

**PETROL FORMASYON SUYUNDAKI
TUZLULUĞUN KİMYASAL KOAGÜLASYON
ÖNİŞLEMİ İLE DEMİR ELEKTROTLAR
KULLANILARAK ELEKTROKOAGÜLASYONLA
GİDERİLMESİ**

ŞEHNAZ GÖKŞEN
Yüksek Lisans Tezi

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı
OCAK - 1998

Şehnaz GÖKŞEN'in Yüksek Lisans tezi olarak hazırladığı "Petrol Formasyon Suyundaki Tuzluluğun Koagülasyon Önışlemiyle Demir Elektrotlar Kullanılarak Elektrokoagülasyonla Giderilmesi" başlıklı tez 10 / 02 / 1998 tarihinde aşğıdaki jüri tarafından Lisansüstü Öğretim Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değeriendirilerek kabul edilmiştir.

Üye (Danışman) : Doç. Dr. Ülker BAKIR ÖĞÜTVEREN

Üye : Prof. Dr. M. Ercengiz YILDIRIM

Üye : Yrd. Doç. Dr. A. Savaş KOPARAL

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
19.02.1998 tarih ve 3/5 sayılı kararıyla onaylanmıştır.

ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

**PETROL FORMASYON SUYUNDAKİ TUZLULUĞUN KOAGÜLASYON ,
ÖNİŞLEMİ İLE DEMİR ELEKTROTLAR KULLANILARAK
ELEKTROKOAGÜLASYONLA GİDERİLMESİ**

ŞEHNAZ GÖKŞEN

**Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Ülker BAKIR ÖĞÜTVEREN
1998, Sayfa 84**

Yapılan çalışmada petrol formasyon suyunda, tuzluluğu oluşturan Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Cl^- , SO_4^- ve HCO_3^- iyonlarının elektrokoagülasyonla giderimi araştırılmıştır. Elektrokoagülasyonda demir elektrotlar kullanılmış, reaktörün ve karıştırıcının anot olma durumu ayrı ayrı incelenmiştir.

Çalışmada uygulanan akımın, pH'nın, işlem sürelerinin, karıştırma hızının ve destek elektrolit kullanımının giderime etkisi araştırılmıştır. Atıksuyun tuz içeriği yalnız elektrokoagülasyonla giderilemediğinden koagülasyon, adsorbsiyon, elektrokoagülasyon ve elektrodializ işlemlerinin bir arada bulunduğu bir karma sistem de uygulanmıştır.

Elde edilen sonuçlar, yüksek derişimlerde tuz içeren atıksuların karma sistemle % 100 arıtılabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Petrol drenaj suları, atıksu, tuzluluk, tuz uzaklaştırma, klorür, sülfat, bikarbonat, kalsiyum, magnezyum, sodyum, elektrokoagülasyon, elektrodializ, koagülasyon

ABSTRACT
Master of Science Thesis

**DESALINATION OF PETROLEUM FORMATION SALINE WATER BY
ELECTROCOAGULATION USING IRON ELECTRODES WITH
PRETREATMENT APPLYING COAGULATION**

ŞEHNAZ GÖKŞEN

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

**Supervisor: Assoc. Prof. Ülker BAKIR ÖĞÜTVEREN
1998, Page 84**

In this study, the feasibility of removal of ions such as Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Cl^- , SO_4^{--} and HCO_3^- which caused salinity in petroleum formation water by electrocoagulation. Studies were conducted using iron reactor and stirrer being either anode or cathode.

The effects of pH, current, time, stirring velocity, polarity of electrodes and supporting electrolyte on the removal rate of ions were investigated. Since it was not possible to remove all ions by electrocoagulation only, a combined system consists of coagulation, adsorption, electrocoagulation and electro dialysis processes was applied for the removal of ions.

Full removal of ions was attained applying the combined system.

Keywords: Petroleum drainage water, wastewater, salinity, desalination, chloride, sulphate, bicarbonate, calcium, magnesium, sodium, electrocoagulation, electro dialysis, coagulation.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. SU ve TOPRAK KİRLİLİĞİ	2
2.1. Su Kirliliği	2
2.1.1. Fiziksel kirleticiler	2
2.1.1.1. Bulanklık	2
2.1.1.2. Sıcaklık	2
2.1.1.3. Katı maddeler	3
2.1.1.4. Renk koku ve tat	3
2.1.2. Kimyasal kirleticiler	3
2.1.2.1. Durumunu değiştirmeyen kimyasal kirleticiler	3
2.1.2.2. Değişebilen kimyasal kirleticiler	3
2.1.2.3. Kalıcı kimyasal kirleticiler	4
2.1.3. Su kirliliği ile ilgili yasal düzenlemeler	5
2.2. Toprak Kirliliği	10
2.2.1. Sıvı atıkların toprağa verilmesi	10
2.2.2. Sulama suyunun toprağa etkisi	10
3. ATIKSULARDA ve PETROL FORMASYON SUYUNDA ÇÖZÜNÜMÜŞ TUZLARIN ZARARLARI	12
3.1. Sodyum	12
3.2. Kalsiyum ve Magnezyum (Sertlik)	14
3.3. Bikarbonatlar (Alkalinite)	15
3.4. Klorürler	16
3.5. Sülfatlar	16
3.6. Petrol Sahası Tuzlu Suları	17
4. ATIKSULARDA ve PETROL FORMASYON SUYUNDA ÇÖZÜNÜMÜŞ TUZLARIN UZAKLAŞTIRILMA YÖNTEMLERİ	20
4.1. Konuyla İlgili Yapılan Çalışmalar	23
5. PIHTILAŞTIRMA - YUMAKLAŞMA	32
5.1. Tanım	32
5.2. Pıhtılaştırma Süreci	32

İÇİNDEKİLER (Devam)

5.3. Yumaklaşma Süreci	33
5.4. Pıhtılaştırma ve Yumaklaşmanın Teorisi	33
5.5. Pıhtılaştırma-Yumaklaşma Sürecinde Kullanılan Kimyasal Maddeler ...	36
5.6. Uygulama Alanları	37
6. ELEKTROKOAGÜLASYON	38
6.1. Tanım	38
6.2. Uygulama Alanları	38
7. ELEKTRODİYALİZ	40
7.1. Elektrodializ Tanımı	40
7.2. Elektrodializde Kullanılan İyon Değişim Membranları	42
7.3. Elektrodializ Uygulama Alanları	43
8. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	46
8.1. Kullanılan Kimyasal Maddeler	46
8.2. Yardımcı Araçlar	46
8.3. Tayinler	47
8.4. Tuzluluğu Oluşturan İyonların Pıhtılaştırma ile Giderimi	47
8.5. Tuzluluğu Oluşturan İyonların Elektrokoagülasyon ile Giderimi	47
8.6. Tuzluluğu Oluşturan İyonların Elektrodializle Giderimi	48
8.7. Tuzluluğu Oluşturan İyonların Karma Sistemle Giderimi	50
8.8. Deney Sonuçlarının Hesaplanmasında Kullanılan Eşitlikler	50
8.8.1. % Giderim	51
8.8.2. Enerji tüketimi	51
9. DENEYSEL ÇALIŞMALARDAN ELDE EDİLEN SONUÇLAR	52
9.1. Tuzluluğu Oluşturan İyonların Pıhtılaştırma ile Giderim Sonuçları	52
9.2. Tuzluluğu Oluşturan İyonların Elektrokoagülasyon ile Giderim Sonuçları	52
9.2.1. Farklı reaktör ve karıştırıcı polarizasyonlarında elde edilen deney sonuçları	52
9.2.2. Farklı derişimlerde yardımcı çöktürücü ilavesinin tuzluluğu oluşturan iyonların giderimi ve enerji tüketimi üzerine olan etkisinin araştırıldığı deney sonuçları	53
9.2.2.1 Demir reaktör anot olduğunda elde edilen deney sonuçları	53
9.2.2.2 Demir karıştırıcı anot olduğunda elde edilen deney sonuçları	53
9.2.3. En iyi koşullarda elektrokoagülasyonla tuz giderimi sonuçları ...	53
9.2.3.1 pH'ın etkisinin araştırıldığı deney sonuçları	53
9.2.3.2 Karıştırma hızının etkisinin araştırıldığı deney sonuçları	53

İÇİNDEKİLER (Devam)

9.2.3.3. Yardımcı çöktürücü olarak farklı madde kullanımının etkisinin araştırıldığı deney sonuçları	54
9.2.3.4. Farklı anot ve katot malzemelerinin kullanımının etkisinin araştırıldığı deney sonuçları	54
9.2.5. Karma sistemle yapılan deneysel çalışma sonuçları	54
10. BULGULAR, YORUM ve ÖNERİLER	79
11. KAYNAKLAR	80
Ek 1. Sülfat iyonu derişiminin okunduğu çalışma doğrusu	

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
2.1. Kıtaiçi su kaynaklarının sınıflarına göre kalite kriterleri (Resmi Gazete: 4 Eylül 1988)	7
2.2. Sulama sularının sınıflandırılmasında esas alınan sulama suyu kalite kriterleri (Resmi Gazete: 7 Ocak 1991)	8
3.1. Toplam çözünmüş katı madde derişimleri açısından suların sınıflandırılması (Uslu, 1987)	12
3.2. Sodyum adsorbsiyon oranına göre sulama sularının sınıflandırılması (Uslu, 1987)	13
3.3. Suların tuzluluk ve sodyum miktarına göre sınıflandırılması (Uslu, 1987)	13
3.4. Sertlik sınıflandırılması (Jackson, 1993)	15
3.5. Petrol sahası tuzlu suları (Nemerow, 1978)	17
3.6. Petrol sahası tuzlu sularının mineral analizi (Train, 1979)	18
3.7. TPAO petrol formasyon suyu analizi (1993)	18
3.8. Çözünmüş tuzların (mg/L) sulama suyu için tehlikeleri (Train, 1979)	19
4.1. Elektrodializ tesislerinin performansı (Scott, 1995)	23
4.2. Farklı tuzluluktaki suların analizi (Adhikary, 1991)	25
4.3. Yüksek tuzluluğa sahip suyun tuz uzaklaştırma işlemi sonuçları (Adhikary, 1991)	26
4.4. Farklı tuzlu sulardan elde edilen suyun bileşimi (Adhikary, 1991)	27
4.5. Ters ozmoz tesislerinde işlenen ham ve ürün suyun kalitesi (Abdula'aly, 1994)	27
5.1. Pıhtılaştırma-Yumaklaştırma prosesinde en çok kullanılan kimyasal maddeler (Köseoğlu, 1996)	36
8.1. Ön işlem yapılmadan elektrodializ çalışmasıyla tuz giderimi sonuçları	49
9.1. Koagülasyonda iyon derişimlerinin değişimi	55
9.2. Koagülasyonda tuzluluk, pH ve iletkenlik değişimi	55
9.3. Reaktör anot iken elektrokoagülasyonda iyon derişimlerinin değişimi	55
9.4. Reaktör anot iken elektrokoagülasyonda tuzluluk, pH, iletkenlik ve enerji tüketimi değişimi	56
9.5. Karıştırıcı anot iken elektrokoagülasyonda iyon derişimlerinin değişimi	56
9.6. Karıştırıcı anot iken elektrokoagülasyonda tuzluluk, pH, iletkenlik ve enerji tüketimi değişimi	57
9.7. Reaktör anot iken yardımcı çöktürücü olarak Al ₂ O ₃ kullanıldığında iyon derişimlerinin değişimi	57
9.8. Reaktör anot iken yardımcı çöktürücü olarak Al ₂ O ₃ kullanıldığında tuzluluk, pH, iletkenlik ve enerji tüketimi değişimi	57
9.9. Karıştırıcı anot iken yardımcı çöktürücü olarak Al ₂ O ₃ kullanıldığında iyon derişimlerinin değişimi	58
9.10. Karıştırıcı anot iken yardımcı çöktürücü olarak Al ₂ O ₃ kullanıldığında tuzluluk, pH, iletkenlik ve enerji tüketimi değişimi	58
9.11. Reaktör anot iken yardımcı çöktürücü olarak Al ₂ O ₃ (1 g) kullanıldığında, pH = 9'da iyon derişimleri	58
9.12. Reaktör anot iken yardımcı çöktürücü olarak Al ₂ O ₃ (1 g) kullanıldığında pH= 9'da tuzluluk, pH, iletkenlik ve enerji tüketimi	58

ÇİZELGELER DİZİNİ (Devam)

9.13. Reaktör anot iken yardımcı çöktürücü olarak Al_2O_3 (1 g) kullanıldığında 70 devir/dk'da iyon derişimleri	59
9.14 Reaktör anot iken yardımcı çöktürücü olarak Al_2O_3 (1 g) kullanıldığında, 70 devir/dk'da tuzluluk, pH, iletkenlik ve enerji tüketimi	59
9.15. Reaktör anot iken yardımcı çöktürücü olarak Fe_2O_3 (1 g) kullanıldığında iyon derişimleri	59
9.16. Reaktör anot iken yardımcı çöktürücü olarak Fe_2O_3 (1 g) kullanıldığında tuzluluk, pH, iletkenlik ve enerji tüketimi	59
9.17. Reaktör anot iken alüminyum karıştırıcı katot olduğunda iyon derişimleri	59
9.18. Reaktör anot iken alüminyum karıştırıcı katot olduğunda tuzluluk, pH, iletkenlik ve enerji tüketimi	60
9.19. Pıhtılaştırma, adsorbsiyon ve elektrokoagülasyon (3,0 A, 50 dk, 1 g Al_2O_3) basamaklarından geçen suyun 10 V gerilimde elektrodiyalizle iyon derişimlerinin değişimi	60
9.20. Pıhtılaştırma, adsorbsiyon ve elektrokoagülasyon (3,0 A, 50 dk, 1 g Al_2O_3) basamaklarından geçen suyun 10 V gerilimde elektrodiyalizle tuzluluk, pH, iletkenlik ve enerji tüketimi değişimi	60
9.21. Pıhtılaştırma, adsorbsiyon ve elektrokoagülasyon (0,75 A, 30 dk) basamaklarından geçen suyun 10 V gerilimde elektrodiyalizle iyon derişimlerinin değişimi	60
9.22. Pıhtılaştırma, adsorbsiyon ve elektrokoagülasyon (0,75 A, 30 dk) basamaklarından geçen suyun 10 V gerilimde elektrodiyalizle tuzluluk, pH, iletkenlik ve enerji tüketimi değişimi	61
9.23. Karma sistemde (Elektrokoagülasyon: 3,0 A, 50 dk; Elektrodiyaliz: 10 V, 30 dk) iyon derişimlerinin değişimi	61
9.24. Karma sistemde (Elektrokoagülasyon: 3,0 A, 50 dk; Elektrodiyaliz: 10 V, 30 dk) tuzluluk, pH ve iletkenlik değişimi	61
9.25. Karma sistemde (Elektrokoagülasyon: 0,75 A, 30 dk; Elektrodiyaliz: 10 V, 30 dk) iyon derişimlerinin değişimi	61
9.26. Karma sistemde (Elektrokoagülasyon: 0,75 A, 30 dk; Elektrodiyaliz: 10 V, 30 dk) tuzluluk, pH ve iletkenlik değişimi	62

ŞEKİLLER DİZİNİ

2.1. Sulama sularının sınıflandırılmasında kullanılan diyagram (Resmi Gazete 7 Ocak 1991)	9
4.1. Membran distilasyonu için spiral birim (Scott, 1995)	22
4.2. Besleme suyunun toplam çözünmüş katı içeriğinin enerji tüketimi (Adhikary, 1991)	25
5.1. Negatif ana yüklü bir kolloidal tane etrafındaki çift tabakanın şematik görünüşü (Köseoğlu, 1996)	35
7.1. Genel bir elektrodializ şeması (Koparal, 1996)	41
7.2. Bir elektrodializ birimi (Tuwiner, 1962)	42
7.3. Tipik bir katyon değişim membranı (Koparal, 1996)	42
7.4. Tuzlu su arıtımında çeşitli süreçlerin maliyetlerinin karşılaştırılması (Koparal, 1996)	44
8.1. Elektrokoagülasyon deney düzeneği	48
8.2. Elektrodializ düzeneği	49
8.3. Karma sistem akış diyagramı	50
9.1. Reaktör anot iken klorür iyonu derişiminin zamanla değişimi	62
9.2. Reaktör anot iken sülfat iyonu derişiminin zamanla değişimi	63
9.3. Reaktör anot iken bikarbonat iyonu derişiminin zamanla değişimi	63
9.4. Reaktör anot iken sodyum iyonu derişiminin zamanla değişimi	64
9.5. Reaktör anot iken kalsiyum iyonu derişiminin zamanla değişimi	64
9.6. Reaktör anot iken % giderimin zamanla değişimi	65
9.7. Reaktör anot iken enerji tüketiminin zamanla değişimi	65
9.8. Klorür iyonu derişiminin farklı reaktör ve karıştırıcı polarizasyonlarında zamanla değişimi (Akım=0,75 A)	66
9.9. Sülfat iyonu derişiminin farklı reaktör ve karıştırıcı polarizasyonlarında zamanla değişimi (Akım=0,75 A)	66
9.10. Bikarbonat iyonu derişiminin farklı reaktör ve karıştırıcı polarizasyonlarında zamanla değişimi (Akım=0,75 A)	67
9.11. Sodyum iyonu derişiminin farklı reaktör ve karıştırıcı polarizasyonlarında zamanla değişimi (Akım=0,75 A)	67
9.12. Kalsiyum iyonu derişiminin farklı reaktör ve karıştırıcı polarizasyonlarında zamanla değişimi (Akım=0,75 A)	68
9.13. % giderimin farklı reaktör ve karıştırıcı polarizasyonlarında zamanla değişimi (Akım=0,75A)	68
9.14. Enerji tüketiminin farklı reaktör ve karıştırıcı polarizasyonlarında zamanla değişimi (Akım=0,75 A)	69
9.15. Karıştırıcı anot iken klorür iyonu derişiminin zamanla değişimi	69
9.16. Karıştırıcı anot iken sülfat iyonu derişiminin zamanla değişimi	70
9.17. Karıştırıcı anot iken bikarbonat iyonu derişiminin zamanla değişimi	70
9.18. Karıştırıcı anot iken sodyum iyonu derişiminin zamanla değişimi	71
9.19. Karıştırıcı anot iken kalsiyum iyonu derişiminin zamanla değişimi	71
9.20. Karıştırıcı anot iken magnezyum iyonu derişiminin zamanla değişimi	72
9.21. Karıştırıcı anot iken % giderimin zamanla değişimi	72
9.22. Karıştırıcı anot iken enerji tüketiminin zamanla değişimi	73

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

9.23. Reaktörün ya da karıştırıcının anot olduğu durumda yardımcı çöktürücü (Al_2O_3) derişiminin klorür derişimine etkisi	73
9.24. Reaktörün ya da karıştırıcının anot olduğu durumda yardımcı çöktürücü (Al_2O_3) derişiminin sülfat derişimine etkisi	74
9.25. Reaktörün ya da karıştırıcının anot olduğu durumda yardımcı çöktürücü (Al_2O_3) derişiminin bikarbonat derişimine etkisi	74
9.26. Reaktörün ya da karıştırıcının anot olduğu durumda yardımcı çöktürücü (Al_2O_3) derişiminin sodyum derişimine etkisi	75
9.27. Reaktörün ya da karıştırıcının anot olduğu durumda yardımcı çöktürücü (Al_2O_3) derişiminin kalsiyum derişimine etkisi	75
9.28. Reaktörün ya da karıştırıcının anot olduğu durumda yardımcı çöktürücü (Al_2O_3) derişiminin % giderime etkisi	76
9.29. Reaktörün ya da karıştırıcının anot olduğu durumda yardımcı çöktürücü (Al_2O_3) derişiminin enerji tüketimine etkisi	76
9.30. Karma sistemde işlem basamaklarının toplam tuzluluk derişimine etkisi (Elektrokoagülasyon: 3,0 A, 50 dk; Elektrodializ: 10 V, 30 dk)	77
9.31. Karma sistemde işlem basamaklarının giderime etkisi (Elektrokoagülasyon: 3,0 A, 50 dk; Elektrodializ: 10 V, 30 dk)	77
9.32. Karma sistemde işlem basamaklarının toplam tuzluluk derişimine etkisi (Elektrokoagülasyon: 0.75 A, 30 dk; Elektrodializ: 10 V, 30 dk)	78
9.33. Karma sistemde işlem basamaklarının giderime etkisi (Elektrokoagülasyon: 0,75 A, 30 dk; Elektrodializ: 10 V, 30 dk)	78

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

- A : Amper
AKM : Askıda Katı Madde (mg/L)
BOİ : Biyolojik Oksijen İstemi (mg/L)
C : Derişim (mg/L)
ÇO : Çözünmüş oksijen (mg/L)
EC : Eleltriysel İletkenlik (mS/cm)
EDR : Geri Döngülü Elektrodializ
I : Akım (Amper)
KOİ : Kimyasal Oksijen İstemi (mg/L)
M : Toplam tuz derişimi ile eleltriysel iletkenlik arasındaki oran katsayısı
RSC : Sodyum Karbonat Kalıtısı (mg/L)
SAR : Sodyum Adsorbsiyon Oranı
TDS : Toplam Çözünmüş Katı
TMD : Isıl Membran Distilasyonu
TOK : Toplam Organik Karbon
V : Gerilim (Volt)
- AET : Avrupa Ekonomik Topluluğu
PHS : Amerikan Halk Sağlığı Servisi

1. GİRİŞ

Son yıllarda tüm dünyada, toplumun her kesiminde giderek artan bir oranda önem verilen konulardan biri de çevre sorunlarıdır. Ekolojik sisteme insanoğlunun yaptığı etkiler, sonuçta çevre sorunu olarak ortaya çıkmaktadır [1].

İnsanoğlu rahat ve modern bir yaşama kavuşabilmek için sanayileşmeye önem vermiş, doğal kaynakları hiç bitmeyecekmiş gibi sınırsızca kullanırken doğaya verdiği zararı gözardı etmiştir. Ancak, yaşadığı ortamın dengesinin bozulup kendisini etkilemeye başlamasıyla çevresini koruması gerektiğini anlamıştır [2].

Çağımızdaki teknolojik gelişmeler, hızlı nüfus artışı ve daha fazla tüketimle birlikte, alıcı ortamlara verilen atıkların miktarlarında ve çeşitliliğinde bir artış gözlenmektedir. Bu artış ve özellikle yeni kirleticilerin ortaya çıkması, su kaynaklarının, toprağın ve atmosferin yararlı kullanımını azaltmaktadır. Kullanılabilir su kaynaklarının her geçen gün azalması, mevcut su kaynaklarının korunmasının önemini artırmaktadır [3]. Endüstriyel atıkları zararsız hale getirmek için yapılan çalışmalar, yeni yatırımları gerektirmektedir. Bilinçsizce yapılan kirliliği temizlemek için her işletmenin bir arıtım tesisi koyması ekonomik olmamakla birlikte yeni kirliliklere de neden olmaktadır. Kirlettikten sonra temizlemek yerine kirleticiyi kaynağında yoketmek daha ekonomik olmaktadır [4].

Yüzyılımızın sonunda dünya üretim biçiminin artık sınır tanımaz küresel bir sistem haline gelmiş olması, çevre sorunlarının da ulusal değil, evrensel ölçekte incelenmesini gerektirmektedir. [5].

Atıksuların su kaynaklarını kirletmesini önlemek amacıyla arıtılmalarında farklı teknikler uygulanmaktadır. Bu tekniklerin bir kısmı pratikte kullanılmakla birlikte, bir kısmı henüz laboratuvar aşamasındadır. Sözü edilen tekniklerin en önemli ortak özelliği, atıksularda bulunan istenmeyen bileşiklerin uzaklaştırılmasıdır. Son yıllarda atıksuların elektrokimyasal yolla arıtımı, üzerinde yoğunlaşılacak bir konu haline gelmiştir. Elektrokimyasal teknikle atıksu arıtımı farklı yöntemlerle yapılabilir. Bu yöntemler; katodik indirgeme, elektroadsorbsiyon, anodik yükseltgeme, elektrodializ, elektrokoagülasyon ve elektroflotasyondur.

