	$1,50 \times 10^2$
20	13,10	10,92	$2,51 \times 10^2$
25	16,25	16,93	$3,89 \times 10^2$
30	17,60	22,00	$5,06 \times 10^2$
35	19,75	28,80	$6,62 \times 10^2$
40	21,20	35,33	$8,12 \times 10^2$

Çizelge 6.38. Bipolar Fe-Fe elektrot, $t=1$ dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)
1	9,45	$3,94 \times 10^{-2}$	$9,05 \times 10^{-1}$
3	27,05	$3,38 \times 10^{-1}$	7,77
5	42,80	$8,92 \times 10^{-1}$	20,49
10	74,75	3,11	71,58

Çizelge 6.39. Bipolar Fe-Fe elektrot, $t=3$ dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)
1	8,85	$1,11 \times 10^{-1}$	2,54
3	22,75	$8,53 \times 10^{-1}$	19,61
5	34,15	2,13	49,05
10	57,80	7,23	$1,66 \times 10^2$

Çizelge 6.40. Bipolar Fe-Fe elektrot, $t=5$ dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)
1	11,00	$2,29 \times 10^{-1}$	5,27
3	26,45	1,65	37,99
5	40,70	4,24	97,43
10	57,60	12,00	$2,76 \times 10^2$

Çizelge 6.41. Bipolar Fe-Fe elektrot, $t=10$ dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)
1	10,45	$4,35 \times 10^{-1}$	10,01
3	27,45	3,43	78,85
5	47,35	9,86	$2,27 \times 10^2$
10	67,15	27,98	$6,43 \times 10^2$

Çizelge 6.42. Bipolar Al-Al elektrot, $t=1$ dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)
1	13,25	$5,52 \times 10^{-2}$	1,27
3	32,80	$4,10 \times 10^{-1}$	9,42
5	51,90	1,08	24,85
10	80,80	3,37	77,37

Çizelge 6.43. Bipolar Al-Al elektrot, $t=3$ dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)
1	12,05	$1,51 \times 10^{-1}$	3,46
3	30,10	1,13	25,94
5	47,15	2,95	67,72
10	80,80	10,10	$2,32 \times 10^2$

Çizelge 6.44. Bipolar Al-Al elektrot, $t=5$ dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)
1	14,85	$3,09 \times 10^{-1}$	7,11
3	34,70	2,17	49,84
5	57,00	5,94	$1,36 \times 10^2$
10	80,80	16,83	$3,87 \times 10^2$

Çizelge 6.45. Bipolar Al-Al elektrot, $t=10$ dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)
1	14,15	$5,90 \times 10^{-1}$	13,55
3	30,60	3,83	87,90
5	47,35	9,86	$2,27 \times 10^2$
10	75,70	31,54	$7,25 \times 10^2$

Çizelge 6.46. Bipolar Al-Fe elektrot, $t=1$ dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)
1	11,10	$4,63 \times 10^{-2}$	1,06
3	28,75	$3,59 \times 10^{-1}$	8,26
5	45,60	$9,50 \times 10^{-1}$	21,83
10	80,80	3,37	77,37

Çizelge 6.47. Bipolar Al-Fe elektrot, $t=3$ dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)
1	11,33	$1,42 \times 10^{-1}$	3,25
3	30,18	1,13	26,00
5	53,40	3,34	76,70
10	80,85	10,11	$2,32 \times 10^2$

Çizelge 6.48. Bipolar Al-Fe elektrot, $t=5$ dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti

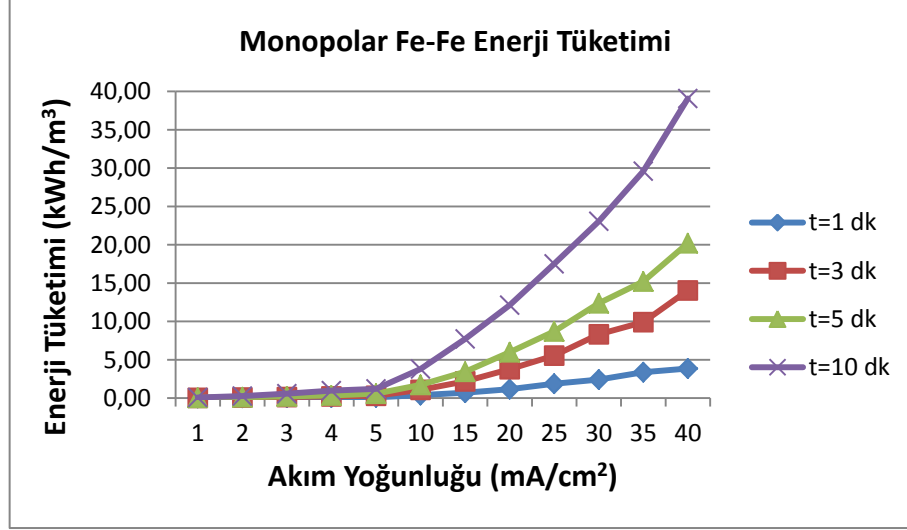
Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)
1	12,40	$2,58 \times 10^{-1}$	5,94
3	27,60	1,73	39,64
5	48,85	5,09	$1,17 \times 10^2$
10	76,30	15,90	$3,65 \times 10^2$

Çizelge 6.49. Bipolar Al-Fe elektrot, $t=10$ dk; enerji tüketimi ve enerji maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)
1	14,63	$6,09 \times 10^{-1}$	14,00
3	29,88	3,73	85,82
5	47,80	9,96	$2,29 \times 10^2$
10	72,93	30,39	$6,98 \times 10^2$

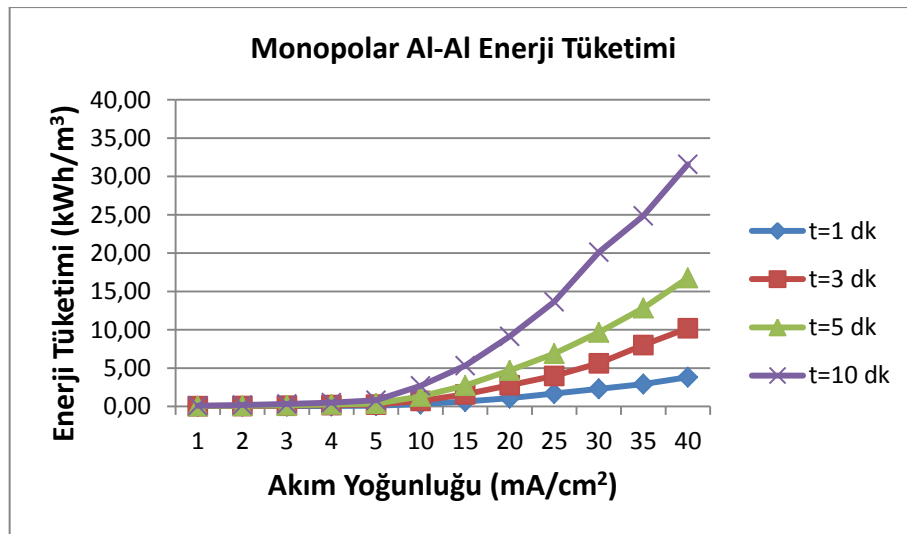
6.3.1.1. Enerji tüketimi karşılaştırmaları

Monopolar Fe-Fe elektrotla 1 dk, 3 dk, 5 dk, 10 dk arıtma sürelerinde yapılan elektrokoagülasyon deneylerinin akım yoğunluğuna bağlı kWh/m³ cinsinden enerji tüketimi değişimleri karşılaştırılması Şekil 6.55’de verilmiştir.



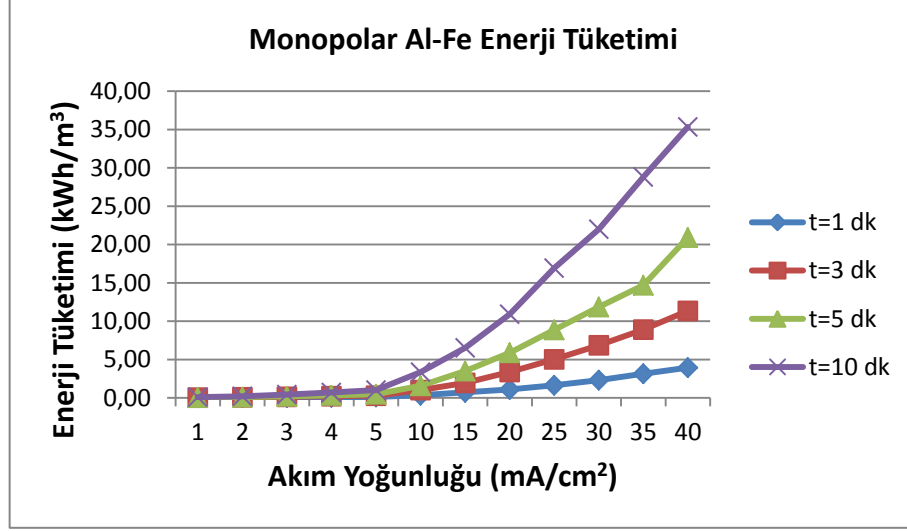
Şekil 6.55. Monopolar Fe-Fe elektrot, 1 dk, 3 dk, 5 dk, 10 dk arıtma süreleri; akım yoğunluğu enerji tüketimi ilişkisi

Monopolar Al-Al elektrotla 1 dk, 3 dk, 5 dk, 10 dk arıtma sürelerinde yapılan elektrokoagülasyon deneylerinin akım yoğunluğuna bağlı kWh/m³ cinsinden enerji tüketimi değişimleri karşılaştırılması Şekil 6.56’da verilmiştir.



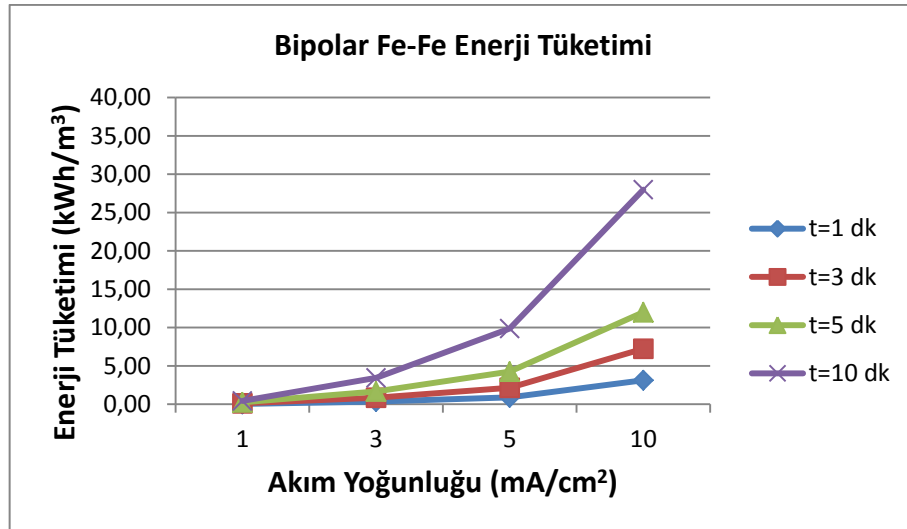
Şekil 6.56. Monopolar Al-Al elektrot, 1 dk, 3 dk, 5 dk, 10 dk arıtma süreleri; akım yoğunluğu enerji tüketimi ilişkisi

Monopolar Al-Fe elektrotla 1 dk, 3 dk, 5 dk, 10 dk arıtma sürelerinde yapılan elektrokoagülasyon deneylerinin akım yoğunluğuna bağlı kWh/m³ cinsinden enerji tüketimi değişimleri karşılaştırılması Şekil 6.57’de verilmiştir.



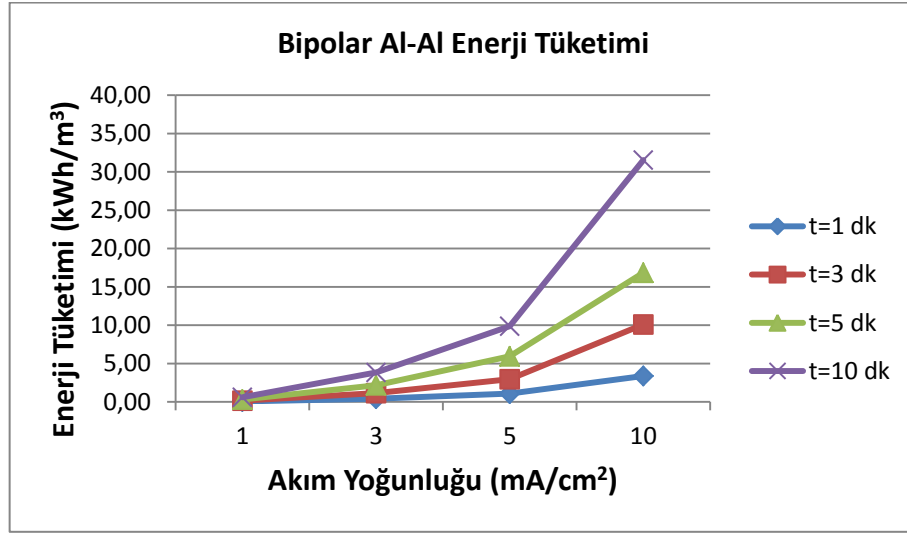
Şekil 6.57. Monopolar Al-Fe elektrot, 1 dk, 3 dk, 5 dk, 10 dk arıtma süreleri; akım yoğunluğu enerji tüketimi ilişkisi

Bipolar Fe-Fe elektrotla 1 dk, 3 dk, 5 dk, 10 dk arıtma sürelerinde yapılan elektrokoagülasyon deneylerinin akım yoğunluğuna bağlı kWh/m³ cinsinden enerji tüketimi değişimleri karşılaştırılması Şekil 6.58’de verilmiştir.



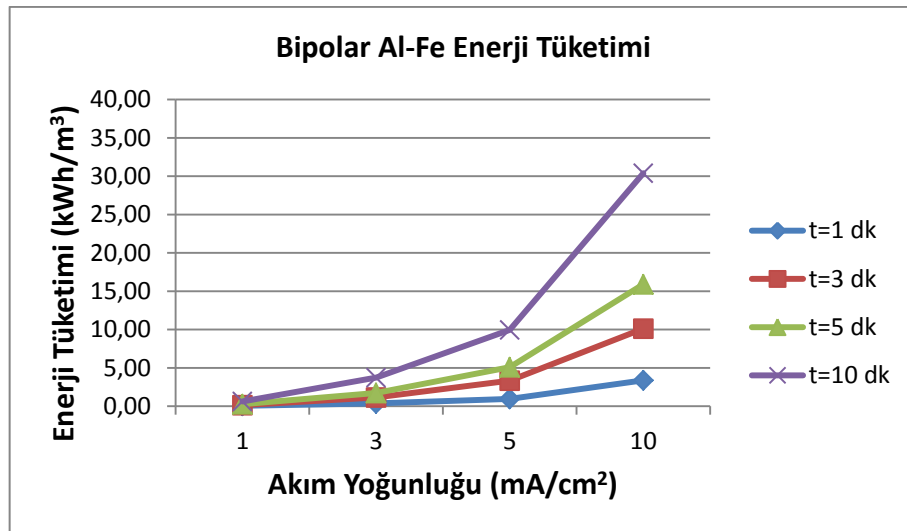
Şekil 6.58. Bipolar Fe-Fe elektrot, 1 dk, 3 dk, 5 dk, 10 dk arıtma süreleri; akım yoğunluğu enerji tüketimi ilişkisi

Bipolar Al-Al elektrotla 1 dk, 3 dk, 5 dk, 10 dk arıtma sürelerinde yapılan elektrokoagülasyon deneylerinin akım yoğunluğuna bağlı kWh/m³ cinsinden enerji tüketimi değişimleri karşılaştırılması Şekil 6.59’da verilmiştir.



Şekil 6.59. Bipolar Al-Al elektrot, 1 dk, 3 dk, 5 dk, 10 dk arıtma süreleri; akım yoğunluğu enerji tüketimi ilişkisi

Bipolar Al-Fe elektrotla 1 dk, 3 dk, 5 dk, 10 dk arıtma sürelerinde yapılan elektrokoagülasyon deneylerinin akım yoğunluğuna bağlı kWh/m³ cinsinden enerji tüketimi değişimleri karşılaştırılması Şekil 6.60’da verilmiştir.



Şekil 6.60. Bipolar Al-Fe elektrot, 1 dk, 3 dk, 5 dk, 10 dk arıtma süreleri; akım yoğunluğu enerji tüketimi ilişkisi

6.3.2. Teorik elektrot maliyeti

Bu bölümde işletme maliyetinin bir parçası olan elektrot tüketim maliyetleri teorik olarak hesaplanmıştır. Her deney için; akım yoğunluğu ve arıtım süresine bağlı olarak değişen teorik elektrot tüketimleri Faradaya yasalarına göre ortaya konduktan sonra, elektrot maliyetleri, demir ve alüminyumun birim fiyatları baz alınarak krş./m^3 cinsinden hesaplanmıştır. 23.04.2018 tarihinde açıklanan verilere göre demirin birim fiyatı 2700 TL/ton, alüminyumun birim fiyatı 8300 TL/ton'dur [41]. Teorik elektrot maliyeti hesaplamaları detaylı olarak EK 5, EK 6 ve EK 7'de gösterilmiştir.

İlerleyen sayfalarda farklı akım yoğunluklarında, 1 dk, 3 dk, 5 dk ve 10 dk arıtma süreleri ve Monopolar Fe-Fe, Monopolar Al-Al, Monopolar Al-Fe, Bipolar Fe-Fe, Bipolar Al-Al, Bipolar Al-Fe elektrot tipleri ve geometrileri ile gerçekleştirilen elektrokoagülasyon deneylerinin, kr./m^3 cinsinden teorik elektrot tüketim maliyeti çizelgeleri gösterilmiştir.

Çizelge 6.50. Monopolar Fe-Fe elektrot, $t=1$ dk; tüketilen teorik elektrot kütlesi ve elektrot tüketim maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Tüketilen Teorik Demir Elektrot Kütlesi (g/m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)
1	2,89	7,81x10 ⁻¹
2	5,79	1,56
3	8,68	2,34
4	11,58	3,13
5	14,47	3,91
10	28,94	7,81
15	43,41	11,72
20	57,88	15,63
25	72,35	19,53
30	86,82	23,44
35	1,01x10 ²	27,35
40	1,16x10 ²	31,25

Çizelge 6.51. Monopolar Fe-Fe elektrot, $t=3$ dk; tüketilen teorik elektrot kütlesi ve elektrot tüketim maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Tüketilen Teorik Demir Elektrot Kütlesi (g/m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)
1	8,68	2,34
2	17,36	4,69
3	26,05	7,03
4	34,73	9,38
5	43,41	11,72
10	86,82	23,44
15	1,30x10 ²	35,16
20	1,74x10 ²	46,88
25	2,17x10 ²	58,60
30	2,60x10 ²	70,32
35	3,04x10 ²	82,04
40	3,47x10 ²	93,76

Çizelge 6.52. Monopolar Fe-Fe elektrot, $t=5$ dk; tüketilen teorik elektrot kütlesi ve elektrot tüketim maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Tüketilen Teorik Demir Elektrot Kütlesi (g/m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)
1	14,47	3,91
2	28,94	7,81
3	43,41	11,72
4	57,88	15,63
5	72,35	19,53
10	1,45x10 ²	39,07
15	2,17x10 ²	58,60
20	2,89x10 ²	78,14
25	3,62x10 ²	97,67
30	4,34x10 ²	1,17x10 ²
35	5,06x10 ²	1,37x10 ²
40	5,79x10 ²	1,56x10 ²

Çizelge 6.53. Monopolar Fe-Fe elektrot, $t=10$ dk; tüketilen teorik elektrot kütlesi ve elektrot tüketim maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Tüketilen Teorik Demir Elektrot Kütlesi (g/m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)
1	28,94	7,81
2	57,88	15,63
3	86,82	23,44
4	1,16x10 ²	31,25
5	1,45x10 ²	39,07
10	2,89x10 ²	78,14
15	4,34x10 ²	1,17x10 ²
20	5,79x10 ²	1,56x10 ²
25	7,23x10 ²	1,95x10 ²
30	8,68x10 ²	2,34x10 ²
35	1,01x10 ³	2,73x10 ²
40	1,16x10 ³	3,13x10 ²

Çizelge 6.54. Monopolar Al-Al elektrot, $t=1$ dk; tüketilen teorik elektrot kütlesi ve elektrot tüketim maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Tüketilen Teorik Alüminyum Elektrot Kütlesi (g/m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)
1	1,40	1,16
2	2,80	2,32
3	4,19	3,48
4	5,59	4,64
5	6,99	5,80
10	13,98	11,61
15	20,97	17,41
20	27,96	23,21
25	34,96	29,01
30	41,95	34,82
35	48,94	40,62
40	55,93	46,42

Çizelge 6.55. Monopolar Al-Al elektrot, $t=3$ dk; tüketilen teorik elektrot kütlesi ve elektrot tüketim maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Tüketilen Teorik Alüminyum Elektrot Kütlesi (g/m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)
1	4,19	3,48
2	8,39	6,96
3	12,58	10,44
4	16,78	13,93
5	20,97	17,41
10	41,95	34,82
15	62,92	52,22
20	83,89	69,63
25	1,05x10 ²	87,04
30	1,26x10 ²	1,04x10 ²
35	1,47x10 ²	1,22x10 ²
40	1,68x10 ²	1,39x10 ²

Çizelge 6.56. Monopolar Al-Al elektrot, $t=5$ dk; tüketilen teorik elektrot kütlesi ve elektrot tüketim maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Tüketilen Teorik Alüminyum Elektrot Kütlesi (g/m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)
1	6,99	5,80
2	13,98	11,61
3	20,97	17,41
4	27,96	23,21
5	34,96	29,01
10	69,91	58,03
15	1,05x10 ²	87,04
20	1,40x10 ²	1,16x10 ²
25	1,75x10 ²	1,45x10 ²
30	2,10x10 ²	1,74x10 ²
35	2,45x10 ²	2,03x10 ²
40	2,80x10 ²	2,32x10 ²

Çizelge 6.57. Monopolar Al-Al elektrot, $t=10$ dk; tüketilen teorik elektrot kütlesi ve elektrot tüketim maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Tüketilen Teorik Alüminyum Elektrot Kütlesi (g/m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)
1	13,98	11,61
2	27,96	23,21
3	41,95	34,82
4	55,93	46,42
5	69,91	58,03
10	1,40x10 ²	1,16x10 ²
15	2,10x10 ²	1,74x10 ²
20	2,80x10 ²	2,32x10 ²
25	3,50x10 ²	2,90x10 ²
30	4,19x10 ²	3,48x10 ²
35	4,89x10 ²	4,06x10 ²
40	5,59x10 ²	4,64x10 ²

Çizelge 6.58. Monopolar Al-Fe elektrot, $t=1$ dk; tüketilen teorik elektrot kütlesi ve elektrot tüketim maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Tüketilen Teorik Alüminyum Elektrot Kütlesi (g/m ³)	Alüminyum Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Tüketilen Teorik Demir Elektrot Kütlesi (g/m ³)	Demir Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Toplam Elektrot Maliyeti (kr./m ³)
1	6,99x10 ⁻¹	5,80x10 ⁻¹	1,45	3,91x10 ⁻¹	9,71x10 ⁻¹
2	1,40	1,16	2,89	7,81x10 ⁻¹	1,94
3	2,10	1,74	4,34	1,17	2,91
4	2,80	2,32	5,79	1,56	3,88
5	3,50	2,90	7,23	1,95	4,85
10	6,99	5,80	14,47	3,91	9,71
15	10,49	8,70	21,70	5,86	14,56
20	13,98	11,61	28,94	7,81	19,42
25	17,48	14,51	36,17	9,77	24,27
30	20,97	17,41	43,41	11,72	29,13
35	24,47	20,31	50,64	13,67	33,98
40	27,96	23,21	57,88	15,63	38,84

Çizelge 6.59. Monopolar Al-Fe elektrot, $t=3$ dk; tüketilen teorik elektrot kütlesi ve elektrot tüketim maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Tüketilen Teorik Alüminyum Elektrot Kütlesi (g/m ³)	Alüminyum Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Tüketilen Teorik Demir Elektrot Kütlesi (g/m ³)	Demir Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Toplam Elektrot Maliyeti (kr./m ³)
1	2,10	1,74	4,34	1,17	2,91
2	4,19	3,48	8,68	2,34	5,83
3	6,29	5,22	13,02	3,52	8,74
4	8,39	6,96	17,36	4,69	11,65
5	10,49	8,70	21,70	5,86	14,56
10	20,97	17,41	43,41	11,72	29,13
15	31,46	26,11	65,11	17,58	43,69
20	41,95	34,82	86,82	23,44	58,26
25	52,43	43,52	1,09x10 ²	29,30	72,82
30	62,92	52,22	1,30x10 ²	35,16	87,39
35	73,41	60,93	1,52x10 ²	41,02	1,02x10 ²
40	83,89	69,63	1,74x10 ²	46,88	1,17x10 ²

Çizelge 6.60. Monopolar Al-Fe elektrot, $t=5$ dk; tüketilen teorik elektrot kütlesi ve elektrot tüketim maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Tüketilen Teorik Alüminyum Elektrot Kütlesi (g/m ³)	Alüminyum Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Tüketilen Teorik Demir Elektrot Kütlesi (g/m ³)	Demir Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Toplam Elektrot Maliyeti (kr./m ³)
1	3,50	2,90	7,23	1,95	4,85
2	6,99	5,80	14,47	3,91	9,71
3	10,49	8,70	21,70	5,86	14,56
4	13,98	11,61	28,94	7,81	19,42
5	17,48	14,51	36,17	9,77	24,27
10	34,96	29,01	72,35	19,53	48,55
15	52,43	43,52	1,09x10 ²	29,30	72,82
20	69,91	58,03	1,45x10 ²	39,07	97,09
25	87,39	72,53	1,81x10 ²	48,84	1,21x10 ²
30	1,05x10 ²	87,04	2,17x10 ²	58,60	1,46x10 ²
35	1,22x10 ²	1,02x10 ²	2,53x10 ²	68,37	1,70x10 ²
40	1,40x10 ²	1,16x10 ²	2,89x10 ²	78,14	1,94x10 ²

Çizelge 6.61. Monopolar Al-Fe elektrot, $t=10$ dk; tüketilen teorik elektrot kütlesi ve elektrot tüketim maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Tüketilen Teorik Alüminyum Elektrot Kütlesi (g/m ³)	Alüminyum Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Tüketilen Teorik Demir Elektrot Kütlesi (g/m ³)	Demir Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Toplam Elektrot Maliyeti (kr./m ³)
1	6,99	5,80	14,47	3,91	9,71
2	13,98	11,61	28,94	7,81	19,42
3	20,97	17,41	43,41	11,72	29,13
4	27,96	23,21	57,88	15,63	38,84
5	34,96	29,01	72,35	19,53	48,55
10	69,91	58,03	1,45x10 ²	39,07	97,09
15	1,05x10 ²	87,04	2,17x10 ²	58,60	1,46x10 ²
20	1,40x10 ²	1,16x10 ²	2,89x10 ²	78,14	1,94x10 ²
25	1,75x10 ²	1,45x10 ²	3,62x10 ²	97,67	2,43x10 ²
30	2,10x10 ²	1,74x10 ²	4,34x10 ²	1,17x10 ²	2,91x10 ²
35	2,45x10 ²	2,03x10 ²	5,06x10 ²	1,37x10 ²	3,40x10 ²
40	2,80x10 ²	2,32x10 ²	5,79x10 ²	1,56x10 ²	3,88x10 ²

Çizelge 6.62. Bipolar Fe-Fe elektrot, $t=1$ dk; tüketilen teorik elektrot kütlesi ve elektrot tüketim maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Tüketilen Teorik Demir Elektrot Kütlesi (g/m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)
1	2,89	$7,81 \times 10^{-1}$
3	8,68	2,34
5	14,47	3,91
10	28,94	7,81

Çizelge 6.63. Bipolar Fe-Fe elektrot, $t=3$ dk; tüketilen teorik elektrot kütlesi ve elektrot tüketim maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Tüketilen Teorik Demir Elektrot Kütlesi (g/m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)
1	8,68	2,34
3	26,05	7,03
5	43,41	11,72
10	86,82	23,44

Çizelge 6.64. Bipolar Fe-Fe elektrot, $t=5$ dk; tüketilen teorik elektrot kütlesi ve elektrot tüketim maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Tüketilen Teorik Demir Elektrot Kütlesi (g/m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)
1	14,47	3,91
3	43,41	11,72
5	72,35	19,53
10	$1,45 \times 10^2$	39,07

Çizelge 6.65. Bipolar Fe-Fe elektrot, $t=10$ dk; tüketilen teorik elektrot kütlesi ve elektrot tüketim maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Tüketilen Teorik Demir Elektrot Kütlesi (g/m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)
1	28,94	7,81
3	86,82	23,44
5	$1,45 \times 10^2$	39,07
10	$2,89 \times 10^2$	78,14

Çizelge 6.66. Bipolar Al-Al elektrot, $t=1$ dk; tüketilen teorik elektrot kütlesi ve elektrot tüketim maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Tüketilen Teorik Alüminyum Elektrot Kütlesi (g/m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)
1	1,40	1,16
3	4,19	3,48
5	6,99	5,80
10	13,98	11,61

Çizelge 6.67. Bipolar Al-Al elektrot, $t=3$ dk; tüketilen teorik elektrot kütlesi ve elektrot tüketim maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Tüketilen Teorik Alüminyum Elektrot Kütlesi (g/m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)
1	4,19	3,48
3	12,58	10,44
5	20,97	17,41
10	41,95	34,82

Çizelge 6.68. Bipolar Al-Al elektrot, $t=5$ dk; tüketilen teorik elektrot kütlesi ve elektrot tüketim maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Tüketilen Teorik Alüminyum Elektrot Kütlesi (g/m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)
1	6,99	5,80
3	20,97	17,41
5	34,96	29,01
10	69,91	58,03

Çizelge 6.69. Bipolar Al-Al elektrot, $t=10$ dk; tüketilen teorik elektrot kütlesi ve elektrot tüketim maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Tüketilen Teorik Alüminyum Elektrot Kütlesi (g/m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)
1	13,98	11,61
3	41,95	34,82
5	69,91	58,03
10	1,40x10 ²	1,16x10 ²

Çizelge 6.70. Bipolar Al-Fe elektrot, $t=1$ dk; tüketilen teorik elektrot kütlesi ve elektrot tüketim maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Tüketilen Teorik Alüminyum Elektrot Kütlesi (g/m ³)	Alüminyum Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Tüketilen Teorik Demir Elektrot Kütlesi (g/m ³)	Demir Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Toplam Elektrot Maliyeti (kr./m ³)
1	6,99x10 ⁻¹	5,80x10 ⁻¹	1,45	3,91x10 ⁻¹	9,71x10 ⁻¹
3	2,10	1,74	4,34	1,17	2,91
5	3,50	2,90	7,23	1,95	4,85
10	6,99	5,80	14,47	3,91	9,71

Çizelge 6.71. Bipolar Al-Fe elektrot, $t=3$ dk; tüketilen teorik elektrot kütlesi ve elektrot tüketim maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Tüketilen Teorik Alüminyum Elektrot Kütlesi (g/m ³)	Alüminyum Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Tüketilen Teorik Demir Elektrot Kütlesi (g/m ³)	Demir Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Toplam Elektrot Maliyeti (kr./m ³)
1	2,10	1,74	4,34	1,17	2,91
3	6,29	5,22	13,02	3,52	8,74
5	10,49	8,70	21,70	5,86	14,56
10	20,97	17,41	43,41	11,72	29,13

Çizelge 6.72. Bipolar Al-Fe elektrot, $t=5$ dk; tüketilen teorik elektrot kütlesi ve elektrot tüketim maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Tüketilen Teorik Alüminyum Elektrot Kütlesi (g/m ³)	Alüminyum Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Tüketilen Teorik Demir Elektrot Kütlesi (g/m ³)	Demir Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Toplam Elektrot Maliyeti (kr./m ³)
1	3,50	2,90	7,23	1,95	4,85
3	10,49	8,70	21,70	5,86	14,56
5	17,48	14,51	36,17	9,77	24,27
10	34,96	29,01	72,35	19,53	48,55

Çizelge 6.73. Bipolar Al-Fe elektrot, $t=10$ dk; tüketilen teorik elektrot kütlesi ve elektrot tüketim maliyeti

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Tüketilen Teorik Alüminyum Elektrot Kütlesi (g/m ³)	Alüminyum Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Tüketilen Teorik Demir Elektrot Kütlesi (g/m ³)	Demir Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Toplam Elektrot Maliyeti (kr./m ³)
1	6,99	5,80	14,47	3,91	9,71
3	20,97	17,41	43,41	11,72	29,13
5	34,96	29,01	72,35	19,53	48,55
10	69,91	58,03	1,45x10 ²	39,07	97,09

6.3.3. Toplam maliyet

İlerleyen sayfalarda farklı akım yoğunluklarında, 1 dk, 3 dk, 5 dk ve 10 dk arıtma süreleri ve Monopolar Fe-Fe, Monopolar Al-Al, Monopolar Al-Fe, Bipolar Fe-Fe, Bipolar Al-Al, Bipolar Al-Fe elektrot tipleri ve geometrileri ile gerçekleştirilen elektrokoagülasyon deneylerinin (önceki çizelgelerde belirtilen enerji tüketim maliyetleri ve teorik elektrot tüketim maliyetleri toplanarak) toplam maliyet çizelgeleri gösterilmiştir.

Çizelge 6.74. Monopolar Fe-Fe elektrot, $t=1$ dk; toplam maliyet

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Toplam Maliyet (kr./m ³)
1	1,92x10 ⁻¹	7,81x10 ⁻¹	9,73x10 ⁻¹
2	6,13x10 ⁻¹	1,56	2,18
3	1,03	2,34	3,38
4	1,63	3,13	4,75
5	2,37	3,91	6,28
10	8,67	7,81	16,48
15	16,16	11,72	27,88
20	26,43	15,63	42,06
25	42,73	19,53	62,27
30	55,44	23,44	78,88
35	77,42	27,35	1,05x10 ²
40	88,48	31,25	1,20x10 ²

Çizelge 6.75. Monopolar Fe-Fe elektrot, $t=3$ dk; toplam maliyet

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Toplam Maliyet (kr./m ³)
1	6,46x10 ⁻¹	2,34	2,99
2	1,87	4,69	6,56
3	3,10	7,03	10,13
4	5,23	9,38	14,60
5	7,04	11,72	18,76
10	24,85	23,44	48,29
15	49,98	35,16	85,15
20	86,47	46,88	1,33x10 ²
25	1,27x10 ²	58,60	1,86x10 ²
30	1,91x10 ²	70,32	2,62x10 ²
35	2,28x10 ²	82,04	3,10x10 ²
40	3,23x10 ²	93,76	4,17x10 ²

Çizelge 6.76. Monopolar Fe-Fe elektrot, $t=5$ dk; toplam maliyet

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Toplam Maliyet (kr./m ³)
1	$8,62 \times 10^{-1}$	3,91	4,77
2	2,44	7,81	10,26
3	4,81	11,72	16,53
4	8,14	15,63	23,77
5	13,05	19,53	32,58
10	39,74	39,07	78,81
15	79,00	58,60	$1,38 \times 10^2$
20	$1,37 \times 10^2$	78,14	$2,16 \times 10^2$
25	$2,00 \times 10^2$	97,67	$2,98 \times 10^2$
30	$2,84 \times 10^2$	$1,17 \times 10^2$	$4,02 \times 10^2$
35	$3,49 \times 10^2$	$1,37 \times 10^2$	$4,86 \times 10^2$
40	$4,64 \times 10^2$	$1,56 \times 10^2$	$6,21 \times 10^2$

Çizelge 6.77. Monopolar Fe-Fe elektrot, $t=10$ dk; toplam maliyet

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Toplam Maliyet (kr./m ³)
1	1,63	7,81	9,44
2	6,03	15,63	21,66
3	13,21	23,44	36,66
4	22,41	31,25	53,66
5	27,53	39,07	66,60
10	87,14	78,14	$1,65 \times 10^2$
15	$1,77 \times 10^2$	$1,17 \times 10^2$	$2,95 \times 10^2$
20	$2,79 \times 10^2$	$1,56 \times 10^2$	$4,35 \times 10^2$
25	$4,02 \times 10^2$	$1,95 \times 10^2$	$5,98 \times 10^2$
30	$5,30 \times 10^2$	$2,34 \times 10^2$	$7,64 \times 10^2$
35	$6,80 \times 10^2$	$2,73 \times 10^2$	$9,54 \times 10^2$
40	$8,98 \times 10^2$	$3,13 \times 10^2$	$1,21 \times 10^3$

Çizelge 6.78. Monopolar Al-Al elektrot, $t=1$ dk; toplam maliyet

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Toplam Maliyet (kr./m ³)
1	1,92x10 ⁻¹	1,16	1,35
2	5,08x10 ⁻¹	2,32	2,83
3	9,05x10 ⁻¹	3,48	4,39
4	1,42	4,64	6,06
5	2,15	5,80	7,96
10	7,18	11,61	18,79
15	14,79	17,41	32,20
20	24,61	23,21	47,82
25	38,42	29,01	67,44
30	52,43	34,82	87,24
35	66,69	40,62	1,07x10 ²
40	87,71	46,42	1,34x10 ²

Çizelge 6.79. Monopolar Al-Al elektrot, $t=3$ dk; toplam maliyet

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Toplam Maliyet (kr./m ³)
1	5,89 x10 ⁻¹	3,48	4,07
2	1,24	6,96	8,20
3	2,28	10,44	12,73
4	3,85	13,93	17,78
5	5,46	17,41	22,87
10	16,37	34,82	51,19
15	36,20	52,22	88,42
20	63,49	69,63	1,33x10 ²
25	91,57	87,04	1,79x10 ²
30	1,29x10 ²	1,04x10 ²	2,34x10 ²
35	1,84x10 ²	1,22x10 ²	3,06x10 ²
40	2,34x10 ²	1,39x10 ²	3,74x10 ²

Çizelge 6.80. Monopolar Al-Al elektrot, $t=5$ dk; toplam maliyet

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Toplam Maliyet (kr./m ³)
1	1,03	5,80	6,83
2	1,92	11,61	13,52
3	3,23	17,41	20,64
4	6,03	23,21	29,24
5	8,50	29,01	37,51
10	30,16	58,03	88,19
15	62,84	87,04	1,50x10 ²
20	1,08x10 ²	1,16x10 ²	2,24x10 ²
25	1,58x10 ²	1,45x10 ²	3,03x10 ²
30	2,22x10 ²	1,74x10 ²	3,96x10 ²
35	2,95x10 ²	2,03x10 ²	4,98x10 ²
40	3,85x10 ²	2,32x10 ²	6,17x10 ²

Çizelge 6.81. Monopolar Al-Al elektrot, $t=10$ dk; toplam maliyet

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Toplam Maliyet (kr./m ³)
1	2,15	11,61	13,76
2	4,02	23,21	27,23
3	7,61	34,82	42,43
4	11,11	46,42	57,53
5	18,43	58,03	76,46
10	61,76	1,16x10 ²	1,78x10 ²
15	1,22x10 ²	1,74x10 ²	2,96x10 ²
20	2,10x10 ²	2,32x10 ²	4,42x10 ²
25	3,14x10 ²	2,90x10 ²	6,04x10 ²
30	4,63x10 ²	3,48x10 ²	8,11x10 ²
35	5,71x10 ²	4,06x10 ²	9,78x10 ²
40	7,26x10 ²	4,64x10 ²	1,19x10 ³

Çizelge 6.82. Monopolar Al-Fe elektrot, $t=1$ dk; toplam maliyet

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Toplam Maliyet (kr./m ³)
1	1,82x10 ⁻¹	9,71x10 ⁻¹	1,15
2	5,75x10 ⁻¹	1,94	2,52
3	1,09	2,91	4,00
4	1,76	3,88	5,65
5	2,49	4,85	7,34
10	8,09	9,71	17,80
15	16,45	14,56	31,01
20	25,09	19,42	44,51
25	37,58	24,27	61,86
30	53,00	29,13	82,13
35	72,06	33,98	1,06x10 ²
40	90,59	38,84	1,29x10 ²

Çizelge 6.83. Monopolar Al-Fe elektrot, $t=3$ dk; toplam maliyet

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Toplam Maliyet (kr./m ³)
1	7,90x10 ⁻¹	2,91	3,70
2	1,67	5,83	7,49
3	3,15	8,74	11,88
4	4,88	11,65	16,53
5	6,61	14,56	21,17
10	23,13	29,13	52,25
15	44,81	43,69	88,51
20	77,56	58,26	1,36x10 ²
25	1,15x10 ²	72,82	1,88x10 ²
30	1,58x10 ²	87,39	2,45x10 ²
35	2,05x10 ²	1,02x10 ²	3,07x10 ²
40	2,61x10 ²	1,17x10 ²	3,77x10 ²

Çizelge 6.84. Monopolar Al-Fe elektrot, $t=5$ dk; toplam maliyet

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Toplam Maliyet (kr./m ³)
1	$8,38 \times 10^{-1}$	4,85	5,69
2	2,35	9,71	12,06
3	4,45	14,56	19,02
4	7,28	19,42	26,70
5	10,89	24,27	35,17
10	36,39	48,55	84,93
15	80,43	72,82	$1,53 \times 10^2$
20	$1,35 \times 10^2$	97,09	$2,32 \times 10^2$
25	$2,03 \times 10^2$	$1,21 \times 10^2$	$3,25 \times 10^2$
30	$2,72 \times 10^2$	$1,46 \times 10^2$	$4,18 \times 10^2$
35	$3,38 \times 10^2$	$1,70 \times 10^2$	$5,08 \times 10^2$
40	$4,81 \times 10^2$	$1,94 \times 10^2$	$6,75 \times 10^2$

Çizelge 6.85. Monopolar Al-Fe elektrot, $t=10$ dk; toplam maliyet

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Toplam Maliyet (kr./m ³)
1	2,15	9,71	11,86
2	4,69	19,42	24,11
3	10,05	29,13	39,18
4	15,90	38,84	54,73
5	23,22	48,55	71,77
10	77,08	97,09	$1,74 \times 10^2$
15	$1,50 \times 10^2$	$1,46 \times 10^2$	$2,96 \times 10^2$
20	$2,51 \times 10^2$	$1,94 \times 10^2$	$4,45 \times 10^2$
25	$3,89 \times 10^2$	$2,43 \times 10^2$	$6,32 \times 10^2$
30	$5,06 \times 10^2$	$2,91 \times 10^2$	$7,97 \times 10^2$
35	$6,62 \times 10^2$	$3,40 \times 10^2$	$1,00 \times 10^3$
40	$8,12 \times 10^2$	$3,88 \times 10^2$	$1,20 \times 10^3$

Çizelge 6.86. Bipolar Fe-Fe elektrot, $t=1$ dk; toplam maliyet

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Toplam Maliyet (kr./m ³)
1	$9,05 \times 10^{-1}$	$7,81 \times 10^{-1}$	1,69
3	7,77	2,34	10,11
5	20,49	3,91	24,40
10	71,58	7,81	79,39

Çizelge 6.87. Bipolar Fe-Fe elektrot, $t=3$ dk; toplam maliyet

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Toplam Maliyet (kr./m ³)
1	2,54	2,34	4,89
3	19,61	7,03	26,64
5	49,05	11,72	60,77
10	$1,66 \times 10^2$	23,44	$1,89 \times 10^2$

Çizelge 6.88. Bipolar Fe-Fe elektrot, $t=5$ dk; toplam maliyet

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Toplam Maliyet (kr./m ³)
1	5,27	3,91	9,17
3	37,99	11,72	49,71
5	97,43	19,53	$1,17 \times 10^2$
10	$2,76 \times 10^2$	39,07	$3,15 \times 10^2$

Çizelge 6.89. Bipolar Fe-Fe elektrot, $t=10$ dk; toplam maliyet

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Toplam Maliyet (kr./m ³)
1	10,01	7,81	17,82
3	78,85	23,44	$1,02 \times 10^2$
5	$2,27 \times 10^2$	39,07	$2,66 \times 10^2$
10	$6,43 \times 10^2$	78,14	$7,21 \times 10^2$

Çizelge 6.90. Bipolar Al-Al elektrot, $t=1$ dk; toplam maliyet

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Toplam Maliyet (kr./m ³)
1	1,27	1,16	2,43
3	9,42	3,48	12,90
5	24,85	5,80	30,65
10	77,37	11,61	88,98

Çizelge 6.91. Bipolar Al-Al elektrot, $t=3$ dk; toplam maliyet

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Toplam Maliyet (kr./m ³)
1	3,46	3,48	6,94
3	25,94	10,44	36,38
5	67,72	17,41	85,13
10	2,32x10 ²	34,82	2,67x10 ²

Çizelge 6.92. Bipolar Al-Al elektrot, $t=5$ dk; toplam maliyet

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Toplam Maliyet (kr./m ³)
1	7,11	5,80	12,91
3	49,84	17,41	67,25
5	1,36x10 ²	29,01	1,65x10 ²
10	3,87x10 ²	58,03	4,45x10 ²

Çizelge 6.93. Bipolar Al-Al elektrot, $t=10$ dk; toplam maliyet

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Toplam Maliyet (kr./m ³)
1	13,55	11,61	25,15
3	87,90	34,82	1,23x10 ²
5	2,27x10 ²	58,03	2,85x10 ²
10	7,25x10 ²	1,16x10 ²	8,41x10 ²

Çizelge 6.94. Bipolar Al-Fe elektrot, $t=1$ dk; toplam maliyet

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Toplam Maliyet (kr./m ³)
1	1,06	$9,71 \times 10^{-1}$	2,03
3	8,26	2,91	11,17
5	21,83	4,85	26,69
10	77,37	9,71	87,08

Çizelge 6.95. Bipolar Al-Fe elektrot, $t=3$ dk; toplam maliyet

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Toplam Maliyet (kr./m ³)
1	3,25	2,91	6,17
3	26,00	8,74	34,74
5	76,70	14,56	91,26
10	$2,32 \times 10^2$	29,13	$2,61 \times 10^2$

Çizelge 6.96. Bipolar Al-Fe elektrot, $t=5$ dk; toplam maliyet

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Toplam Maliyet (kr./m ³)
1	5,94	4,85	10,79
3	39,64	14,56	54,21
5	$1,17 \times 10^2$	24,27	$1,41 \times 10^2$
10	$3,65 \times 10^2$	48,55	$4,14 \times 10^2$

Çizelge 6.97. Bipolar Al-Fe elektrot, $t=10$ dk; toplam maliyet

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)	Elektrot Maliyeti (kr./m ³)	Toplam Maliyet (kr./m ³)
1	14,00	9,71	23,71
3	85,82	29,13	$1,15 \times 10^2$
5	$2,29 \times 10^2$	48,55	$2,77 \times 10^2$
10	$6,98 \times 10^2$	97,09	$7,95 \times 10^2$

6.4. Destek Elektrolit Derişiminin Arıtıma ve Maliyete Etkisi

Elektrokoagülasyon proseslerinde atıksuyun elektriksel iletkenliğinin artırılması, işlemin aynı akım yoğunluğuna daha düşük gerilimlerdeyken ulaşmasını sağlar. Bu yüzden elektrokoagülasyon proseslerinde maliyet açısından daha uygun sonuçlar yaratıyorsa atıksuyun elektriksel iletkenliğini yükseltmek amacıyla destek elektrolit kullanılabilir.