Yakın zamanlara kadar su kirlenmesinin incelenmesi sağlık açısından ele alınmıştır. Gelişmekte olan ve az gelişmiş ülkeler için bu fikir, hala güncelliğini korumaktadır. Herşeyden önce toplumların ihtiyacı olan sağlıklı içme ve kullanma suyunun sağlanması gerekir. Bunu, kullanılmış suların uygun bir şekilde uzaklaştırılması ve diğer çevre sorunlarının çözümü izler. Bugün su kirlenmesi, sadece sağlık açısından değil, kaynakların korunması ve en uygun şekilde kullanılmasının sağlanması yollarının araştırılması yönüyle de ele alınmaktadır [6].

Dünya üzerinde uygun kalitede su içeren kaynakların bulunması gün geçtikçe zorlaşmakta, bulunan kaynakların uygun hale getirilmesi ise özel bir güç harcanmasını gerektirmektedir. Bu nedenle tuz uzaklaştırma sistemleri kurulurken ve özellikleri belirlenirken suyun gerikazanımı önemli bir etken olmuştur [7].

SU VE TOPRAK KİRLİLİĞİ

2.1. Su Kirliliği

Su kirliliğinin çok çeşitli tanımları yapılmaktadır. IULA Çevre Terimleri Sözlüğü'nde su kirliliği, "Suyun yararlı kullanımını etkileyecek miktarlarda kimyasal, fiziksel veya biyolojik maddelerin katılmasıyla kalitesinin bozulması" olarak tanımlanmaktadır.

AET Konseyi'nin kabul ettiği su kirliliği tanımı ise; "İnsan sağlığını tehlikeye sokacak, canlılara ve ekolojik su sistemine zarar verecek, rekreasyonu tehlikeye sokacak veya suların diğer meşru kullanımını güçleştirecek nitelikte sonuçlar yaratan, insanlar tarafından su ortamına, doğrudan doğruya veya dolaylı bir şekilde her türlü madde ve enerji atımıdır" şeklindedir.

Ülkemiz yasalarında ise su kirliliği, 4 Eylül 1988 tarihli 19919 sayılı Resmi Gazetede; "Su kaynağının kimyasal, fiziksel, bakteriyolojik, radyoaktif ve ekolojik özelliklerinin olumsuz yönde değişmesi şeklinde gözlenen ve doğrudan veya dolaylı yollardan biyolojik kaynaklarda, insan sağlığında, balıkçılıkta, su kalitesinde ve suyun diğer amaçlarla kullanılmasında engelleyici bozulmalar yaratacak madde veya enerji atıklarının boşaltılmasıdır" şeklinde tanımlanmıştır.

Aynı kanunda atıksu için yapılan tanım ise; "Evsel, endüstriyel, tarımsal ve diğer kullanımlar sonucunda kirlenmiş veya özellikleri kısmen veya tamamen değişmiş sular ile maden ocakları ve cevher hazırlama tesislerinden kaynaklanan sular ve yapılaşmış kaplamalı ve kaplamasız şehir bölgelerinden cadde, otopark ve benzeri alanlardan akışların yüzey veya yüzeyaltı akışa dönüşmesi sonucunda gelen sulardır" şeklindedir [8].

Su kirliliğine neden olan etkenler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

2.1.1. Fiziksel kirleticiler

2.1.1.1. Bulanıklık

Suda bulunan askıdaki maddeler ve kolloid parçacıklar ışığın sudan geçişini engeller. Bu geçirimsizlik, suyun bulanıklığı olarak adlandırılır. Bulanıklık, suyun kolloid ve askıda katı madde içeriğini gösteren bir su kalite parametresidir. Bulanıklık hızlı kum filtrelerinde sık geri yıkama gereksinimine yol açar ve klor kullanımını artırır [9].

2.1.1.2. Sıcaklık

Sıcaklık kimyasal tepkimeleri ve hızlarını, doğal sulardaki yaşamı ve suyun insan kullanımına uygunluğunu belirlemesi nedeniyle çok önemli bir parametredir. Yüksek sıcaklıktaki suların alıcı ortamlara verilmesi, sudaki oksijenin yüksek oranda tüketilmesine yol açabilir. [9].

Döküldüğü su ortamında 1,5 °C'lik değişiklik oluşturan atık suların, canlı yaşamının dengesini bozduğu ve sıcaklık farkının yüksek olmasının suların döküldüğü kanallarda da tahribat yarattığı belirtilmiştir [10].

Sıcaklık için üst sınır 32 °C olup, doğal su sıcaklığının akarsularda 3 °C ve göllerde 2 °C'den fazla yükseltilmesine izin verilmez. Su sıcaklığının yükselmesi, çoğunlukla kirli suların istenmeyen özelliklerini daha da belirginleştirir ve büyütür [11].

2.1.1.3. Katı maddeler

Analitik olarak bir ham suyun toplam katı madde miktarı, 103-105 °C'deki buharlaştırma sonunda kalan katı madde miktarıdır. Bu sıcaklıkta belirli bir buhar basıncına sahip maddeler buharlaşma sonucu kaybolur ve katı madde olarak tanımlanmazlar. Toplam katı madde "Toplam Askıda Katı Madde" ile "Toplam Çözünmüş ve Kolloidal Katı Madde" şeklinde sınıflandırılabilir. Çökebilen katı maddeler bir atıksu arıtım tesisinin işletilmesi hakkında bilgi verir [9].

2.1.1.4. Renk, koku ve tat

Atıksulardaki kokunun, genellikle çözünmüş gazlar ve uçucu organik bileşiklerden ileri geldiği, atıksulardaki belirli inorganik ve organik bileşiklerin, sudaki balık ve diğer canlılarda karakteristik ve hoşta gitmeyen bir tat oluşturduğu bilinmektedir.

Kaplıca suları ve içme suyu olarak kullanılan sularda renk, genellikle estetik yönden istenmez. Koyu renkli sular, güneş ışınlarının geçişini engellemesi nedeniyle balıklar ve suda yaşayan diğer canlılar için zararlı olmaktadır. Çünkü bu durumda fotosentez yavaşlar, buna bağlı olarak çözünmüş oksijen düzeyi düşer ve suda yaşayan canlılar arasındaki denge bozulur [10].

2.1.2. Kimyasal kirleticiler

Su kirliliğine neden olan kimyasal kirleticiler üç grupta incelenebilir.

2.1.2.1. Durumunu değiştirmeyen kimyasal kirleticiler

Zamanla bir değişikliğe uğramayan klorür ve bunun gibi inorganik bileşiklerdir. Bu maddelerde kimyasal ve biyolojik parçalanma olmaz.

2.1.2.2. Değişebilen kimyasal kirleticiler

7 Ocak 1991 tarih, 20748 sayılı Resmi Gazete'de biyolojik olarak parçalanabilen organik maddeler, "değişebilen kimyasal kirleticiler" olarak tanımlanmıştır. Bu maddeler mikroorganizmalar tarafından bozundurulur ve inorganik kararlı maddelere dönüşürler. Burada Biyokimyasal Oksijen İstemi (BOİ), Kimyasal Oksijen İstemi (KOİ), Çözünmüş Oksijen (ÇO) parametreleri önem kazanmaktadır.

BOİ, ayrışabilen organik maddelerin aerobik şartlar altında bakteriler tarafından parçalanması için gereken oksijen miktarıdır. Kullanılan oksijen miktarı, kullanılan maddelerin miktarı ile orantılı olduğundan BOİ, organik maddelerin miktarının tayini için dolaylı bir yol sayılabilir.

Balıkların ve suda yaşayan diğer organizmaların yaşamlarını devam ettirebilmek için belirli derişimlerde oksijene gereksinimleri vardır. Yüksek derişimlerde, parçalanabilen organik maddeler içeren atıksular, bakteriler tarafından kullanılırken, yüzeysel sudaki oksijenin azalmasına ve oksijensiz yaşayamıyan canlı hayatın sona ermesine neden olur. Ortamdaki oksijenin kaybolmasıyla havasız çürüme başlar ve etrafa rahatsız edici kokular yayılır [10].

Değişebilen kimyasal kirleticiler arasında, kükürtlü ve azotlu bileşikler ile serbest klor da önem kazanmaktadır. Kükürt kısmen organik yapıya girebilen, onun dışında doğal dolanımında en çok anorganik durumda yeralan bir elementtir. Sularda az miktarda sülfür ve daha çok miktarda da sülfat halinde bulunabilir. Özellikle anaerobik ayrışma sonunda indirgenen kükürt, ikinci aşamada kötü kokulu ve zehirli bir gaz olan H_2S 'e dönüşür [12].

KOİ, atıksuların kirlilik derecesini belirlemede kullanılan önemli bir parametredir. BOİ'den farklı olarak yükseltgenebilen organik maddelerin biyokimyasal tepkimelerle değil, redoks tepkimeleriyle yükseltgenmesi temeline dayanır. Biyokimyasal yükseltgenme bazı organik maddelerde çok hızlı olmasına karşın, diğer bazı maddelerde çok yavaş olabilirken, kimyasal yükseltgenmede, maddenin biyolojik olarak ayrışıp ayrışmadığı önemli değildir. Yükseltgen ortamda organik maddelerdeki karbon, +4 değerliğe yükseltgenerek karbondioksit'e dönüşür.

Atıksularla atılıp yüzeysel sulara karışan azotlu maddelerin, karbon ve fosfor gibi genelde aynı kaynaklı sayılabilecek diğer besin maddeleri ile birlikte, su ortamlarında aşırı beslenmeyle ilgili "ötrofikasyon" olayına neden olduğu bilinmektedir. Göl ve benzeri yerlerde ortaya çıkan bu olayda, su bitkilerinin, alglerin ve mikroorganizmaların aşırı üremeleri ve daha sonra ölüp çökelmeleriyle dip çamuru sürekli yükselerek bataklık oluşur.

Klor, su ve atıksu arıtımında hem yükseltgen, hem de dezenfektan olarak kullanılmaktadır. Yükseltgen olarak sularda tat, koku ve renk giderilmesinde; evsel atık sularda ise koku kontrolü, sülfür yükseltgemesi, amonyak giderimi ve dezenfeksiyon amacıyla ve soğutucularda, soğutma kolonlarında, yüzme havuzlarında yosunlanmayı ve kireçlenmeyi önlemek için kullanılmaktadır [13].

2.1.2.3. Kalıcı kimyasal kirleticiler

7 Ocak 1991 tarih, 20748 sayılı Resmi Gazete'de kalıcı kimyasal kirleticiler olarak, zamanla birikime yol açan civa, arsenik, krom, kurşun, kadmiyum, bakır gibi metaller, deterjanlar ve tarım ilaçları verilmektedir. Uzun yarılanma süresine sahip birçok radyoaktif madde de görelî olarak kalıcıdır. Parçalanma çok az olacağından, bu kirleticilerin derişimleri alıcı suya ilavelerle gittikçe artar ve gıda zincirine girerek canlıların vücutlarında birikir [10].

Diğer yandan hidrojen iyonu derişimi de su kaynakları için önemli bir parametredir. Biyolojik yaşam için uygun olan hidrojen iyonu derişim aralığı oldukça

dardır. Su kaynaklarındaki mikro ve makro yaşamın korunması ve istenmeyen kimyasal tepkimelerin önlenmesi için pH değerinin kontrol edilmesi gerekir [9].

Deşarj noktasında pH değerinin ani olarak değişmesi, bu değişikliklere karşı hassas olan bitki ve hayvanların ölümlerine neden olur. İzin verilen pH sınırı, balık hayatının korunması ve yüksek alkali veya asit özellikteki atıksu deşarjlarının önlenmesi bakımından 6,5 - 8,5 arasında tutulur [11].

Türkiye’de genel olarak sulara boşaltılacak atıklar için pH aralığı 6,0 - 9,0 olarak belirlenmiştir.

2.1.3. Su kirliliği ile ilgili yasal düzenlemeler

Kirlenmeye başlamış ve kendi kendini doğal-biyolojik yoldan temizleyemez hale gelmiş su kaynakları, genel olarak deşarj standartları uygulanarak korunur [11].

İçme suyu kaynaklarının korunmasına yönelik ilk yasal düzenleme 1593 sayılı Umumi Hıfzıssıhha Kanunu’nda yer almaktadır. Bu yasa ile içme amaçlı su sağlanan kaynakların korunması, ayrıca lağım sularının dere, çay ve nehirlere verilmesine sınırlama getirilmesi sağlanmıştır.

Daha sonra 1380 sayılı Su Ürünleri Kanunu çıkarılmıştır. Bu yasa, denizlerde ve iç sularda su ürünleri üretilmesini düzenlerken, bu ortamların kirlenmesini de önlemeye yönelik hükümler içermektedir.

Kirliliğin denetiminde gerekli sınır değerler, her yıl Tarım ve Köy İşleri Bakanlığı Koruma ve Kontrol Genel Müdürlüğü’nce hazırlanıp 28 Şubat’ta Resmi Gazete’de yayınlanan Su Ürünleri Avcılığı’nı düzenleyen sirkülerde yer almaktadır.

2872 sayılı Çevre Kanunu (9 Ağustos 1983) tüm çevre sorunlarını önlemeye yönelik kapsamlı ilk yasal düzenlemedir. Yasanın amacı, “Bütün vatandaşların ortak varlığı olan çevrenin korunması, iyileştirilmesi; kırsal ve kentsel alanda arazinin ve doğal kaynakların en uygun şekilde kullanılması ve korunması; su, toprak ve havanın kirlenmesinin önlenmesi; ülkenin bitki ve hayvan varlığı ile doğal ve tarihsel zenginliklerinin korunarak bugünkü ve gelecek kuşakların sağlık, uygarlık ve yaşam düzeyinin geliştirilmesi ve güvence altına alınması için yapılacak düzenlemelerin ve alınacak önlemlerin, ekonomik ve sosyal kalkınma hedefleriyle uyumlu olarak belirli hukuki ve teknik esaslara göre düzenlemektir”.

4 Eylül 1988 tarihli Resmi Gazete’de Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği yayınlanmıştır. Bu yönetmelik su kirliliğini önlemedeki en kapsamlı ve ayrıntılı yasal düzenleme olup önemli bir boşluğu doldurmuş bulunmaktadır. [8].

Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği’nce yayınlanmış tebliğler kendi ilgi alanlarında düzenlemeler getirmektedir.

- İdari Usuller Tebliği (1989)
- Sudaki Tehlikeli ve Zararlı Maddeler Tebliği (1989)
- Numune Alma ve Analiz Metotları Tebliği (1991).

4 Eylül 1988 tarih ve 19919 sayılı Resmi Gazete’de yeraltı suları, kalitelerine göre aşağıdaki biçimde sıralanmışlardır.

- Sınıf Yas I : Yüksek kaliteli yeraltı suları
- Sınıf Yas II : Orta kaliteli yeraltı suları
- Sınıf Yas III : Düşük kaliteli yeraltı suları

Yüksek kaliteli yeraltı suları bir arıtma işleminden sonra içme suyu olarak kullanılabilirler. Sadece havalandırma ile gerekli oksijen sağlanması koşuluyla, Sınıf I yüzeysel sulara ait kalite parametrelerini sağlayan yeraltı suları, Sınıf Yas I suları olarak kabul edilir (Çizelge 2.1).

Orta kaliteli yeraltı suları, bir arıtma işleminden sonra içme suyu olarak kullanılabilir yeraltı sularıdır. Bu sular; tarımsal su ve hayvan sulama suyu veya sanayide soğutma suyu olarak, herhangi bir arıtma işlemine gerek duyulmadan kullanılabilir. Sınıf II yüzeysel suların kalite parametrelerini sağlayan yeraltı suları, Sınıf Yas II suları olarak kabul edilir (Çizelge 2.1).

Düşük kaliteli yeraltı suları ise yukarıda verilen kalite parametrelerinden daha kötü özellik taşıyan sulardır. Bu suların kullanım yeri, ekonomik, teknolojik ve sağlık açısından sağlanabilecek arıtma derecesiyle belirlenebilir (Çizelge 2.1).

Arıtılmış atıksuların sulamada kullanılmasıyla ilgili sınırlamalar, 7 Ocak 1991 tarih ve 20748 sayılı Resmi Gazete’de verilmiştir. Atıksuların araziye vermeye veya sulamaya uygun olup olmadığını belirlemek için incelenmesi gereken en önemli parametreler;

- Suyun içindeki çözünmüş maddelerin toplam derişimi ve elektriksel iletkenlik,
- Sodyum iyonu derişimi ve sodyum iyonu derişiminin diğer maddelere oranı,
- Bor, ağır metal ve toksik olabilecek diğer maddelerin derişimi,
- Bazı koşullarda kalsiyum ve magnezyum iyonlarının toplam derişimi.

Sulamada sularındaki çözünmüş tuzların toplam derişimi, elektriksel iletkenlik (EC) değeri yardımıyla kolaylıkla belirlenebilir. Toplam tuz derişimi ile EC arasındaki oran katsayısı (M), 25⁰C’deki iletkenlikler mikromho ve tuz derişimleri mg/L ile ifade edildiğinde 0,6 - 0,7 arasında bir değer alır.

Su kimyası için suyun spesifik iletkenliği ya da varolan iyonların sayı ve tipine göre suyun taşıyabileceği elektrik akım şiddeti çok çeşitli uygulamalara kaynak olmuştur. Bir sulu çözeltiden akımın geçişi, iyonların yer değiştirmesiyle gerçekleşir. İyonların çözelti içindeki hareket edebilirliği ve buna bağlı olarak çözeltinin elektrik akımı iletebilme özelliği “iletkenlik” olarak adlandırılır. Bir çözeltinin iletkenliği, akıma karşı gösterdiği direncidir.

Spesifik iletkenlik öncelikle yeraltı sularının yapısındaki toplam çözünmüş katıların derişim değerlerinin belirlenmesinde önemli bir kriterdir. Ayrıca arıtılmış suların arazi uygulamalarında spesifik iletkenlik ölçümleri elde edilecek ürünün verimliliği, kullanılan donanımın korozyon derecesi konusunda önemli ipuçları verir. Bunun yanı sıra spesifik iletkenlik ölçümleri yapılarak, çöktürme ve nötralizasyon işlemleri için gereken kimyasal madde miktarlarının saptanması da mümkündür. [14]

Çizelge 2.1. Kıtaçi su kaynaklarının sınıflarına göre kalite kriterleri [Resmi Gazete: 4 Eylül 1988]

Su Kalite Parametreleri	Su Kalite Sınıfları			
	I	II	III	IV
A) Fiziksel ve İnorganik Kimyasal Parametreler				
1 Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	25	25	30	>30
2 pH	6,5 - 8,5	6,5- 8,5	6,0 - 9,0	6,0-9,0 dışında
3 Çözünmüş oksijen (mg O_2/L)	8	6	3	<3
4 Oksijen doygunluğu (%)	90	70	40	<40
5 Klorür iyonu (mg Cl^-/L)	25	200	400	>400
6 Sülfat iyonu (mg $\text{SO}_4^{2-}/\text{L}$)	200	200	400	>400
7 Amonyum azotu (mg $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{L}$)	0,2	1	2	>2
8 Nitrit azotu (mg $\text{NO}_2^-/\text{N}/\text{L}$)	0,002	0,01	0,05	>0,05
9 Nitrat azotu (mg $\text{NO}_3^-/\text{N}/\text{L}$)	5	10	20	>20
10 Toplam fosfor ((mg $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}/\text{L}$)	0,02	0,16	0,65	>0,65
11 Toplam çözünmüş madde (mg/L)	500	1500	5000	5000
12 Renk (Pt-Co birimi)	5	50	300	>300
13 Sodyum (mg Na^+/L)	125	125	250	>250
B) Organik parametreler				
1 KOİ (mg/L)	25	50	70	>70
2 BOİ (mg/L)	4	8	20	>20
3 Organik karbon (mg/L)	5	8	12	>12
4 Toplam Kjeldahl azotu (mg/L)	0,5	1,5	5	>5
5 Emülsifiye yağ ve gres (mg/L)	0,02	0,3	0,5	>0,5
6 Metilen mavisi aktif maddeleri (MBAS) (mg/L)	0,05	0,2	1	>1,5
7 Fenolik maddeler (uçucu) (mg/L)	0,002	0,01	0,1	>0,1
8 Mineral yağlar ve türevleri (mg/L)	0,02	0,1	0,5	>0,5
9 Toplam pestisit (mg/L)	0,001	0,01	0,1	>0,1
C) İnorganik kirlenme parametreleri				
1 Civa (mg Hg/L)	0,1	0,5	2	>2
2 Kadmiyum (mg Cd/L)	3	5	10	>10
3 Kurşun (mg Pb/L)	10	20	50	>50
4 Arsenik (mg As/L)	20	50	100	>100
5 Bakır (mg Cu/L)	20	50	200	>200
6 Krom (toplam) (mg Cr/L)	20	50	200	>200
7 Krom (mg Cr^{6+}/L)	Ölçülemeyecek kadar az	20	50	>50
8 Kobalt (mg Co/L)	10	20	200	>200
9 Nikel (mg Ni/L)	20	50	200	>200
10 Çinko (mg Zn/L)	200	500	2000	>2000
11 Siyanür (toplam) (mg CN/L)	10	50	100	>100
12 Florür (mg F^-/L)	1000	1500	2000	>2000
13 Serbest Klor (mg Cl_2/L)	10	10	50	>50
14 Sülfür (mg S^{2-}/L)	2	2	10	>10
15 Demir (mg Fe/L)	300	1000	5000	>5000
16 Mangan (mg Mn/L)	100	500	3000	>3000
17 Bor (mg B/L)	1000	1000	1000	>1000
18 Selenyum (mg Se/L)	10	10	20	>20
19 Baryum (mg Ba/L)	1000	2000	2000	>2000
20 Alüminyum (mg Al/L)	0,3	0,3	1	>1
21 Radyoaktivite (pCi/L)				
Alfa aktivitesi	1	10	10	>10
Beta aktivitesi	10	100	100	>100
D) Bakteriyolojik parametreler				
1 Fekal koliform (EMS/100 mL)	10	200	2000	>2000
2 Toplam Koliform (EMS/100 mL)	1000	20.000	100.000	>100.000

7 Ocak 1991 tarih ve 20748 sayılı Resmi Gazete’de sulamada kullanılan artırılmış atıksudaki sodyumun sulanan toprakta tutulması, sodyum adsorbsiyon oranı (SAR) şeklinde tanımlanmaktadır. SAR; suyun sodyum (veya benzer alkaliler) açısından zararlılığının bir ölçüsü olarak kullanılmaktadır.

SAR aşağıdaki eşitlikle belirlenir:

$$SAR = Na^+ / [(Ca^{++} + Mg^{++}) / 2]^{1/2} \quad (2.1)$$

Burada;

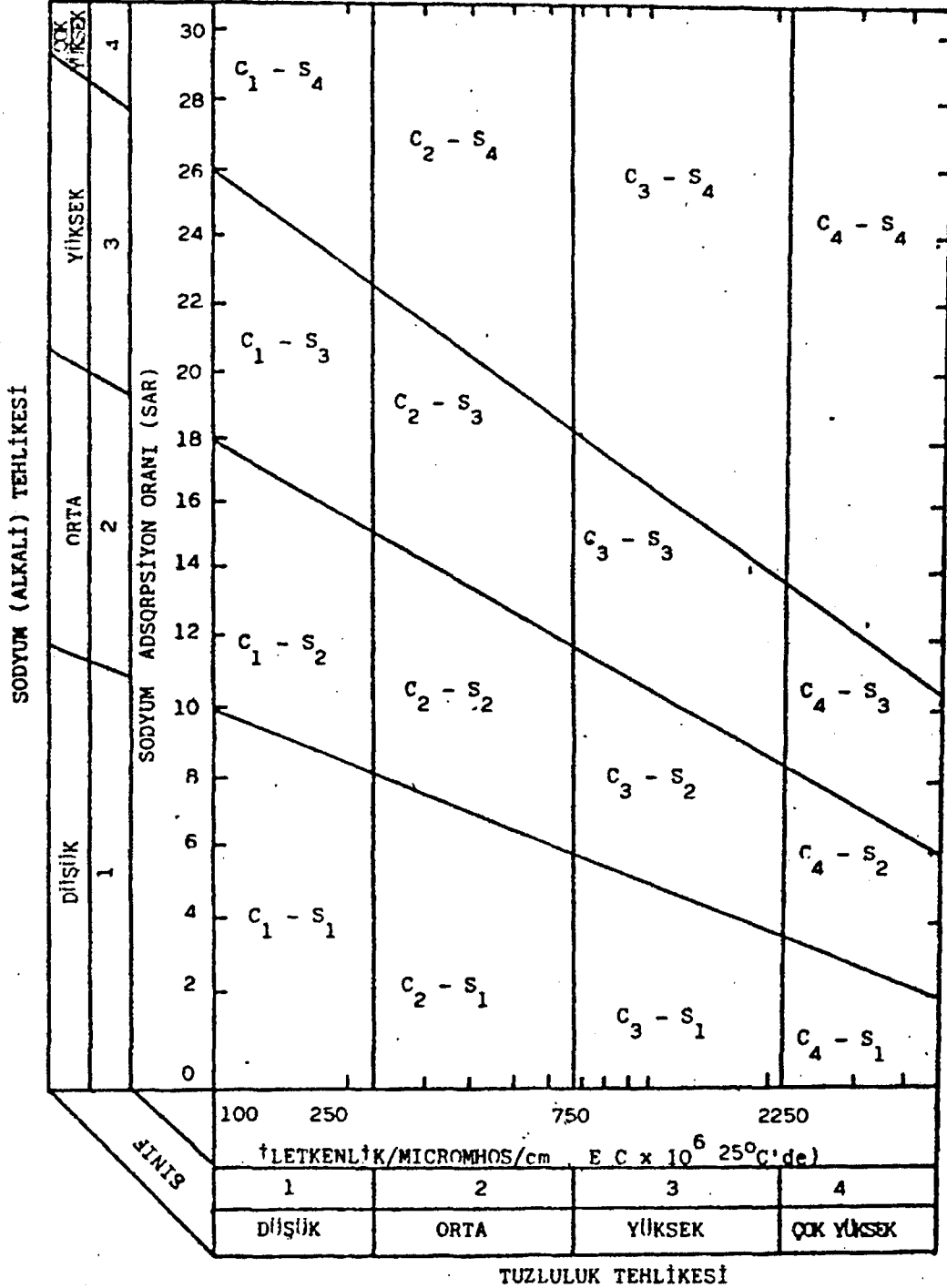
Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} : milieşdeğer kütle cinsinden sudaki derişimlerdir.

Elektriksel iletkenlik ve sodyum adsorbsiyon oranı (SAR) esas alınarak sulama sularının sınıflandırılması, Şekil 2.1’deki diyagrama göre yapılır. Bu diyagram yardımıyla atık suyun sınıfını C_1S_1 - C_4S_4 arasındaki sulama su sınıfları arasında bulmak mümkündür. Tarımsal sulamada kullanılacak değişik sınıf sular için istenen sulama suyu kalite kriterleri Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Sulama sularının sınıflandırılmasında esas alınan sulama suyu kalite kriterleri [Resmi Gazete: 7 Ocak 1991]

Sulama Suyu Sınıfı	I Sınıf Su	II Sınıf Su	III Sınıf Su	IV Sınıf Su	V Sınıf Su
Kalite Kriterleri	Çok İyi	İyi	Kullanılabilir	İhtiyatla Kullanılmalı	Zararlı, Uygun Değil
$EC_{25} \times 10^6$ (omhos/cm)	0 - 250	250 - 750	250 - 2000	2000 - 3000	>3000
Değişebilir sodyum yüzdesi (%Na)	<20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	>80
Sodyum adsorbsiyon oranı (SAR)	<10	10 - 18	18 - 26	>26	
Sodyum karbonat kalıntısı (RSC) meşdkütle/L mg/L	<1,25 <66	1,25 - 2,5 66 - 133	>2,5 >133		
Klorür (Cl^-) meşdkütle/L mg/L	0 - 4 0 - 142	4 - 7 142 - 249	7 - 12 249 - 426	12 - 20 426 - 71	>20 >710
Sülfat (SO_4^{--}) meşdkütle/L mg/L	0 - 4 0 - 192	4 - 7 192 - 336	7 - 12 336 - 575	12 - 20 576 - 960	>20 >960
Toplam tuz derişimi (mg/L)	0 - 175	175 - 525	525 - 1400	1400 - 2100	>2100
Bor derişimi (mg/L)	0 - 0,5	0,5 - 1,12	1,12 - 2,0	2,0	
Sulama suyu sınıfı	C_1S_1	C_1S_2, C_2S_2, C_2S_1	$C_1S_3, C_2S_3, C_3S_3, C_3S_2, C_3S_1$	$C_1S_4, C_2S_4, C_3S_4, C_4S_4, C_4S_3, C_4S_2, C_4S_1$	
NO_3^- veya NH_4^+ (mg/L)	0 - 5	5 - 10	10 - 30	30 - 50	>50
Fekal koliform 1/100 ml	0 - 2	2 - 20	20 - 10^2	10^2 - 10^3	> 10^3
BOI_5 (mg/L)	0 - 25	25 - 50	50 - 100	100 - 200	>200
Askıda katı madde (mg/L)	20	30	45	60	>100
pH	6,5 - 8,5	6,5 - 8,5	6,5 - 8,5	6 - 9	<6 veya >9
Sıcaklık ($^{\circ}C$)	30	30	35	40	>40

Kirli suların arıtılarak, içme suyu özelliği kazanması mümkün ise de bunun için çok karmaşık ve pahalı işlemlerin uygulanması gerekir. Bu halde bile klorür ve nitrat gibi bazı kirleticiler giderilmeden kalacaktır [11],



Şekil 2.1. Sulama sularının sınıflandırılmasında kullanılan diyagram [Resmi Gazete: 7 Ocak 1991]

2.2. Toprak Kirliliği

Genel olarak çevrenin birbirine ayrılmaz bir şekilde bağlı, biri diğerine sürekli etki eden, birindeki bir bozulmanın ötekine mutlaka yansıdığı bileşenleri; toprak, hava ve su olarak sayılabilir. Toprak kirlenmesi araştırılırken bu bileşenlerin etkilerinin birlikte incelenmesi gerekir.

Toprak kirlenmesi, insan faaliyetleri sonucu toprağın doğal yapısının bozulması, fiziksel, kimyasal ve biyolojik bileşiminin olumsuz yönde değişmesi ve toprağın özelliği nedeniyle kullanılabilirliğinin azalması veya yerinde kullanılmaması şeklinde tarif edilebilir. Buna göre toprağın çeşitli özelliklerini olumsuz yönde etkileyen her müdahale, toprak için kirlenme olarak değerlendirilebilir. Toprak kirliliğinin nedenleri olarak; çeşitli sanayi kuruluşlarının katı atıklarının toprağa atılması, arıtma tesislerinde oluşan çamurların dökülmesi, sıvı atıkların toprağa verilerek uzaklaştırılması, tarımsal koruma ilaçlarının toprakta birikmesi, sulama sonunda topraktaki tuz miktarının artması vs. gösterilebilir.

2.2.1. Sıvı atıkların toprağa verilmesi

Alıcı ortam olarak uygun bir su yatağının bulunmaması durumunda sıvı atıklar farklı fiziksel arıtım birimlerinden geçirilerek, bazen de arıtım yapılmaksızın toprağa verilebilir. Sıvı atıkların toprağa verilmesi; sıvı atıkların uzaklaştırılması ve suyun az bulunduğu yerlerde sıvı atıkların sulama suyu olarak kullanılması gibi iki farklı amaç için uygulanır.

Sıvı atıkların toprağa verilebilmesi için sıvı atık özelliklerinin kabul edilebilir düzeyde olması gerekir. Bu özelliklerden en önemlileri aşığıdaki gibi verilebilir:

- Toplam çözünmüş katı maddeler; bu parametre elektriksel iletkenlikle ilgilidir. (Özellikle kurak bölgelerde, TDS bitkiler için çok zararlı olur).
- Askıda katı maddeler.
- Organik maddeler; sıvı atıklarda BOİ, KOİ ve TOK olarak ölçülen organik maddeler çözünmüş, askıda veya kolloidal olarak bulunabilir. Genel olarak organik maddelerin derişimi toprak veya bitkilere kısa sürede etkili olmayacak düzeydedir.
- Azot bileşikleri
- Fosfor
- Ağır ve eser haldeki metaller
- Bakteriyolojik özellikler.

2.2.2. Sulama suyunun toprağa etkisi

Sulu ziraat yapılan bölgelerde sulama suyunun kalitesi önemlidir. Sudaki iyonların durumuna göre toprakta zamanla tuzlanma oluşur. Sulama suyunda gözönünde bulundurulması gereken kalite parametreleri şunlardır:

- a) TDS veya elektriksel iletkenlik,
- b) Sodyum içeriği (genel olarak SAR şeklinde verilir),
- c) Bikarbonat,

- d) Klorürler,
- e) Bor,
- f) Diğer iyonlar,
- g) pH.

Sulama suyunun içerdiği tuzlar, zamanla toprakta birikerek topraktaki tuz derişimini artırır. Bu artış, toprağın geçirgenliğini olumsuz yönde etkilediğinden, yukarıda sıralanan parametrelerin bilinmesi ve gerekli önlemlerin alınması önemlidir [6].

3. ATIKSULARDA ve PETROL FORMASYON SUYUNDA ÇÖZÜNÜMÜŞ TUZLARIN ZARARLARI

Nicelik açısından sularda doğal olarak en sık rastlanan tuzlar kalsiyum, magnezyum ve sodyumun bikarbonat, sülfat ve klorürleridir. Bunun yanı sıra daha düşük derişimlerde demir, mangan, stronsyum ve florürler de doğal suyun bileşenlerindedir. Evsel ve endüstriyel atıksuların yüzey sularına deşarjı ile, bu sulardaki klorür, sülfat, fosfat ve nitrat derişimleri yükselir. Çeşitli nitelikteki suların belirlenmesi için Çizelge 3.1'deki tanımlar kullanılabilir [15].

Çizelge 3.1. Toplam çözünmüş katı madde derişimleri açısından suların sınıflandırılması [15]

Suyun Cinsi	Toplam Çözünmüş Katı Madde (g/m ³)
Tatlı Sular	0 - 1000
Acı Sular	1000 - 10.000
Tuzlu Sular	10.000 - 100.000
Deniz Suyu	100.000'den fazla

Tuzlu sular, yaklaşık 35.000 mg/L TDS içeren deniz suları ve 10.000 mg/L - 15.000 mg/L arasında TDS içeren tuzlu sular olarak sınıflandırılabilir.

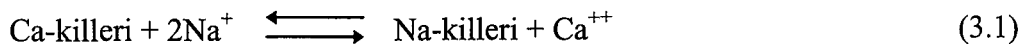
Yüzey suları kanallar boyunca yeraltı su kaynaklarına doğru akarken toprakta ve kayalarda bulunan mineralleri de çözer. Dolayısıyla yeraltı suları, yüzey sularına göre daha fazla çözünmüş mineral taşır [16].

İçme suyunda fazla miktardaki çözünmüş katı, fiziksel etkileri nedeniyle önemlidir. Tüketim için en ideal çözünmüş katı derişiminin 319-397 mg/L olduğu, 1283-1333 mg/L arasındaki çözünmüş katı içeriğinin ise istenmeyen derişim olduğu saptanmıştır. Optimum ortalama ise 658-755 mg/L'den daha az olarak belirlenmiştir. ABD, Halk Sağlığı Servisi (PHS) İçme Suyu Standartları, eğer daha iyi bir kaynak yoksa, maksimum çözünmüş katı derişiminin 500 mg/L olması gerektiğini belirlemiştir [17].

Tuzların bir kısmı zehirli olmamakla birlikte içme, endüstriyel ve sulama amaçlı kullanımda istenmez. Örneğin sodyum klorür ve potasyum sülfat normal su ve atıksu arıtım tesislerinden hiçbir değişikliğe uğramadan alıcı sulara karışır [11].

3.1. Sodyum

Killi zeminlerde doğal olarak bulunan kalsiyumlu killer, suyun içerdiği sodyum iyonlarıyla iyon değişimine uğrarlar.



Sodyum iyonları derişiminin kalsiyum iyonlarının derişimine oranının fazla olmaması, toprağın tarım ve hayvancılık açısından kullanımında önem taşımaktadır.

Sulama sularının bu açıdan değerlendirilmesi amacıyla da “Sodyum Adsorbsiyon Oranı” (SAR) kullanılır [15].

Çizelge 3.2. Sodyum adsorbsiyon oranına göre sulama sularının sınıflandırılması [15]

Sodyum Adsorbsiyon Oranı (SAR)	Sulama Suyu Olarak Değerlendirme
8'den Küçük	Sulama suyu olarak sakıncasız
8 - 12	Suyun uygunluğu, toplam tuzluluk ve toprak özelliklerine de bağlı
12'den büyük	Sulama suyu olarak sakıncalı

Şekil 2.1'de gösterilen diyagramın tuzluluk ve sodyum miktarına göre incelenmesi, Çizelge 3.3'te gösterilmektedir.

Çizelge 3.3. Suların tuzluluk ve sodyum miktarına göre sınıflandırılması [15]

Tuzluluğa Göre Alt Sınıflar		Sodyum Miktarına Göre Alt Sınıflar	
C ₁ - Az tuzlu su	Bitkilerin çoğu için sulama suyu olarak kullanılabilir	S ₁ - Az sodyumlu su	Sodyuma karşı çok duyarlı olan bitkilerin her türlü tarımı için uygun
C ₂ - Orta tuzlulukta su	Orta derecede tuza gereksinim duyan bitkiler için kullanılabilir	S ₂ - Orta derecede sodyumlu su	Geçirgenliği iyi olan jipsli arazi için uygundur.
C ₃ - Fazla tuzlu su	Drenaj yapılmaksızın bitkiler için kullanılmaz; bazı bitkiler için kullanılabilir.	S ₃ - Fazla sodyumlu su	Ender hallerde sulama suyu olarak kullanılabilir
C ₄ - Aşırı tuzlu su	Sulama için uygun değildir. Ancak çok iyi drenajı yapılmış alanlarda bazı bitkiler yetiştirilebilir.	S ₄ - Aşırı sodyumlu su	Çok düşük tuzluluk hallerinin dışında sulama suyu olarak kullanılamaz.

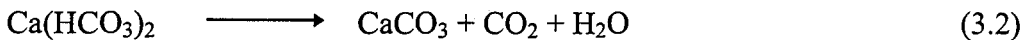
Sodyum normalde içme suyunda 50 µg/L'den daha az miktarda bulunur ve içme suyu ile vücuda alınan miktar, gıda gibi farklı yollarla alınan toplam miktarın % 1-2'sini geçmez [18]. Sağlıklı insanlar için suyun sodyum içeriği çok önemli değildir. Çünkü bu yolla alınan sodyum miktarı, diğer yollarla alınan sodyum miktarından çok daha azdır. Diğer yandan kalp rahatsızlığı nedeniyle sodyum diyeti yapanlar ve bebekler gibi sodyuma duyarlı kullanıcılar için suyun sodyum içeriği saptanmalıdır. Normal sodyum diyeti 20 µg/L sodyum içeriğine izin verir [16].

270 mg/L sodyum içeriği, mineralize sularda istenmeyen bir oran olabilir; fakat, pekçok evsel su kullanım kaynaklarında bu oran aşılabılır. Su kaynaklarındaki sodyumun uzaklaştırılması oldukça yüksek maliyet gerektiren bir işlemdir [17].

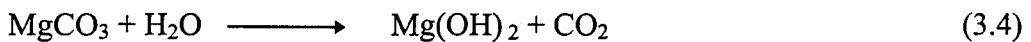
3.2. Kalsiyum ve Magnezyum (Sertlik)

Su sertliği, suda çözünmüş çökyüklü metal iyonlarının neden olduğu bir özelliktir. Kalsiyum ve magnezyum gibi toprak alkali metaller, doğal suda sertliğe neden olan en önemli etkenlerdir. Bunların yanı sıra, Fe^{++} , Al^{+3} , Mn^{++} , Zn^{++} ve Sr^{++} iyonları da aynı etkiyi göstermelerine karşın, kalsiyum ve magnezyum kadar etkili değildirler [13][14][17].

Doğal sularda en sık rastlanan kalsiyum ve magnezyum iyonlarının yarattığı sertlik, toplam sertlik olarak kabul edilebilir [13]. Suyun toplam sertliği, geçici sertlik ve kalıcı sertlik olmak üzere ikiye ayrılır: Geçici sertliğin nedeni kalsiyum ve magnezyumun bikarbonat tuzlarıdır. Bu sertlik kaynatma ile giderilebilir.



Sıcaklığın artması durumunda suda kalsiyum karbonat açığa çıkar ve kazanların cidarlarında çökeler. Benzer şekilde magnezyum bikarbonat içeren suların ısınması halinde aşağıdaki tepkime gerçekleşir.



Magnezyum bikarbonat kazan taşı oluşumunda etkilidir. Özet olarak geçici sertlik, sıcak su sistemlerinde kireç taşı birikintileri yapması, sıcak olarak hazırlanan içeceklerde bulanıklığa ve yüzeyde görülen köpüklere neden olması açısından istenmeyen bir olgudur.

Kalıcı sertlik, kalsiyum ve magnezyumun klorür, sülfat, nitrat ve fosfat tuzları tarafından oluşturulur. Bu sertlik kaynatmayla giderilemez. Sadece magnezyum sülfat sulara acı bir tat verdiğinden ve müshil etkisi bulunduğundan, bu bileşiğin olumsuz etkilerinden sözedilebilir [15].

Sertlik ölçümü, su endüstrisinde en çok uygulanan testlerdendir. Sertliğin fazla olması, estetik ve ekonomik olarak istenmeyen bir durumdur. Evsel sularda kalsiyum karbonat olarak suların sertliği 500 mg/L'yi geçmez (içme sularının ortalama sertliği 250 mg $CaCO_3/L$ 'dir). Sert sular genellikle temizlik işlemleri esnasında daha çok temizlik maddesi harcanmasına neden olurlar. Sular, toplam sertliklerine göre sınıflandırılırlar.

Sertliğe neden olan temel iyonlar (kalsiyum ve magnezyum), ağır metal toksiditesi nedeniyle sudaki yaşamı olumsuz etkiler. Su yataklarındaki biyolojik yaşamın sürmesi, suyun sertliği ile doğrudan ilişkili olsa da; sertliğin kendisi biyolojik bir etkiye sahip değildir [14].

Çizelge 3.4. Sertlik sınıflandırılması [14]

Toplam Sertlik (mg CaCO ₃ /L)	Su Sınıflandırılması
0 - 10	Oldukça yumuşak su
10 - 75	Normal yumuşaklıkta su
75 - 100	Az derecede sert su
100 - 200	Orta derecede sert su
200 - 300	Normal sertlikte su
300 ve daha yüksek değerler	Oldukça sert su

Sertlik, sulama için kullanımda önemli bir etkiye sahip değildir. Ancak sertliğe neden olan iyonlar, değişken sodyum miktarının belirlenmesinde önem taşırlar [17].

3.3. Bikarbonatlar (Alkalinite)

Suda bikarbonatlar karbondioksitin topraktaki bazik maddelerle tepkimesi sonucu oluşurlar. Bir suyun alkalinitesi, asitleri nötralize edebilme kapasitesi olarak tanımlanır. Doğal suların alkalinitesi, zayıf asitlerin tuzlarından ileri gelir. Doğal sularda alkalinite genel olarak karbonatlar, bikarbonatlar, hidroksitler ve fosfatlar nedeniyle artar.

Koagülasyon, yumuşatma, dağıtım sistemlerindeki korozyonun kontrolü için gereksinim duyulan kimyasal maddelerin miktarını etkilediğinden alkalinite şehir suyu kaynakları için kullanılan suda önemlidir. Karbonat ve bikarbonat gibi maddelerden oluşan alkalinitenin içilebilir su kaynaklarında sağlık açısından toksik etkisi gözlenmemiştir.

Alkalinite, atıksu arıtım uygulamalarında büyük ölçüde kullanılan bir özelliktir. pH'a, olan etkisi nedeniyle organizmalar üzerinde doğrudan ve sudaki diğer kirliliklerin toksiditesinde dolaylı olarak etkilidir [13][17].

Alkalinite, kazan besleme sularının kontrolünde de önemlidir. Çünkü karbondioksit, kaynayan suda çözünmez ve buharla uzaklaşır. Bu da pH'ı artırır, alkaliniteyi bikarbonattan karbonata ve daha sonra da hidroksite yükseltir. Bunun sonucunda ısı değiştiricilerde kabuk oluşumu gözlenir [14].

Endüstriyel su kaynaklarındaki aşırı alkalinite, içecek endüstrisi gibi asidik temelli üretim yapan gıda endüstrisinde ürün bozulmalarına neden olmaktadır. Sulama için kullanılan suyun alkalinitesi toprakta sodyum oranını arttırdığından önemli olabilir. Bikarbonat derişimi yüksek olduğunda, çözeltide bulunan kalsiyum ve magnezyum iyonları, karbonatlar olarak çökmekte ve topraktan suyun buharlaşması sırasında alkalinitesinin yoğunlaşmasına neden olmaktadır. Kalsiyum ve magnezyum iyonları çözelti içinde azaldıklarında, sodyum iyonunun oranı bağıl olarak yükselmekte ve tesis donanımına zarar vermektedir.

Genellikle kalsiyum karbonat olarak 400 - 500 mg/L'den yüksek olan alkalinite değerlerinin halk sağlığı açısından zararlı olduğu gözlemlenmiştir [9]. Alkalinite, fotosentez olaylarında pH'ı düzenlediğinden, balık ve sudaki diğer yaşam için önemlidir. Karbonat ve bikarbonat bazı toksik ağır metallerle birleşerek bunların

toksiditesini hissedilir oranda düşürür. Bu nedenle, Amerikan Ulusal Teknik Denetleme Kurulu tarafından sudaki minimum alkalinite değeri 20 mg/L olarak belirlenmiş ve alkalinitenin % 25 civarında azaltılabileceği, daha az alkalinite durumunda suyun doğal dengesinin bozulacağı ifade edilmiştir [17].

3.4. Klorürler

Suyun çeşitli maddeleri iyi çözme özelliği, toprağın üst tabakalarındaki ve daha derindeki toprak oluşumlarında bulunan klorürlerin suya geçmesine yol açar. Klorürler, bütün doğal sularda farklı derişimlerde yaygın olarak bulunurlar. Klorür içeriği, normalde mineral içeriğinin artışına bağlı olarak artar. Yüksek bölgelerdeki kaynaklarda klorür içeriği genellikle düşüktür. Buna karşılık, nehir ve yeraltı sularında daha belirgin miktarlarda klorür derişimleri görülür [13][19].

0 - 500 mg/L arasındaki klorür derişimine sahip su "tatlı su", 500 mg/L ile 1000 mg/L arasındaki klorür içeriği olan su "tuzlu su", 1000 mg/L'nin üzerindeki klorür içeriğine sahip su "yüksek tuzlulukta su" olarak sınıflandırılır [14].

Pek çok endüstriyel atık fark edilir miktarda klorür içerir. Endüstriyel atıklardaki klorür içeriği, yüzey sularının kirliliğinin kontrolü açısından petrol saha tuzlu suları ve diğer tuzlu suların bulunduğu tüm alanlarda çok önemlidir. Aşırı olmayan derişimlerdeki klorürler insan sağlığına zararlı değildir. 250 mg/L'nin üzerindeki derişimler suya tuzlu bir tat verirler [13][16][19].

Su sağlanan alanların kısıtlı olduğu yerlerde, 2000 mg/L klorür içeren sular bile evsel kullanım için, hiçbir zararlı etki yapmaksızın kullanılabilir [13]. Sudaki yüksek klorür derişimi, insan yaşamı için toksik bir etkiye sahip olmamakla birlikte; yüksek miktarlardaki klorür, metal borular için korozif ve bitki yaşamı için zararlıdır [14].