Gerçekleştirilen akım yoğunluğuna bağlı giderim deneylerinin verileri ve maliyet hesapları doğrultusunda mermer atıksularının elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılması sırasında her elektrot demeti için en uygun maliyetli ve deşarj standartlarını sağlayan arıtma koşullarının 1 dk arıtma süresi ve 1 mA/cm² akım yoğunluğu olduğu görülmüştür. Destek elektrolit derişiminin arıtıma etkisini göstermek amacıyla bu ideal arıtma koşullarında mermer atıksuyuna destek elektrolit olarak farklı derişimlerde Na₂SO₄ (0 mM Na₂SO₄, 0,5 mM Na₂SO₄, 1 mM Na₂SO₄, 3 mM Na₂SO₄) ilavesi yapılarak farklı elektrot tipleri ve geometrileriyle elektrokoagülasyon işlemleri tekrarlanmış ve arıtılan atıksuların gerilim, pH, sıcaklık, elektriksel iletkenlik, bulanıklık ve AKM parametreleri ölçülerek bulgular kaydedilmiştir. Ayrıca bu arıtımlar sırasında tüketilen enerji miktarları ve enerji maliyetleri hesaplanmış, destek elektrolit kullanıldığında ortaya çıkan enerji maliyeti tasarrufları sarf edilen destek elektrolit maliyetleriyle kr./m³ cinsinden karşılaştırılarak destek elektrolit kullanımının işletme maliyeti açısından daha uygun bir sonuç verip vermediği incelenmiştir.

Destek elektrolit derişimi deneylerinde kullanılan ham atıksuyun parametreleri Çizelge 6.98’de verilmiştir.

Çizelge 6.98. Destek elektrolit derişimi deneylerinde kullanılan ham atıksu karakterizasyonu

Bulanıklık (NTU)	8210
AKM (mg/L)	4622
pH	8,12
Sıcaklık (C°)	17,6
Elektriksel İletkenlik (µs/cm)	543

Destek elektrolit kullanıldığında ortaya çıkan enerji maliyeti tasarrufları; destek elektrolit ilave edilmemiş arıtımların enerji maliyetlerinden, destek elektrolit ilave edilmiş arıtımların enerji maliyetlerinin çıkarılmasıyla bulunmuştur.

Destek elektrolit olarak kullanılan Na₂SO₄ kimyasalının 31.10.2017 tarihinde belirlenen fiyatı kg başına 110 TL'dir. Bu bilgi doğrultusunda 400 ml ve 1 m³ atıksuda 0,5 mM, 1 mM, 3 mM derişim sağlayacak destek elektrolit miktarlarının kr. cinsinden maliyetleri Çizelge 6.99'da verilmiştir.

Çizelge 6.99. Destek elektrolit maliyetleri

Na ₂ SO ₄ Derişimi (mM)	Destek elektrolit maliyeti (kr./400 ml)	Destek elektrolit maliyeti (kr./m ³)
0,5	0,308	770
1	0,627	1567,5
3	1,87	4675

6.4.1. Monopolar Fe-Fe elektrot ile yapılan çalışmalar ve maliyet hesabı

0 mM, 0,5 mM, 1mM ve 3mM Na₂SO₄ derişimleriyle 1 dk arıtma süresi ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda Monopolar Fe-Fe elektrot ile yapılan deneylerin bulguları Çizelge 6.100'de verilmiştir.

Çizelge 6.100. Monopolar Fe-Fe elektrot, destek elektrolit derişimi bulguları

Na ₂ SO ₄ Derişimi (mM)	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	Elektriksel İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	AKM (mg/L)
0	1,80	7,68	18,1	478	55,6	46
0,5	1,30	7,73	17,8	530	55,6	44
1	1,10	7,89	17,8	595	54,0	38
3	0,85	7,95	17,8	762	68,4	46

Çizelge 6.100'de gösterilen bulgular doğrultusunda elde edilen, Monopolar Fe-Fe elektrotla yapılan deneylerde destek elektrolit derişimlerinin bulanıklık ve AKM giderimine etkisi Çizelge 6.101'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.101. Monopolar Fe-Fe elektrot, destek elektrolit derişiminin arıtıma etkisi

Na₂SO₄ Derişimi (mM)	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM Giderimi (%)
0	99,32	99,00
0,5	99,32	99,05
1	99,34	99,18
3	99,17	99,00

Monopolar Fe-Fe elektrotla destek elektrolit kullanılarak yapılan arıtımlarda bulanıklık ve AKM giderimlerinde belirgin bir artış gözlenmemiştir. Zira destek elektrolit kullanılmadan yapılan arıtımlarda dahi bulanıklık ve AKM giderim verimleri %99'un üzerindedir.

Monopolar Fe-Fe elektrotla destek elektrolit kullanılarak yapılan arıtımların enerji tüketimi ve enerji maliyeti hesaplamaları Çizelge 6.102'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.102. Monopolar Fe-Fe elektrot, destek elektrolit derişiminin enerji tüketimi ve maliyetine etkisi

Na₂SO₄ Derişimi (mM)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m³)	Enerji Maliyeti (kr./m³)
0	1,80	$7,50 \times 10^{-3}$	$1,72 \times 10^{-1}$
0,5	1,30	$5,42 \times 10^{-3}$	$1,24 \times 10^{-1}$
1	1,10	$4,58 \times 10^{-3}$	$1,05 \times 10^{-1}$
3	0,85	$3,54 \times 10^{-3}$	$8,14 \times 10^{-2}$

Monopolar Fe-Fe elektrotla destek elektrolit kullanılarak yapılan arıtımların enerji maliyeti tasarrufları ile destek elektrolit derişimi maliyetlerinin kr./m³ cinsinden kıyaslamaları Çizelge 6.103'de verilmiştir.

Çizelge 6.103. Monopolar Fe-Fe elektrot, destek elektrolit derişimi maliyetleri ve enerji maliyeti tasarruflarının karşılaştırması

Na ₂ SO ₄ Derişimi (mM)	Destek elektrolit maliyeti (kr./m ³)	Enerji Maliyeti Tasarrufu (kr./m ³)	Fark (kr./m ³)
0	0	0	0
0,5	770	4,75x10 ⁻²	769,95
1	1567,5	6,67x10 ⁻²	1567,43
3	4675	9,06x10 ⁻²	4674,91

Çizelge 6.103'den anlaşıldığı gibi Monopolar Fe-Fe elektrot ile destek elektrolit kullanılarak yapılan arıtmalar, arıtım süresi çok kısa olduğundan, destek elektrolit kullanılmayan arıtıma göre çok daha yüksek maliyetli çıkmıştır.

1 dk arıtma süresi ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda Monopolar Fe-Fe elektrot ile yapılan arıtmalarda destek elektrolit kullanımının arıtım verimine ve işletme maliyetine olumlu bir katkısı gözlenmemiştir.

6.4.2. Monopolar Al-Al elektrot ile yapılan çalışmalar ve maliyet hesabı

0 mM, 0,5 mM, 1mM ve 3mM Na₂SO₄ derişimleriyle 1 dk arıtma süresi ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda Monopolar Al-Al elektrot ile yapılan deneylerin bulguları Çizelge 6.104'de verilmiştir.

Çizelge 6.104. Monopolar Al-Al elektrot, destek elektrolit derişimi bulguları

Na ₂ SO ₄ Derişimi (mM)	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	Elektriksel İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	AKM (mg/L)
0	3,65	7,93	17,8	563	57,6	40
0,5	2,80	7,94	17,8	605	63,1	50
1	2,40	8,02	17,6	663	57,4	30
3	2,10	8,07	17,7	863	65,4	44

Çizelge 6.104'de gösterilen bulgular doğrultusunda elde edilen, Monopolar Al-Al elektrotla yapılan deneylerde destek elektrolit derişimlerinin bulanıklık ve AKM giderimine etkisi Çizelge 6.105'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.105. *Monopolar Al-Al elektrot, destek elektrolit derişiminin arıtıma etkisi*

Na₂SO₄ Derişimi (mM)	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM Giderimi (%)
0	99,30	99,13
0,5	99,23	98,92
1	99,30	99,35
3	99,20	99,05

Monopolar Al-Al elektrotla destek elektrolit kullanılarak yapılan arıtımlarda bulanıklık ve AKM giderimlerinde belirgin bir artış gözlenmemiştir. Zira destek elektrolit kullanılmadan yapılan arıtımlarda dahi bulanıklık ve AKM giderim verimleri %99'un üzerindedir.

Monopolar Al-Al elektrotla destek elektrolit kullanılarak yapılan arıtımların enerji tüketimi ve enerji maliyeti hesaplamaları Çizelge 6.106'da gösterilmiştir.

Çizelge 6.106. *Monopolar Al-Al elektrot, destek elektrolit derişiminin enerji tüketimi ve maliyetine etkisi*

Na₂SO₄ Derişimi (mM)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m³)	Enerji Maliyeti (kr./m³)
0	3,65	1,52x10 ⁻²	3,50x10 ⁻¹
0,5	2,80	1,17x10 ⁻²	2,68x10 ⁻¹
1	2,40	1,00x10 ⁻²	2,30x10 ⁻¹
3	2,10	8,75x10 ⁻³	2,01x10 ⁻¹

Monopolar Al-Al elektrotla destek elektrolit kullanılarak yapılan arıtımların enerji maliyeti tasarrufları ile destek elektrolit derişimi maliyetlerinin kr./m³ cinsinden kıyaslamaları Çizelge 6.107'de verilmiştir.

Çizelge 6.107. Monopolar Al-Al elektrot, destek elektrolit derişimi maliyetleri ve enerji maliyeti tasarruflarının karşılaştırması

Na ₂ SO ₄ Derişimi (mM)	Destek elektrolit maliyeti (kr./m ³)	Enerji Maliyeti Tasarrufu (kr./m ³)	Fark (kr./m ³)
0	0	0	0
0,5	770	8,19x10 ⁻²	769,92
1	1567,5	1,20x10 ⁻¹	1567,38
3	4675	1,49x10 ⁻¹	4674,85

Çizelge 6.107'den anlaşıldığı gibi Monopolar Al-Al elektrot ile destek elektrolit kullanılarak yapılan arıtmalar, arıtım süresi çok kısa olduğundan, destek elektrolit kullanılmayan arıtıma göre çok daha yüksek maliyetli çıkmıştır.

1 dk arıtma süresi ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda Monopolar Al-Al elektrot ile yapılan arıtmalarda destek elektrolit kullanımının arıtım verimine ve işletme maliyetine olumlu bir katkısı gözlenmemiştir.

6.4.3. Monopolar Al-Fe elektrot ile yapılan çalışmalar ve maliyet hesabı

0 mM, 0,5 mM, 1mM ve 3mM Na₂SO₄ derişimleriyle 1 dk arıtma süresi ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda Monopolar Al-Fe elektrot ile yapılan deneylerin bulguları Çizelge 6.108'de verilmiştir.

Çizelge 6.108. Monopolar Al-Fe elektrot, destek elektrolit derişimi bulguları

Na ₂ SO ₄ Derişimi (mM)	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	Elektriksel İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	AKM (mg/L)
0	3,9	7,89	17,8	539	60,8	32
0,5	2,88	7,94	17,6	583	60,5	48
1	2,58	7,91	17,7	640	61,3	46
3	2,4	7,98	17,8	838	63,9	56

Çizelge 6.108'de gösterilen bulgular doğrultusunda elde edilen, Monopolar Al-Fe elektrotla yapılan deneylerde destek elektrolit derişimlerinin bulanıklık ve AKM giderimine etkisi Çizelge 6.109'da gösterilmiştir.

Çizelge 6.109. Monopolar Al-Fe elektrot, destek elektrolit derişiminin arıtıma etkisi

Na₂SO₄ Derişimi (mM)	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM Giderimi (%)
0	99,26	99,31
0,5	99,26	98,96
1	99,25	99,00
3	99,22	98,79

Monopolar Al-Fe elektrotla destek elektrolit kullanılarak yapılan arıtımlarda bulanıklık ve AKM giderimlerinde belirgin bir artış gözlenmemiştir. Zira destek elektrolit kullanılmadan yapılan arıtımlarda dahi bulanıklık ve AKM giderim verimleri %99'un üzerindedir.

Monopolar Al-Fe elektrotla destek elektrolit kullanılarak yapılan arıtımların enerji tüketimi ve enerji maliyeti hesaplamaları Çizelge 6.110'da gösterilmiştir.

Çizelge 6.110. Monopolar Al-Fe elektrot, destek elektrolit derişiminin enerji tüketimi ve maliyetine etkisi

Na₂SO₄ Derişimi (mM)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m³)	Enerji Maliyeti (kr./m³)
0	3,9	1,63x10 ⁻²	3,73x10 ⁻¹
0,5	2,88	1,20x10 ⁻²	2,76x10 ⁻¹
1	2,58	1,08x10 ⁻²	2,47x10 ⁻¹
3	2,4	1,00x10 ⁻²	2,30x10 ⁻¹

Monopolar Al-Fe elektrotla destek elektrolit kullanılarak yapılan arıtımların enerji maliyeti tasarrufları ile destek elektrolit derişimi maliyetlerinin kr./m³ cinsinden kıyaslamaları Çizelge 6.111'de verilmiştir.

Çizelge 6.111. Monopolar Al-Fe elektrot, destek elektrolit derişimi maliyetleri ve enerji maliyeti tasarruflarının karşılaştırması

Na ₂ SO ₄ Derişimi (mM)	Destek elektrolit maliyeti (kr./m ³)	Enerji Maliyeti Tasarrufu (kr./m ³)	Fark (kr./m ³)
0	0	0	0
0,5	770	9,72x10 ⁻²	769,90
1	1567,5	1,26x10 ⁻¹	1567,37
3	4675	1,43x10 ⁻¹	4674,86

Çizelge 6.111’den anlaşıldığı gibi Monopolar Al-Fe elektrot ile destek elektrolit kullanılarak yapılan arıtmalar, arıtım süresi çok kısa olduğundan, destek elektrolit kullanılmayan arıtıma göre çok daha yüksek maliyetli çıkmıştır.

1 dk arıtma süresi ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda Monopolar Al-Fe elektrot ile yapılan arıtmalarda destek elektrolit kullanımının arıtım verimine ve işletme maliyetine olumlu bir katkısı gözlenmemiştir.

6.4.4. Bipolar Fe-Fe elektrot ile yapılan çalışmalar ve maliyet hesabı

0 mM, 0,5 mM, 1mM ve 3mM Na₂SO₄ derişimleriyle 1 dk arıtma süresi ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda Bipolar Fe-Fe elektrot ile yapılan deneylerin bulguları Çizelge 6.112’de verilmiştir.

Çizelge 6.112. Bipolar Fe-Fe elektrot, destek elektrolit derişimi bulguları

Na ₂ SO ₄ Derişimi (mM)	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	Elektriksel İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	AKM (mg/L)
0	12,3	7,67	17,4	480	60,5	46
0,5	10,55	7,85	17,2	543	91,5	48
1	9,05	7,87	17,3	606	78,9	56
3	8,1	8,06	17,4	768	69,8	20

Çizelge 6.112’de gösterilen bulgular doğrultusunda elde edilen, Bipolar Fe-Fe elektrotla yapılan deneylerde destek elektrolit derişimlerinin bulanıklık ve AKM giderimine etkisi Çizelge 6.113’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.113. Bipolar Fe-Fe elektrot, destek elektrolit derişiminin arıtıma etkisi

Na₂SO₄ Derişimi (mM)	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM Giderimi (%)
0	99,26	99,00
0,5	98,89	98,96
1	99,04	98,79
3	99,15	99,57

Bipolar Fe-Fe elektrotla destek elektrolit kullanılarak yapılan arıtımlarda bulanıklık ve AKM giderimlerinde belirgin bir artış gözlenmemiştir. Zira destek elektrolit kullanılmadan yapılan arıtımlarda dahi bulanıklık ve AKM giderim verimleri %99'un üzerindedir.

Bipolar Fe-Fe elektrotla destek elektrolit kullanılarak yapılan arıtımların enerji tüketimi ve enerji maliyeti hesaplamaları Çizelge 6.114'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.114. Bipolar Fe-Fe elektrot, destek elektrolit derişiminin enerji tüketimi ve maliyetine etkisi

Na₂SO₄ Derişimi (mM)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m³)	Enerji Maliyeti (kr./m³)
0	12,3	5,13x10 ⁻²	1,18
0,5	10,55	4,40x10 ⁻²	1,01
1	9,05	3,77x10 ⁻²	8,67x10 ⁻¹
3	8,1	3,38x10 ⁻²	7,76x10 ⁻¹

Bipolar Fe-Fe elektrotla destek elektrolit kullanılarak yapılan arıtımların enerji maliyeti tasarrufları ile destek elektrolit derişimi maliyetlerinin kr./m³ cinsinden kıyaslamaları Çizelge 6.115'de verilmiştir.

Çizelge 6.115. Bipolar Fe-Fe elektrot, destek elektrolit derişimi maliyetleri ve enerji maliyeti tasarruflarının karşılaştırması

Na ₂ SO ₄ Derişimi (mM)	Destek elektrolit maliyeti (kr./m ³)	Enerji Maliyeti Tasarrufu (kr./m ³)	Fark (kr./m ³)
0	0	0	0
0,5	770	1,68x10 ⁻¹	769,83
1	1567,5	3,11x10 ⁻¹	1567,19
3	4675	4,02x10 ⁻¹	4674,60

Çizelge 6.115'den anlaşıldığı gibi Bipolar Fe-Fe elektrot ile destek elektrolit kullanılarak yapılan arıtmalar, arıtım süresi çok kısa olduğundan, destek elektrolit kullanılmayan arıtıma göre çok daha yüksek maliyetli çıkmıştır.

1 dk arıtma süresi ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda Bipolar Fe-Fe elektrot ile yapılan arıtmalarda destek elektrolit kullanımının arıtım verimine ve işletme maliyetine olumlu bir katkısı gözlenmemiştir.

6.4.5. Bipolar Al-Al elektrot ile yapılan çalışmalar ve maliyet hesabı

0 mM, 0,5 mM, 1mM ve 3mM Na₂SO₄ derişimleriyle 1 dk arıtma süresi ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda Bipolar Al-Al elektrot ile yapılan deneylerin bulguları Çizelge 6.116'da verilmiştir.

Çizelge 6.116. Bipolar Al-Al elektrot, destek elektrolit derişimi bulguları

Na ₂ SO ₄ Derişimi (mM)	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	Elektriksel İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	AKM (mg/L)
0	13	8	17,4	594	54,2	44
0,5	12,05	8	17,3	648	65,6	52
1	9,55	8,03	17,3	696	47,6	32
3	5,33	8,12	17,5	825	64,3	42

Çizelge 6.116'da gösterilen bulgular doğrultusunda elde edilen, Bipolar Al-Al elektrotla yapılan deneylerde destek elektrolit derişimlerinin bulanıklık ve AKM giderimine etkisi Çizelge 6.117'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.117. Bipolar Al-Al elektrot, destek elektrolit derişiminin arıtıma etkisi

Na₂SO₄ Derişimi (mM)	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM Giderimi (%)
0	99,34	99,05
0,5	99,20	98,87
1	99,42	99,31
3	99,22	99,09

Bipolar Al-Al elektrotla destek elektrolit kullanılarak yapılan arıtımlarda bulanıklık ve AKM giderimlerinde belirgin bir artış gözlenmemiştir. Zira destek elektrolit kullanılmadan yapılan arıtımlarda dahi bulanıklık ve AKM giderim verimleri %99'un üzerindedir.

Bipolar Al-Al elektrotla destek elektrolit kullanılarak yapılan arıtımların enerji tüketimi ve enerji maliyeti hesaplamaları Çizelge 6.118'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.118. Bipolar Al-Al elektrot, destek elektrolit derişiminin enerji tüketimi ve maliyetine etkisi

Na₂SO₄ Derişimi (mM)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m³)	Enerji Maliyeti (kr./m³)
0	13	5,42x10 ⁻²	1,24
0,5	12,05	5,02x10 ⁻²	1,15
1	9,55	3,98x10 ⁻²	9,14x10 ⁻¹
3	5,33	2,22x10 ⁻²	5,10x10 ⁻¹

Bipolar Al-Al elektrotla destek elektrolit kullanılarak yapılan arıtımların enerji maliyeti tasarrufları ile destek elektrolit derişimi maliyetlerinin kr./m³ cinsinden kıyaslamaları Çizelge 6.119'da verilmiştir.

Çizelge 6.119. Bipolar Al-Al elektrot, destek elektrolit derişimi maliyetleri ve enerji maliyeti tasarruflarının karşılaştırması

Na ₂ SO ₄ Derişimi (mM)	Destek elektrolit maliyeti (kr./m ³)	Enerji Maliyeti Tasarrufu (kr./m ³)	Fark (kr./m ³)
0	0	0	0
0,5	770	9,11x10 ⁻²	769,91
1	1567,5	3,31x10 ⁻¹	1567,17
3	4675	7,35x10 ⁻¹	4674,27

Çizelge 6.119'dan anlaşıldığı gibi Bipolar Al-Al elektrot ile destek elektrolit kullanılarak yapılan arıtmalar, arıtım süresi çok kısa olduğundan, destek elektrolit kullanılmayan arıtıma göre çok daha yüksek maliyetli çıkmıştır.

1 dk arıtma süresi ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda Bipolar Al-Al elektrot ile yapılan arıtmalarda destek elektrolit kullanımının arıtım verimine ve işletme maliyetine olumlu bir katkısı gözlenmemiştir.

6.4.6. Bipolar Al-Fe elektrot ile yapılan çalışmalar ve maliyet hesabı

0 mM, 0,5 mM, 1mM ve 3mM Na₂SO₄ derişimleriyle 1 dk arıtma süresi ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda Bipolar Al-Fe elektrot ile yapılan deneylerin bulguları Çizelge 6.120'de verilmiştir.

Çizelge 6.120. Bipolar Al-Fe elektrot, destek elektrolit derişimi bulguları

Na ₂ SO ₄ Derişimi (mM)	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	Elektriksel İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	AKM (mg/L)
0	13,73	7,93	17,3	544	40,7	22
0,5	11,8	7,97	17,1	595	50,2	46
1	10,23	7,97	17,3	659	57,4	44
3	8,7	8,09	17,4	870	70,4	44

Çizelge 6.120'de gösterilen bulgular doğrultusunda elde edilen, Bipolar Al-Fe elektrotla yapılan deneylerde destek elektrolit derişimlerinin bulanıklık ve AKM giderimine etkisi Çizelge 6.121'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.121. Bipolar Al-Fe elektrot, destek elektrolit derişiminin arıtıma etkisi

Na₂SO₄ Derişimi (mM)	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM Giderimi (%)
0	99,50	99,52
0,5	99,39	99,00
1	99,30	99,05
3	99,14	99,05

Bipolar Al-Fe elektrotla destek elektrolit kullanılarak yapılan arıtımlarda bulanıklık ve AKM giderimlerinde belirgin bir artış gözlenmemiştir. Zira destek elektrolit kullanılmadan yapılan arıtımlarda dahi bulanıklık ve AKM giderim verimleri %99'un üzerindedir.

Bipolar Al-Fe elektrotla destek elektrolit kullanılarak yapılan arıtımların enerji tüketimi ve enerji maliyeti hesaplamaları Çizelge 6.122'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.122. Bipolar Al-Fe elektrot, destek elektrolit derişiminin enerji tüketimi ve maliyetine etkisi

Na₂SO₄ Derişimi (mM)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m³)	Enerji Maliyeti (kr./m³)
0	13,73	5,72x10 ⁻²	1,31
0,5	11,8	4,92x10 ⁻²	1,13
1	10,23	4,26x10 ⁻²	9,80x10 ⁻¹
3	8,7	3,63x10 ⁻²	8,33x10 ⁻¹

Bipolar Al-Fe elektrotla destek elektrolit kullanılarak yapılan arıtımların enerji maliyeti tasarrufları ile destek elektrolit derişimi maliyetlerinin kr./m³ cinsinden kıyaslamaları Çizelge 6.123'de verilmiştir.

Çizelge 6.123. Bipolar Al-Fe elektrot, destek elektrolit derişimi maliyetleri ve enerji maliyeti tasarruflarının karşılaştırması

Na ₂ SO ₄ Derişimi (mM)	Destek elektrolit maliyeti (kr./m ³)	Enerji Maliyeti Tasarrufu (kr./m ³)	Fark (kr./m ³)
0	0	0	0
0,5	770	1,85x10 ⁻¹	769,81
1	1567,5	3,35x10 ⁻¹	1567,16
3	4675	4,82x10 ⁻¹	4674,52

Çizelge 6.123'den anlaşıldığı gibi Bipolar Al-Fe elektrot ile destek elektrolit kullanılarak yapılan arıtmalar, arıtım süresi çok kısa olduğundan, destek elektrolit kullanılmayan arıtıma göre çok daha yüksek maliyetli çıkmıştır.

1 dk arıtma süresi ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda Bipolar Al-Fe elektrot ile yapılan arıtmalarda destek elektrolit kullanımının arıtım verimine ve işletme maliyetine olumlu bir katkısı gözlenmemiştir.

6.5. Başlangıç pH'ının Arıtıma ve Maliyete Etkisi

Elektrokoagülasyon proseslerinde atıksuyun elektriksel iletkenliğini arttıran ve işlemin aynı akım yoğunluğuna daha düşük gerilimlerdeyken ulaşmasını sağlayan bir diğer yöntem başlangıç pH'ının değiştirilmesidir. Bu yüzden elektrokoagülasyon proseslerinde maliyet açısından daha uygun sonuçlar yaratıyorsa atıksuyun pH'ını düşürerek elektriksel iletkenliğini yükseltmek amacıyla asit kullanılabilir.

Başlangıç pH'ının değiştirilmesi deneylerinde de her elektrot demeti için önceki bulgularda ideal arıtma koşulları olarak belirlenen 1 dk arıtma süresi ve 1 mA/cm² akım yoğunluğu uygulanarak arıtmalar gerçekleştirilmiştir. Başlangıç pH'ının arıtıma etkisini göstermek amacıyla atıksuyun başlangıç pH'ı HCl (Hidroklorik asit) kullanılarak 6 ve 3'e ayarlanmış, bunların yanında bir de atıksuyun kendi doğal başlangıç pH'ı ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Arıtılan atıksuların gerilim, pH, sıcaklık, elektriksel iletkenlik, bulanıklık ve AKM parametreleri ölçülerek bulgular kaydedilmiştir. Ayrıca bu arıtmalar sırasında tüketilen enerji miktarları ve enerji maliyetleri hesaplanmış, başlangıç pH'ı düşürüldüğünde ortaya çıkan enerji maliyeti tasarrufları sarf edilen HCl maliyetleriyle kr./m³ cinsinden karşılaştırılarak başlangıç pH'ını düşürmenin işletme maliyeti açısından daha uygun bir sonuç verip vermediği incelenmiştir.

Başlangıç pH'ının değiştirilmesi deneylerinde kullanılan ham atıksuyun parametreleri Çizelge 6.124'de verilmiştir.

Çizelge 6.124. *Başlangıç pH'ının değiştirilmesi deneylerinde kullanılan ham atıksu karakterizasyonu*

Bulanıklık (NTU)	8630
AKM (mg/L)	6840
pH	7,38
Sıcaklık (C°)	18,1
Elektriksel İletkenlik (µs/cm)	754

Başlangıç pH'ı düşürüldüğünde ortaya çıkan enerji maliyeti tasarrufları; doğal başlangıç pH'ı kullanılarak yapılan arıtmaların enerji maliyetlerinden, başlangıç pH'ı 6 ve 3'e düşürmüş arıtmaların enerji maliyetlerinin çıkarılmasıyla bulunmuştur.

Başlangıç pH'ını düşürmek için kullanılan HCl kimyasalının 31.10.2017 tarihinde belirlenen fiyatı 2,5 L başına 100 TL'dir. 400 ml atıksuyun 7,38 olan doğal pH'ını 6'ya düşürmek için yaklaşık olarak 0,5 ml derişik HCl kullanılmıştır. 400 ml atıksuyun 7,38 olan doğal pH'ını 3'e düşürmek için yaklaşık olarak 5 ml derişik HCl kullanılmıştır. Bu bilgi doğrultusunda 400 ml ve 1 m³ atıksuda 6 ve 3 pH değerlerini sağlayacak HCl miktarlarının kr. cinsinden maliyetleri Çizelge 6.125'de verilmiştir.

Çizelge 6.125. *Başlangıç pH değiştirme maliyetleri*

Başlangıç pH	HCl maliyeti (kr./400 ml)	HCl maliyeti (kr./m ³)
6	2	5000
3	20	50000

6.5.1. Monopolar Fe-Fe elektrot ile yapılan çalışmalar ve maliyet hesabı

Başlangıç pH'ları 7,38 (doğal pH), 6 ve 3 olan mermer endüstrisi atıksularının 1 dk arıtma süresi ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda Monopolar Fe-Fe elektrot ile arıtılması deneylerinin bulguları Çizelge 6.126'da verilmiştir.

Çizelge 6.126. Monopolar Fe-Fe elektrot, başlangıç pH'ı deney bulguları

Başlangıç pH	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	Elektriksel İletkenlik (μS/cm)	Bulanıklık (NTU)	AKM (mg/L)
7,38	1,4	7,39	18,3	719	115	76
6	1,1	6,58	18,2	1836	84,8	52
3	0,45	4,49	18,2	8,22x10 ³	19,8	28

Çizelge 6.126'da gösterilen bulgular doğrultusunda elde edilen, Monopolar Fe-Fe elektrotla yapılan deneylerde başlangıç pH'ının bulanıklık ve AKM giderimine etkisi Çizelge 6.127'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.127. Monopolar Fe-Fe elektrot, başlangıç pH'ının arıtma etkisi

Başlangıç pH	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM Giderimi (%)
7,38	98,67	98,89
6	99,02	99,24
3	99,77	99,59

Monopolar Fe-Fe elektrotla başlangıç pH'ları düşürülerek yapılan arıtmalarda bulanıklık ve AKM giderimlerinde yaklaşık %1'lik bir artış gözlenmiştir. Atıksuyun doğal başlangıç pH'ı ile yapılan arıtımda da bulanıklık ve AKM giderim verimleri %98'un üzerinde olarak oldukça yüksek seviyededir.

Monopolar Fe-Fe elektrotla doğal başlangıç pH'ı kullanılarak ve başlangıç pH'ı düşürülerek yapılan arıtmaların enerji tüketimi ve enerji maliyeti hesaplamaları Çizelge 6.128'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.128. Monopolar Fe-Fe elektrot, başlangıç pH'ının enerji tüketimi ve maliyetine etkisi

Başlangıç pH	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)
7,38	1,4	5,83x10 ⁻³	1,34x10 ⁻¹
6	1,1	4,58x10 ⁻³	1,05x10 ⁻¹
3	0,45	1,88x10 ⁻³	4,31x10 ⁻²

Monopolar Fe-Fe elektrotla başlangıç pH'ı düşürülerek yapılan arıtmaların enerji maliyeti tasarrufları ile HCl sarfiyatı maliyetlerinin kr./m³ cinsinden kıyaslamaları Çizelge 6.129'da verilmiştir.

Çizelge 6.129. Monopolar Fe-Fe elektrot, başlangıç pH'ını düşürme maliyetleri ve enerji maliyeti tasarruflarının karşılaştırması

Başlangıç pH	HCl sarfiyatı maliyeti (kr./m ³)	Enerji Maliyeti Tasarrufu (kr./m ³)	Fark (kr./m ³)
7,38	0	0	0
6	5000	2,87 x10 ⁻²	4999,97
3	50000	9,10 x10 ⁻²	49999,91

Çizelge 6.129'dan anlaşıldığı gibi Monopolar Fe-Fe elektrot ile başlangıç pH'ı düşürülerek yapılan arıtmalar, arıtım süresi çok kısa olduğundan, doğal başlangıç pH'ındaki atıksuyun arıtımına kıyasla çok daha yüksek maliyetli çıkmıştır.

1 dk arıtma süresi ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda Monopolar Fe-Fe elektrot ile yapılan arıtmalarda, başlangıç pH'ını düşürmenin, arıtım verimine çok küçük olumlu bir etkisi olmakla beraber, işletme maliyeti açısından oldukça elverişsiz bir durum yarattığı ve başlangıç pH'ı 3'e düşürülen atıksuların arıtılmış çıkış sularının, deşarj standartlarında belirtilen 6-9 pH aralığında olmadığı gözlenmiştir.

6.5.2. Monopolar Al-Al elektrot ile yapılan çalışmalar ve maliyet hesabı

Başlangıç pH'ları 7,38 (doğal pH), 6 ve 3 olan mermer endüstrisi atıksularının 1 dk arıtma süresi ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda Monopolar Al-Al elektrot ile arıtılması deneylerinin bulguları Çizelge 6.130'da verilmiştir.

Çizelge 6.130. Monopolar Al-Al elektrot, başlangıç pH'ı deney bulguları

Başlangıç pH	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	Elektriksel İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	AKM (mg/L)
7,38	2	7,48	18,3	903	138	100
6	1,6	6,54	18,2	1802	62,4	22
3	1	3,8	18,3	1,24x10 ⁴	15,9	38

Çizelge 6.130'da gösterilen bulgular doğrultusunda elde edilen, Monopolar Al-Al elektrotla yapılan deneylerde başlangıç pH'ının bulanıklık ve AKM giderimine etkisi Çizelge 6.131'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.131. Monopolar Al-Al elektrot, başlangıç pH'ının arıtma etkisi

Başlangıç pH	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM Giderimi (%)
7,38	98,40	98,54
6	99,28	99,68
3	99,82	99,44

Monopolar Al-Al elektrotla başlangıç pH'ları düşürülerek yapılan arıtmalarda bulanıklık ve AKM giderimlerinde yaklaşık %1'lik bir artış gözlenmiştir. Atıksuyun doğal başlangıç pH'ı ile yapılan arıtımda da bulanıklık ve AKM giderim verimleri %98'un üzerinde olarak oldukça yüksektedir.

Monopolar Al-Al elektrotla doğal başlangıç pH'ı kullanılarak ve başlangıç pH'ı düşürülerek yapılan arıtmaların enerji tüketimi ve enerji maliyeti hesaplamaları Çizelge 6.132'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.132. Monopolar Al-Al elektrot, başlangıç pH'ının enerji tüketimi ve maliyetine etkisi

Başlangıç pH	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)
7,38	2	8,33 x10 ⁻³	1,92x10 ⁻²
6	1,6	6,67 x10 ⁻³	1,53x10 ⁻²
3	1	4,17x10 ⁻³	9,58x10 ⁻²

Monopolar Al-Al elektrotla başlangıç pH'ı düşürülerek yapılan arıtmaların enerji maliyeti tasarrufları ile HCl sarfiyatı maliyetlerinin kr./m³ cinsinden kıyaslamaları Çizelge 6.133'de verilmiştir.

Çizelge 6.133. Monopolar Al-Al elektrot, başlangıç pH'ını düşürme maliyetleri ve enerji maliyeti tasarruflarının karşılaştırması

Başlangıç pH	HCl sarfiyatı maliyeti (kr./m ³)	Enerji Maliyeti Tasarrufu (kr./m ³)	Fark (kr./m ³)
7,38	0	0	0
6	5000	3,83x10 ⁻²	4999,96
3	50000	9,58x10 ⁻²	49999,90

Çizelge 6.133'den anlaşıldığı gibi Monopolar Al-Al elektrot ile başlangıç pH'ı düşürülerek yapılan arıtmalar, arıtım süresi çok kısa olduğundan, doğal başlangıç pH'ındaki atıksuyun arıtımına kıyasla çok daha yüksek maliyetli çıkmıştır.

1 dk arıtma süresi ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda Monopolar Al-Al elektrot ile yapılan arıtmalarda, başlangıç pH'ını düşürmenin, arıtım verimine çok küçük olumlu bir etkisi olmakla beraber, işletme maliyeti açısından oldukça elverişsiz bir durum yarattığı ve başlangıç pH'ı 3'e düşürülen atıksuların arıtılmış çıkış sularının, deşarj standartlarında belirtilen 6-9 pH aralığında olmadığı gözlenmiştir.

6.5.3. Monopolar Al-Fe elektrot ile yapılan çalışmalar ve maliyet hesabı

Başlangıç pH'ları 7,38 (doğal pH), 6 ve 3 olan mermer endüstrisi atıksularının 1 dk arıtma süresi ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda Monopolar Al-Fe elektrot ile arıtılması deneylerinin bulguları Çizelge 6.134'de verilmiştir.

Çizelge 6.134. Monopolar Al-Fe elektrot, başlangıç pH'ı deney bulguları

Başlangıç pH	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	Elektriksel İletkenlik (μS/cm)	Bulanıklık (NTU)	AKM (mg/L)
7,38	2,38	7,4	18,2	904	138	82
6	1,85	6,53	18	1887	89,2	60
3	0,95	4,1	18,1	1,22x10 ⁴	15,8	18

Çizelge 6.134'de gösterilen bulgular doğrultusunda elde edilen, Monopolar Al-Fe elektrotla yapılan deneylerde başlangıç pH'ının bulanıklık ve AKM giderimine etkisi Çizelge 6.135'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.135. Monopolar Al-Fe elektrot, başlangıç pH'ının arıtıma etkisi

Başlangıç pH	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM Giderimi (%)
7,38	98,40	98,80
6	98,97	99,12
3	99,82	99,74

Monopolar Al-Fe elektrotla başlangıç pH'ları düşürülerek yapılan arıtımlarda bulanıklık ve AKM giderimlerinde yaklaşık %1'lik bir artış gözlenmiştir. Atıksuyun doğal başlangıç pH'ı ile yapılan arıtımda da bulanıklık ve AKM giderim verimleri %98'un üzerinde olarak oldukça yüksektedir.

Monopolar Al-Fe elektrotla doğal başlangıç pH'ı kullanılarak ve başlangıç pH'ı düşürülerek yapılan arıtımların enerji tüketimi ve enerji maliyeti hesaplamaları Çizelge 6.136'da gösterilmiştir.

Çizelge 6.136. Monopolar Al-Fe elektrot, başlangıç pH'ının enerji tüketimi ve maliyetine etkisi

Başlangıç pH	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)
7,38	2,38	9,92x10 ⁻³	2,28x10 ⁻¹
6	1,85	7,71x10 ⁻³	1,77x10 ⁻¹
3	0,95	3,96x10 ⁻³	9,10x10 ⁻²

Monopolar Al-Fe elektrotla başlangıç pH'ı düşürülerek yapılan arıtmaların enerji maliyeti tasarrufları ile HCl sarfiyatı maliyetlerinin kr./m³ cinsinden kıyaslamaları Çizelge 6.137'de verilmiştir.

Çizelge 6.137. Monopolar Al-Fe elektrot, başlangıç pH'ını düşürme maliyetleri ve enerji maliyeti tasarruflarının karşılaştırması

Başlangıç pH	HCl sarfiyatı maliyeti (kr./m ³)	Enerji Maliyeti Tasarrufu (kr./m ³)	Fark (kr./m ³)
7,38	0	0	0
6	5000	5,08x10 ⁻²	4999,95
3	50000	1,37x10 ⁻¹	49999,86

Çizelge 6.137'den anlaşıldığı gibi Monopolar Al-Fe elektrot ile başlangıç pH'ı düşürülerek yapılan arıtmalar, arıtım süresi çok kısa olduğundan, doğal başlangıç pH'ındaki atıksuyun arıtımına kıyasla çok daha yüksek maliyetli çıkmıştır.

1 dk arıtma süresi ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda Monopolar Al-Fe elektrot ile yapılan arıtmalarda, başlangıç pH'ını düşürmenin, arıtım verimine çok küçük olumlu bir etkisi olmakla beraber, işletme maliyeti açısından oldukça elverişsiz bir durum yarattığı ve başlangıç pH'ı 3'e düşürülen atıksuların arıtılmış çıkış sularının, deşarj standartlarında belirtilen 6-9 pH aralığında olmadığı gözlenmiştir.

6.5.4. Bipolar Fe-Fe elektrot ile yapılan çalışmalar ve maliyet hesabı

Başlangıç pH'ları 7,38 (doğal pH), 6 ve 3 olan mermer endüstrisi atıksularının 1 dk arıtma süresi ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda Bipolar Fe-Fe elektrot ile arıtılması deneylerinin bulguları Çizelge 6.138'de verilmiştir.

Çizelge 6.138. Bipolar Fe-Fe elektrot, başlangıç pH'ı deney bulguları

Başlangıç pH	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	Elektriksel İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	AKM (mg/L)
7,38	10,45	7,37	18,1	783	143	98
6	6,6	6,38	18,1	1583	116	58
3	1,35	3,82	18	1,05x10 ⁻⁴	21,7	14

Çizelge 6.138'de gösterilen bulgular doğrultusunda elde edilen, Bipolar Fe-Fe elektrotla yapılan deneylerde başlangıç pH'ının bulanıklık ve AKM giderimine etkisi Çizelge 6.139'da gösterilmiştir.

Çizelge 6.139. Bipolar Fe-Fe elektrot, başlangıç pH'ının arıtma etkisi

Başlangıç pH	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM Giderimi (%)
7,38	98,34	98,57
6	98,66	99,15
3	99,75	99,80

Bipolar Fe-Fe elektrotla başlangıç pH'ları düşürülerek yapılan arıtmalarda bulanıklık ve AKM giderimlerinde yaklaşık %1'lik bir artış gözlenmiştir. Atıksuyun doğal başlangıç pH'ı ile yapılan arıtımda da bulanıklık ve AKM giderim verimleri %98'un üzerinde olarak oldukça yüksek seviyededir.

Bipolar Fe-Fe elektrotla doğal başlangıç pH'ı kullanılarak ve başlangıç pH'ı düşürülerek yapılan arıtmaların enerji tüketimi ve enerji maliyeti hesaplamaları Çizelge 6.140'da gösterilmiştir.

Çizelge 6.140. Bipolar Fe-Fe elektrot, başlangıç pH'ının enerji tüketimi ve maliyetine etkisi

Başlangıç pH	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)
7,38	10,45	4,35x10 ⁻²	1,00
6	6,6	2,75x10 ⁻²	6,32x10 ⁻¹
3	1,35	5,63x10 ⁻³	1,29x10 ⁻¹

Bipolar Fe-Fe elektrotla başlangıç pH'ı düşürülerek yapılan arıtmaların enerji maliyeti tasarrufları ile HCl sarfiyatı maliyetlerinin kr./m³ cinsinden kıyaslamaları Çizelge 6.141'de verilmiştir.

Çizelge 6.141. Bipolar Fe-Fe elektrot, başlangıç pH'ını düşürme maliyetleri ve enerji maliyeti tasarruflarının karşılaştırması

Başlangıç pH	HCl sarfiyatı maliyeti (kr./m ³)	Enerji Maliyeti Tasarrufu (kr./m ³)	Fark (kr./m ³)
7,38	0	0	0
6	5000	3,69x10 ⁻¹	4999,63
3	50000	8,71x10 ⁻¹	49999,13

Çizelge 6.141'den anlaşıldığı gibi Bipolar Fe-Fe elektrot ile başlangıç pH'ı düşürülerek yapılan arıtmalar, arıtım süresi çok kısa olduğundan, doğal başlangıç pH'ındaki atıksuyun arıtımına kıyasla çok daha yüksek maliyetli çıkmıştır.

1 dk arıtma süresi ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda Bipolar Fe-Fe elektrot ile yapılan arıtmalarda, başlangıç pH'ını düşürmenin, arıtım verimine çok küçük olumlu bir etkisi olmakla beraber, işletme maliyeti açısından oldukça elverişsiz bir durum yarattığı ve başlangıç pH'ı 3'e düşürülen atıksuların arıtılmış çıkış sularının, deşarj standartlarında belirtilen 6-9 pH aralığında olmadığı gözlenmiştir.

6.5.5. Bipolar Al-Al elektrot ile yapılan çalışmalar ve maliyet hesabı

Başlangıç pH'ları 7,38 (doğal pH), 6 ve 3 olan mermer endüstrisi atıksularının 1 dk arıtma süresi ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda Bipolar Al-Al elektrot ile arıtılması deneylerinin bulguları Çizelge 6.142'de verilmiştir.