Birçok alanda doğal sulardaki klorür düzeyi, evsel, endüstriyel ve tarımsal kullanım için önemli bir kriterdir. Yüksek derişimde klorür içeren endüstriyel atıklar ve tuzlu suların deşarj edildiği bölgelerde kullanım alanlarının korunması için su kontrol edilmelidir.

Bitkilerin sulanması için kullanılan suyun klorür içeriği, genellikle suyun toplam tuzluluğu ile kontrol edilir. Buharlaşmaya bağlı olarak, sulanan bitkinin kök bölgesindeki tuzluluk ve klorür içeriği artar. Klorüre ve tuzluğa karşı duyarlı olan bitkilerin sulanmasında içilebilir su standardı taşıyan ya da daha düşük klorür ve toplam tuzluluk derişimine sahip sular kullanılır [19].

3.5. Sülfatlar

Sülfatlar, doğada en yaygın bulunan maddelerdendir. Kuyu drenaj suları, pirit yükseltgenmesi nedeniyle yüksek oranda sülfat içerebilir [14]. Doğal suların sülfat içeriği, genel ve endüstriyel su kaynaklarının uygunluğunun belirlenmesinde çok önemlidir. Atıksulardaki sülfat miktarı, sülfatların hidrojen sülfüre indirgenmesinden ileri gelebilecek sorunların büyüklüğünün belirlenmesinde önemli bir faktördür. Çamur ve endüstriyel atıkların havasız ortamda özümsemesinde sülfatlar, hidrojen sülfüre indirgenir [19].

Su örneklerinde sülfat ile ilgili yapılan bir çalışmada 1000-1500 mg/L arasındaki sülfat derişiminin % 62 oranında müşhil etki yarattığı gözlenmiştir. Bununla birlikte bu etkinin yaklaşık %25'i 200-500 mg/L sülfat derişim aralığında gerçekleşmektedir [17].

İçme suyunda sülfat iyonu 250 mg/L'den daha fazla olmamalıdır. Sülfatlar 500 mg/L'nin altındaki derişimlerde insan sağlığını ciddi biçimde tehdit edici nitelikte olmamasına karşı 600 mg/L'nin üzerindeki derişimlerde suyun tadı keskinleşir ve müşhil etki ciddi boyutlara ulaşır [14][16].

Doğal suların sülfat içerikleri, kanal borularındaki korozyon olasılığı ve atıksu arıtım tesislerinin planlaması açısından önemlidir [13]. 600 mg/L'nin üzerindeki sülfat, ısıtıcıların çeperlerini kaplar ve kabuk oluşumunu hızlandırır [14].

3.6. Petrol Sahası Tuzlu Suları

Petrol atıkları genel olarak petrol üretimi ve petrol rafinasyonundan oluşan atıklar olarak sınıflandırılabilir. Rafinasyon atıkları; pompalama, tuz giderme, distilasyon, alkilleme ve polimerizasyon süreçlerinin sonucu oluşurlar. Büyük hacimdeki bu atıklar, askıda ve çözünmüş katılar, petrol, sülfür, klorür, merkaptanlar, fenolik bileşikler ve çözünmüş demir içerir.

Petrol sahalarından gelen atıklar; sondaj çamurları, tuzlu su, serbest ve emülsiyeye olmuş petrol, tank dip çamuru ve doğalgazdır. Bu atıklardan biri olan tuzlu su diğerlerinden çok farklıdır. Birçok sondaj katmanının hemen üzerinde ya da altında tuzlu su katmanına rastlanır. Petrol sondajı sırasında, petrol ile birlikte, pompadan tuzlu su çıkışını engellemek için çeşitli önlemler alınmaya çalışılsa da bu tamamen başarılmaz ve tuzlu su ve petrol daha sonra yerçekimiyle ayrılır [20].

Amerika'daki dört önemli petrol üretim bölgesinin tuzlu su atıklarının analizi Çizelge 3.5'de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Petrol sahası tuzlu suları [20]

Bölge	Toplam Katı (TDS) (mg/L)
Illinois	113.000
Kentucky	251.000
Oklahoma	236.000
Texas	69.000

Kansas'taki beş petrol sahası tuzlu sularının mineral içerikleri Çizelge 3.6'da verilmektedir [17].

Çizelge 3.6. Petrol sahası tuzlu sularının mineral analizi [17]

Radikal	Değişim Aralığı (ppm)
Kalsiyum (Ca)	1507 - 12.888
Magnezyum (Mg)	346 - 4290
Sodyum (Na)	8260 - 63.275
Brom (Br)	32 - 633
Karbonat (CO ₃ ⁻)	0
Bikarbonat (HCO ₃ ⁻)	43 - 644
Sülfat (SO ₄ ⁻)	0 - 1578
Klorür (Cl ⁻)	12.750 - 127.220
Toplam Katılar	25.210 - 248.600

Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı'nın petrol sondaj çalışmaları yaptığı Güneydoğu Anadolu Bölgesi Karakuş kuyusu petrol formasyon suyu analiz raporu Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.7. TPAO petrol formasyon suyu analizi (1993)

İyonlar	Değişim (mg/L)
Sodyum	8109,50
Kalsiyum	1118,00
Magnezyum	315,00
Demir	0,78
Sülfat	693,00
Klorür	14.638,53
Karbonat	0,00
Bikarbonat	443,00

Petrol bölgelerinde deşarj edilen tuzlu suların çevresel etkileriyle ilgili olarak ilk veriler 1924'ün başlarında elde edilmiştir.

Yapılan bir çalışma sonucunda toksidite ile özellikle klor, sodyum, potasyum iyonları ve alkalinite arasında bir ilişki olduğu ortaya konmuştur. Parametreler tek tek incelendiğinde etkili görünmeler de bir araya geldiklerinde, değişkenlere bağlı olarak, farklı etkilere sahip olabilmektedirler. Sonuç olarak derişimi yüksek iyonların toksiditeye neden oldukları saptanmıştır.

Petrol bölgelerinden yüzey sularına deşarj edilen tuz içeriğinin çevresel etkilerini araştırmak üzere Wyoming'deki Salt Creek petrol bölgesinden bırakılan tuzlu suları alan çevre sularından, 1988-1990 yılları arasında örnekler alınmış ve toksidite için test edilmiştir. Petrol bölgelerinden önemli oranda etkilenen yeraltı sularındaki yaşamsal faaliyetler, yüzey sularıyla karşılaştırıldığında, oldukça düşüktür. Yapılan çalışmaya göre, hidrojen sülfür, eser metaller, polar olmayan organik bileşikler toksiditeye neden olmamaktadırlar. Gözlemlenen toksiditenin nedeni olarak temel inorganik iyonlar gösterilebilir (Na⁺, K⁺, Cl⁻, HCO₃⁻, CO₃⁻) [21].

Çözünmüş katıların dolaylı etkileri arasında birincil olarak, gıda endüstrisinde kullanılan bitkilerin üreme alanlarının yabancı bitkilerle kaplanması gösterilebilir. Tarımsal sulama amaçlı kullanılan su da çözünmüş katı derişimi bakımından sınırlandırılmıştır. Sulama amaçlı kullanılan su, yalnızca çözünmüş katıların ozmotik etkilerinden değil, aynı zamanda varolan farklı katyonların miktarlarından da etkilenir. Kurak ve yarıkurak bölgelerde tuzluluğun zararları ile ilgili genel sınıflandırma Çizelge 3.7'deki gibidir.

Çizelge 3.8. Çözünmüş tuzların (mg/L) sulama suyu için tehlikeleri [17]

Herhangi bir zararlı etkisi olmayan sular	500
Duyarlı ürünler üzerinde zararlı etkilere neden olabilecek sular	500 - 1000
Birçok ürün üzerinde zararlı etkide bulunabilecek ve dikkatli kullanım gerektiren sular	1000 - 2000
Yarangeçirgen topraklarda yetişen dayanıklı bitkiler için dikkatli uygulama gerektiren sular	2000 - 5000

Tüm balık ve sudaki diğer canlıların normal koşullarda yaşamlarını sürdürebilmeleri için çözünmüş katı derişimi düzenlenmelidir. Yapılan bir çalışmada tatlı su canlılarının 10.000 mg/L çözünmüş katı içeriğine kadar yaşayabildikleri saptanmıştır. Alabalık ve tatlı su levreği 15.000 mg/L çözünmüş katı derişimine kadar yaşamlarını sürdürebilmektedir [17].

4. ATIKSULARDA ve PETROL FORMASYON SUYUNDA ÇÖZÜNMÜŞ TUZLARIN UZAKLAŞTIRILMA YÖNTEMLERİ

Kirli ve yeryüzüne pompalanan yeraltı sularıyla ilgili uygulamalar oldukça iyi düzenlenmiştir. Bu uygulamalar uzun yıllar boyunca endüstriyel atıksuların arıtılmasıyla ilgili deneyimlerle geliştirilmiştir. Yine de kimi zaman bu uygulamalar spesifik bölgelerde kirletilmiş yeraltı sularına uygulandığında bazı karışıklıklar ortaya çıkabilir. Gereken işlem tipi birincil olarak uzaklaştırılacak kirleticilere bağlıdır. Eğer uzaklaştırılacak olan kirletici tek ise işlem düzeneği oldukça basit bir yapıda olabilir, diğer yandan çok sayıdaki kirletici varlığında işlem karmaşık bir yapı kazanır.

Yeraltı sularındaki inorganik kirleticilerin uzaklaştırılması için farklı birkaç kimyasal çöktürme yöntemi uygulanabilir. Uygun bir pH'ta düşük çözünürlüğe sahip inorganik maddelerin varlığına bağlı olarak üç temel kimyasal yöntem vardır.

- Hidroksitle çöktürme,
- Karbonatla çöktürme,
- Sülfürle çöktürme.

Hidroksitle çöktürme, inorganik maddeler ve metallerin uzaklaştırılmasında en yaygın yöntemdir. Yöntem pH ayarlaması (pH'ın yükseltilmesi) için kireç veya sodyum hidroksit ilavesi gerektirir. Sodyum hidroksit kimyasal olarak taşıma ve depolama kolaylığı ve bulamaç haline getirildiğinde düşük hacimli olması nedeniyle bir avantaja sahip olmasına karşın çoğunlukla jelatin yapıdadır ve suyunun uzaklaştırılması oldukça zordur.

Karbonatla çöktürme soda ile 8,2-8,5 pH'ta gerçekleştirilir. Bu yöntem teorik olarak çalışılabilir nitelikte olsa da uygulamada kontrolü zordur.

Genel olarak bu üç yöntemde bakıldığında en fazla inorganik maddeyi (arsenik haricinde) uzaklaştıran yöntemin sülfürle çöktürme olduğu görülmektedir. Yüksek giderim kapasitesine karşın taşıma ve depolamadaki zorluk, sülfür çamurunun havayla temas ettiğinde yükseltgenerek sülfata dönüşmesi, bu yöntemin dezavantajı olarak ortaya çıkmaktadır.

Atıksu akımlarından ağır metaller ve diğer inorganik maddelerin uzaklaştırılması için en yaygın teknik kimyasal çöktürme olmasına karşın diğer teknikler de oldukça fazla sayıdadır.

Kimyasal çöktürme, akış hızına bağlı olarak kesikli veya sürekli olabilir. Eğer debi günde $\sim 115 \text{ m}^3$ 'ten daha az ise kesikli sistem en ekonomik olanıdır. Günlük debi $\sim 115 \text{ m}^3$ 'ü aştığında büyük tank kapasitesi gerektiğinden kesikli sistem ekonomik değildir [22].

Tuz uzaklaştırma; tuzlu su, deniz suyu gibi çeşitli sulardan çözünmüş tuzların uzaklaştırılması olarak tanımlanır. Tuz uzaklaştırma işlemi, ters ozmoz ve elektodiyaliz gibi membran süreçlerini içeren yöntemlerle yapılabilir. İyon değişimi, buharlaştırma gibi membransız ya da membranlı uygun artım sürecinin seçilmesi, yerel ekonomik koşullara bağlıdır. Sürecin ekonomisi, çözünmüş katıların derişimi ile doğru orantılıdır.

Çözünmüş katılar ve kirleticiler, sudan buharlaştırma ve kristallendirme gibi faz değişimi içeren iki süreçle uzaklaştırılabilir. Buharlaştırmada su ısıtılarak buharlaştırılır ve çözünebilir tuzlar buharda daha az bulunacağından buhar suya göre daha az kirlilik içerir. Sıvı fazdaki çözünmüş tuz derişiminin buhar fazdaki çözünmüş tuz derişimine

bölünmesiyle elde edilen ayırma faktörü genel olarak 1000'den daha büyüktür. Tuz uzaklaştırma amacıyla, çok etkili buharlaştırma, buharın tekrar sıkıştırılması ve ani buharlaştırma gibi farklı buharlaştırma süreçleri denenmiştir.

Kristallendirmede ayırma için dondurma yöntemi uygulanır. Kristal oluşumu sırasında yabancı maddeler dışarıda kalırlar. Bu süreç tuzlu su ve saf buzdan oluşan iki fazlı bir sistemdir. Bu iki faz, fiziksel olarak birbirinden ayrılabilir ve buzun tekrar eritilmesi ile artırılmış su elde edilebilir. Bu yöntem yaygın bir tuz uzaklaştırma yöntemi değildir, çünkü katı buzun taşınması ve tuz kristallerinin sıvıdan ayrılması zordur [7].

Sudan uçucu olmayan maddelerin ayrılması ile ilgili olarak özellikle deniz suyundan veya tuzlu sudan tuzun endüstriyel ölçekte uzaklaştırılması için birçok süreç geliştirilmiştir. Güneş enerjisinin kullanıldığı ısıl tuz uzaklaştırma yöntemi için en basit oluşum solar damıtıcılardır. Bu süreçte distile edilmiş ürün hızı düşüktür, çünkü buharlaşma ısısı geri kazanılamaz. 1 m³ su için yaklaşık 690 kWh buharlaşma ısısı gerekmektedir. Sonuç olarak ısıl tuz uzaklaştırma birimlerinin maliyetini azaltmak için bu enerji kaybını azaltmak gerekir. Bu da çok etkili solar distilasyon, çok kademeli ani solar distilasyon gibi süreçlerle sağlanabilir [23].

Membran distilasyonu kavramı da tuz uzaklaştırılmasında uygulanabilecek bir yöntem olarak önerilmektedir. Bu süreç, temelde membranın buhar halinde suyun geçişine izin vermesine, fakat sıvı halde suyun geçişine izin vermemesine dayanır. Doğrudan yoğuşma ve sınırsız basamak sayısı yönünden çok kademeli ani buharlaştırmaya benzer. Şekil 4.1'de gösterilen birim spiral yapıda tasarlanmış ve buharın yoğuşturulması yoluyla tuz uzaklaştırmayı önermektedir. Bu sürecin en önemli maliyeti ısı değişimi için gerekli yüzey alanıdır. Bu yüzden büyük ölçekli tuz uzaklaştırmada tercih edilmez.

Önemli bir tuz uzaklaştırma süreci de iyon değişimidir. İyon değişim sistemlerinde bulunan sabit yüke sahip polimer reçineler, sudaki anyonlar ya da katyonlarla etkileşen kimyasal gruplar içerir. Sudaki istenmeyen iyonlar reçinedeki uygun iyonlarla yer değiştirir ve reçine yatağında tutulurlar. Tipik tuz uzaklaştırma süreci Na⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺ gibi katyonların H⁺'le, Cl⁻, SO₄⁻² veya PO₄⁻³ gibi anyonların OH⁻ ile yer değiştirmesi biçiminde olur.

Günümüzde tuz uzaklaştırmada çeşitli süreçlerin bir bileşimi kullanılmaktadır. Bu bileşim, ön işlem basamağı (ızgaradan geçirme, pıhtılaştırma ve yumaklaşma, kireçle yumuşatma, filtrasyon, derin yatak filtrasyonu vs.) ve bir tuz uzaklaştırma basamağı (genellikle iyon değişimi veya, ya bir ters ozmoz birimi ile ya da bir geleneksel elektrodializ birimi ile birlikte bir iyon değişimi) içerir. Bu süreçlerdeki sorunlar;

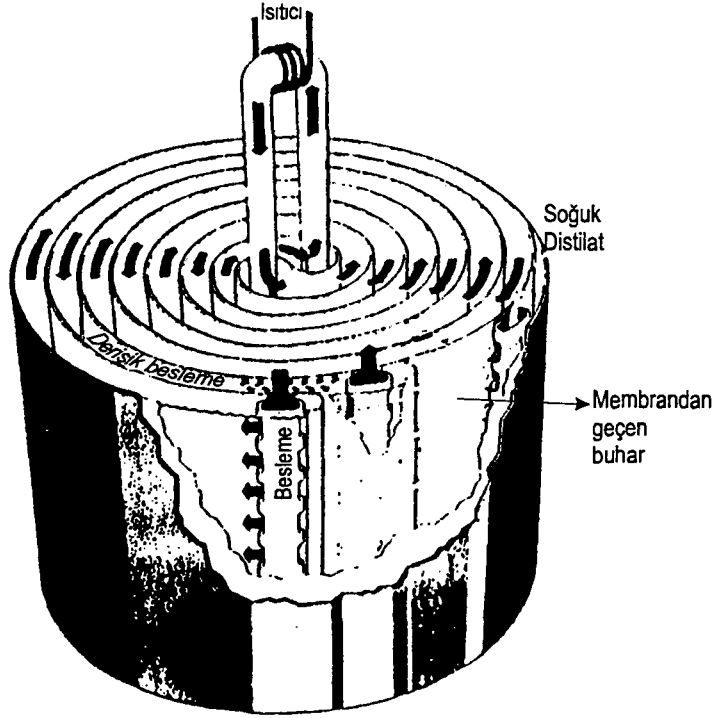
- İyon değiştiricilerin rejenerasyonu için kullanılan ticari nitelikte asit ve bazların yüksek tuz derişimine sahip atıksu oluşumuna neden olmaları,

- Membranın kabarması ve kirlenmesini engellemek amacıyla besleme suyuna eklenen farklı kimyasal maddelerin membran bölgesinden uzaklaştırılmasıdır.

Bu sorunları önlemek amacıyla, düşük çevresel etkili, minimum yüzey suyu tüketimi ile atıksuyun miktarının azaltılması, asit ve bazların tekrar kullanımına dayanan yeni bir teknolojik anlayış geliştirilmiştir [7].

Isıl membran distilasyonu (TMD), çok farklı beslemelerden saf su elde etmek amacıyla denenmiş bir süreçtir. Birçok geleneksel yöntemle karşılaştırıldığında TMD'nin düşük sıcaklıklarda yüksek saflıkta damıtılmış su sağlamak gibi avantajları

vardır. Öte yandan TMD'nin maliyetinin yüksek olması ve çok düşük hızlarda çalışma zorunluluğu gibi dezavantajları da vardır [23].



Şekil 4.1. Membran distilasyonu için spiral birim [7]

Ticari ters ozmoz membranları suyun içerdiği çözülmüş katıların uzaklaştırılmasında % 99 oranında etkilidir. Ters ozmoz süreçlerinde artan toplam çözülmüş katı miktarı çok az bir işletme maliyeti farkına neden olmaktadır. Dolayısıyla ters ozmoz süreci, deniz suyuunda 45.000 mg/L toplam çözülmüş katı içeriği durumunda ekonomiktir. Dünya üzerindeki tuz uzaklaştırma süreçlerinin % 31'inin ters ozmoz süreçlerinden oluştuğu tahmin edilmektedir. Ters ozmoz tuzlu suların arıtılmasında % 73 gibi geniş bir uygulama alanı bulurken, deniz suyuunda % 7 gibi az bir orana sahiptir. Büyük tesislerin kapasiteleri 20.000-30.000 m³/gün'dür.

Bütün geridöngülü elektrodializ tesisleri, yerleşim bölgelerinin su gereksinimini karşılamak ve endüstride kullanılmak üzere 757.088,24 m³/gün su üretiminde kullanılmaktadır. Geridöngülü elektrodializ uygulamaları soğutma kulesi atığı, rafineri atık suyu ve ters ozmoz atık akımındaki uzaklaştırılmış tuz derişiminin neden olduğu yüksek kirliliği ve membran bozulmasını azaltmasındaki başarısı nedeniyle oldukça geniş bir alan bulmaktadır. Yalnızca ABD'de 1000'in üzerinde iyon değişimi ile demineralizasyon tesisi vardır. Bununla birlikte EDR ve ters ozmoz gibi membran sistemleri iyon değiştiriciden çıkan suda kalite iyileştirmesi gerektiğinde gittikçe artan uygulama alanı bulmaktadır [7].

4.1. Konuyla İlgili Yapılan Çalışmalar

Tuzlu sudan tuz uzaklaştırma tesislerinden birinde (Amerika Webster-Güney Dakota) şehir kanalizasyonundan alınan suyun önce tuzu uzaklaştırılmış, süzölmüş ve ardından dört aşamalı elektrodializ cihazından demineralize olmak üzere geçmiştir. Demineralizasyon süreci, 1500 - 1800 mg/L arasındaki ham sudan 350 mg/L toplam çözünmüş katı içeriğine sahip su elde etmek amacıyla dört aşamaya bölünmüştür. Bunun gibi günde 450 m³ su arıtım kapasiteli çok basamaklı sistemler daha ekonomiktir. Bu sürecin her bir basamağında yaklaşık olarak 220 çift iyon değiştirici membran kullanılmıştır ve bu membranlar bir grup oluşturmak üzere yan yana sıralanmışlardır. Tesisteki ham suyun en önemli iyonik içeriği yavaş çözünen CaSO₄'tir. Bu durum suyun sıcaklığını yükseltir, 9 °C'de ana madde olarak NaCl içeren tuzlu suların arıtıldığı membranların kullanıldığı diğer tesislerle karşılaştırıldığında, görece olarak oldukça büyük membran alanına gerek duyulur.

Çizelge 4.1. Elektrodializ tesislerinin performansı [7]

Tesisin Adı	Webster (ABD)	Shikine (Japon)	Oshima (Japon)
GENEL VERİLER			
İşlenen Ham Su	Kuyu suyu	Kuyu suyu	Kuyu suyu
Tesis Kapasitesi (m ³ /gün)	950	200	1000
Ham Suyun Tuzluluğu (mg/L)	1500 - 1800	1145	2992
Ürün Suyun Tuzluluğu (mg/L)	350	500	500
Ham Suyun Sıcaklığı (°C)	9,15 - 25	25	
Ham Suyun Temel İyonik Bileşeni	CaSO ₄	NaCl	NaCl
Sistem İşlem Tipi	sürekli	kesikli	sürekli
İşlem Kontrolü	otomatik	otomatik	otomatik
Membran Ölçüleri (mm)	1115 x 1115	1150 x 575	1115 x 1115
Blok Başına Membran Hücre Çifti Sayısı	216	150	250
Blok Basamak Sayısı	4	1	4
İŞLEM VERİLERİ			
Ham Suyun Sıcaklığı (°C)	9,0	11,0	23,0
Toplam Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	1,40	1,35	1,00
H ₂ SO ₄ Tüketimi (g/m ³)	2,80	4	4
Ham Suyun Miktarı (m ³ /gün)	1660	227	1540
İşlenmiş Suyun Miktarı (m ³ /gün)	954	200	1340
Tuz Uzaklaştırma Verimi (%)	57,5	88,1	87,0
Ürün Suyun Tuzluluğu	356	484	425

Bu tesisin enerji gereksinimi 1,0 - 1,4 kWh/m³'tür. Dünya üzerinde 2000'den fazla tuz uzaklaştırma tesisi vardır. Bu tesisler toplam olarak 10⁶ m³/gün kapasiteye sahiptir ve toplam membran alanı 45 x 10³ m²'dir [7].

Yüzey sularından endüstriyel kullanım amaçlı su elde etmede minimum çevresel etki ile tuz uzaklaştırma konulu bir araştırmada, klasik yöntemlerin dezavantajını oluşturan aşırı tuzlu atıksu oluşumunun engellenmesi, böylece çevresel etkilerin azaltılması amacıyla geliştirilmiş yeni teknolojilerin uygulanması üzerinde durulmuştur.

Bu çalışma kapsam olarak geliştirilmiş ön işlem basamağı ve farklı membran süreçleri ile bir iyon değiştirici basamağının bileşimini içerir.

Pilot tesiste;

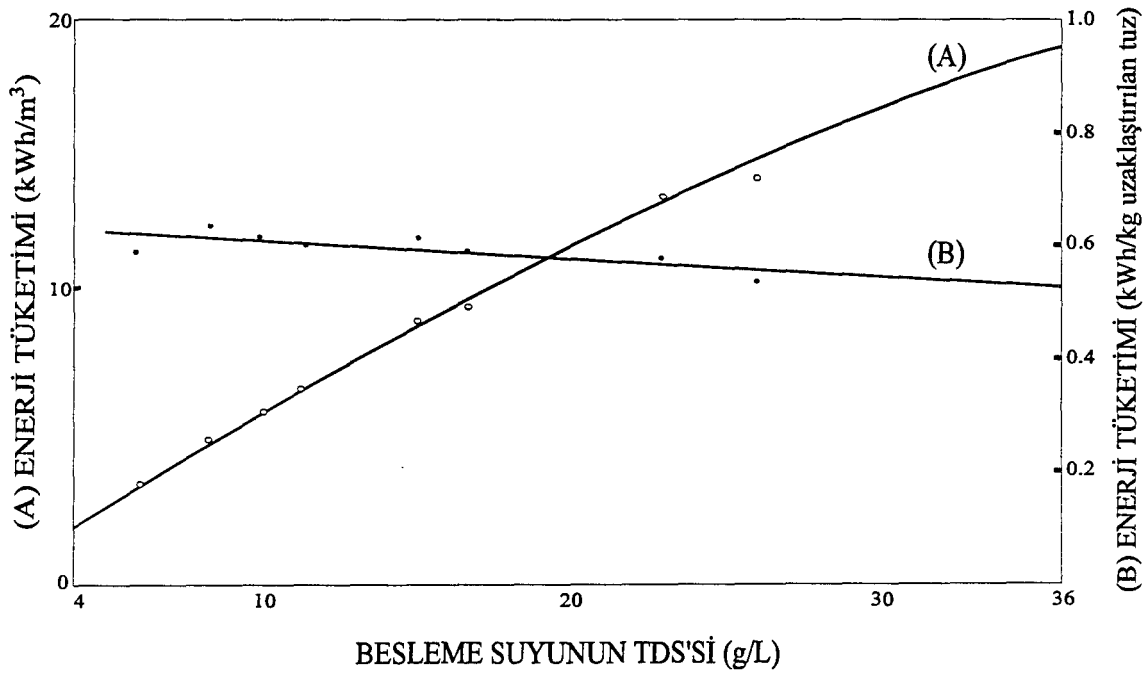
- Tuz uzaklaştırma için düşük basınçlı ters ozmoz'dan oluşan ön işlem basamağı,
- İyon değişimi ile toplam tuz uzaklaştırma,
- İki kutuplu membranlar kullanılarak elektrodializ yoluyla asit ve baz üretimi, gibi birçok basamak bulunmaktadır [24].

6000-10.250 mg/L toplam çözünmüş katı içeriğine sahip tuzlu suyun artırılması için hazırlanan laboratuvar ölçekli elektrodializ hücresinde her biri 80 cm² etkin alana sahip 35 çift katyon ve anyon değişim membranı kullanılmıştır. 12.000-27.170 mg/L toplam çözünmüş katı içeren tuzlu suyun arıtımında benzer yapıda iki hücre, 27.100-36.000 mg/L toplam çözünmüş katı içeren tuzlu suyun arıtımında ise farklı sayılarda hücre çiftine ve aynı etkin alana sahip üç hücre kullanılmıştır. Cl⁻, NO₃⁻ gibi iyonlarla birlikte, toplam sertlik ve toplam çözünmüş katıda da azalma saptanmıştır. Enerji gereksinimi ve akım verimi deneysel verilerden yola çıkılarak hesaplanmıştır. Optimum akış hızları ve enerji tüketimi, 800 mg/L toplam çözünmüş katı içeren farklı tuzlu suların elde edilen kullanılabilir su baz alınarak saptanmıştır. Sonuçlar farklı kapasitedeki elektrodializ tesislerinde farklı tuzluluklardaki suların artırılması için tasarım ve işletme verilerinin elde edilmesinde kullanışlıdır.

Bilinen miktarda toplam çözünmüş katı içeren tuzlu su elektrodializ bölmelerine beslenmiştir. Elektrodializ bölmelerinde hava uzaklaştırıldıktan sonra seyreltik ve derişik akımların hızları belirlenmiştir. Elektrolize bağlı olarak anot bölmesinde asidite oluştuğundan sonra, 500 m³/h akış hızına sahip az miktarda tuzlu su elektroliz ürünlerinin uzaklaştırılması için elektrot bölmelerine beslenmiştir. Elektrot yıkama suyu önce anot bölmesinden daha sonra da katot bölmesinden geçirilmiştir. Bu işlem bu bölmelerdeki kabuk oluşumunu engellemek amacıyla yapılmıştır. Ardından iki elektrot arasına elektrik akımı uygulanmıştır.

Farklı tuzlulukta suların analiz sonuçları Çizelge 4.2'de verilmiştir. Farklı toplam çözünmüş katı içerikleri olan tuzlu suların elektrodializ yoluyla arıtım sonuçları ise Çizelge 4.3'te gösterilmiştir. 27.100-36.000 mg/L toplam çözünmüş katı içeren suların toplam sertlik deniz suyundakinden fazladır. 10.250 mg/L'ye kadar toplam çözünmüş katı içeren tuzlu suların toplam çözünmüş katı içeriği 1000 mg/L'nin altına düşürülmüştür. Tüm toplam çözünmüş katı aralıkları için toplam çözünmüş katı, Cl⁻ ve toplam sertlikteki azalmanın hemen hemen aynı olduğu bulunmuştur. Ancak NO₃⁻'daki azalma toplam çözünmüş katıdan her zaman azdır. Akış hızı düşük olduğunda % giderim artmıştır. Birkaç çalışma hariç akım verimi % 80'in üzerinde ve çalışmaların çoğunda enerji tüketimi 0,65 kWh/kg-uzaklaştırılan tuz'dan daha azdır. Farklı toplam çözünmüş katı içeriklerinde 5 L/h seyreltik akım akış hızlarında ürün suyun pH'ı 7'nin altındadır. Çalışmada optimum akış hızı 5 L/h ya da fazla olarak belirlenmiştir [25].

Toplam çözünmüş katı (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	Toplam Sertlik CaCO ₃ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	pH
6000	3280	1260	26,0	7,50
8100	4420	1840	32,5	7,41
10.250	5640	2300	41,0	7,40
12.000	6520	2620	49,0	7,46
15.500	8620	3450	62,0	7,50
18.120	9850	4060	72,5	7,64
24.170	13.400	5260	97,0	7,64
27.100	15.000	6080	108,0	7,63
36.000	20.100	8000	144,0	7,52



Şekil 4.2. Besleme suyunun toplam çözünmüş katı içeriğinin enerji tüketimi:

(A) kWh/m³,

(B) kWh/kg-uzaklaştırılan tuz [25]

Besleme suyunun toplam çözünmüş katı içeriği arttıkça birim kütle başına enerji tüketiminin birim hacim başına azaldığı gözlenmiştir (Bkz. Şekil 4.2-B eğrisi). Besleme suyunun tuz içeriğine bağlı olarak enerji tüketimi doğrusal olmayan bir şekilde artmaktadır (Bkz. Şekil 4.2-A eğrisi). Farklı tuzlu sulardan optimum koşullarda elde edilen suyun kalitesi Çizelge 4.4'te verilmiştir [25].

Çizelge 4.3. Yüksek tuzluğa sahip suyun tuz uzaklaştırma işlemi sonuçları [25]

Beslemenin TDS İçeriği (mg/L)	Akış Hızı (L/h)	Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Ürün Su			% İndirgeme		Akım Verimi %	Enerji Tüketimi kWh/kg- uzaklaştırılan tuz
			pH	TDS (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	TDS	NO ₃ ⁻		
6000	9,0	8,37	7,21	1000	5,5	83,3	78,3	86,3	0,59
	7,8	7,62	7,02	800	4,2	86,7	83,8	85,5	0,60
	7,2	7,50	6,58	670	4,3	88,8	83,5	82,1	0,63
	6,0	6,75	4,36	540	3,1	91,0	88,1	78,0	0,66
	4,8	6,25	2,57	390	2,4	93,5	90,8	69,0	0,74
8100	8,4	10,50	7,30	1560	9,8	80,7	69,8	84,0	0,61
	7,5	9,75	7,36	1310	7,5	83,8	76,9	83,9	0,61
	6,0	8,62	7,26	900	5,5	88,9	83,1	80,5	0,64
	5,3	7,87	7,12	800	4,7	90,1	85,5	79,0	0,65
10.250	4,8	7,50	6,85	670	4,0	91,7	87,7	76,4	0,67
	9,0	13,25	7,32	2700	14,5	73,6	64,6	82,3	0,62
	6,6	11,00	7,46	1700	9,2	83,4	77,6	82,4	0,62
	5,7	10,00	7,20	1100	8,0	89,3	80,5	83,8	0,61
	5,0	9,12	7,20	800	6,5	92,2	84,1	83,2	0,62
12.000	3,6	7,12	4,80	360	4,1	96,5	90,0	80,3	0,64
	9,0	15,00	7,60	3900	19,0	67,5	61,2	78,0	0,66
	8,4	14,62	7,60	3500	17,0	70,8	65,3	78,4	0,65
	7,2	12,87	7,10	2600	14,0	78,3	71,4	84,4	0,61
	6,0	11,25	5,82	200	11,0	83,3	77,5	85,6	0,60
15.500	4,2	9,37	3,54	1070	8,0	91,1	83,7	78,7	0,65
	9,0	16,87	7,36	5150	25,5	66,8	58,9	88,7	0,58
	7,2	14,75	7,24	4000	19,0	74,2	69,3	91,4	0,57
	5,4	12,50	7,16	2900	13,5	81,3	78,2	87,4	0,59
	4,8	11,75	6,84	2450	11,5	84,2	81,4	85,6	0,60
18.120	3,6	10,00	6,30	1800	8,0	88,4	87,1	79,2	0,65
	8,0	17,62	7,26	6000	26,0	66,9	64,1	88,4	0,58
	7,2	16,75	7,18	5280	22,0	70,9	69,6	88,7	0,58
	6,0	15,00	7,02	4100	18,0	77,4	75,2	90,0	0,57
	4,8	13,50	6,77	2970	13,5	83,6	81,4	86,5	0,59
24.170	3,6	11,75	6,44	2080	9,5	88,5	86,4	78,9	0,65
	9,6	25,00	7,40	9800	45,0	59,5	53,6	88,7	0,58
	8,0	23,37	7,39	8000	35,5	66,9	63,4	88,9	0,58
	6,6	21,25	7,40	6200	28,0	74,3	71,1	89,6	0,57
	5,4	18,75	6,00	5100	22,0	78,9	77,3	88,2	0,58
27.100	3,6	13,75	4,18	3160	14,8	86,9	84,7	88,4	0,58
	7,8	24,00	7,42	10.200	49,0	62,4	54,6	88,3	0,51
	6,6	21,87	7,23	8500	39,0	68,6	63,9	90,1	0,50
	5,4	20,00	7,12	6600	30,3	75,6	71,9	88,9	0,51
	4,8	18,75	6,20	5800	26,0	78,6	75,9	87,6	0,51
36.000	4,2	17,50	6,04	4900	23,5	81,9	78,2	85,6	0,52
	7,2	24,50	7,40	20.200	95,0	43,9	34,0	74,6	0,60
	6,0	22,50	7,26	17.250	79,0	52,1	45,1	80,4	0,56
	5,4	21,25	7,12	15.300	71,0	57,5	50,7	84,5	0,53
	4,8	20,00	7,01	13.700	63,0	61,9	56,2	85,9	0,52
3,6	17,50	3,61	10.500	48,0	70,8	66,7	84,2	0,53	

Çizelge 4.4. Farklı tuzlu sulardan elde edilen suyun bileşimi [25]

Besleme Suyunun TDS İçeriği (mg/L)	Ürün Suyun TDS içeriği (mg/L)				Ürün Suyun Cl İçeriği (mg/L)	Ürün Suyun Sertliği (CaCO ₃ olarak) (mg/L)	Ürün Suyun NO ₃ ⁻ İçeriği (mg/L)	Toplam İndirgeme %		pH
	1.Hücre	2.Hücre	3.Hücre	Son				TDS	NO ₃ ⁻	
6000	800	---	---	800	400	160	4,2	86,7	83,8	7,02
8100	800	---	---	800	400	170	4,7	90,1	85,5	7,12
10.250	800	---	---	800	420	200	6,5	92,2	84,1	7,20
12.000	2600	800	---	800	410	160	6,0	93,3	87,7	7,10
15.500	2900	800	---	800	410	160	6,0	94,8	90,3	7,01
18.120	6000	800	---	800	450	200	4,2	95,6	94,2	7,10
24.170	6200	800	---	800	450	160	6,0	96,7	93,8	7,21
27.100	10.200	2400	800	800	400	160	5,5	97,0	94,9	7,16
36.000	15.300	2850	800	800	390	160	8,0	97,8	94,4	7,08

Suudi Arabistan'ın merkez bölgesindeki yeraltı sularının içme suyu elde etmek amacıyla artıldığı üç ters ozmoz biriminin yüksek toplam çözünmüş katı içeren su için performanslarının incelendiği bir çalışmada elde edilen sonuçlar Çizelge 4.5'te verilmiştir. Bu tesislerin her birinin kapasitesi 8700-51.000 m³/gün arasında değişmektedir. Üç farklı bölgeden alınan yeraltı suyu örnekleri 30 - 60 °C arasındaki yüksek sıcaklık aralıklarında ve kalsiyum, sodyum, klor ve sülfat gibi iyonlar bakımından zengin, 675-2000 mg/L arasında toplam çözünmüş katı derişimine sahip sulardır.

Çizelge 4.5. Ters ozmoz tesislerinde işlenen ham ve ürün suyun kalitesi [26]

Parametreler	Tesis					
	Unayzah		Al-Majmaah (Yeni)		Al-Zulfi	
	Ham Su	Ürün Su	Ham Su	Ürün Su	Ham Su	Ürün Su
Sıcaklık (°C)	34	34	55	35	37	38
pH	7,1	5,6	7,4	5,3	7,4	5,7
Toplam çözünmüş katı (mg/L)	675	60	1980	240	1415	180
Silika (mg/L)	16	---	28	---	16	1
Demir (mg/L)	---	---	4	---	3,5	<0,05
Kalsiyum (mg/L)	85	1,1	264	8	188	11
Magnezyum (mg/L)	19	1,6	172	3	78	2,9
Sodyum (mg/L)	---	---	283	93	103	35
Bikarbonat (mg/L)	142	8	211	3	222	20
Klorür (mg/L)	---	---	460	79	287	55
Sülfat (mg/L)	158	35	---	---	470	50
Toplam Sertlik (mg/L) (CaCO ₃ cinsinden)	291	11	901	11	792	40
Numune Bölgesi	Tabuk		Minjur		Saq	

Bu çalışmada tesis yerleşimi, membran tipi, bakteriyel büyüme ve kirlenmenin tesis performansı ve ürün su kalitesini etkileyen en temel faktörler olduğu gösterilmiştir.

Membran kirlenmesi nedeniyle akış düşüşü sistem performansının azalmasıyla ilgili karşılaşılan en genel sorundur. Selüloz asetat membranları bakteri oluşumu ve besleme suyu pH'ına duyarlı olduklarından performanslarının azaldığı gözlemlenmiştir [26].

İsrail Ulusal Su İşletmesi (MEKOROT), ters ozmoz teknolojisi ile su kaynağı ve kalitesi sorunlarını çözmek üzere bazı çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalarda iki farklı düzenleme benimsenmiştir; yüksek kapasiteli sistem ve küçük yerleşim alanları için basit olarak tasarlanmış küçük kapasiteli sistemler. Yüksek kapasiteli sistemlerin analizinde elde edilen en önemli veriler yüksek ürün geri kazanımı ve düşük enerji tüketimidir. 1982 yılında kurulan ters ozmoz teknolojisi ile deniz suyundan tuz uzaklaştırma tesisinde günde 11.000 m³ deniz suyu artırılmış ve daha önce kullanılan ısı damıtma yöntemine göre yılda 20.000 ton petrol eşdeğeri enerji kazancı sağlanmıştır. 1996 yılı itibariyle 34 ters ozmoz birimi toplu olarak 38.000 m³/gün tuzlu su kapasiteyle çalışmaktadır. Hizmete girecek olan 20 yeni ters ozmoz birimiyle toplam sayının 56'ya çıkması ve toplam kapasitenin 150.000 m³/gün olması planlanmıştır [27].

Suyun sertliğinin elektrokimyasal yolla uzaklaştırılmasını konu alan bir başka çalışmada, kalsiyum iyonlarının anyonik bölmeden katyonik bölmeye doğru hareket ederken katyonik bir membran kullanımının sağlayacağı avantajlar incelenmiştir. Ayrıca katot çevresinde hidroksit iyonlarının oluşumu nedeniyle hidroksit iyonlarının bikarbonat iyonlarını nötürleştirerek karbonat biçiminde çözelti içerisinde tutmalarını engellemek için yüksek gerilim uygulamanın sağlayacağı kazançlar da gözlemlenmiştir [28].

Kabuk oluşumu, deniz suyundan tuz uzaklaştırma birimlerinde rastlanan en önemli sorundur. Kabuk oluşumu, birim verimini etkiler. Bu sorunun üstesinden gelmek için iki yol kullanılabilir;

- 1- Tuzu uzaklaştırılmış suya, çekirdeklerin büyümesini engellemek amacıyla, kalsiyum karbonat, sülfat ve magnezyum hidroksit çekirdeklerinin adsorblayacağı bir miktar madde ilave edilmesi (tuz uzaklaştırma tesislerinde bu amaçla kullanılan maddelerden birisi polifosfattır),
- 2- Bikarbonattan karbondioksit oluşumu için kuvvetli asit ilavesi.

Yukarıda sayılan yöntemler klasik olarak uygulanan yöntemler olmakla birlikte; seyrelterek doğaya bırakmanın çevreye olumsuz etkileri olabileceği gibi, suya kuvvetli asit ilavesi de tuz uzaklaştırma biriminde korozyonun artmasına neden olmaktadır.

Yapılan bir çalışmada, yukarıda sözü edilen sorunları aşmak amacıyla kabuk oluşumuna neden olan temel iyonların derişiminin azaltılmasıyla ilgili yeni bir yöntem denenmiştir. Magnezyum, kalsiyum ve bikarbonat iyonları içeren suya elektroliz uygulandığında katotta su indirgenmekte ve elektrotlarda kalsiyum karbonat ve magnezyum hidroksit çökelekleri oluşmaktadır.

Bu yöntem diğerleriyle karşılaştırıldığında suyun sertliğinin azaltılmasında:

- Hızlı sonuç vermesi,
- Düşük enerji maliyeti,
- Uzaklaştırılan sertliğin derecesinin kolay kontrol edilebilmesi gibi avantajlara sahiptir [26].

Hindistan'da yapılan bir çalışmada deniz suyundan ilk elektrodializle tuz uzaklaştırma tesisinin performansı incelenmiştir. 5,5 m³/gün kapasiteye sahip olan tesis, iki aşamalı tuz giderimi yöntemiyle çalışmaktadır. Birinci basamakta deniz suyunun geridöngüsüyle % 85'e varan verime ulaşılmıştır.

İki elektrodializ bölmesinden birincisi 100 x 50 cm ölçülerinde 120 çift hücreli, ikincisi ise 81x42 cm ölçülerinde 100 çift hücrelidir. Membranlar polietilen-sitirendivinil benzenden yola çıkılarak hazırlanmış interpolimer niteliktedir. Ürün su bir depolama tankında toplanır; atıksu, membran bölmelerinin katot bölgesinden denize boşaltılır. Ürün suyunun toplam çözünmüş katı derişimi 600 - 700 mg/L arasındadır [29].

Doğal sularda sertliğin çöktürülmesinin kinetiği ile ilgili diğer bir çalışmada ise alkali ortamda sertliğe neden olan magnezyum ve kalsiyumun çöktürülmesi ile verim ve hız araştırılmıştır. Farklı sertlik değerlerinde ve iyon derişimlerinde çökmenin belirlenmesi için elektrokoagülasyondan önce doğal sularda geniş sıcaklık aralıklarında sodyum hidroksitle yumuşatma işlemi çalışılmıştır. Sertliğe neden olan iyonların NaOH ile sudan uzaklaştırılması (pH = 11,5) 25-60 dakika arasında olmuş ve maksimum çökme hızı ilk 10 dakikada görülmüştür. Kalsiyum ve magnezyum iyonlarının farklı derişimlerinde suyun alkalinitesinin giderilmesi işlemlerinde, magnezyum iyonu derişimi artırıldığında, çökelek oluşumu yavaşlamakta ve çöktürme verimi azalmaktadır. Sıcaklıktaki artış, çökelek oluşum hızını artırmıştır. Elektrokoagülasyonda NaOH ile birlikte Fe₂O₃ kullanımı, sertlik veren iyonların uzaklaştırılmasında etkili olmuştur [30].

Tar kumu kullanılarak petrol şistli atıksuların elektrokoagülasyonu ile ilgili bir çalışmada ise, elektrokoagülasyon yoluyla üç farklı tar kumundan geçen atıksudan askıda katı ve yağların yaklaşık % 98'i uzaklaştırılmıştır. Normalde çözünmüş kalsiyum ve magnezyumun yaklaşık % 65'i ve çözünmüş silikanın ise % 95-99'u uzaklaştırılabilmektedir. Ayrıca süreç, önemli toksik bileşenleri ve mikrotoksik organizmaları da uzaklaştırmaktadır [31].

Başka bir çalışmada kazan besleme suyu için yeni bir tekniğin ekonomik faydaları gözlemlenmiştir. Kazan besleme suyu işlemleri için iyon değişimi ve elektrodializ süreçlerinin ortak bir bileşimi, sudaki elektriksel iletkenlik, toplam sertlik ve klor iyonu derişimini azaltmış, ayrıca su verimini % 456 artırmış ve kazanda oluşan çamur miktarı % 50 azalmıştır [32].

Nükleer güç istasyonlarında üçlü membran demineralizasyonu için kullanılan EDR sistemlerinde giren suyun tuz uzaklaştırma işlemi önceden yapılmıştır. EDR bölmelerinde % 90 tuz giderimi 0,1 kWh/3,79 m³ enerji tüketimi ile sağlanır [7].

Tuzlu sudaki CaCO₃'ün çöktürülmesi ile demineralizasyon işleminin etkinliğinin incelendiği bir çalışmada Ca⁺⁺ ve HCO₃⁻ derişimleri ile havalandırma süreleri ve sıcaklıklar çalışılmıştır. Kullanılan süreç; kısmi yumuşatma, dekarbonizasyon ve demineralizasyon teknikleri ile tuzlu suyun arıtımının ardından ısıtma ve havalandırma işlemleriyle Ca⁺⁺ ve HCO₃⁻ iyonlarının CaCO₃ halinde çöktürülmesi yöntemine dayanan Ca⁺⁺ kation değişim tekniğinden yola çıkılarak hazırlanmıştır. Elde edilen veriler kısmi yumuşatma, dekarbonizasyon ve demineralizasyon tekniklerinin, asidifikasyon ve Na⁺ kation değişimi veya kimyasal tuz uzaklaştırma yöntemleriyle birlikte kullanıldığında daha etkili olacağını göstermektedir. Elde edilen saf CaCO₃'ün tekrar kullanıma uygun olduğu da belirtilmektedir [33].