Çizelge 6.142. Bipolar Al-Al elektrot, başlangıç pH'ı deney bulguları

Başlangıç pH	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	Elektriksel İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	AKM (mg/L)
7,38	13,55	7,44	18,1	806	89,5	64
6	9,25	6,24	18,1	1857	48,6	36
3	3	4,17	18,1	1,22x10 ⁻⁴	32,7	26

Çizelge 6.142'de gösterilen bulgular doğrultusunda elde edilen, Bipolar Al-Al elektrotla yapılan deneylerde başlangıç pH'ının bulanıklık ve AKM giderimine etkisi Çizelge 6.143'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.143. Bipolar Al-Al elektrot, başlangıç pH'ının arıtma etkisi

Başlangıç pH	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM Giderimi (%)
7,38	98,96	99,06
6	99,44	99,47
3	99,62	99,62

Bipolar Al-Al elektrotla başlangıç pH'ları düşürülerek yapılan arıtmalarda bulanıklık ve AKM giderimlerinde yaklaşık %1'lik bir artış gözlenmiştir. Atıksuyun doğal başlangıç pH'ı ile yapılan arıtımda da bulanıklık ve AKM giderim verimleri %98'un üzerinde olarak oldukça yüksek seviyededir.

Bipolar Al-Al elektrotla doğal başlangıç pH'ı kullanılarak ve başlangıç pH'ı düşürülerek yapılan arıtmaların enerji tüketimi ve enerji maliyeti hesaplamaları Çizelge 6.144'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.144. Bipolar Al-Al elektrot, başlangıç pH'ının enerji tüketimi ve maliyetine etkisi

Başlangıç pH	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)
7,38	13,55	5,65x10 ⁻²	1,30
6	9,25	3,85x10 ⁻²	8,86x10 ⁻¹
3	3	1,25x10 ⁻²	2,87x10 ⁻¹

Bipolar Al-Al elektrotla başlangıç pH'ı düşürülerek yapılan arıtmaların enerji maliyeti tasarrufları ile HCl sarfiyatı maliyetlerinin kr./m³ cinsinden kıyaslamaları Çizelge 6.145'de verilmiştir.

Çizelge 6.145. Bipolar Al-Al elektrot, başlangıç pH'ını düşürme maliyetleri ve enerji maliyeti tasarruflarının karşılaştırması

Başlangıç pH	HCl sarfiyatı maliyeti (kr./m ³)	Enerji Maliyeti Tasarrufu (kr./m ³)	Fark (kr./m ³)
7,38	0	0	0
6	5000	4,12x10 ⁻¹	4999,59
3	50000	1,01	49998,99

Çizelge 6.145'den anlaşıldığı gibi Bipolar Al-Al elektrot ile başlangıç pH'ı düşürülerek yapılan arıtmalar, arıtım süresi çok kısa olduğundan, doğal başlangıç pH'ındaki atıksuyun arıtımına kıyasla çok daha yüksek maliyetli çıkmıştır.

1 dk arıtma süresi ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda Bipolar Al-Al elektrot ile yapılan arıtmalarda, başlangıç pH'ını düşürmenin, arıtım verimine çok küçük olumlu bir etkisi olmakla beraber, işletme maliyeti açısından oldukça elverişsiz bir durum yarattığı ve başlangıç pH'ı 3'e düşürülen atıksuların arıtılmış çıkış sularının, deşarj standartlarında belirtilen 6-9 pH aralığında olmadığı gözlenmiştir.

6.5.6. Bipolar Al-Fe elektrot ile yapılan çalışmalar ve maliyet hesabı

Başlangıç pH'ları 7,38 (doğal pH), 6 ve 3 olan mermer endüstrisi atıksularının 1 dk arıtma süresi ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda Bipolar Al-Fe elektrot ile arıtılması deneylerinin bulguları Çizelge 6.146'da verilmiştir.

Çizelge 6.146. Bipolar Al-Fe elektrot, başlangıç pH'ı deney bulguları

Başlangıç pH	Gerilim (V)	pH	Sıcaklık (C°)	Elektriksel İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	AKM (mg/L)
7,38	12,73	7,38	18,1	799	97,3	60
6	7,9	6,25	18	1781	77,1	54
3	2,38	4,08	17,9	1,23x10 ⁻⁴	29,7	28

Çizelge 6.146'da gösterilen bulgular doğrultusunda elde edilen, Bipolar Al-Al elektrotla yapılan deneylerde başlangıç pH'ının bulanıklık ve AKM giderimine etkisi Çizelge 6.147'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.147. Bipolar Al-Fe elektrot, başlangıç pH'ının arıtma etkisi

Başlangıç pH	Bulanıklık Giderimi (%)	AKM Giderimi (%)
7,38	98,87	99,12
6	99,11	99,21
3	99,66	99,59

Bipolar Al-Fe elektrotla başlangıç pH'ları düşürülerek yapılan arıtmalarda bulanıklık ve AKM giderimlerinde yaklaşık %1'lik bir artış gözlenmiştir. Atıksuyun doğal başlangıç pH'ı ile yapılan arıtımda da bulanıklık ve AKM giderim verimleri %98'un üzerinde olarak oldukça yüksek seviyededir.

Bipolar Al-Fe elektrotla doğal başlangıç pH'ı kullanılarak ve başlangıç pH'ı düşürülerek yapılan arıtmaların enerji tüketimi ve enerji maliyeti hesaplamaları Çizelge 6.148'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.148. Bipolar Al-Fe elektrot, başlangıç pH'ının enerji tüketimi ve maliyetine etkisi

Başlangıç pH	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Enerji Maliyeti (kr./m ³)
7,38	12,73	5,30x10 ⁻²	1,22
6	7,9	3,29x10 ⁻²	7,56x10 ⁻¹
3	2,38	9,92x10 ⁻³	2,28x10 ⁻¹

Bipolar Al-Fe elektrotla başlangıç pH'ı düşürülerek yapılan arıtmaların enerji maliyeti tasarrufları ile HCl sarfiyatı maliyetlerinin kr./m³ cinsinden kıyaslamaları Çizelge 6.149'da verilmiştir.

Çizelge 6.149. Bipolar Al-Fe elektrot, başlangıç pH'ını düşürme maliyetleri ve enerji maliyeti tasarruflarının karşılaştırması

Başlangıç pH	HCl sarfiyatı maliyeti (kr./m ³)	Enerji Maliyeti Tasarrufu (kr./m ³)	Fark (kr./m ³)
7,38	0	0	0
6	5000	4,63x10 ⁻¹	4999,54
3	50000	9,91x10 ⁻¹	49999,01

Çizelge 6.149'dan anlaşıldığı gibi Bipolar Al-Fe elektrot ile başlangıç pH'ı düşürülerek yapılan arıtmalar, arıtım süresi çok kısa olduğundan, doğal başlangıç pH'ındaki atıksuyun arıtımına kıyasla çok daha yüksek maliyetli çıkmıştır.

1 dk arıtma süresi ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda Bipolar Al-Fe elektrot ile yapılan arıtmalarda, başlangıç pH'ını düşürmenin, arıtım verimine çok küçük olumlu bir etkisi olmakla beraber, işletme maliyeti açısından oldukça elverişsiz bir durum yarattığı ve başlangıç pH'ı 3'e düşürülen atıksuların arıtılmış çıkış sularının, deşarj standartlarında belirtilen 6-9 pH aralığında olmadığı gözlenmiştir.

6.6. Çökme Süresi Karşılaştırmaları

Mermer endüstrisi atıksuyu içerisinde bulunan partiküller yüksek düzeyde çökme potansiyeline sahiptir (Bkz. Bölüm 6.11. Zeta Potansiyeli Analizi). Bu tez çalışmasında arıtıma tabi tutulan tüm atıksu numuneleri arıtmadan sonra 1 saat çökmeye bırakılmış ve ardından parametre ölçümleri yapılmıştır. Bu bölümde ise farklı elektrot tipi ve geometrileriyle arıtılan mermer atıksularının arıtmadan hemen sonraki 1 saat içerisinde belirli dakikalardaki çökme durumları incelenmiştir. Arıtılmayan ham atıksu ise doğal çökmeye bırakılmış, belli dakikalarda numuneler alınarak çökme derecesi tespit edilmiştir. Ham atıksuyun AKM parametresi üzerinden ne kadar süre sonra deşarj standartlarını sağlayacağı ve ne kadar sürede arıtılmış atıksuların 1 saatlik çökme miktarlarıyla aynı seviyede çökme oluşturacağı ortaya konmuştur. Bu bölümde yapılan tüm deneyler için aynı karakterizasyona sahip ham atıksu kullanılmıştır. Çizelge 6.157’de verilen ham atıksuyun doğal çökme tablosunda 0. dk parametreleri ham atıksu karakterizasyonunu temsil etmektedir.

Her elektrot tipi ve geometrisiyle 400 ml atıksuya 1 dk arıtma süresi ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda elektrokoagülasyon prosesi uygulanmıştır. Bu işlem sırasında ölçülen gerilimler ve arıtılan atıksuyun ilk 1 saat içerisinde belli dakikalardaki parametre ölçümlerini içeren bulguların verildiği çizelge numaraları Çizelge 6.150’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.150. Çökme süresi deneylerinde farklı elektrot tipi ve geometrilerinin gerilimleri ve çizelge numaraları

Elektrot tipi ve geometrisi	Gerilim (V)	Çizelge numarası
Monopolar Fe-Fe	1,7	Çizelge 6.151
Monopolar Al-Al	3,25	Çizelge 6.152
Monopolar Al-Fe	3,0	Çizelge 6.153
Bipolar Fe-Fe	12,5	Çizelge 6.154
Bipolar Al-Al	16,7	Çizelge 6.155
Bipolar Al-Fe	13,21	Çizelge 6.156

Çizelge 6.151. Monopolar Fe-Fe elektrot, çökelme süresi bulguları

Çökelme Süresi (dk)	pH	Sıcaklık (C°)	Elektriksel İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	AKM (mg/L)
0	7,42	12,3	549	1017	2276
5	7,46	12,8	560	318	320
10	7,47	13,0	581	296	278
15	7,53	13,6	595	168	112
20	7,58	14,1	613	135	96
30	7,70	14,8	630	106	82
40	7,73	15,3	657	102	78
45	7,79	15,9	666	98,9	64
50	7,83	16,5	683	78,4	62
60	8,20	17,2	690	58,4	40

Çizelge 6.151’de AKM parametresine bakıldığında Monopolar Fe-Fe elektrotla yapılan arıtım sonrasında 20 dakikalık çökelme süresinin deşarj standartlarını karşıladığı görülmektedir.

Çizelge 6.152. Monopolar Al-Al elektrot, çökelme süresi bulguları

Çökelme Süresi (dk)	pH	Sıcaklık (C°)	Elektriksel İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	AKM (mg/L)
0	7,40	17,3	527	1096	2028
5	7,41	17,5	543	244	242
10	7,45	17,6	611	156	146
15	7,47	17,8	615	144	118
20	7,49	18,0	647	92,4	106
30	7,51	18,1	664	90,3	66
40	7,52	18,1	673	63,3	46
45	7,55	18,2	696	55,6	32
50	7,57	18,4	702	49,2	28
60	7,58	18,4	722	43,3	24

Çizelge 6.152’de AKM parametresine bakıldığında Monopolar Al-Al elektrotla yapılan arıtım sonrasında 25 dakikalık çökelme süresinin deşarj standartlarını karşıladığı görülmektedir.

Çizelge 6.153. *Monopolar Al-Fe elektrot, çökeltme süresi bulguları*

Çökeltme Süresi (dk)	pH	Sıcaklık (C°)	Elektriksel İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	AKM (mg/L)
0	7,03	15,5	594	1093	1298
5	7,14	15,7	608	338	260
10	7,25	15,8	616	170	224
15	7,31	16,0	631	149	136
20	7,49	16,1	645	109	126
30	7,53	16,4	653	78	96
40	7,61	16,7	667	75,2	74
45	7,68	17,1	679	68,1	56
50	7,73	17,5	691	47,3	50
60	7,90	17,6	699	45,1	34

Çizelge 6.153’de AKM parametresine bakıldığında Monopolar Al-Fe elektrotla yapılan arıtım sonrasında 30 dakikalık çökeltme süresinin deşarj standartlarını karşıladığı görülmektedir.

Çizelge 6.154. *Bipolar Fe-Fe elektrot, çökeltme süresi bulguları*

Çökeltme Süresi (dk)	pH	Sıcaklık (C°)	Elektriksel İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	AKM (mg/L)
0	6,94	19,8	662	985	1496
5	7,18	19,5	683	242	218
10	7,24	19,3	693	194	168
15	7,29	19,2	720	132	126
20	7,30	19,1	739	109	106
30	7,35	18,9	747	92,8	84
40	7,38	18,8	762	64,8	80
45	7,42	18,6	771	55,2	58
50	7,49	18,5	778	49,7	44
60	7,58	18,4	785	42,5	36

Çizelge 6.154’de AKM parametresine bakıldığında Bipolar Fe-Fe elektrotla yapılan arıtım sonrasında 25 dakikalık çökeltme süresinin deşarj standartlarını karşıladığı görülmektedir.

Çizelge 6.155. Bipolar Al-Al elektrot, çökelme süresi bulguları

Çökelme Süresi (dk)	pH	Sıcaklık (C°)	Elektriksel İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	AKM (mg/L)
0	7,35	20,0	533	1086	1932
5	7,47	19,9	601	233	230
10	7,52	19,8	621	155	140
15	7,56	19,8	628	129	104
20	7,58	19,6	642	109	96
30	7,66	19,5	663	69,4	54
40	7,64	19,4	668	64,6	32
45	7,69	19,3	677	47,4	26
50	7,71	19,2	693	41,3	22
60	7,66	19,2	716	37,1	20

Çizelge 6.155’de AKM parametresine bakıldığında Bipolar Al-Al elektrotla yapılan arıtım sonrasında 20 dakikalık çökelme süresinin deşarj standartlarını karşıladığı görülmektedir.

Çizelge 6.156. Bipolar Al-Fe elektrot, çökelme süresi bulguları

Çökelme Süresi (dk)	pH	Sıcaklık (C°)	Elektriksel İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	AKM (mg/L)
0	7,32	19,8	528	1069	1694
5	7,41	19,7	569	239	180
10	7,42	19,6	610	110	112
15	7,41	19,5	611	98,7	94
20	7,43	19,5	644	95,4	82
30	7,46	19,4	645	74,6	60
40	7,54	19,3	664	67,6	40
45	7,57	19,2	668	49,2	38
50	7,53	19,1	705	46,1	26
60	7,53	19,0	717	36,6	16

Çizelge 6.156’da AKM parametresine bakıldığında Bipolar Al-Fe elektrotla yapılan arıtım sonrasında 15 dakikalık çökelme süresinin deşarj standartlarını karşıladığı görülmektedir.

Ham atıksuyun doğal çökelmeye bırakıldıktan sonra belli dakikalardaki parametre ölçümlerini içeren bulgular Çizelge 6.157’de verilmiştir.

Çizelge 6.157. *Ham atıksu doğal çökelme süresi bulguları*

Çökelme Süresi (dk)	pH	Sıcaklık (C°)	Elektriksel İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (NTU)	AKM (mg/L)
0	7,45	20,0	470	8670	4010
5	7,51	19,9	536	802	638
10	7,68	20,0	572	560	460
15	7,64	19,9	577	349	322
20	7,70	19,7	603	310	268
30	7,73	19,8	615	287	192
40	7,75	19,7	626	260	188
45	7,70	19,7	680	246	184
50	7,87	19,6	653	235	178
60 (1 sa)	8,34	19,4	678	195	170
75	8,36	19,3	685	187	164
90	8,42	19,3	680	181	152
105	8,47	19,1	688	133	146
120 (2 sa)	8,50	19,0	697	116	138
135	8,54	18,9	703	108	126
150	8,61	18,6	709	95,6	112
165	8,65	18,8	716	89,9	104
180 (3 sa)	8,67	18,7	723	86,9	98
195	8,66	18,8	734	78,7	86
210	8,72	18,7	736	74,3	76
225	8,75	18,6	740	69,9	74
240 (4 sa)	8,79	18,6	749	64,6	68
255	8,70	18,5	712	63,3	66
270	8,71	18,4	683	59,7	64
285	8,68	18,7	676	56,5	58
300 (5 sa)	8,65	18,6	659	55,1	52

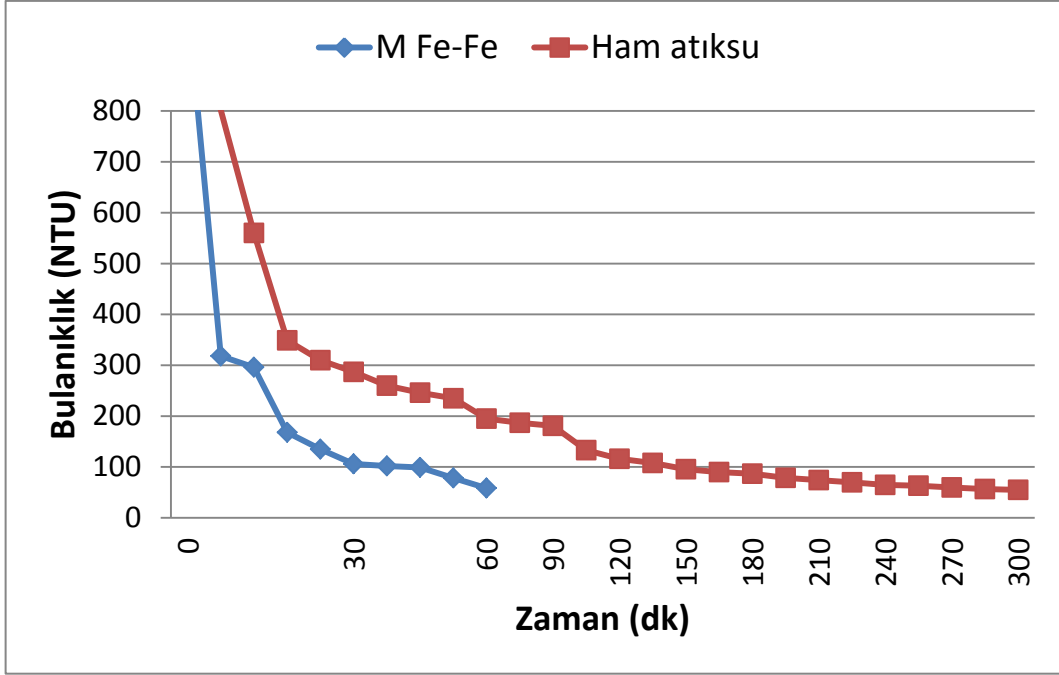
Çizelge 6.157’de AKM parametresine bakıldığında ham atıksuyun 3 saatlik doğal çökelme süresinin deşarj standartlarını karşıladığı, 5 saatlik doğal çökelme süresi

sonunda ise 1 mA/cm² akım yoğunluğunda 1 dk süreyle elektrokoagülasyon işlemine tabi tutulan ve 1 saat çöktürülen atıksuların değerlerine yaklaştığı görülmektedir.

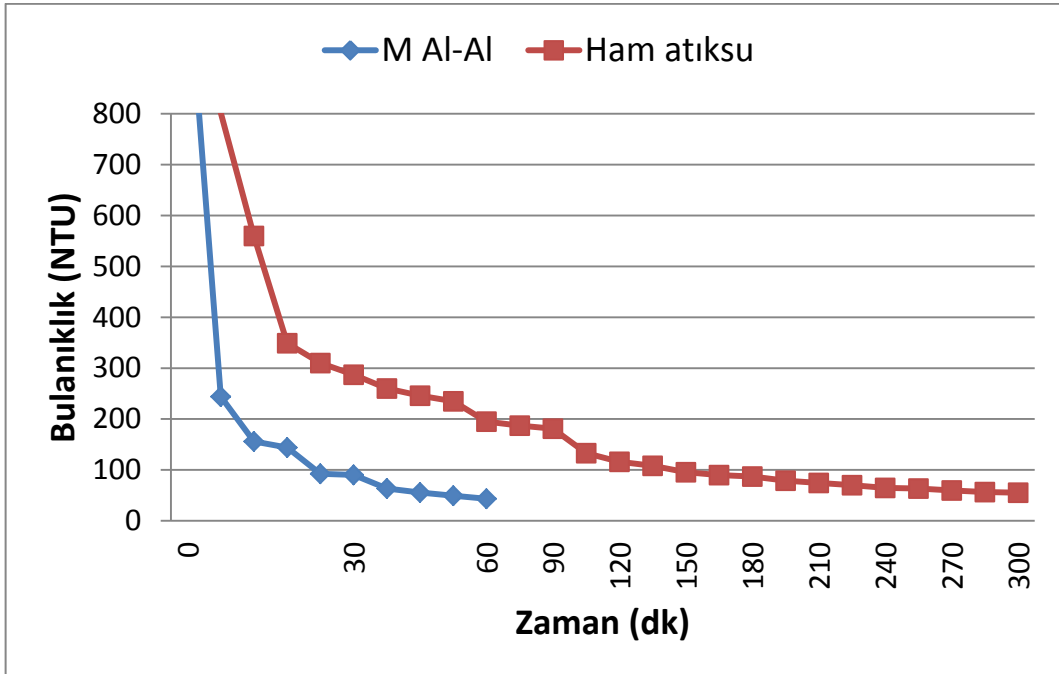
Her elektrot tipi ve geometrisi için yapılan elektrokoagülasyon işleminden sonraki 1 saatlik çökeltme süresi içinde belli zaman aralıklarında yapılan bulanıklık ve AKM ölçümlerinin ham atıksuyun doğal çökmesi sırasında belli zaman aralıklarında yapılan bulanıklık ve AKM ölçümleriyle karşılaştırılmasına dair şekillerin numaraları Çizelge 6.158’de verilmiştir.