Bir diğerk çalışma atık sudan Ca ve Mg bileşenlerinin uzaklaştırılması ile ilgilidir. Atıksu, Na kasyon değıştirici ile yumuşatılmış, kasyon değıştirici NaCl çözeltisiyle yenilenmiştir. Kasyon değışiminden sonra su; kimyasal arıtım, çöktürme ve yenileme çözeltisinin geri döngüsü işlemlerine tabi tutulmuştur. Na kasyon değıştiricinin 7-10 m/h akış hızında % 15-18 NaCl çözeltisiyle rejenerasyonu ile NaCl tüketimi azaltılmış ve çevresel etkiler önlenmiştir. Su kalsine edilmiş soda ile yumuşatılmış, 0,01-0,05 m³/h besleme hızıyla çöktürme tankına alınmış ve ardından NaOH ile CaCO₃ ayrılarak Mg(OH)₂'in uzaklaştırılması için süzölmüştür [34].

Suyun eşzamanlı dekarbonizasyon ve koagölasyon işleminin sonucu , % 30'dan daha fazla miktarda FeSO₄ koagölün çözeltisi (3-300 g FeSO₄/m³ su), yükseltgen ve sonraki aşamada % 1-30 sulu Ca(OH)₂ süspansiyonu ilavesi ile 5-70 °C'de pH'ı 8-10 olan su üretilmiştir. Daha sonra klasik yöntemle dekarbonizasyon yapılmıştır. Oluşan süspansiyon, oldukça iyi çökebilme özelliğı göstermiş ve su hızlı bir biçimde arıtılmıştır. 15 mg FeSO₄'ın % 1'lik sulu çözeltisi 1 L nehir suyuna (pH-8, Ca sertliğı 4,85 meq/L, türbidite 200 gr SiO₂/L) ilave edilmiştir. Karıştırmadan sonra pH 9,2'ye çıkana kadar % 7,5 sulu Ca(OH)₂ süspansiyonu ilave edilmiş ve karıştırma 5 dakika sürdürölerek su arıtılmıştır [35].

Düşük sıcaklıktaki deniz suyu, Al₂O₃ dolgulu bir kolondan geçirildiğinde deniz suyundaki kalsiyum iyonunun Al₂O₃ üzerinde adsorblandığı gözlemlenmiştir. Kolondan sıcak su geçirilerek Ca⁺⁺, Al₂O₃ üzerinden desorbe edilmiş ve buharlaştırma ile tuz uzaklaştırmada kabuk oluşumunu azaltmıştır. 1 mg, 20 - 30 mesh Al₂O₃ üzerinde, 25 °C'de 100 mL deniz suyundan (271 ppm Ca⁺⁺) Ca⁺⁺ adsorbsiyonu 1,40 mg-Ca/g Al₂O₃, 75 °C'de 100 mL deniz suyundan Ca⁺⁺ adsorbsiyonu ise 1,31 mg-Ca/g Al₂O₃ olmuştur [36].

Tuzlu suda ısıtma ve havalandırmayı izleyen kasyon değışimi yöntemiyle CaCO₃ çöktüröldüğünde ve su yumuşatıldığında, ardından dekarbonize ve demineralize edildiğinde sırasıyla % 20-85, % 30-95 ve % 20-35 giderim sağlanmıştır. Sürecin etkinliğı, kasyon değışim basamağının ardından HCO₃⁻ anyon değışimi ile artırılabilir. Bu süreçte elde edilen CaCO₃ yüksek saflıkta ticari değere sahip bir üründür [37].

Bikarbonat-klorür çözeltisinden karbonat uzaklaştırılmasının kinetiğı (kabuk oluşumunu ve jeotermal enerji tesislerinin korozyonunu önlemek amacıyla); Na⁺, K⁺, Mg⁺⁺,un klorür ve bikarbonatlarını ve CO₂ içeren bir sulu çözelti üzerinde çalışılmıştır. Karbonat uzaklaştırması en etkili olarak kaynatma işleminle gerçekteşmektedir. Bikarbonat-klorür çözeltisinden karbonatın uzaklaştırılmasında birinci basamakta bikarbonat bozunarak CaCO₃ oluşmakta, ikinci basamakta ise varolan Mg⁺⁺ iyonlarından etkilenen CaCO₃'ün hidrolizi gerçekteşmektedir. Süreç, tuzluğı 5-200 mg/L olan çözeltiler için uygun bulunmuştur [38].

Ca⁺⁺ ve/veya Mg⁺⁺ ve Sr⁺⁺ ve/veya Ba⁺⁺ iyonlarının neden olduğı kirlilik, sulu alkali metal klorür çözeltisinden, bir aminofosforik asit tipi ve aminokarboksilik asit tipi çift etkili reçine yardımıyla uzaklaştırılmıştır. Burada 1,5 mg/L Ca, 0,7 mg/L Mg, 0,5 mg/L Ba ve 1,4 mg/L Sr içeren % 32'lik NaCl çözeltisi, Sumichelate MC 75 ve Duolite C 467 kolonlarından geçirilerek arıtılmıştır. Elde edilen ürün sudaki Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Sr⁺⁺ ve Ba⁺⁺ içeriğı standartların alt sınırlarındadır [39].

CaC₂'ün hidrolizi yoluyla C₂H₂ üretiminde atık içinde büyük oranda yeralan Ca(OH)₂, endüstriyel atıksu işlemlerinde Mg, P, Hg, KOİ, BOİ ve askıda katı gibi

kirleticilerin uzaklaştırılmasında kullanışlı bir inorganik koagülandır. Sönmüş kireç çözeltisi veya karışımı, Mg^{++} içeren atıksuların arıtılmasında etkilidir. Arıtılan su, çöktürülür ve ardından süzülerek katı maddeler uzaklaştırılır. Donanım maliyeti düşük ve ürün suyun kalitesi yüksektir [40].

Petrolde tuz uzaklaştırılması sırasında açığa çıkan atık sudan metallerin uzaklaştırılmasında CaO ile yapılan çöktürmede, Mg^{++} , Ca^{++} , Fe^{++} , Zn^{++} , Mn^{++} , Pb^{++} ve Ag^+ için en iyi sonuç elde edilmiştir. Bu çöktürme işlemi pH 10,5'ta $FeSO_4$ ve CaO'in hidroksitleri ile yapılan koagülasyonla sağlanmıştır [41].

5. PIHTILAŞTIRMA - YUMAKLAŞMA

5.1. Tanım

Pıhtılaştırma, su ortamındaki kolloid (çok küçük, askıdaki ve yer çekimiyle çökmeyen) parçacıkların taşıdıkları elektriksel yükten dolayı oluşmuş durağan hallerinin çeşitli yöntemlerle bozularak birbirleriyle temas haline geçmeleri sonucu daha kolay çökebilen büyük kümeler haline getirilmeleri olayıdır. Su ortamlarında rastlanan kolloid parçacıklar kökenleri, derişimleri ve boyutları temelinde büyük farklılıklar gösterirler. Kolloid parçacıklar suda bulanıklık, renk ve tat gibi sorunlara yol açabilir [9].

Pıhtılaştırma ve yumaklaştırma süreçleri içme suyu ve atıksu arıtımında kullanılır. Bu süreçlerin amacı kolloidlerin çöktürülerek sudan uzaklaştırılmasıdır. Pıhtılaştırma- yumaklaştırma süreci ile çöktürülebilecek kolloidlerin çapı 1 mikron ile 1 milimikron arasında değişir. Suyun içindeki askıda maddelerin çoğu kolloidal yapıdadır. Bu da bulanıklık ve renge neden olur. Kolloidal maddeler negatif yük taşırlar. Bu yüzden demir, alüminyum gibi üç değerli metal tuzlar kullanılarak koagüle edilirler. Bu işlem kutupsal çekimle gerçekleşir.

Suların kimyasal pıhtılaştırması çeşitli amaçlar için yapılır.

- Organik ve inorganik bulanıklığın giderilmesi
- Renk giderimi
- Bakteri ve patojen giderimi
- Alg ve organizmaların giderimi
- Koku ve tat yapıcı maddelerin giderilmesi
- Fosfat giderimi
- Biyolojik Oksijen İstemi ve Kimyasal Oksijen İstemi giderimi
- Askıda katı madde giderimi
- Metal giderimi

Suyun içindeki maddeler boyutlarına göre 3'e ayrılır.

- Askıda maddeler
- Kolloidal maddeler
- Çözünmüş maddeler

Kolloidler atomlar ve küçük moleküllerden iridir ve normal filtrelerde tutulamazlar. Sudaki yayılmalarına göre iki tip kolloid vardır. Bunlar ;

- Hidrofilik kolloidler (su seven)
- Hidrofobik kolloidler (su sevmeyen)

5.2. Pıhtılaştırma Süreci

Atıksu arıtımında, kolloidal maddelerle askı halindeki, çok küçük taneciklerin çökmesini kolaylaştırmak için suya ilave edilen kimyasal maddelere koagülan (pıhtılaştırıcı) denilmektedir. Pıhtılaştırma süreci ise koagülanların atıksuya ilave edilmesini takiben hızlı bir şekilde atıksuya karıştırılmaları ve atıksuyun bünyesindeki

kolloidal ve askıda katı maddelerle birleşerek flok (yumak) oluşturmaya hazır hale gelmesi işlemidir. Askıda maddeler ve kolloidler çok uzun bekletme süresi olmadan atıksudan ayrılamazlar.

Koagülan ilavesi ile bu süre çok kısaltılır. Askıda maddeler ve çözünabilir organik maddeler ise biyolojik arıtmayla giderilebilir. Ancak çözünmeyen organik madde miktarı yüksekse kimyasal pıhtılaştırma uygulamak daha ekonomik ve uygundur.

Pıhtılaştırma sürecinde amaç ;

- Kolloidin zeta potansiyelinin düşürülmesi ve
- Kolloidin negatif yükünün nötralize edilmesidir.

5.3. Yumaklaşma Süreci

Flokülasyon süreci (yumaklaştırma) atıksuyun yavaş ve uygun şekilde bir süre karıştırılarak küçük tane ve pıhtıların büyümesi, birbiriyle birleşmesi, yumaklaşması ve böylece kolayca çökebilecek flokların oluşması işlemidir. Oluşan bu floklar bir sonraki süreç olan çöktürme kademesinde çökerek atıksudan ayrılırlar.

Yumakların irileşmesi yardımcı koagülanlar kullanılarak kolaylaştırılır. Bunların en önemlisi polielektrolitlerdir.

Yumaklaşma sürecini etkileyen faktörler aşağıdaki gibidir.

- Atıksuyun kalitesi,
- Atıksudaki askıda katı madde, kolloid ve diğer kirleticilerin miktarı,
- pH,
- Koagülasyon ve flokülasyon bölümlerindeki bekletme süresi, karıştırma tipi, çöktürme bölümünün özellikleri,
- Suyun sıcaklığı,
- Alkalinite,
- Sudaki iyonların özellikleri,
- Koagülanın tipi ve dozajı.

5.4. Pıhtılaştırma ve Yumaklaşmanın Teorisi

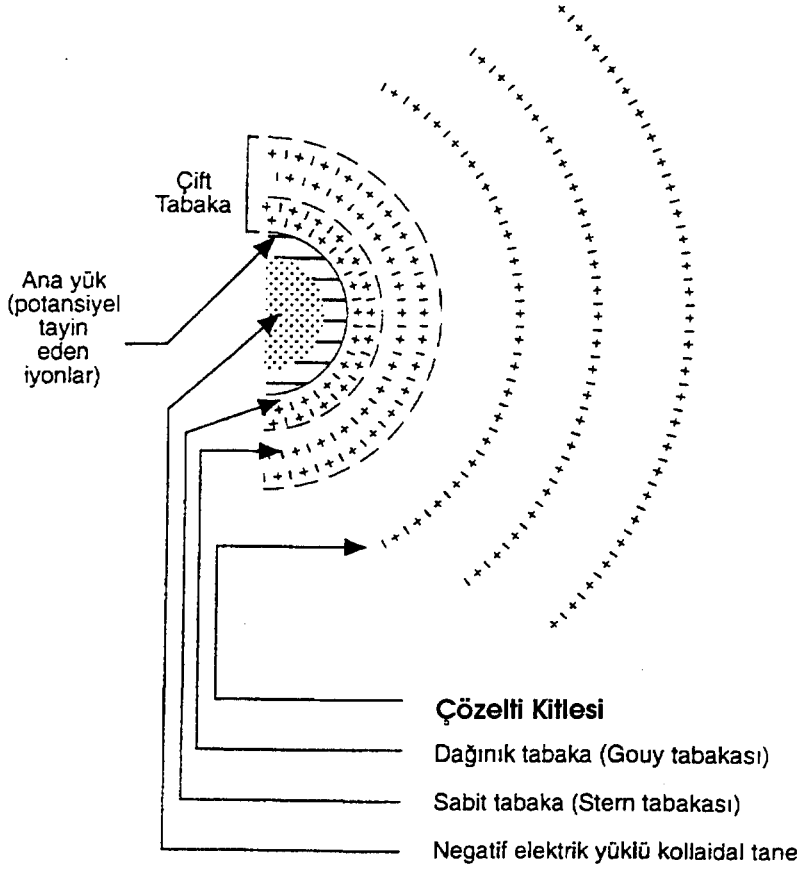
Kolloidlerin su ortamını seven (hidrofilik) ve su ortamını sevmeyen (hidrofobik) olmak üzere ikiye ayrıldığını belirtmiştik. Hidrofilik tanelerin suya karşı olan bu sevgileri, tanecik üzerindeki -OH, -COOH ve -NH₂ gibi polar grupların bulunmasından ileri gelmektedir. Elektrik yükünün bir yerde toplanması, polar grupların bir elektrik dipoluna sahip olmalarını sağlar. Bu gruplar suda çözünürler, dolayısıyla da etraflarındaki suyu çekip üzerlerinde tutarlar, böylece etraflarında sağlam bir su kılıfı oluştururlar. Taneciği çevreleyen bu su zarfına hidrasyon suyu veya zarf suyu denir. Böyle bir tanecik, etrafındaki su zarfı ile beraber, tek bir parçaymış gibi hareket etmekte ve böylece bu tanecik-su zarfından oluşan cismin hareketi bağımsız, yalnız ve homojen bir taneciğin hareketine benzemektedir. Hidrofobik kolloidal tanecikler suya karşı bir bağlılık göstermezler. Bu nedenle de etraflarında onları saran ve onlarla beraber hareket eden bir su zarfı oluşmaz. Genellikle, organik kolloidler hidrofilik, inorganik kolloidler ise hidrofobik cinstendir. Kolloidin etrafındaki zarf suyunun bittiği noktaya kesilme

düzlemi denir. Kolloid taneler elektriksel özelliklere sahiptir; bu özellikler davranışlarına büyük ölçüde etki eder. Tane yüzeyi üzerinde bulunan elektrik yükleri, arada bir elektrostatik alan oluşturur. Kolloidal sistemin kararlılığını sağlayan ana etken bu elektrostatik alandır. Tane yüzeyindeki bu yüklere “ana yük” denir. Kolloidal tane üzerindeki ana yük, atıksuda bulunan karşıt yükteki iyonları kendine çeker. Eğer tanenin ana yükü fazla ise, etraftan oldukça fazla sayıda karşıt yüklü iyonları çeker ve böylece tane, yoğun bir karşıt iyonlar tabakası ile kaplanmış olur. Bu şekilde tanenin elektrik yükü kısmen dengelenir; yani nötr hale yaklaşır. Bu, ilk ve yoğun, karşıt iyonlar tabakasına “sabit tabaka” veya “Stern tabakası” denir. Stern tabakası da yine aynı cinsten fakat, daha az sayıdaki iyonların oluşturduğu az yoğun bir tabaka ile çevrilir. Bu ikinci karşıt iyonlar tabakasına da “dağınık tabaka” veya “Gouy tabakası” denir. Gouy tabakasındaki iyon derişimi Stern tabakasına bitişik olan kısımda fazla, atıksu kitlesiyle birleştiği yerde ise azdır. Bununla birlikte Stern ve Gouy tabakaları içinde de, gayet az sayıda ana yükü oluşturan iyonlardan bulunmaktadır. Stern ve Gouy tabakalarının her ikisine birden “çift tabaka” adı verilir. Daha önce sözü edilen, kesilme düzleminin üzerindeki gerilime “zeta gerilimi” denir. Kolloidal tanenin gösterdiği elektrokinetik özellikler çoğunlukla zeta gerilimine bağlıdır. Bu yüzden zeta gerilimi çok önemlidir. Hidrofobik kolloidal tanelerde, kesilme düzlemi sabit tabaka dış yüzeyine çok yakındır.

Hidrofilik kolloidal tanelerde ise kesilme düzlemi zarf suyu dış yüzü üzerine gelmektedir. Hidrofobik bir sistemdeki itme kuvvetleri ise sadece zeta geriliminden oluşmaktadır. Taneler üzerindeki zeta gerilimleri yüksek ise birbirlerini kuvvetle iterler. Hidrofilik tanelerin dengesi ise sadece zeta gerilimine bağlı değildir; bu taneleri saran zarf suyu, tanelerin birleşmesine karşı elastik bir barikat etkisi yapmaktadır. Pıhtılaştırma - yumaklaşma sürecinin gerçekleşmesi için itme kuvvetlerinin yani zeta geriliminin düşürülmesi gerekir. Bu işlem iki şekilde yapılabilir.

- pH ayarlanması ile
- Atıksuya karşıt yüklü iyonların ilavesi ile

Kolloidlerin pH'ı ayarlandığı zaman kolloidal tane üzerindeki zeta gerilimi düşmektedir. Zeta gerilimi kolloid sisteme karşıt yüklü iyonlar vererek de indirilir. Atıksuya sonradan karşıt yüklü iyonlar ilave edilmesi sabit (Stern) ve dağınık (Gouy) tabaka üzerindeki iyon miktarını birdenbire artırır ve bunun sonucu olarak zeta gerilimi düşer. Hidrofilik kolloid dengesi sadece zeta gerilimine değil, zarf suyuna da dayanır. Zarf suyu tabakası, suya yüksek derişimde tuz ilave edilerek küçültülebilir.



Şekil 5.1. Negatif ana yüklü bir kolloidal tane etrafındaki çift tabakanın şematik görünüşü [42]

Kolloidlerin kararlılığını sağlayan önemli bir faktör yüzey yükünün olmasıdır. Yüzey yükü, ortam (örneğin atıksu) ve kolloidlerin kimyasal bileşimine bağlı olarak farklı biçimlerde gelişir. Gelişimlerdeki farklılığa bakılmaksızın bu parçacıklar kolayca çökebilecek ağırlıkta daha büyük parçacıklar şeklinde yumaklaşırsa bu durağanlık çökmeyi sağlamalıdır. Yüzey yükü genellikle tercihli olarak adsorbsiyon, iyonlaşma ve izomorf yer değiştirme şeklinde gelişir. Örneğin yağ damlacıkları, gaz kabarcıkları veya suda dağılmış diğer kimyasal inert maddeler anyonların tercihli adsorbsiyonu şeklinde negatif bir yük kazanacaktır. Proteinler ve mikroorganizmalar gibi maddeler de yüzey yükü karboksil ve amino gruplarının iyonizasyonu ile oluşur. İzomorf yer değiştirmedeki yük değişimi, kil ve diğer katı parçacıklarda oluşur. Burada kafes yapıdaki iyonlar çözeltiden gelen iyonlarla yer değiştirir (örneğin alüminyum ve silisyumun yer değiştirmesi gibi).

Pıhtılaşmayı iletirmek amacıyla belirli iyonların eklenmesine örnek olarak metal oksitlerin ya da sıfıra yakın yüke sahip hidroksitlerin yüklerini azaltmak için kuvvetli asit veya baz eklenmesi gösterilebilir. Elektrolitler kolloidal süspansiyonların yoğunlaşması için de eklenebilir [42].

5.5. Pıhtılaştırma - Yumaklaşma Sürecinde Kullanılan Kimyasal Maddeler

Su arıtımında en çok kullanılan koagülanlar alüminyum sülfat ve demir tuzlarıdır. Alüminyum sülfat (daha ucuz olduğu için) demir tuzlarından daha çok kullanılmasına karşın demir tuzlarının da daha geniş pH aralığında etkin olma avantajları vardır.

Atıksu arıtımında en çok kullanılan koagülanlar ise alum ve kireçtir. Bazen geri döngü çamuru ve polielektrolitler gibi koagülan yardımcıları da kullanılır. Su ya da atıksuyun pıhtılaştırma ve yumaklaşmasında temel etkenler; türbidite, askıda katılar, sıcaklık, pH, kationik ve anyonik bileşim ve derişim, karıştırmanın süresi ve derecesi, koagülanın ve gerekirse koagülan yardımcısının yapısı ve dozajıdır [43].

Kimyasal arıtımı gerçekleştirmek amacıyla değişik kimyasal maddeler kullanılabilir. Kimyasal çöktürmeyle arıtılmış su elde ederken toplam askıda katı maddede % 80-90, BOİ₅'de % 40-70, KOİ'de % 30-60 giderim sağlanabilir. Kimyasal arıtmada, en çok kullanılan kimyasal maddeler aşağıda verilmiştir.

Çizelge 5.1. Pıhtılaştırma-yumaklaştırma sürecinde en çok kullanılan kimyasal maddeler [44]

KİMYASAL MADDE	FORMÜLÜ
Alum	Al ₂ (SO ₄) ₃ .18H ₂ O
Demir (II) Sülfat	FeSO ₄ .7 H ₂ O
Kireç	Ca(OH) ₂
Demir (III) Klorür	FeCl ₃
Demir (III) Sülfat	Fe ₂ (SO ₄) ₃
Polielektrolitler	Doğal - Sentetik

Demir Tuzları: Demir tuzları atıksu arıtımında çok sık olarak kullanılır. Demir klorür sıvı ve katı olarak bulunabilir. Demir klorür nedeniyle oluşan çökelek demir hidroksittir (Fe(OH)₃). Demir sülfat daha ucuz bir kimyasal maddedir ve atıksu arıtımında yoğun olarak kullanılır.

Alüminyum Tuzları: Alüminyum sülfat (Alum) sıkça kullanılan bir kimyasal maddedir. Verimi, demir tuzları kadar yüksek değildir. Alüminyum hidroksit flokları daha az yoğundur ve demir tuzlarına göre çökmesi yavaştır. Çöktürme havuzunda daha uzun bekletme süreleri gerekir.

Kalsiyum Tuzları: Kalsiyum hidroksit Ca (OH)₂ hem pH ayarlamak için hem de koagülan olarak kullanılabilir.

Diğer Kimyasal Maddeler: Sülfürik asit (H₂SO₄) ve hidroklorik asit (HCl), pH'ı düşürmek için kullanılır. Kostik (NaOH), hem pH'ı yükseltmek için hem de bazı atıksularda polielektrolitten önce koagülan olarak kullanılır.

Polielektrolitler: Polielektrolitler doğal ve sentetik olmak üzere ikiye ayrılır. Doğal polielektrolitler biyolojik temellidir ve nişasta ürünlerinden veya selülozdan elde edilir. Sentetik polielektrolitler ise yüklerine göre sınıflandırılır. Negatif, pozitif ve nötr olma durumlarına göre anyonik, katyonik ve iyonik olmayan şeklinde adlandırılırlar. Polielektrolitler tanecikler arasındaki bağları büyütürler ve iri floklar oluşmasını sağlarlar. İki veya daha fazla tanecik polielektrolit bağlarına tutunarak köprü oluşturur. Bu köprü aynı şekilde oluşan diğer köprülerle birleşir. Böylece floklar irileşir ve çökeltme ile daha kolay giderilirler. Kimyasal atıksu arıtım tesislerinde polielektrolit kullanımı özellikle son 15 yılda çok önemli boyutlara ulaşmıştır. Polielektrolit kovalent bağlarla biraraya gelmiş birbirine bağlı bir seri kimyasal birimden (monomer birimler) oluşan bir yapıya sahiptir. Pozitif yüklü katyonik polimerler doğrudan koagülan olarak veya koagülan yardımcısı olarak kullanılabilir. Bu tip polielektrolitler aynı zamanda filtrasyon yardımcısı malzemesi ve çamur suyunun giderilmesinde koşulları uygunlaştırmada kullanılır. Yüksüz ve negatif yüklü olan anyonik polimerler koagülan yardımcısı, filtrasyon yardımcısı ve çamuru uygunlaştırmada kullanılır [44].

Pıhtılaştırma ve yumaklaştırma işlemleri için kullanılan ve daha ucuz, ancak hazırlanması ve işletmesi zor olan kimyasal dozaj maddeleri (alum, demir klorür, demir sülfat, kireç vb.) yerine bugün modern tesislerde, uygun anyonik veya katyonik polielektrolitler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [43].

5.6. Uygulama Alanları

Evsel atıksuların arıtımında; ham atıksuyun birincil ya da ikincil arıtımından çıkan suların fiziksel-kimyasal arıtımında katıların toplanması için kullanılır. Endüstriyel atıksu arıtımında ise önemli ölçüde askıda katı madde içeren atıksudaki giderilmesinde uygulanır.

Pıhtılaştırma ve yumaklaştırma, kimyasal çöktürme ve çamur yoğunlaştırmasında yaygın olarak kullanılır. Bu işlem, temelde, atıksuya kimyasal madde eklenmesi ile bünyesinde bulunan askıda ve çözünmüş maddelerin yapısını değiştirmek ve eklenen maddelerin fiziksel etkileriyle bunların sudan uzaklaştırılmasını sağlamak için yapılır.

Pıhtılaştırma - yumaklaştırma - çökeltme süreçleri, pamuklu tekstil endüstrisi atıksuyunda AKM, organik madde, renk, metal iyonu ve biyolojik olarak arıtılmayan spesifik kirleticilerin giderilmesinde kullanılmaktadır [44].

6. ELEKTROKOAGÜLASYON

6.1. Tanım

Elektrokoagülasyon; çözünebilen ve pıhtılaştırıcı özelliğe sahip metal (alüminyum ve demir gibi) bir elektrodun kullanıldığı elektrokimyasal atıksu arıtım sürecidir. Elektrokoagülasyonda pıhtılaşma ve çökeltme mekanizmaları sisteme kimyasal madde ilavesi ile değil, elektrokimyasal reaktördeki elektrotlar aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Örneğin anodun demir olması durumunda, anotta Fe^{++} iyonları oluşacaktır. Katotta ise suyun elektrolizi ile hidrojen gazı yanında OH^- iyonları da oluşur.

Süreç sırasında elektrotlarda gerçekleşen tepkimeler;

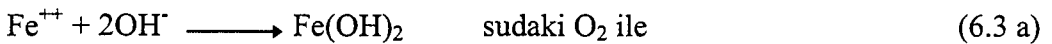
Katotta:



Anotta:



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



Bu aşamada arıtılacak sudaki kirleticiler, örneğin $Cr(III)$, ya OH^- ile $Cr(OH)_3$ gibi çözünmeyen bir bileşik oluşturarak ya da oluşan $Fe(OH)_3$ 'ün çökmesiyle eşzamanlı olarak $Fe(OH)_3$ yumağına tutunarak çöker [8].

6.2. Uygulama Alanları

Elektrokoagülasyon süreci, büyük ölçekli uygulamalarda denenmemiş olmakla birlikte, laboratuvar ölçekli çalışmalarda klasik yöntemlere göre bazı avantajlara sahip olduğu gözlenmiştir. Bu avantajlar kısaca aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Metal sanayiinde elektrokoagülasyonla, hiç kimyasal madde kullanmadan arıtma yapılabilir.
- Boyar maddeler, ağır metaller çok kısa sürede uzaklaştırılabilir.
- Klasik çöktürme yöntemlerinde olduğundan çok daha az çökelek oluşur.
- Bu yöntemde elektrik enerjisi tüketimi sanıldığı kadar büyük olmamaktadır.
- Klasik yöntemlerde atıksuyun pH'ının ayarlanması söz konusudur. PH ayarı için bir ön işlem (nötralizasyon) yapılmaktadır. Oysa elektrokoagülasyon

yönteminde atıksu, ucuz ve kolay bulunan yemek tuzu (destek elektrolit) ilavesi ile doğrudan elektrokimyasal reaktöre verilebilir.

- Elektrokimyasal proseslerde yatırım maliyetinin düşük olacağı yapılan çalışmalarda gösterilmiştir [44].

Elektrokoagülasyon ile tekstil endüstrisi atıksularından boyar maddelerin uzaklaştırılması ve metal sanayiinde metal ve ağır metallerin etkin ve ekonomik şekilde giderilmesi mümkün olmaktadır [45].

Deniz suyunun elektrolizi ve atık çamurların arıtımında da elektrokoagülasyon süreci uygulanmıştır. Anotta üretilen klor dezefeksiyon sağlarken, hidroksil iyonları deniz suyundaki magnezyumu uzaklaştırır, (oluşan magnezyum hidroksitin yumaklaştırıcı etkisi vardır). Fosfatın da çöktürülüp uzaklaşması sağlanır. Böylece yosunların aşırı büyümesi engellenmiş, yosun oluşum kontrolü sağlanmış olur [44].

Atıksulardan yağın elektrokoagülasyon yoluyla uzaklaştırılmasını konu alan bir çalışmada % 100 giderim sağlanmıştır. Proses, demir ve alüminyum reaktörlerde kesikli olarak uygulanmıştır [46].

Elektrokoagülasyon süreciyle yapılan bir başka çalışmada atıksulardan nitrat giderimi incelenmiştir. Çözünebilir anot olarak demirin kullanıldığı bu çalışmada destek elektrolit olarak sodyum klorür kullanıldığında % 100'e ulaşan giderim sağlanmıştır.

Suda çözünen toluen, benzen gibi maddeler dışında organik madde ve inorganik tuzların bu yöntemle giderilmesi olası gözükmemektedir [47].

7. ELEKTRODİYALİZ

7.1. Elektrodializ Tanımı

Tuzlar ve mineraller su içinde çözüldüğü zaman iyon şeklini alırlar. Bu iyonlar pozitif veya negatif elektrik yüklü atomik veya moleküler büyüklükteki parçacıklardır. Örneğin tuz (NaCl), pozitif yüklü katyon olarak adlandırılan Na^+ iyonuna ve negatif yüklü anyon olarak adlandırılan Cl^- 'e ayrışır. Anot ve katot arasında bir gerilim uygulanırsa bu iyonlar elektrik alanı içinde taşınarak negatif yüklü anyonlar pozitif yüklü anoda ve pozitif yüklü katyonlar negatif yüklü katoda hareket edecektir.

Elektrodializ süreçleri, elektriksel gerilim farkının itici gücü altında sulu çözeltilerden iyonların ayrılması için kullanılan elektrik yüklü membranlardan oluşur. Bir başka deyişle, elektrik yüklü membranlar ve elektriksel gerilim farkı, çözeltiden ve diğer yüksüz bileşenlerden iyonik parçacıkların ayrılması için kullanılır [10].

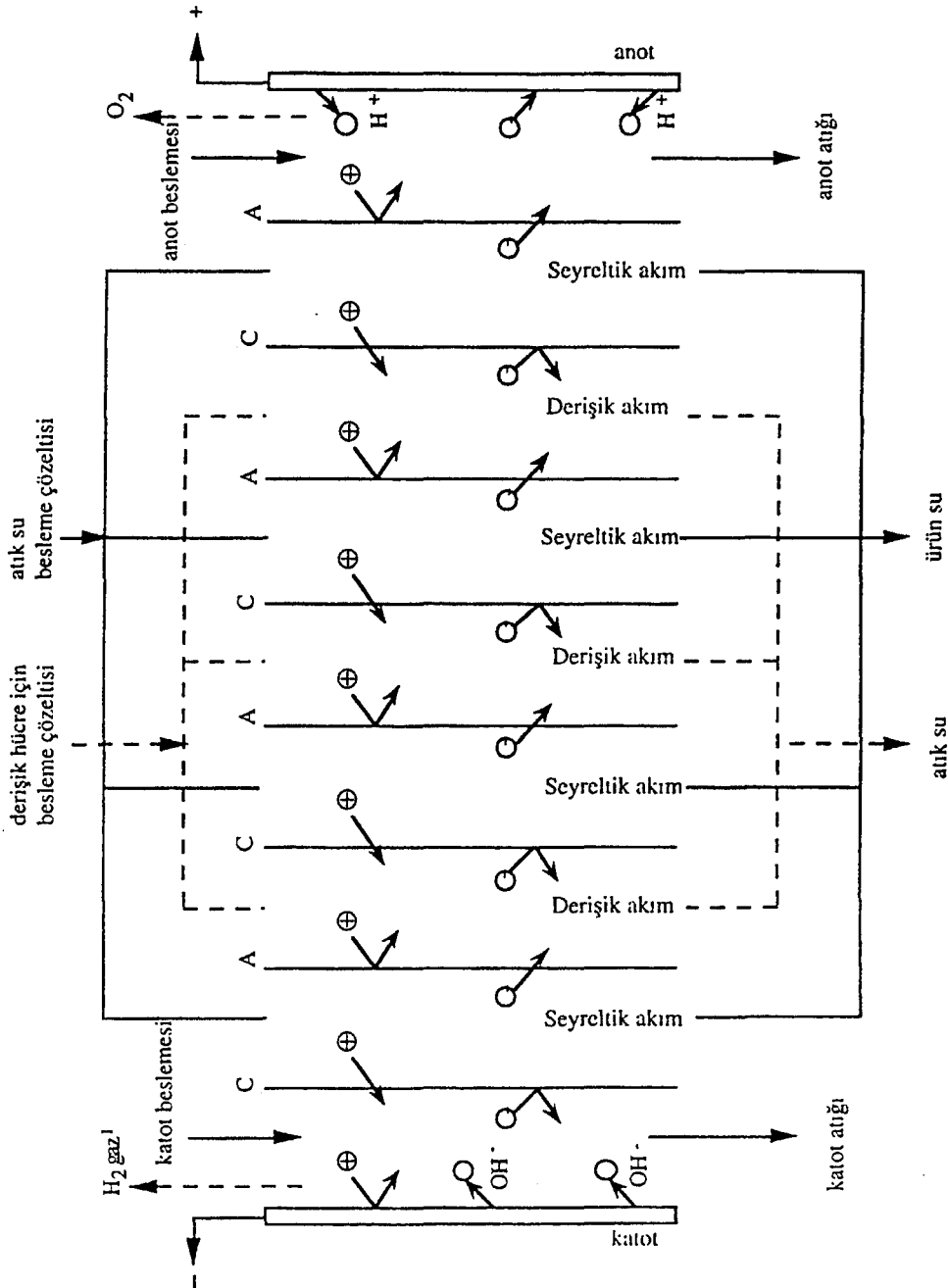
Elektrodializ hücresi anot ve katot arasında sıralı anyon ve katyon geçirici membran serilerini içerir. Şekil 7.1'de genel bir elektrodializ şeması görülmektedir. Katyonlar sabit negatif yüklü katyon değişim membranlarından kolaylıkla geçer ve sabit pozitif yüklü anyon değişim membranları tarafından itilirler. Böylece iyon derişimi bir bölmede azalırken daha sonraki bölmede artar; iyon yönünden zenginleşen çözelti derişik, iyon kaybeden çözelti ise seyreltik olarak adlandırılır [8][48].

Bir elektrodializ birimi seyreltik ve derişik çözelti kanalları, gasketler ve membranlardan oluşur. Şekil 7.2'de bir elektrodializ birimi verilmiştir [49]. Gasketler sadece membranları ayırmazlar, bunun yanında farklı bölmeler içinde bulunan manifoldlar ile akışkanın dağılmasını da sağlarlar. Membran tabakaları arasındaki uzaklık olabildiğince küçük olmalıdır. Endüstride bulunan elektrodializ hücrelerinde membranlar arasındaki uzaklık 0,5 ile 2 mm arasında değişmektedir [50]. Pek çok hücre tasarımında, hem membranı desteklemek hem de besleme çözeltilisinin akış dağılımını kontrol etmek için membran tabakaları arasına dağıtıcılar yerleştirilmiştir. Elektrodializ hücresi için en ciddi tasarım sorunu, bu bölmeler içinde uniform bir akış dağılımı sağlamak ve içteki kaçakları önlemektir. Özellikle, derişik çözelti bulunan bölmeden seyreltik çözelti bölmesine kaçakların olması çok önemli bir sorundur [8].

Uygulamada elektrodializ sistemlerinde 100 ile 500 bölmeli hücrelerde paralel olarak yerleştirilmiş 100 ile 200 kadar katyon ve anyon değişim membranı yer alır [50][51].

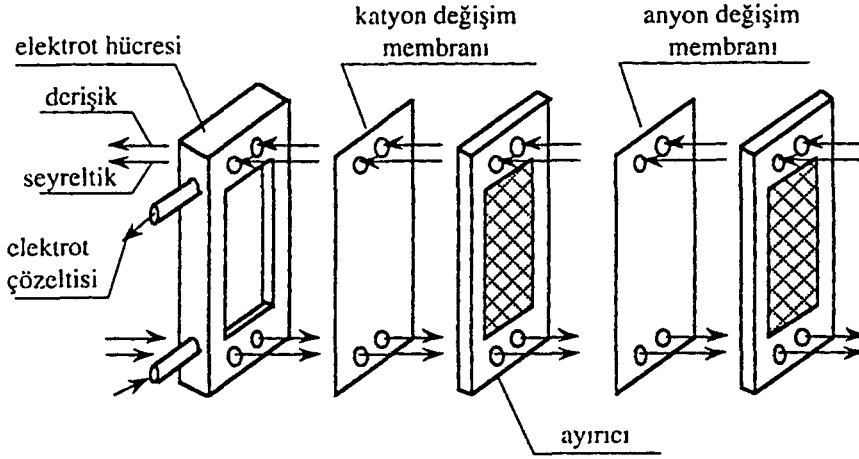
Elektrodializ, bir elektriksel alan altında iyonların iyon geçiren bir membrandan geçirilmesi temeline dayanır. Çözelti akışı, diğer membran süreçlerinde olduğu gibi membranın içinden değil, membran yüzeyinden gerçekleşir. Böylece ters ozmozdaki genel sorun olan membran kirlenmesinin kısmi olarak önüne geçilebilir. Ancak tuzlar, membran yüzeyinde çökebilir. Sürecin verimi membranın yalnızca aynı yükteki iyonların geçişine izin vermesi, zıt yükteki iyonların geçişine izin vermemesine bağlıdır. İyon taşınımı, beslemeden derişik kısma geçen iyonların (tuzların) harcadığı elektrik enerjisiyle orantılıdır. Buradan da görüleceği gibi elektrodializ, düşük tuz derişimlerinde (< 3000-5000 mg/L) uygulama alanı bulmaktadır. En önemli endüstriyel uygulaması, tuzlu sudan içme suyu üretimidir.

Tipik olarak elektrodializde 1000-5000 mg/L çözülmüş tuz içeren tuzlu besleme çözeltisi, Dünya Sağlık Örgütü'nün sınırlarına uygun değer olan 500 mg/L'den daha az tuzluluğa sahip içme suyu ve 20.000-50.000 mg/L tuzluluğa sahip tuzlu su akımına dönüştürülür. Yüksek oranda iyon giderimi gerektiğinde elektrodializ, birçok basamaktan oluşan bir sistem şeklinde uygulanır ve her bir basamakta yaklaşık % 50 tuz uzaklaştırma sağlanabilir.



Şekil 7.1. Genel bir elektrodializ şeması [8]

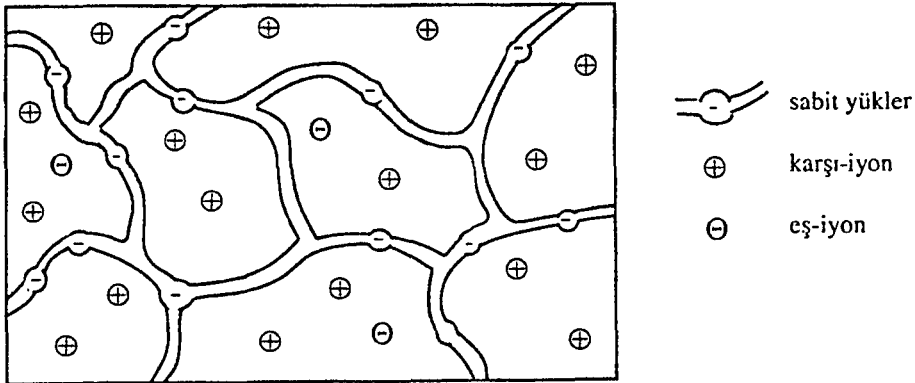
Elektrodiyaliz işlemi sırasında derişim polarizasyonunun bir sonucu olarak membran yüzeyinde tuzlar birikecektir. Bu sorunun boyutu, su kaynağının kalitesine ve elektrodiyalizden önceki ön işlemin kapsamına bağlıdır. Bu işlem, geridöngülü elektrodiyaliz uygulaması ile giderilir [8].



Şekil 7.2. Bir elektrodiyaliz birimi [49]

7.2. Elektrodiyalizde Kullanılan İyon Değişim Membranları

Elektrodiyaliz birimindeki en önemli bileşen iyon değişim membranlarıdır. Reçinelerde olduğu gibi membranlarda da iki farklı tip vardır; bunlar matris içinde negatif yüklü sabit gruplar içeren katyon değişim membranları ve pozitif yüklü sabit gruplar içeren anyon değişim membranlarıdır (Çizelge 7.1). Birçok inorganik iyon değiştirici materyal olmasına karşın, pek çoğu Silika, Bentonit, Alüminyum ve Zirkonyum oksihidratlarından oluşur. Günümüzde membranlar daha çok sentetik polimerlerden üretilmektedir. Tipik bir katyon değişim membranının şematik diyagramı Şekil 7.3'te gösterilmektedir.



Şekil 7.3. Tipik bir katyon değişim membranı [8]

Katyon değişim membranı, polimer matrislerden oluşur ve sabit negatif yüklü gruplar içerir. Elektro-nötralite hareketli pozitif yüklü katyonlar ile sağlanır. Hareketli iyonlar karşı-iyon ve eş-iyon olarak adlandırılır. Hareketli anyonlar (eş-iyonlar), sabit negatif yüklü gruplarla aynı yükü taşıdıklarına göre, az ya da çok itilirler. Bu itme "Donnan Eksklusyon"u olarak adlandırılır. Bir katyon değişim membranında eş-iyonların itilmesi nedeniyle, membran boyunca tüm elektrik akımını katyonlar taşır. Anyon değişim membranları, polimer matriste sabit pozitif yükler taşırlar ve katyonları iterler. Böylece akım anyonlar tarafından taşınır [8].

Membran süreçleri, kolloidal maddeleri membran yüzeyinde biriktirecek itici güce sahiptir. Kolloidal parçacıklar, sınır su katmanının yüzeyinde toplam yük oluşturmak üzere suyla etkileşirler. Elektrodializ bölmelerine uygulanan doğru akım elektrik alanı, kolloidleri anyon membranına doğru hareketlendirir. Membran yüzeyinde oluşan elektrik alanı ve elektrostatik çekim gücü, pozitif yüklü iyonların anyon değiştirici membranlar üzerinde birikmesine neden olur. Geridöngülü elektrodializ (EDR) sürecinde doğru akım alanı tersine döndürüldüğünde elektriksel itme gücü de ters döner ve membran yüzeyinde birikmiş olan kolloidleri tuzlu su akımına geri gönderir.

7.3. Elektrodializin Uygulama Alanları

Elektrolit çözeltilerin deriştirilmesi, deiyonize edilmesi ve seyreltilmesi, elektrodializin en önemli uygulamalarıdır. Daha sonraları tuzlu sudan tuz uzaklaştırma için önde gelen tekniklerden biri haline gelmiştir. Elektrodializ, deniz suyundan tuz uzaklaştırılarak tuz üretimi için de geniş oranda kullanılan bir süreçtir.

Temelde iyonik taneciklerin geri kazanılması ya da uzaklaştırılması için olası uygulamaları olan bir tekniktir. Kullanıldığı diğer bazı endüstri dalları ise; gıda, ilaç, metal kaplama endüstrilerinin atıksularının arıtılması ve tuz çözeltilerinin kimyasal rejenerasyonudur. Tüm bunlar gözönünde bulundurulduğunda elektrodializ;

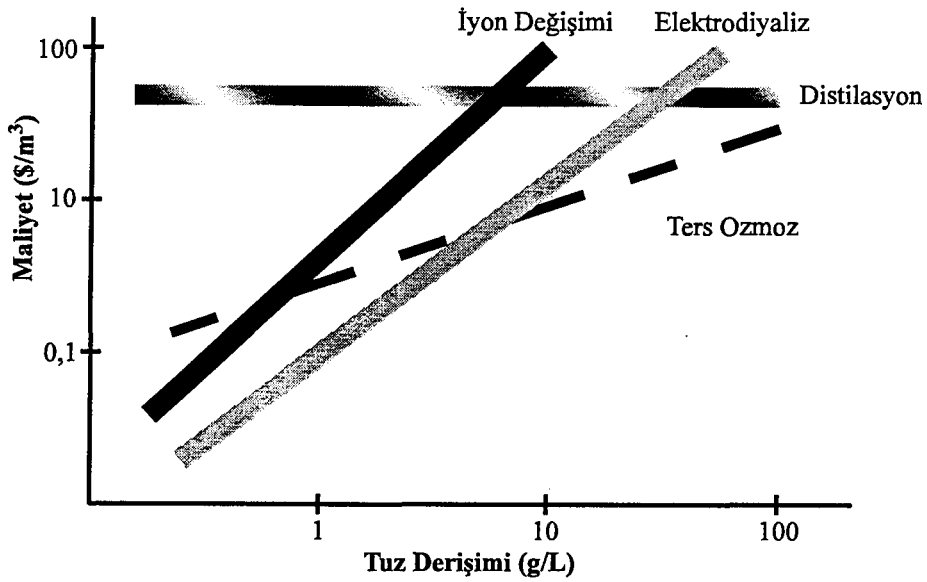
- Sulu çözeltilerden tuz, asit ve bazların ayrılması,
- Nötral moleküllerden iyonik bileşenlerin ayrılması,
- Çok yüklü iyonlardan tek yüklü iyonların ayrılması,
- Yeni türler üretmek üzere iyonik parçacıkların ilavesi gibi aratım ve ayırma amacıyla uygulanmaktadır.

Elektrodializin

- Yüklü bileşenler için yüksek seçicilik,
- Düşük enerji ve yatırım maliyeti,
- Sürekli işlem,
- Ek kimyasal maddelere ve kapsamlı ön işleme gerek duyulmaması,
- Membran ömrünün uzun olması gibi avantajları vardır [52].

Elektrodializ ve ters ozmoz, sudan tuz uzaklaştırma süreçlerinde rekabet halindedir. Her iki süreç için enerji gereksinimi kuramsal olarak aynı olmasına karşın, uygulamada tersinmez enerji kaybından dolayı, enerji gereksinimi farklıdır. Ters ozmozdaki enerji kaybı, membranın iki yüzündeki basınç farkıyla ilişkilidir; bu basınç

iyonların membrandan geçerken neden oldukları sürtünme kaybından doğar. Dolayısıyla, elektrodializde enerji gereksinmesi çözülmüş iyonların derişimine doğrudan bağlıdır. Düşük oranda çözülmüş iyon derişiminde elektrodializin enerji gereksinimi ters ozmozun enerji gereksiniminden daha azdır. Belli bir iyon derişiminde ise elektrodializin maliyeti artmakta ve ters ozmozun üzerine çıkmaktadır. Bu nedenle ters ozmoz daha fazla tercih edilir hale gelmektedir. Ayırma sürecinin maliyetlerini hesaplarırken aynı zamanda membransız ayırma maliyetleri de göz önüne alınmalıdır.