Çizelge 6.158. *Farklı elektrotlarla arıtılmış atıksuyun ham atıksuyla çökme sürelerine göre bulanıklık ve AKM karşılaştırmalarını gösteren şekillerin numaraları*

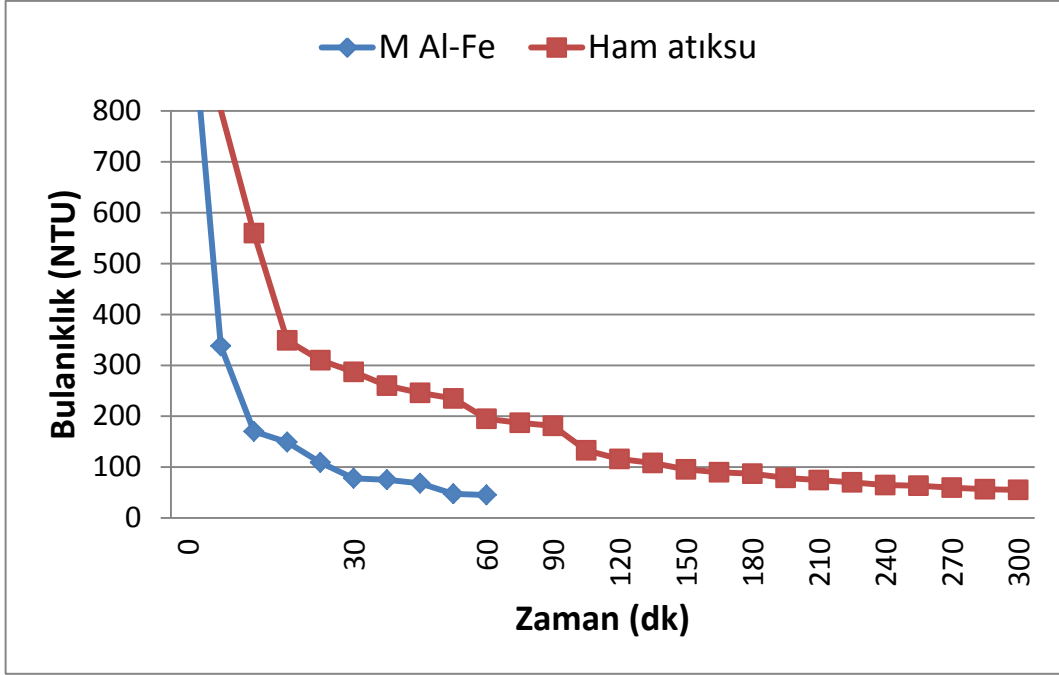
Elektrot tipi ve geometrisi	Karşılaştırma Türü	Şekil numarası
Monopolar Fe-Fe	Bulanıklık	Şekil 6.61
Monopolar Al-Al	Bulanıklık	Şekil 6.62
Monopolar Al-Fe	Bulanıklık	Şekil 6.63
Bipolar Fe-Fe	Bulanıklık	Şekil 6.64
Bipolar Al-Al	Bulanıklık	Şekil 6.65
Bipolar Al-Fe	Bulanıklık	Şekil 6.66
Monopolar Fe-Fe	AKM	Şekil 6.67
Monopolar Al-Al	AKM	Şekil 6.68
Monopolar Al-Fe	AKM	Şekil 6.69
Bipolar Fe-Fe	AKM	Şekil 6.70
Bipolar Al-Al	AKM	Şekil 6.71
Bipolar Al-Fe	AKM	Şekil 6.72



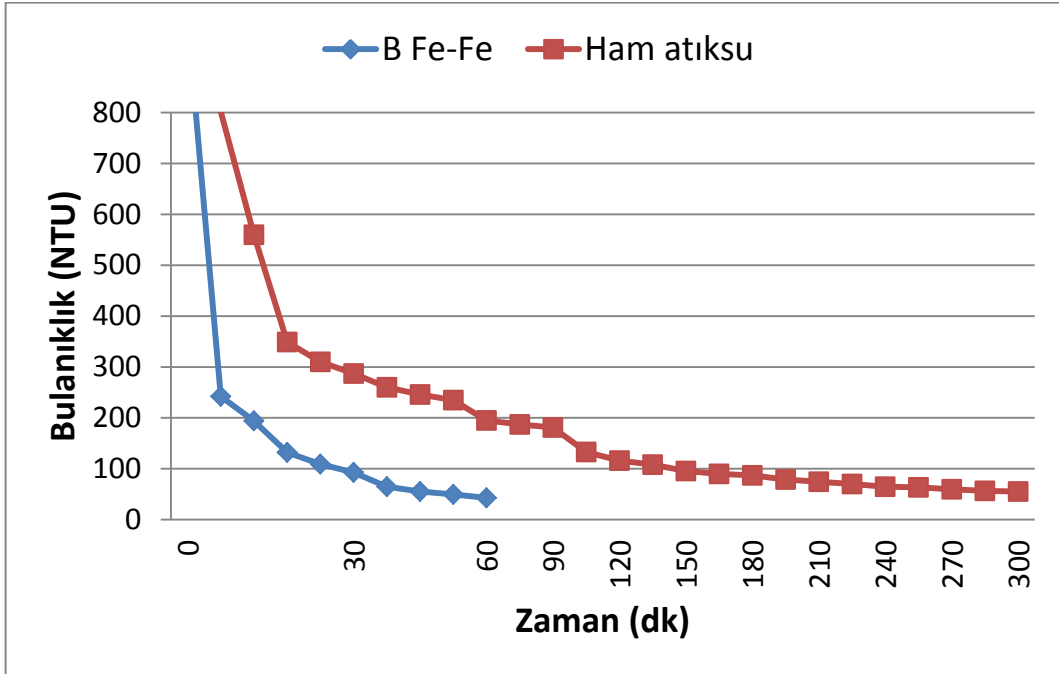
Şekil 6.61. Monopolar Fe-Fe elektrot ile arıtılan atıksu ve ham atıksuyun çökme zamanına göre bulanıklık karşılaştırması



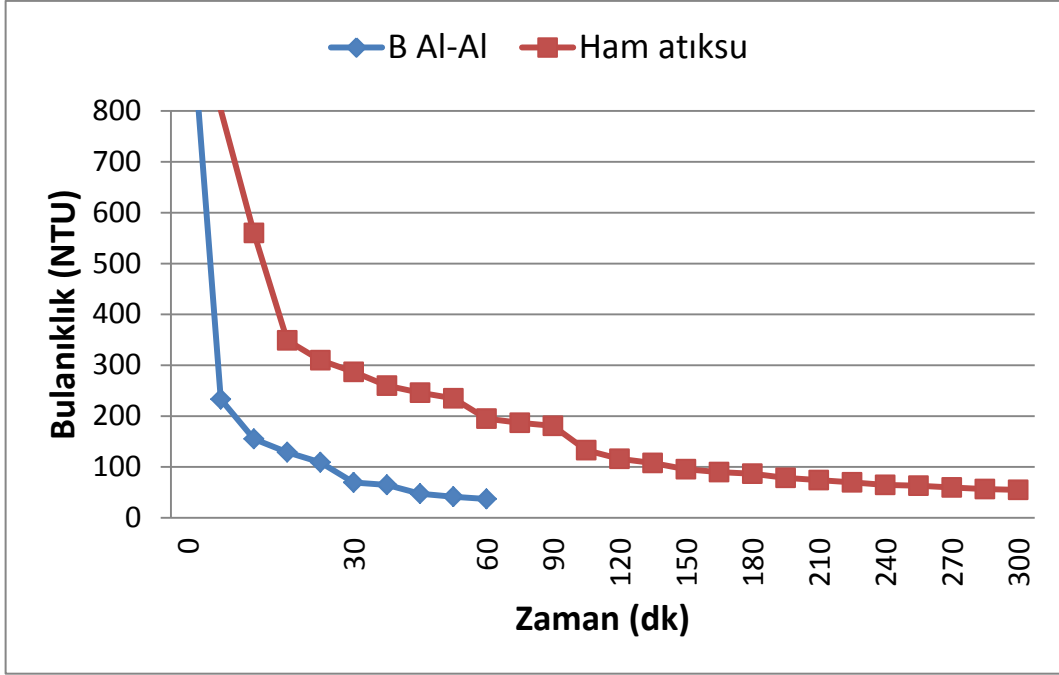
Şekil 6.62. Monopolar Al-Al elektrot ile arıtılan atıksu ve ham atıksuyun çökme zamanına göre bulanıklık karşılaştırması



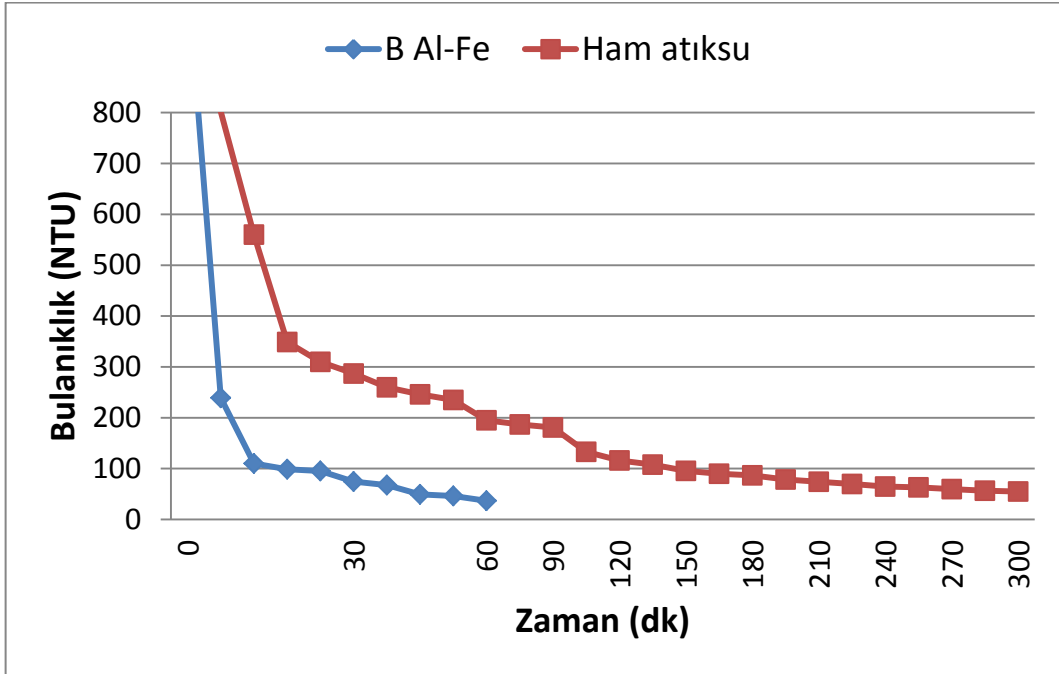
Şekil 6.63. Monopolar Al-Fe elektrot ile arıtılan atıksu ve ham atıksuyun çökme zamanına göre bulanıklık karşılaştırması



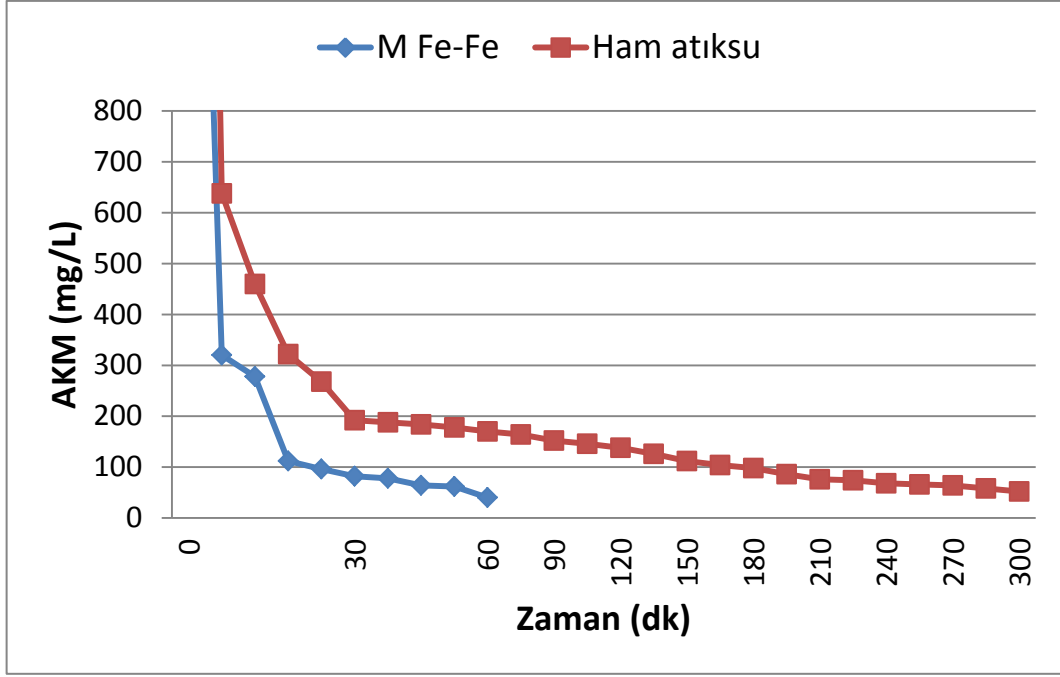
Şekil 6.64. Bipolar Fe-Fe elektrot ile arıtılan atıksu ve ham atıksuyun çökme zamanına göre bulanıklık karşılaştırması



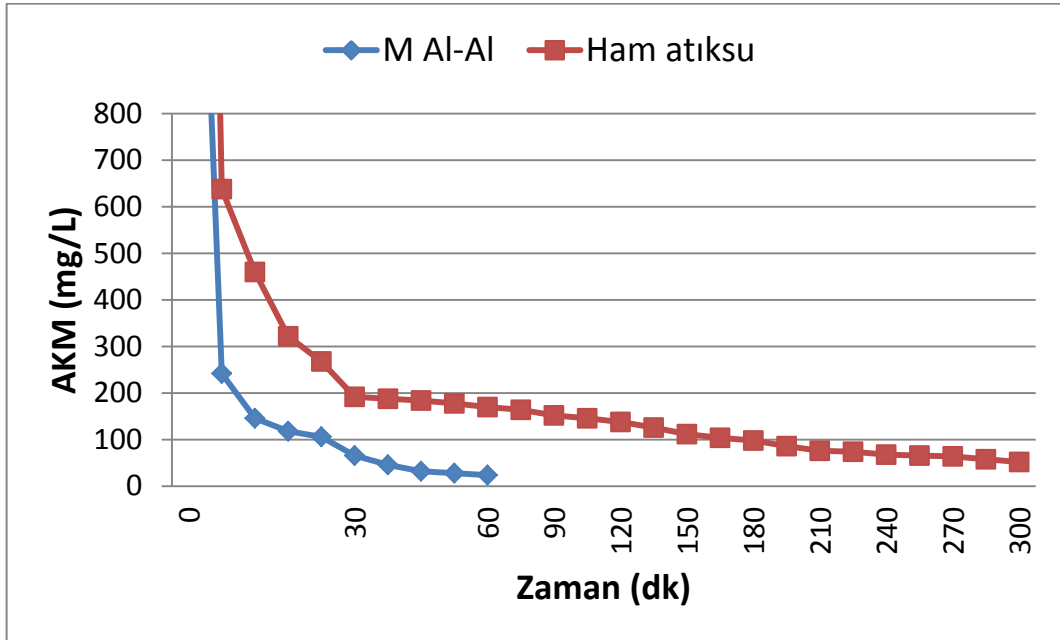
Şekil 6.65. Bipolar Al-Al elektrot ile arıtılan atıksu ve ham atıksuyun çökme zamanına göre bulanıklık karşılaştırması



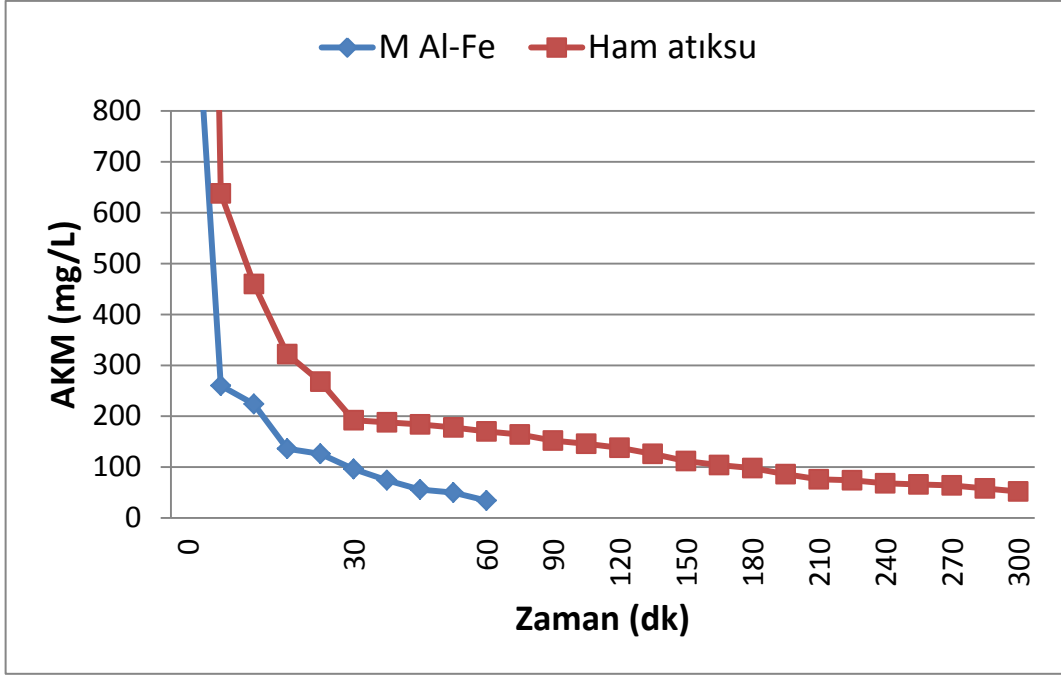
Şekil 6.66. Bipolar Al-Fe elektrot ile arıtılan atıksu ve ham atıksuyun çökme zamanına göre bulanıklık karşılaştırması



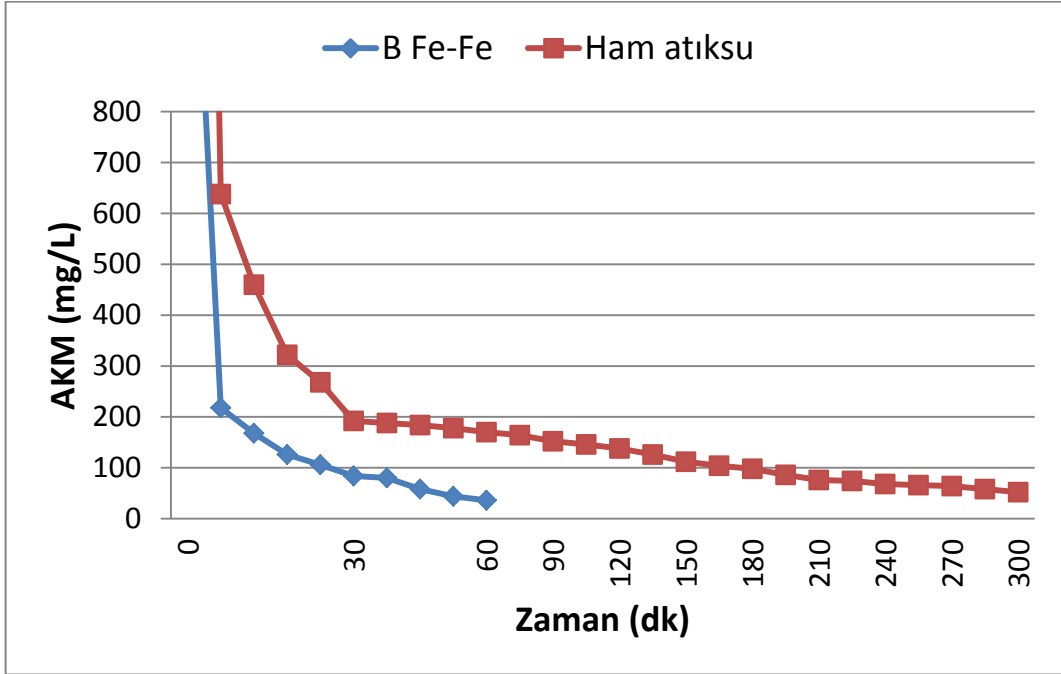
Şekil 6.67. Monopolar Fe-Fe elektrot ile arıtılan atıksu ve ham atıksuyun çökme zamanına göre AKM karşılaştırması



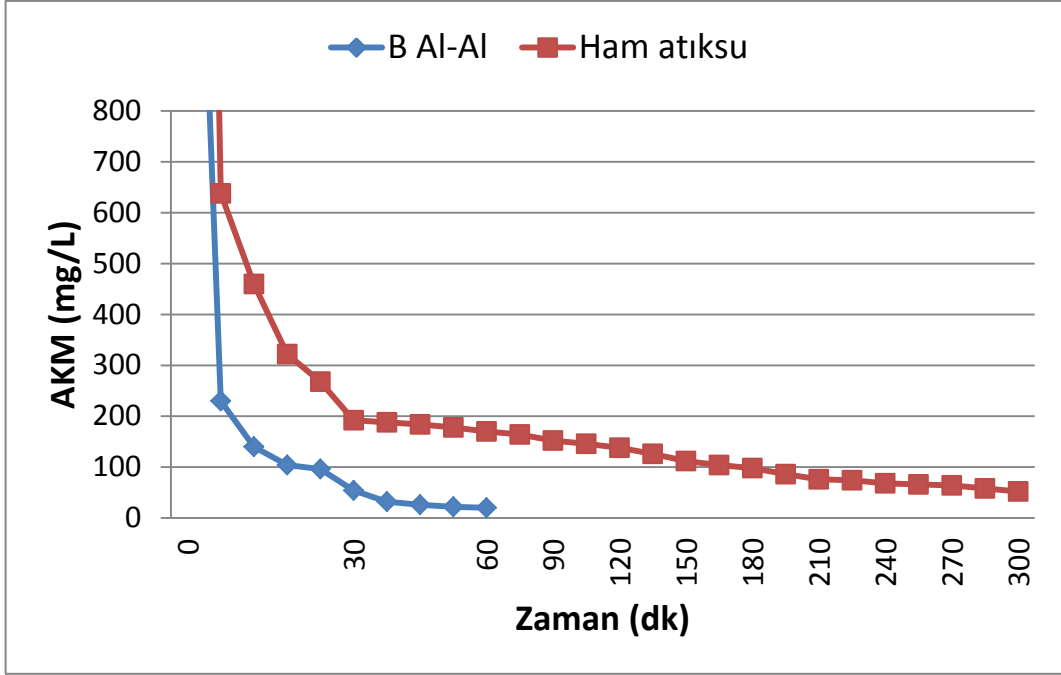
Şekil 6.68. Monopolar Al-Al elektrot ile arıtılan atıksu ve ham atıksuyun çökme zamanına göre AKM karşılaştırması



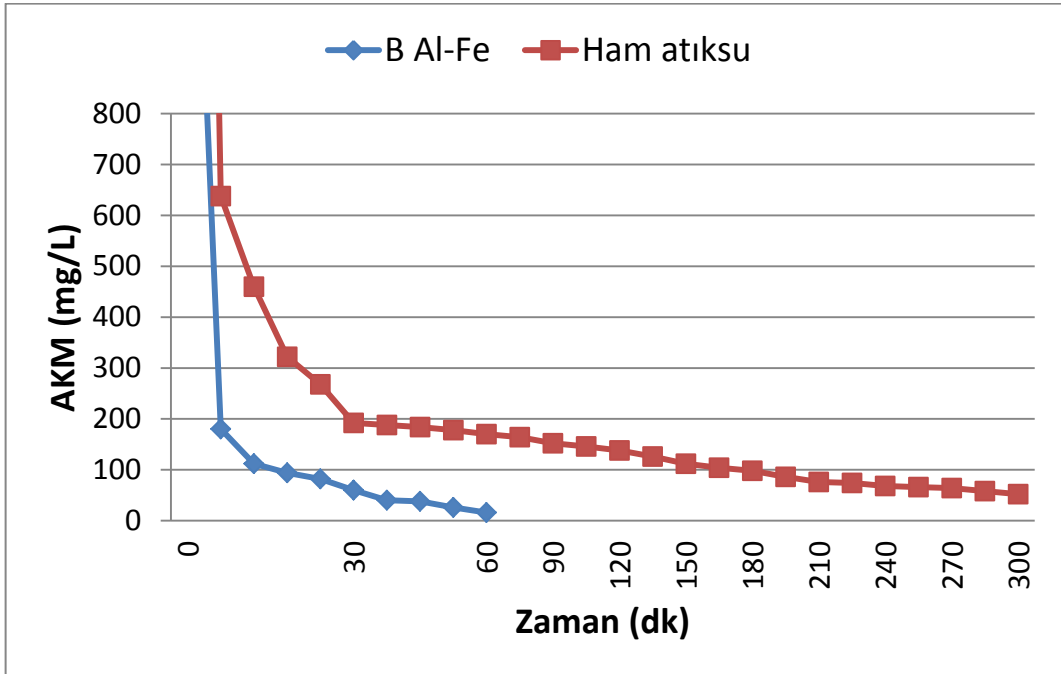
Şekil 6.69. Monopolar Al-Fe elektrot ile arıtılan atıksu ve ham atıksuyun çökme zamanına göre AKM karşılaştırması



Şekil 6.70. Bipolar Fe-Fe elektrot ile arıtılan atıksu ve ham atıksuyun çökme zamanına göre AKM karşılaştırması



Şekil 6.71. Bipolar Al-Al elektrot ile arıtılan atıksu ve ham atıksuyun çökme zamanına göre AKM karşılaştırması



Şekil 6.72. Bipolar Al-Fe elektrot ile arıtılan atıksu ve ham atıksuyun çökme zamanına göre AKM karşılaştırması

6.7. Toplam Krom Analizi

Mermer işleme endüstrisi atıksularının SKKY’da belirtilen deşarj standartlarında, deşarj edilecek atıksuyun Cr^{+6} değer limiti 0,3 mg/L olarak belirtilmiştir. Deneyleer için mermer işleme fabrikasından alınan ham atıksu numunelerinin Toplam Cr değeri, ICP cihazı ile 0,124 μ g/L olarak tespit edilmiştir. Bu değer limit değerin oldukça altında kaldığından Cr^{+6} değeri ile ilgili başka bir çalışma yapılmamıştır. ICP cihazının mermer atıksuyunda bulunan Toplam Cr ölçümüne dair ortaya çıkardığı veriler EK 9’da verilmiştir.

6.8. Yağ ve Gres Analizi

Mermer işleme endüstrisi atıksularının SKKY’da belirtilen deşarj standartlarında, deşarj edilecek atıksuyun yağ ve gres değer limiti 10 mg/L olarak belirtilmiştir. Ham atıksuyun yağ gres değeri 12 mg/L olarak ölçülmüştür. 1 dk arıtma süresi ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda Monopolar Fe-Fe, Monopolar Al-Al, Monopolar Al-Fe, Bipolar Fe-Fe, Bipolar Al-Al, Bipolar Al-Fe elektrotlarla elektrokoagülasyon prosesi uygulanmış atıksuların yağ gres değerleri Çizelge 6.159’da verilmiştir.

Çizelge 6.159. Yağ gres analizi

Elektrot Tipi ve Geometrisi	Yağ Gres Değeri (mg/L)
Monopolar Fe-Fe	8
Monopolar Al-Al	4
Monopolar Al-Fe	7
Bipolar Fe-Fe	6
Bipolar Al-Al	6
Bipolar Al-Fe	5

6.9. Renk Analizi

Mermer işleme endüstrisi atıksularının SKKY’da belirtilen deşarj standartlarında, deşarj edilecek atıksuyun renk değeri limiti 280 Pt-Co olarak belirtilmiştir. Ham atıksuyun renk değeri 10,684 Pt-Co olarak ölçülmüştür. 1 dk arıtma süresi ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda Monopolar Fe-Fe, Monopolar Al-Al, Monopolar Al-Fe, Bipolar Fe-Fe, Bipolar Al-Al, Bipolar Al-Fe elektrotlarla

elektrokoagülasyon prosesi uygulanmış atıksuların renk değerleri Çizelge 6.160'da verilmiştir. Spektrofotometrede yapılan renk ölçüm verilerinin detayları EK 10'da verilmiştir.

Çizelge 6.160. Renk analizi

Elektrot Tipi ve Geometrisi	Renk Değeri (Pt-Co)
Monopolar Fe-Fe	27,031
Monopolar Al-Al	14,919
Monopolar Al-Fe	33,917
Bipolar Fe-Fe	7,270
Bipolar Al-Al	19,481
Bipolar Al-Fe	7,684

6.10. KOİ Analizi

Mermer işleme endüstrisi atıksularının SKKY'da belirtilen deşarj standartlarında, KOİ değerine dair bir limit belirtilmemiştir. Yine de mermer işleme endüstrisi atıksularının KOİ değerleri hakkında fikir sahibi olunabilmesi için KOİ ölçümleri yapılmıştır. Ham atıksuyun KOİ değeri 37,05 mg/L olarak ölçülmüştür. 1 dk arıtma süresi ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda Monopolar Fe-Fe, Monopolar Al-Al, Monopolar Al-Fe, Bipolar Fe-Fe, Bipolar Al-Al, Bipolar Al-Fe elektrotlarla elektrokoagülasyon prosesi uygulanmış atıksuların KOİ değerleri Çizelge 6.161'de verilmiştir.

Çizelge 6.161. KOİ analizi

Elektrot Tipi ve Geometrisi	KOİ Değeri (mg/L)
Monopolar Fe-Fe	5,29
Monopolar Al-Al	10,59
Monopolar Al-Fe	21,17
Bipolar Fe-Fe	5,29
Bipolar Al-Al	10,59
Bipolar Al-Fe	15,88

6.11. Zeta Potansiyeli Analizi

Ham atıksuyun zeta potansiyeli değeri -4,84 mV olarak ölçülmüştür. 1 dk arıtma süresi ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda Monopolar Fe-Fe, Monopolar Al-Al, Monopolar Al-Fe, Bipolar Fe-Fe, Bipolar Al-Al, Bipolar Al-Fe elektrotlarla elektrokoagülasyon prosesi uygulanmış atıksuların ortalama zeta potansiyeli değerleri Çizelge 6.162’de verilmiştir. Zeta potansiyeli cihazı ile yapılan zeta potansiyeli ölçüm verilerinin detayları EK 11’de verilmiştir.

Çizelge 6.162. Zeta potansiyeli analizi

Elektrot Tipi ve Geometrisi	Zeta Potansiyeli Değeri (mV)
Monopolar Fe-Fe	-7,89
Monopolar Al-Al	-10,07
Monopolar Al-Fe	-10,09
Bipolar Fe-Fe	-9,16
Bipolar Al-Al	-9,79
Bipolar Al-Fe	-11,23

6.12. Çamur Tartımı

Ham atıksuyun çamur miktarı 1,3897 gr/400 ml olarak ölçülmüştür. 1 dk arıtma süresi ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda Monopolar Fe-Fe, Monopolar Al-Al, Monopolar Al-Fe, Bipolar Fe-Fe, Bipolar Al-Al, Bipolar Al-Fe elektrotlarla elektrokoagülasyon prosesi uygulanmış atıksuların çamur tartımı değerleri Çizelge 6.163’de verilmiştir.

Çizelge 6.163. Çamur tartımı değerleri

Elektrot Tipi ve Geometrisi	Çamur Miktarı (gr/400 ml)
Monopolar Fe-Fe	1,5479
Monopolar Al-Al	1,4229
Monopolar Al-Fe	1,4523
Bipolar Fe-Fe	1,5471
Bipolar Al-Al	1,4836
Bipolar Al-Fe	1,5227

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Mermer endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılması konulu çalışmada; mermer işleme endüstrisi atıksularının, Monopolar bağlantılı Fe-Fe, Al-Al ve Al-Fe (hibrit) elektrotlar ve Bipolar bağlantılı Fe-Fe, Al-Al ve Al-Fe (hibrit) elektrotlar kullanılarak, 1 dk, 3 dk, 5 dk, 10 dk arıtma sürelerinde ve Monopolar bağlantılı elektrotlar için 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 mA/cm² akım yoğunluklarında, Bipolar bağlantılı elektrotlar için 1, 3, 5, 10 mA/cm² akım yoğunluklarında elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtımı gerçekleştirilmiştir. Arıtılan suların; pH, sıcaklık, elektriksel iletkenlik değerleri, AKM ve bulanıklık giderimleri incelenmiş, enerji tüketimi ve işletme maliyeti hesaplamaları yapılmıştır.

SKKY'de belirtilen mermer işleme atıksuyu deşarj kriterleri ve işletme maliyetleri dikkate alınarak her elektrot için ideal akım yoğunluğu ve arıtma süreleri belirlenmiştir. Buna göre Monopolar ve Bipolar bağlantılı Fe-Fe, Al-Al ve Al-Fe elektrotların her biri için ideal arıtma süresi 1dk ve ideal akım yoğunluğu 1 mA/cm² olarak tespit edilmiştir. 1 dk arıtma süresinde ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda çalıştırılan Monopolar Fe-Fe, Monopolar Al-Al, Monopolar Al-Fe, Bipolar Fe-Fe, Bipolar Al-Al, Bipolar Al-Fe elektrotlarının sırasıyla; AKM giderimleri; %96,98, %97,51, %99,40, %98,94, %99,09, %99,08; bulanıklık giderimleri; %99,08, %99,91, %99,29, %99,00, %99,34, %99,56; enerji tüketimleri; 8,33x10⁻³ kWh/m³, 8,33x10⁻³ kWh/m³, 7,92x10⁻³ kWh/m³, 3,94x10⁻² kWh/m³, 5,52x10⁻² kWh/m³, 4,63x10⁻² kWh/m³; işletme maliyetleri (toplam maliyetler); 9,73x10⁻¹ kr./m³, 1,35 kr./m³, 1,15 kr./m³, 1,69 kr./m³, 2,43 kr./m³, 2,03 kr./m³ olarak belirlenmiştir.

Bu verilere göre tüm elektrotların çok yüksek düzeyde kirlilik giderimi sağladığı, en yüksek AKM giderimini Monopolar Al-Fe elektrotun (%99,40), en yüksek bulanıklık giderimini Monopolar Al-Al elektrotun (%99,91), en düşük enerji tüketimini Monopolar Al-Fe elektrotun (7,92x10⁻³ kWh/m³), en düşük işletme maliyetini Monopolar Fe-Fe elektrotun (9,73x10⁻¹ kr./m³) sağladığı ortaya çıkmıştır.

Tüm elektrotlar için optimum arıtma süresi ve optimum akım yoğunluğu belirlendikten sonra destek elektrolit derişimi ve başlangıç pH'nın arıtma etkisi incelenmiştir.

Destek elektrolit derişiminin arıtma etkilerini gözlemlemek amacıyla mermer atıksuyuna, 1 dk arıtma süresinde ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda, 0 mM (destek elektrolitsiz), 0,5 mM, 1 mM, 3 mM derişimlerinde Na₂SO₄ kimyasalı ilave edilerek

elektrokoagülasyon işlemi uygulanmış, AKM ve bulanıklık giderimleri tespit edilerek işletme maliyetleri hesaplanmıştır. Buna göre tüm elektrotlar için zaten çok yüksek olan AKM ve bulanıklık giderimlerinde, destek elektrolit kullanımına bağlı olarak belirgin bir artış gözlenmemiştir. Destek elektrolit kullanılarak yapılan arıtmalarda arıtma süresinin çok kısa olması dolayısıyla destek elektrolitlerden yeterli verim alınamamış, destek elektrolit kullanılarak yapılan arıtmalar, destek elektrolit kullanılmayan arıtmalara göre yüksek maliyetli çıkmıştır.

Başlangıç pH'nın arıtma etkilerini gözlemlemek amacıyla tüm elektrotlar için mermer atıksuyunun başlangıç pH'ı; doğal pH (7,38) yanında HCl kimyasalı kullanılarak 6 ve 3 olarak ayarlanmış, 1 dk arıtma süresinde ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda elektrokoagülasyon işlemi uygulanmıştır. Arıtılan suların AKM ve bulanıklık giderimleri tespit edilerek işletme maliyetleri hesaplanmıştır. Buna göre tüm elektrotlar için zaten çok yüksek olan AKM ve bulanıklık giderimlerinde, başlangıç pH'ına bağlı olarak yaklaşık %1'lik artışlar gözlenmiş, ancak pH'ı 3'e düşürülen atıksuların arıtım sonrası pH'larının SKKY'da belirtilen mermer işleme atıksularının deşarj kriterlerine uymadığı tespit edilmiştir. Ayrıca başlangıç pH'ı HCl kullanılarak 6 ve 3'e düşürülen atıksuların işletme maliyeti HCl kimyasalı maliyetine bağlı olarak, doğal pH'la yapılan arıtmaların işletme maliyetine kıyasla çok daha yüksek çıkmış ve başlangıç pH'ını düşürmenin avantajlı bir seçenek olmadığı sonucu çıkarılmıştır.

Destek elektrolit kullanımının ve başlangıç pH'ını ayarlamamanın anlamlı bir katkısı bulunmadığından çalışmanın devamında bu işlemler uygulanmamıştır. Sonraki aşamada, atıksuların tüm elektrotlarla ideal koşullarda arıtılması sonrası ilk 1 saatteki çökeltme süreleri, arıtım uygulanmamış mermer atıksuyunun çökeltme süresiyle, AKM ve bulanıklık parametreleri üzerinden karşılaştırılmıştır. 1 dk arıtma süresi ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda Monopolar Fe-Fe, Monopolar Al-Al, Monopolar Al-Fe, Bipolar Fe-Fe, Bipolar Al-Al, Bipolar Al-Fe elektrotlar sırasıyla 20 dk, 25 dk, 30 dk, 25 dk, 20 dk, 15 dk çökeltme sürelerinde AKM parametresine bağlı deşarj standartlarını sağlarken, arıtılmamış mermer atıksuyu 3 saatlik çökeltme süresi sonunda AKM parametresine bağlı deşarj standartlarını sağlamıştır. Arıtılmış atıksuların 1 saatlik çökeltme süresi sonunda Monopolar Fe-Fe, Monopolar Al-Al, Monopolar Al-Fe, Bipolar Fe-Fe, Bipolar Al-Al, Bipolar Al-Fe elektrotlarının sırasıyla, AKM değerleri; 40 mg/L, 24 mg/L, 34 mg/L, 36 mg/L, 20 mg/L, 16 mg/L; bulanıklık değerleri; 58,4 NTU, 43,3 NTU, 45,1 NTU, 42,5 NTU, 37,1 NTU, 36,6 NTU olarak belirlenmiştir. Arıtılmamış mermer

atıksuyunun ise 5 saatlik çökelme süresi sonrasında AKM değeri 52 mg/L, bulanıklık değeri 55,1 NTU olarak tespit edilmiştir. Buna göre elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılan atıksuların arıtma süresi ve arıtma kalitesi yönünden avantaj sağladığı ortaya çıkmaktadır.

Mermer işleme endüstrisi atıksularının SKKY’de belirtilen deşarj standartlarında Cr^{+6} değer limiti 0,3 mg/L olarak belirtilmiştir. Bu çalışma için kullanılan mermer atıksuyunun Toplam Cr değeri 0,124 μ g/L olarak tespit edilmiş ve bu değer limitin oldukça altında kaldığından Cr^{+6} değeri ile ilgili başka bir çalışma yapılmamıştır.

Son olarak tüm elektrotların ideal arıtma koşullarında elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtılması sonrasında yağ gres, renk, KOİ, zeta potansiyeli parametreleri incelenmiş ve çamur tartımları yapılmıştır. 1 dk arıtma süresinde ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda çalıştırılan Monopolar Fe-Fe, Monopolar Al-Al, Monopolar Al-Fe, Bipolar Fe-Fe, Bipolar Al-Al, Bipolar Al-Fe elektrotlarının sırasıyla; yağ gres değerleri; 8 mg/L, 4 mg/L, 7 mg/L, 6 mg/L, 6mg/L, 5 mg/L; renk değerleri; 27,031 Pt-Co, 14,919 Pt-Co, 33,917 Pt-Co, 7,270 Pt-Co, 19,481 Pt-Co, 7,684 Pt-Co; KOİ değerleri; 5,29 mg/L, 10,59 mg/L, 21,17 mg/L, 5,29 mg/L, 10,59 mg/L, 15,88 mg/L; zeta potansiyeli değerleri; - 7,89 mV, -10,07 mV, -10,09 mV, -9,16 mV, -9,79 mV, -11,23 mV; çamur miktarları; 1,5479 gr/400 ml, 1,4229 gr/400 ml, 1,4523 gr/400 ml, 1,5471 gr/400 ml, 1,4836 gr/400 ml, 1,5227 gr/400 olarak tespit edilmiştir. Renk analizlerinde, özellikle demir elektrotlarda zahiri renk oluşumu gerçekleştiğinden (askıda kalan partiküller yüzünden), arıtılan sular analiz öncesi filtreden geçirilmiş ve gerçek renk değerleri ölçülmüştür. Yağ gres ve renk değerleri SKKY’de belirtilen deşarj kriterlerinin oldukça altında olduğundan elektrokoagülasyonla arıtma sonrası mermer atıksularının deşarj standartlarını karşıladığı söylenebilmektedir.

Mermer işleme endüstrisi atıksularının arıtılmasında monopolar bağlantılı elektrotlar bipolar bağlantılı elektrotlara göre (AKM ve bulanıklık parametresi üzerinden) daha yüksek verim göstermiştir. Alüminyum elektrotlar genel olarak kirlilik gideriminde demir elektrota kıyasla daha yüksek performans göstermesine rağmen, alüminyum malzemenin demir malzemeye göre daha yüksek maliyetli olması ekonomik açıdan demir elektrotları daha cazip kılmıştır. Tüm elektrotlar SKKY’de belirtilen deşarj kriterlerini sağladığından en ekonomik seçenek olan Monopolar Fe-Fe elektrotun mermer işleme endüstrisi atıksu arıtımlarında en uygun elektrot tipi ve geometrisi olduğu ortaya çıkmıştır. Günlük 150 m³ su tüketilen bir mermer işleme tesisinde,

deneyleerde yer alan aynı koşullarda, elektrokoagölasyon yöntemi kullanılarak Monopolar Fe-Fe elektrot ile atıksu arıtımı yapılırsa günlük arıtım işletme maliyetinin (enerji maliyeti+elektrot maliyeti) 146 kr. olacağı hesaplanmıştır.

Orta ve büyük kapasiteli mermer işleme tesislerinin işletme koşullarında ihtiyaç duyulan temiz suyun, atıksu arıtım hızına bağlı olarak karşılandığı; mermer işleme tesislerinde kullanılan temiz suyun kalitesinin, mermer nihai ürün kalitesini doğru orantılı olarak etkilediğı ve arıtma süresinin uzamasının, daha büyük bir arıtma havuzu ihtiyacını doğuracağı göz önüne alındığında, elektrokoagölasyon yöntemiyle arıtımın hem işletme verimini ve ürün kalitesini olumlu yönde etkileyeceğı hem de atıksu arıtma ünitesinin kurulum maliyetlerini düşüreceğı anlaşılmaktadır. Elektrokoagölasyonla arıtma yönteminin mermer atıksuları için mevcut yöntemlere kıyasla iyi bir seçenek olduğu düşünöldüğünden, laboratuvar ölçeğinde yapılan bu çalışmaların pilot ölçekli bir sistem olarak gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] DPT, ‘Madencilik Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Yapı Malzemeleri II’, Özel İhtisas Raporu, Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Ankara-2001, s: 9
- [2] Tosun, A., Türkiye’nin Mermer İhracatını Arttırma Olanaklarının Araştırılması, 2007
- [3] 3213 sayılı Maden Kanunu, 15/6/1985 tarihli, 18785 Sayılı Resmi Gazete, Tertip:5 Cilt : 24 Sayfa : 446
- [4] Doğanay, H., ‘Ekonomik Coğrafya 1: Doğal Kaynaklar (4. Baskı), Aktif Yayınları, Erzurum-2002
- [5] Erkanol, D., Aydındağ, A., ‘Türkiye Geneli Doğaltaş Potansiyel Alanlarının Belirlenmesi Projesi’, MTA-2012
- [6] T.C. Ekonomi Bakanlığı, ‘Doğal Taş Sektörü’, İhracat Genel Müd. Maden, Metal ve Orman Ürünleri Daire Başkanlığı, 2018
- [7] T.C. Kalkınma Bakanlığı, ‘Madencilik Politikaları’ Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Onuncu Kalkınma Planı 2014-2018, Ankara- 2015, s:123
- [8] Çetin, T., Türkiye Mermer Potansiyeli Üretimi ve İhracatı, Gazi Üniversitesi, Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi, 23(3), 243-256, 2003
- [9] DPT, ‘Madencilik’, Özel İhtisas Raporu, Dokuzuncu Beş Yıllık Kalkınma Planı, Ankara- 2007
- [10] Akkoyun, Ö., Ankara, H., ‘Kalite Maliyet Modelleri ve Mermer Fabrikaları İçin Bir Uygulama’, Madencilik Dergisi, Cilt 46, Sayı 1, Mart-2007
- [11] Fırsatlar Şehri Elazığ Projesi, ‘Entegre Mermer İşleme Tesisi Fizibilite Raporu’, 2011
- [12] Kulaksız, S., ‘Doğal Taş (Mermer) Maden İşlemeciliği ve İşleme Teknolojileri’ TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Ankara-2007

- [13] Onargan, T., Köse, H., Deliormanlı, Hamdi., 'Mermer', TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Ankara-2006
- [14] Gündüz, L., Şentürk, A., Sarıışık, A., 'Mermer İşleme Tesislerinde Mermer Makinaları Üzerine Teknik Bir Araştırma', Türkiye I. Mermer Sempozyumu, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Afyon-1995
- [15] Ceylan, H., Mança S., 'Mermer Parça Atıklarının Beton Agregası Olarak Değerlendirilmesi', SDU Teknik Bilimler Dergisi, Isparta-2013
- [16] Öztürk, M., 'Mermer Kesiminden Kaynaklanan Çevre Kirliliği Bildirisi', 6-14, Ankara-2009
- [17] Uğur, İ., Gündüz, L., 'Mermer Atıklarının Değerlendirilebilirliği', Türkiye I. Mermer Sempozyumu, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Afyon-1995
- [18] Ceylan, H., 'Mermer Fabrikalarındaki Mermer Toz Atıklarının Ekonomik Olarak Değerlendirilmesi' , Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Isparta- 2000
- [19] Yılmaztürk, D., 'Andezit İşleme Atıksuyunun Fizikokimyasal Arıtımı', Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Konya-2011
- [20] Solak, M., 'Elektrokoagülasyon Prosesi ile Mermer Atıksularının Arıtılması', Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Isparta- 2007
- [21] Büyüksağış, İ.S., 'Mermer İşleme Tesisleri Atıksularının Arıtım Yöntemleri ve Ekonomikliklerinin İncelenilmesi', Türkiye I. Mermer Sempozyumu, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Afyon-1995
- [22] Kavaklı, M., 'Mermer İşleme Tesisi Proses Atıksularının Özellikleri, Arıtılması ve Kontrolü', MERSEM 2003 Sempozyumu, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Afyon-2003

- [23] Alptekin, A.M., ‘Doğal Taş Atıksularının Flokülasyon/Koagülasyon Yöntemiyle Arıtılması’, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Afyon-2006
- [24] Reynolds T., Richards P., ‘Çevre Mühendisliğinde Temel İşlemler ve Süreçler’, Efil Yayınevi, Ankara-2011
- [25] Afonso, M. D., Alves, A. M. B., Mohsen, M., ‘Crossflow Microfiltration of Marble Processing Wastewaters’, International Congress on Membranes and Membrane Processes (ICOM), Desalination 149 (2002) 153-162, France-2002
- [26] Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Resmi Gazete Tarihi: 31.12.2004, Resmi Gazete Sayısı: 25687
- [27] Yazıcı, E.T., ‘Iohexol’ün Elektrooksidasyon Yöntemi İle Parçalanması ve İşletme Parametrelerinin Etkilerinin Belirlenmesi’, Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Gebze-2017
- [28] İlhan, F., Kurt, U., Apaydın, Ö., Arslankaya, E., Gönüllü, M.T., ‘Elektrokimyasal Arıtım Uygulamaları: Katı Atık Sızıntı Suyu Çalışması’, Türkiye 2007, İstanbul-2007
- [29] Chaturvedi, S.I., ‘Mercury Removal Using Fe-Fe Electrodes by Electrocoagulation’, IJMER, 3, 1, 101-108, 2013
- [30] Akarsu, C., Taner, F., Ayol, A., ‘Sızıntı Suyunun Elektrooksidasyon Prosesi ile Arıtılması’, ISEM 2014, Adıyaman-2014
- [31] Khin, M.M., Nayir, S.A., Babuu, J.V., Murugan, R., Khrishna, R.R., ‘A Review on Nanomaterials for Environmental Remediation’, Energy Environ. Sci., 5, 8075-8109,2012
- [32] Huitle, C.A.M., ‘Direct and Indirect Electrochemical Oxidation of Organic Pollutants, University of Ferrera, Chemical Sciences, Doktora Tezi, Ferrera-2004

- [33] Fil, B.A., Boncukçuoğlu R., Yılmaz, A.E., Bayar, S., ‘Antep Fıstığı İşleme Atıksularının Elektrokoksasyon Yöntemiyle Ön Arıtım Çalışmaları’, Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enst. Der. 2(2): 29-36, 2012
- [34] Liu, H., Zhao, X., Jiuhui, Q., (Ed: Comminellis, C., Chen, G.), ‘Electrocoagulation in Water Treatment, Electrochemistry dor the Environment’, Springer, New York, A.B.D., 245-261, 2010
- [35] Bazrafshan, E., Ownagh, K.A., Mahvi A.H., ‘Application of Electrocoagulation Process Using Iron and Aluminium Electrodes for Flouride Removal from Aqueous Environment’, E-J. Chem, 9,4,2297-2308,2012
- [36] Bakır Öğütveren Ü., Koparal S.A., Albek E., Yavuz Y., Bahar M., Albek M., Tezcan Ün, Ü., Gerçel, Ö., Önder, E., Bayrakçı Karel, F., ‘Süt ve Süt Endüstrisi Atıksularının Elektrokimyasal Yöntemlerle Arıtılması’, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir-2007
- [37] Solak, M., Kılıç, M., Yazıcı, H., Şencan, A., ‘Removal of Suspended Solids and Turbidity from Marble Processing Wastewaters by Electrocoagulation: Comparison of Electrode Materials and Electrode Connection Systems’, Journal of Hazadous Materials, 172 (2009) 345-352, 2009
- [38] Solak, M., Kılıç, M., Yazıcı, H., Baldan Pakdil, N., ‘Elektrokoagülasyon ve Kimyasal Koagülasyon Prosesleri ile Mermer İşleme Atıksularının Arıtılmasının Ekonomik Analizi’, DEÜ Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Cilt: 16 Sayı: 2 sh. 13-24 Mayıs 2014
- [39] Emir, G., ‘Seramik Endüstrisi Atıksularının Elektrokagülasyon Yöntemi ile Arıtılması’, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir-2015
- [40] EPDK, 01/04/2018 tarihinden itibaren geçerli olan tarife tabloları, 2018
<http://www.epdk.gov.tr/TR/Dokumanlar/TDB/Elektrik>
- [41] Anonim, Piyasa Fiyatları, 2018, <http://www.demirhaber.com>

EK 1 - Aktif Elektrot Yüzey Alanı Hesabı

6cmx4cm'lik 3 mm kalınlığında elektrotların 3,7 cm'i suya batırılarak elektrokoagülasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

Aktif elektrot alanı hesabı aşağıdaki gibidir.

Bir elektrotun suya dalan yüzey alanı:

$$4 \times 3,7 \times 2 + 0,3(3,7 \times 2 + 4) = 33,02 \text{ cm}^2$$

Reaksiyon 3 adet anot ve 3 adet katot olmak üzere toplam 6 elektrotla gerçekleştirilmiştir. Anot elektrotlar aktif olan elektrotlar olduğu için yalnızca anot elektrotların toplam yüzey alanı hesaplanmıştır.

$$33,02 \times 3 = 99,06 \text{ cm}^2$$

Aktif elektrot alanı yaklaşık 100 cm² olarak alınmıştır.

EK 2 – Akım Yoğunluğu Hesabı

Akım yoğunluğu tepkime sırasında birim aktif elektrot alanından geğen akımdır.

Aktif elektrot alanı 100 cm^2 olarak alınmıştır.

Akım şiddeti (I) amper, Akım yoğunluğu ise mA/cm^2 'dir. Amper miliampere çevrilerek aktif elektrot alanına bölündüğünde akım yoğunluğu bulunacaktır.

$$1 \text{ Amper} = 1000 \text{ mA}$$

$$I \times 1000 / 100 = 10 \times I$$

EK 3 – Örnek Enerji Tüketimi Hesabı

Monopolar Fe-Fe elektrot

t=1dk.

Akım Yoğunluğu=1 mA/cm²

I=0,1 A

V=2,0 V

P=I×V=0,1×2,0/1000=0,0002 kW

Hesaplanan güç 1 dk (60 sn) boyunca 400 ml suya uygulanmaktadır.

Enerji tüketimi (arıtılan 400 mL için)= 0,0002×60/3600=0,0000003 kWh/400mL=

3×10⁻⁶ kWh/400mL

Enerji tüketimi (arıtılan 1 m³ için)= 3×10⁻⁶×2500 =0,008333 kWh/m³

EK 4 – Örnek Enerji Maliyeti Hesabı

Monopolar Fe-Fe elektrot

$t=1$ dk

Enerji tüketimi (arıtılan 400 mL için) = 3×10^{-6} kWh/400mL

Enerji tüketimi (arıtılan 1 m³ için) = 0,008333 kWh/m³

Birim enerji fiyatı: 22,9814 kr./ kWh

Enerji maliyeti (400 mL için) = $3 \times 10^{-6} \times 22,9814 = 0,000077$ kr./400 mL

Enerji maliyeti(m³ için) = $0,008333 \times 22,9814 = 0,191512$ kr./ m³

EK 5 – Örnek Elektrot Maliyeti Hesabı – Monopolar Fe-Fe Elektrot

Monopolar Fe-Fe elektrot

$$t = 1 \text{ dk} = 60 \text{ sn}$$

$$I = 0,1 \text{ A}$$

$$M_{\text{Fe}} = 55,845 \text{ g/mol}$$

$$\text{Faraday Sabiti (F)} = N_A \times q = 96485 \text{ C/mol}$$

$$\text{Değerlik elektron sayısı (z)} = 3$$

Teorik olarak harcanan elektrot kütlesi (400 mL başına)=

$$m = \frac{I \times t \times M}{F \times z} = 0,1 \times 60 \times 55,845 / (96485 \times 3) = 335,07 / 28945 = 0,0011575893 \text{ g/400 mL}$$

Teorik olarak harcanan elektrot kütlesi (m^3 başına)=

$$m = 2500 \times 0,0011575893 = 2,89397 \text{ g/m}^3$$

Demirin birim fiyatı= 2700 TL/ton

Teorik olarak harcanan elektrot maliyeti(400 mL başına)=

$$0,0011575893 \times 2700 \times 10^{-6} \times 10^2 = 0,000313 \text{ kr./400 mL}$$

Teorik olarak harcanan elektrot maliyeti (m^3 başına)=

$$0,000313 \times 10^6 / 400 = 0,781373 \text{ kr./ m}^3$$

(Bipolar Fe-Fe elektrot da aynı şekilde hesaplanmaktadır.)

EK 6 – Örnek Elektrot Maliyeti Hesabı – Monopolar Al-Al Elektrot

Monopolar Al-Al elektrot

$$t = 1 \text{ dk} = 60 \text{ sn}$$

$$I = 0,1 \text{ A}$$

$$M_{\text{Al}} = 26,9815 \text{ g/mol}$$

$$\text{Faraday Sabiti (F)} = N_A \times q = 96485 \text{ C/mol}$$

$$\text{Değerlik elektron sayısı (z)} = 3$$

Teorik olarak harcanan elektrot kütlesi (400 mL başına)=

$$m = \frac{I \times t \times M}{F \times z} = 0,1 \times 60 \times 26,9815 / (96485 \times 3) = 0,0005559 \text{ g/400 mL}$$

Teorik olarak harcanan elektrot kütlesi (m^3 başına)=

$$m = 2500 \times 0,0005559 = 1,398223 \text{ g/m}^3$$

Alüminyumun birim fiyatı= 8300 TL/ton

Teorik olarak harcanan elektrot maliyeti(400 mL başına)=

$$0,0005559 \times 8300 \times 10^{-6} \times 10^2 = 0,000464 \text{ kr./400 mL}$$

Teorik olarak harcanan elektrot maliyeti (m^3 başına)=

$$0,000464 \times 10^6 / 400 = 1,160525 \text{ kr./ m}^3$$

(Bipolar Al-Al elektrot da aynı şekilde hesaplanmaktadır.)

EK 7 – Örnek Elektrot Maliyeti Hesabı – Monopolar Al-Fe Elektrot

Monopolar Al-Fe Elektrot

t= 1 dk

Demirin aktif elektrot olduğu süre t= 0,5 dk

Alüminyumun aktif elektrot olduğu süre t= 0,5 dk

Demir elektrot

t= 0,5 dk

I=0,1 A

$M_{Fe}=55,845$ g/mol

Faraday Sabiti (F)= $N_A \times q= 96485$ C/mol

Değerlik elektron sayısı (z)=3

Teorik olarak harcanan elektrot kütlesi (400 mL başına)=

$$m = \frac{I \times t \times M}{F \times z} = 0,1 \times 0,5 \times 60 \times 55,845 / (96485 \times 3) = 0,000579 \text{ g/400 mL}$$

Teorik olarak harcanan elektrot kütlesi (m^3 başına)=

$$m=2500 \times 0,000579=1,446987 \text{ g/m}^3$$

Demirin birim fiyatı= 2700 TL/ton

Teorik olarak harcanan elektrot maliyeti(400 mL başına)=

$$0,000579 \times 2700 \times 10^{-6} \times 10^2 = 0,000156 \text{ kr./400 mL}$$

Teorik olarak harcanan elektrot maliyeti (m^3 başına)=

$$0,000156 \times 10^6 / 400 = 0,390686 \text{ kr./ m}^3$$

Alüminyum elektrot

t= 0,5 dk

I=0,1 A

$M_{Al}=26,9815$ g/mol

Faraday Sabiti (F)= $N_A \times q= 96485$ C/mol

Değerlik elektron sayısı (z) =3

Teorik olarak harcanan elektrot kütlesi (400 mL başına)=

$$m = \frac{I \times t \times M}{F \times z} = 0,1 \times 0,5 \times 60 \times 26,9815 / (96485 \times 3) = 0,000280 \text{ g}/400 \text{ mL}$$

Teorik olarak harcanan elektrot kütlesi (m³ başına)=

$$m = 2500 \times 0,000280 = 0,699111 \text{ g}/\text{m}^3$$

Alüminyumun birim fiyatı= 8300 TL/ton

Teorik olarak harcanan elektrot maliyeti(400 mL başına)=

$$0,000280 \times 8300 \times 10^{-6} \times 10^2 = 0,000232 \text{ kr.}/400 \text{ mL}$$

Teorik olarak harcanan elektrot maliyeti (m³ başına)=

$$0,000232 \times 10^6 / 400 = 0,580262 \text{ kr.}/\text{m}^3$$

Teorik olarak harcanan **toplam** elektrot maliyeti(400 mL başına)=

$$0,000156 + 0,000232 = 0,000388 \text{ kr.}/400 \text{ mL}$$

Teorik olarak harcanan **toplam** elektrot maliyeti (m³ başına)=

$$0,390686 + 0,580262 = 0,970949 \text{ kr.}/\text{m}^3$$

(Bipolar Al-Fe elektrot da aynı şekilde hesaplanmaktadır.)

EK 8 – Örnek Toplam Maliyet Hesabı – Monopolar Fe-Fe Elektrot

Monopolar Fe-Fe elektrot

$t = 1$ dk

$I = 0,1$ A

Enerji maliyeti (400 mL başına) = $0,000077$ kr./400 mL

Teorik olarak harcanan demir elektrot maliyeti (400 mL başına) = $0,000313$ kr./400 mL

Toplam maliyet (400 mL başına) =

$0,000077$ kr./400 mL + $0,000313$ kr./400 mL = $0,000389$ kr./400 mL

Enerji maliyeti (m^3 başına) = $0,191512$ kr./ m^3

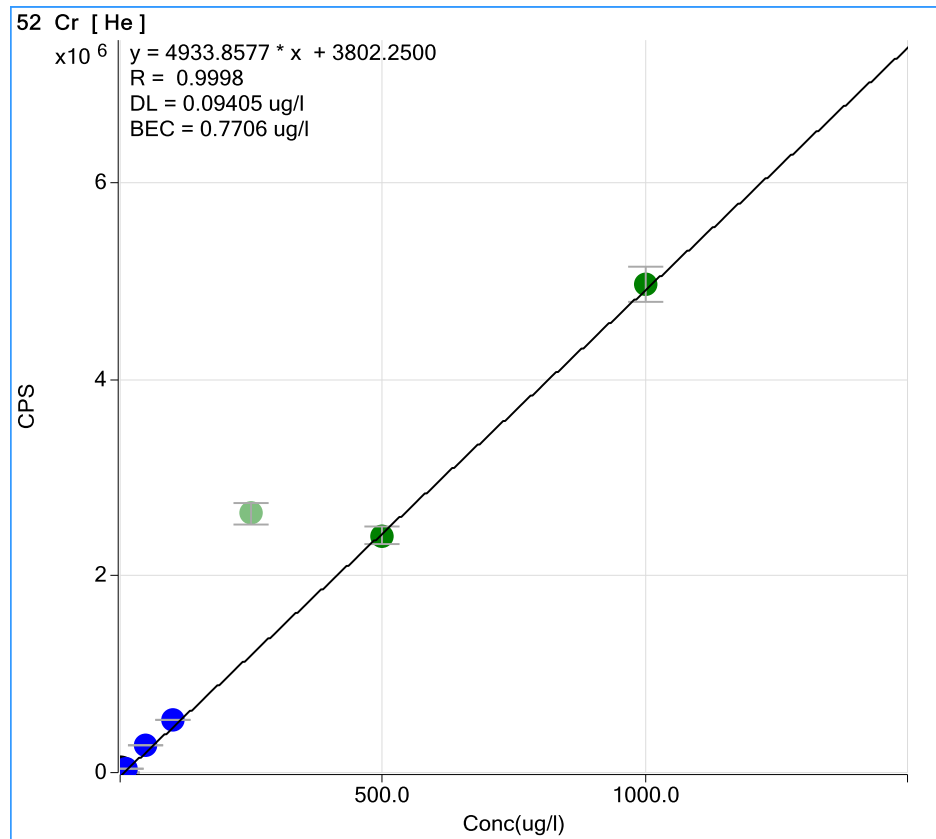
Teorik olarak harcanan demir elektrot maliyeti (m^3 başına) = $0,781373$ kr./ m^3

Toplam maliyet (m^3 başına) =

$0,191512$ kr./ m^3 + $0,781373$ kr./ m^3 = $0,972884$ kr./ m^3

EK 9 – Toplam Cr Analizi Sonuçları

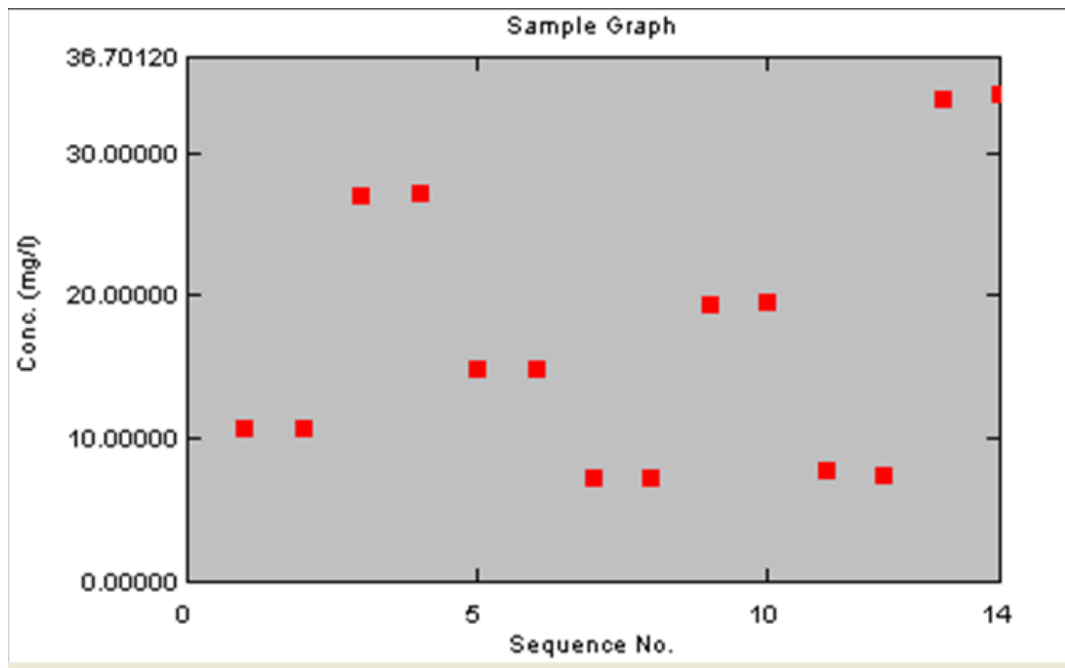
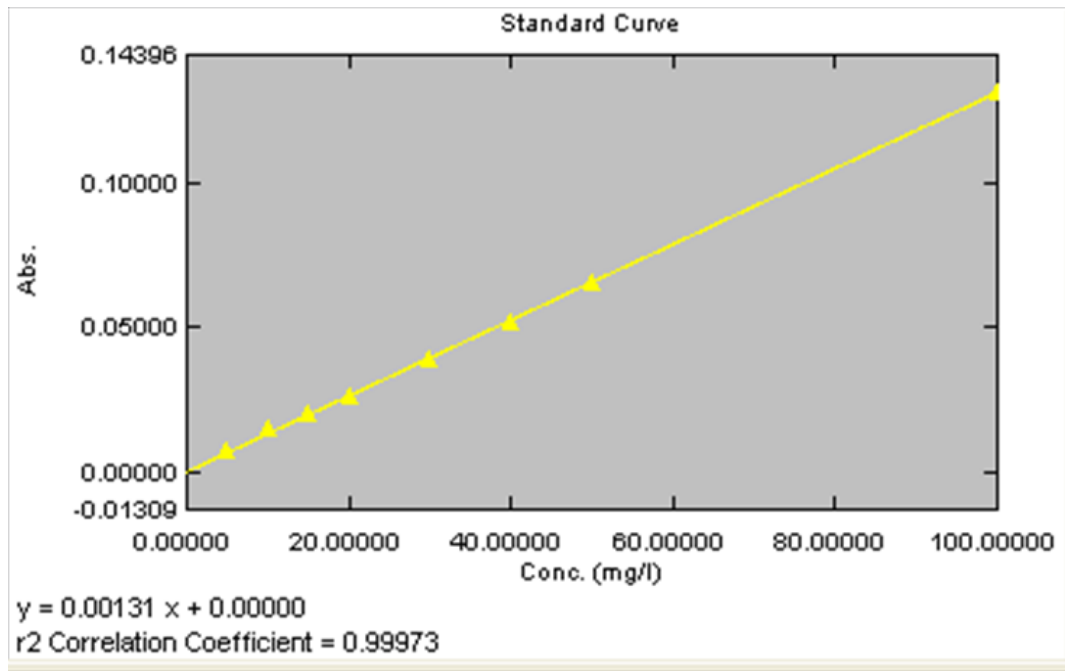
Sample	52 Cr [He]	
Sample Name	Conc. [ug/l]	Conc. RSD
0	0	N/A
2	<0.000	N/A
5	1,18200327	9,4516959
10	7,43661652	2,8799033
50	55,1912382	1,4831457
100	107,590947	1,3016345
250	532,695962	7,8025874
500	487,608667	7,2113803
1000	1005,20264	7,0997194
Sample 1000x	<0.000	N/A
Sample 100x	<0.000	N/A
Sample 10x	<0.000	N/A
Sample	0,12431489	9,2622026



EK 10- Renk Ölçüm Verileri

Sample ID	Conc	WL456.0
Ham atıksu1	10,68413	0,01399
Ham atıksu2	10,68413	0,01399
Monopolar FeFe1	26,96082	0,03531
Monopolar FeFe2	27,10063	0,03549
Monopolar AlAl1	14,92516	0,01955
Monopolar AlAl2	14,91350	0,01953
Monopolar AlFe1	33,81171	0,04428
Monopolar AlFe2	34,02143	0,04456
Bipolar FeFe1	7,22373	0,00946
Bipolar FeFe2	7,31694	0,00958
Bipolar AlAl1	19,37590	0,02538
Bipolar AlAl2	19,58563	0,02565
Bipolar AlFe1	7,50336	0,01030
Bipolar AlFe2	7,50336	0,00983

(Grafikler bir sonraki sayfadadır.)



EK 11 Zeta Potansiyeli Ölçüm Verileri

Sample ID	Record	ZP (mV)
Ham atıksu1	01	-4,39
Ham atıksu2	02	-4,92
Ham atıksu3	03	-5,22
Monopolar FeFe1	11	-7,42
Monopolar FeFe2	12	-8,07
Monopolar FeFe3	13	-8,18
Monopolar AlAl1	21	-9,02
Monopolar AlAl2	22	-10,9
Monopolar AlAl3	23	-10,3
Monopolar AlFe1	31	-8,86
Monopolar AlFe2	32	-10,2
Monopolar AlFe3	33	-11,2
Bipolar FeFe1	41	-9,27
Bipolar FeFe2	42	-9,05
Bipolar FeFe3	43	-9,16
Bipolar AlAl1	51	-9,08
Bipolar AlAl2	52	-10,2
Bipolar AlAl3	53	-10,1
Bipolar AlFe1	61	-10,6
Bipolar AlFe2	62	-11,5
Bipolar AlFe3	62	-11,6