Şekil 7.4. Tuzlu su arıtımında çeşitli süreçlerin maliyetlerinin karşılaştırılması [8]

Membran teknolojilerindeki hızlı gelişme ve ters ozmoz süreçlerinde işlem hacmine göre enerji tüketiminin gün geçtikçe azalması hem uygulama koşullarını basitleştirdiğinden, hem de daha ekonomik hale getirdiğinden, ters ozmoz, buharlaştırma gibi süreçlere göre ön plana çıkmıştır.

Membran tuz uzaklaştırma sistemi, özellikle organik madde içeren suların arıtılmasında, eğer bir dezenfektan ilave edilmemişse, bakteriyel gelişimi destekleyici niteliktedir. Akrilik temelli anyon değiştirici membranlar hipoklorit, kloramin ve peroksitler gibi kuvvetli dezenfektanlara karşı büyük direnç gösterir. 25 mg/L serbest klor gibi yüksek miktarlarda dezenfektan ilavesi, diğer maddelerin sterilizasyonu için kısa süreli kullanılabilir. Tipik membran ömürleri, kimyasal etkinlikte bir kayıp olmadan, anyon değiştirici membran için 10 yıl, kation değiştirici membran için ise 17 yıla kadar varan sürelerdir.

Elektrodializin uygulama alanları aşağıdaki biçimde sıralanabilir;

- * Tuz uzaklaştırma yoluyla kullanılabilir su üretimi
- * Endüstriyel atıklardan su ve değerli maddelerin geri kazanımı

- * Gıda endüstrisinde tuz ve asit uzaklaştırılması
- * İlaç endüstrisinde çözeltilerin tuzsuzlaştırılması
- * Deniz suyundan tuz elde edilmesi
- * Tuzlu su atık akımlarından iki kutuplu membranlar yardımıyla asit ve baz üretimi
- * Asetik asitin deriştirilmesi
- * Glauber tuzunun deriştirilmesi
- * Kağıt endüstrisi atıksularının deriştirilmesi
- * Meyve sularından asit uzaklaştırılması
- * Proteinin saflaştırılması
- * Fotoğrafçılıkta kullanılan kimyasal maddelerin geri kazanılması
- * Radyoaktif atıksuların tuzsuzlaştırılması
- * Yakıt pilleri
- * Analitik prosesler [7]

8. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalarda tuzluluğun giderilmesi amacıyla etkin olarak uygulanan elektrokoagülasyon sürecinden önce koagülasyon yapılmıştır.

Son olarak koagülasyon, adsorbsiyon, elektrokoagülasyon ve elektrodializi içeren bir karma sistem verimlilik ve maliyet açısından incelenmiştir.

Artılacak model suyun özellikleri aşağıdaki gibidir:

Anyonlar;

Klorür: 14.750 mg/L

Sülfat: 700 mg/L

Bikarbonat ..: 460 mg/L

Katyonlar;

Sodyum: 8121 mg/L

Kalsiyum: 1150 mg/L

Magnezyum.: 325 mg/L

Toplam Tuzluluk: 25.506 mg/L

İletkenlik: 55,00 mS/cm

pH: 7,65

8.1. Kullanılan Kimyasal Maddeler

Model atıksuyun hazırlanmasında kullanılan kimyasal maddeler NaHCO_3 , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ve NaCl 'dir.

Artırılmış suyun içerdiği iyonların tayininde kullanılan kimyasal maddeler aşağıda verilmiştir.

Klorür tayininde potasyum kromat belirteç çözeltisi (50 g/L), 0,0141 N standart gümüş nitrat çözeltisi, 0,0141 N standart sodyum klorür çözeltisi, ayrıca pH ayarlaması için sodyum hidroksit çözeltisi kullanılmıştır.

Sülfat tayininde baryum klorür kristali, litrede 100 μg SO_4^{2-} içeren standart sülfat çözeltisi, gliserin, derişik hidroklorik asit, sodyum klorür, izopropil alkol ile hazırlanan yardımcı çözelti kullanılmıştır.

Bikarbonat tayininde ise 0,04 N hidroklorik asit kullanılmıştır.

Kalsiyum-magnezyum tayini, 0,02 M EDTA çözeltisi, Eriochrome Black-T, sodyum borat, metanolden hazırlanan indikatör çözeltisi, amonyak, amonyum klorürle hazırlanan tampon çözelti ile yapılmıştır.

8.2. Yardımcı Araçlar

Çalışmalarda akım, 220 V girişli ELSİM marka güç kaynağından sağlanmış, geçen akım ve uygulanan gerilim OGSM 3900 model dijital avometre kullanılarak ölçülmüştür. Sülfat iyonu tayini için JENWAY 6035 marka türbidimetre, iletkenlik tayini için ise HACH COMPANY 44600 marka cihaz kullanılmıştır. Sodyum tayini

HITACHI 911 marka Auto Analizörde Bachringer Mannin Selektif elektrotlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. pH, Orion 710A Benchtop pH/ISE iyonmetre kullanılarak ölçülmüştür.

8.3. Tayinler

Klorür tayini, standart metotlarda verilen arjantometrik yöntemle gerçekleştirilmiştir. Sülfat tayini, türbidimetrik yöntemle yapılmış, sonuçlar standart sülfat çözeltilerinin derişimlerine göre hazırlanan çalışma doğrusundan tespit edilmiştir (Bkz. Ek 1). Bikarbonat, kalsiyum ve magnezyum tayinleri, TSE tarafından belirlenen titrimetrik yöntemler kullanılarak yapılmıştır. Sodyum tayini, Osmangazi Üniversitesi Tıp Fakültesi Biyokimya Anabilim Dalı laboratuvarında yaptırılmıştır.

8.4. Tuzluluğu Oluşturan İyonların Pıhtılaştırma ile Giderimi

Model atıksuyun tuz derişimi çok yüksek olduğundan, iyonların derişimini düşürmek amacıyla pıhtılaştırmanın etkinliği araştırılmıştır. Jar Test cihazında yapılan çalışmalarda farklı koagülanların giderime etkisi önce ayrı ayrı daha sonra da kireçle birlikte incelenmiştir.

Koagülan olarak demir (II) sülfat [$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$], demir (III) klorür [$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$] ve alum [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$] kullanılmıştır. Daha iyi yumak oluşumunu sağlamak için de koagülan yardımcısı olarak katyonik polimer ilave edilmiştir. En uygun koagülan miktarları 1 litre çözelti için 25,17 g demir (II) sülfat, 16,3 g demir (III) klorür ve 33,51 g alum olarak belirlenmiştir. En iyi sonuç 11,17 g kireçle birlikte alumin kullanıldığı deneysel çalışmada elde edilmiştir.

Miktarların belirlenmesinde koagülanların en etkin oldukları pH değerleri dikkate alınmıştır. Yapılan ön çalışmalarla en uygun süre ve çalışma hızı belirlenmiştir. Toplam karıştırma süresi 30 dk olarak saptanmış, hızlı karıştırma 110 devir/dk hızla 1 dk, yavaş karıştırma ise 10 devir/dk hızla kalan 29 dk'da gerçekleştirilmiştir.

8.5. Tuzluluğu Oluşturan İyonların Elektrokoagülasyon ile Giderimi

Bu konuyla ilgili deneysel çalışmalar demir reaktör ve demir karıştırıcı elektrotlar yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Reaktörün dış çapı 7,5 cm, iç çapı 6,5 cm ve yüksekliği 5,5 cm'dir. Reaktörde arıtılan atıksuyun hacmi 100 mL'dir. Sistemde tuzu uzaklaştırılacak model atıksu, petrol formasyon suyunun içerdiği tuzluluk değerleri esas alınarak hazırlanmıştır. Deneysel kesikli yöntem uygulanmıştır.

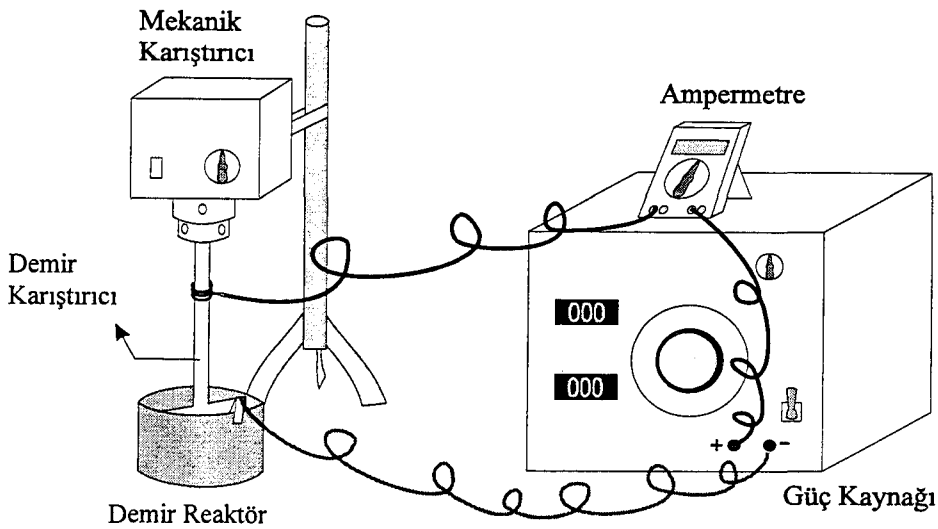
Demir reaktörün anot, demir karıştırıcının katot olduğu ve karıştırıcının anot, reaktörün katot olduğu durum ayrı ayrı incelenmiştir. Ayrıca bu parametrik çalışmalarda elde edilen en iyi koşullarda yardımcı çöktürücünün, pH'ın ve karıştırma hızının atıksu arıtımına etkisi de araştırılmıştır.

Yardımcı çöktürücü olarak farklı derişimlerde alüminyum oksit kullanılmıştır. Yardımcı çöktürücüyle yapılan çalışmalar için en iyi koşullarda farklı yardımcı çöktürücü olarak demir (III) oksit'in etkisi de incelenmiştir. Diğer bir deneysel

çalışmayla da tuz gideriminin en yüksek olduğu koşullarda demir reaktör anot, alüminyum karıştırıcı katot olduğunda verim araştırılmıştır.

Ön çalışmalarda sıcaklık artışının sistemi olumsuz yönde etkileyen önemli bir etken olduğu gözlenmiş, deneysel çalışmaların süreleri sıcaklık artışına göre belirlenmiştir. Çalışmalar 0,75; 1,5; 2,25 ve 3,0 amper akım değerlerinde; 0,75 A için 30, 60, 90 ve 120; 1,5, 2,25 ve 3,0 A için 10, 20, 30 ve 40'ar dakikalık sürelerde yürütülmüştür. Giderimin en iyi ve sıcaklığın düşük olduğu değerler için süre uzatılmıştır. Arıtılmış çözelti, 24 saat bekletilip Whatman 40 numaralı süzgeç kağıdından süzildükten sonra, süzüntüde tuzluluğu oluşturan iyonların tayinleri ile iletkenlik ve pH değerleri belirlenmiştir.

Deneysel çalışmada kullanılan sistem Şekil 8.1'deki gibidir.



Şekil 8.1. Elektrokoagülasyon deney düzeneği

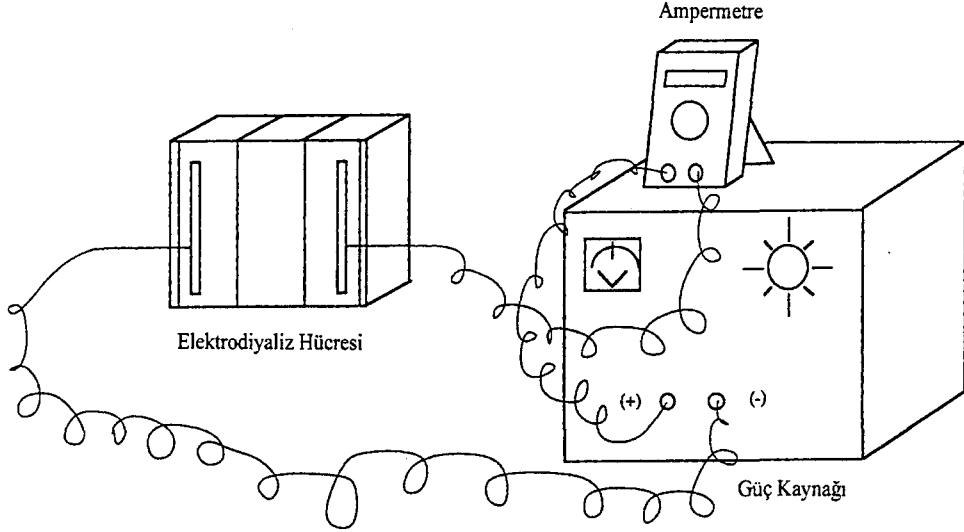
8.6. Tuzluluğu Oluşturan İyonların Elektrodializle Giderimi

Tuzluluğu oluşturan iyonların uzaklaştırılması için elektrodializ yöntemi de kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan elektrodializ hücresinin yüksekliği 7,3 cm, eni 5,3 cm ve boyu 7 cm'dir. Toplam hücre hacmi 200 cm³'tür. Hücre anyon ve katyon değiştirici membranlarla 3 hacme ayrılmıştır.

Elektrodializ hücresinde Nafion 423 katyon değişim membranı ile Ionac MA3475 anyon değişim membranı, anot olarak grafit, katot olarak paslanmaz çelik kullanılmıştır. Hücrenin seyreltik bölme hacmi 78, diğer iki derişik bölmenin hacimleri ise 61'er cm³'tür. Çözelti içindeki katyonlar ve anyonlar uygulanan elektrik alanının itici gücünün altında sırasıyla katoda ve anoda doğru yönelmektedir. Katyonlar katoda yönelirken katyon değiştirici membrandan, benzer şekilde anyonlar anoda yönelirken anyon değiştirici membrandan geçmektedir.

Seyreltik bölmede iyonların (katyonlar ve anyonlar) derişimi azalırken, katot bölmesindeki çözeltide katyon derişimi, anot bölmesindeki çözeltide de anyon derişimi artmaktadır.

Tasarlanan sistem kesikli çalışılmıştır ve çalışma süresi, sınır değerleri sağlayacak şekilde belirlenmiştir. Bu çalışmaların yapıldığı deney düzeneği Şekil 8. 3.'te verilmiştir.



Şekil 8.2. Elektrodiyaliz düzeneği

Model atıksu hiçbir ön işleme tabi tutulmaksızın yapılan elektrodiyaliz çalışmaları Çizelge 8.1'de verilmiştir.

Çizelge 8.1. Ön işlem yapılmadan elektrodiyaliz çalışmasıyla tuz giderimi sonuçları

Gerilim (V)	Zaman (dk)	Akım (mA)	Kalan Derişim (mg/L)					
			Klorür (Cl ⁻)	Sülfat (SO ₄ ⁻)	Bikarbonat (HCO ₃ ⁻)	Sodyum (Na ⁺)	Kalsiyum (Ca ⁺⁺)	Magnezyum (Mg ⁺⁺)
15,0	20	80,8	14.725,43	675,00	165,92	7570,32	82,16	2,43
	40	62,1	13.725,70	650,02	146,40	7266,19	82,74	2,45
	60	49,9	13.325,86	637,50	78,08	7584,71	85,00	2,50
20,0	20	107,4	13.725,40	656,25	136,64	7266,36	88,18	0,00
	40	72,53	13.625,70	680,00	107,36	7241,85	82,00	0,00
	60	66,65	13.850,60	675,60	117,12	7199,17	80,16	0,00

Elektrodiyaliz sistemi 5000 mg/L'den fazla tuz içeren çözeltilerde verimli olmamaktadır. Yapılan deneysel çalışmalarda tuz derişimi yüksek olduğu için sıcaklık artmış, membran gözenekleri tıkanmış, anot ve katot materyalleri olan grafit ve çelik

aşınmıştır. Anot olarak, dayanıklı metallere biri olan titanyum denenmesine karşın aşınmanın önüne geçilememiştir.

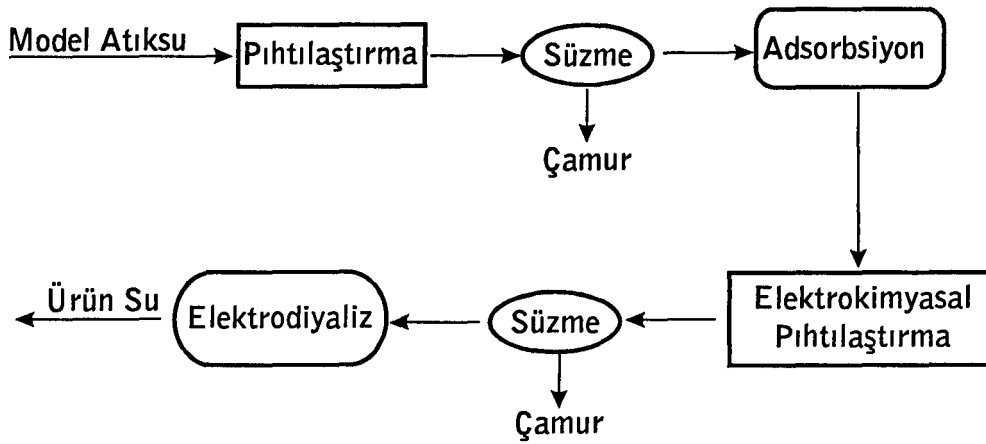
8.7. Tuzluluğu Oluşturan İyonların Karma Sistemle Giderimi

Yapılan çalışmalarda, model atıksu derişiminin çok yüksek olması nedeniyle, yöntemlerin tek başlarına kullanılmasının istenen sonucu vermediği gözlenmiş ve tüm yöntemleri içeren bir karma sistem denenmiştir.

Yüksek tuzluluğa sahip atıksuyun doğrudan elektrokimyasal işlemle artırılmasında verim düşük olduğundan elektrokoagülasyon öncesi pıhtılaştırma ve adsorbsiyon deneyleri yapılmıştır. Model atıksuya öncelikle pıhtılaştırma işlemi uygulanmış, çıkan su adsorbsiyon işlemine tabi tutulmuştur. Adsorbsiyon kolonunun çıkışından elde edilen su, elektrokoagülasyon sistemine verilmiştir. Derişimi 5000 mg/L'den aşağıya indirilen çözeltiliye son basamak olarak elektrodializ uygulanmıştır.

Karma sistemin son basamağı olarak çalışılan elektrodializ; elektrokoagülasyondan çıkan suyun kalitesinin sınır değerlerinin üzerinde olması nedeniyle ilave edilmiştir.

Karma sistemin akış diyagramı Şekil 8.3'te verilmiştir.



Şekil 8.3. Karma sistem akış diyagramı

8.8. Deney Sonuçlarının Hesaplanmasında Kullanılan Eşitlikler

Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde işlem sonunda kalan derişim, tuzluluğun % giderimi ve enerji tüketimi hesaplamaları yapılmıştır. Bu hesaplamalarda kullanılan eşitlikler aşağıdadır.

8.8.1. % Giderim

$$\% \text{ Giderim} = \frac{(C_0 - C)}{C_0} \times 100 \quad (8.1)$$

Burada:

C_0 ; Model suyun başlangıç tuz derişimi (mg/L)

C ; İşlemden sonraki tuz derişimi (mg/L)

ifade etmektedir.

8.8.2. Enerji tüketimi

$$\text{Enerji Tüketimi (kWh/g)} = \frac{V \cdot I \cdot t}{(C_0 - C)} \quad (8.2)$$

Burada:

V ; Gerilim (Volt)

I ; Akım (Amper)

t ; Zaman (s)

C_0 ; Model suyun başlangıç tuz derişimi (mg/L)

C ; İşlemden sonraki tuz derişimi (mg/L)

ifade etmektedir.

9. DENEYSEL ÇALIŞMALAR DAN ELDE EDİLEN SONUÇLAR

9.1. Tuzluluğu Oluşturan İyonların Pıhtılaştırma ile Giderim Sonuçları

Pıhtılaştırma çalışmalarında farklı koagülan maddelerin toplam tuzluluk giderimine ve tuzluluğa neden olan iyonların her birinin derişimine etkisi araştırılmıştır. Kullanılan koagülan maddelerin, tuzluluğu oluşturan iyonların giderimi üzerindeki etkilerinin araştırıldığı deney sonuçları Çizelge 9.1, toplam tuzluluk giderimi sonuçları Çizelge 9.2'de verilmiştir.

Deney sonuçlarından da görüldüğü gibi en iyi giderim kireç+alum kullanıldığında elde edilmiştir. Karma sistemde de koagülan olarak aynı maddeler kullanılmıştır.

9.2. Tuzluluğu Oluşturan İyonların Elektrokoagülasyon ile Giderim Sonuçları

9.2.1. Farklı reaktör ve karıştırıcı polarizasyonlarında elde edilen deney sonuçları

Demir reaktör anot, karıştırıcı katot olduğunda uygulanan akım ve işlem süresinin iyonların giderimine etkisinin araştırıldığı deney sonuçları Çizelge 9.3, toplam tuzluluk ve enerji tüketimine etkisinin araştırıldığı deney sonuçları Çizelge 9.4'te verilmiştir.

Uygulanan akımın ve sürenin iyonların derişimine etkisi Şekil 9.1-9.5'te, toplam tuzluluk giderimine ve enerji tüketimine etkisi Şekil 9.6-9.7'de gösterilmiştir.

Demir reaktörün anot olduğu çalışmada, Çizelge 9.3'te de görüleceği gibi magnezyum iyonu % 100 giderildiğinden akım ve sürenin magnezyum iyonunun derişimine etkisi şekil olarak verilmemiştir.

Düşük bir akım olan 0,75 A'deki çalışma süreleri, diğer akımlardaki sürelerden farklı olduğu için bu deneysel çalışmaların sonuçları demir reaktörün anot olduğu durumun ve demir karıştırıcının anot olduğu durumun karşılaştırması şeklinde verilmiştir. Bu durumlarda işlem süresinin iyonların giderimine etkisi Şekil 9.8-9.12, giderim ve enerji tüketimine etkisi Şekil 9.13-14'te verilmiştir.

Demir karıştırıcı anot ve reaktör katot olduğunda, uygulanan akım ve çalışma süresinin iyonların giderimi üzerine etkisinin araştırıldığı deney sonuçları Çizelge 9.5'te verilmiştir. İşlem süresinin giderim ve enerji tüketimine etkisinin araştırıldığı deney sonuçları Çizelge 9.6'da verilmiştir.

Demir karıştırıcının anot olarak kullanıldığında akım ve çalışma süresinin her bir iyonun derişimine etkisi Şekil 9.15-9.20, giderim ve enerji tüketimine etkisi ise Şekil 9.21-9.22'de verilmiştir.

9.2.2. Farklı derişimlerde yardımcı çöktürücü ilavesinin tuzluluğu oluşturan iyonların giderimi ve enerji tüketimi üzerine olan etkisinin araştırıldığı deney sonuçları

9.2.2.1. Demir reaktör anot olduğunda elde edilen deney sonuçları

Demir reaktörün anot olarak kullanıldığı deneylerde en iyi sonuçlar, akım 3,0 A, süre 50 dk olduğunda elde edilmiştir. Buna bağlı olarak demir reaktörün anot olduğu durumda yardımcı çöktürücü ilave edilerek yapılan deneysel çalışmalar bu koşullarda gerçekleştirilmiştir. Farklı derişimlerde kullanılan yardımcı çöktürücünün iyonların derişimine etkisinin araştırıldığı deney sonuçları Çizelge 9.7’de, giderime ve enerji tüketimine etkisi Çizelge 9.8’de verilmiştir.

Reaktör anot olduğunda yardımcı çöktürücü derişiminin her bir iyonun derişimine etkisi Şekil 9.23-9.27’de, giderim ve enerji tüketimine etkisi Şekil 9.28-9.29’da, karıştırıcının anot olması durumuyla karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir.

9.2.2.2. Demir karıştırıcı anot olduğunda elde edilen deney sonuçları

Demir karıştırıcı anot olduğunda en iyi sonuçlar akım 3,0 A, süre 40 dk olduğunda elde edilmiştir. Buna bağlı olarak aynı koşullarda, demir karıştırıcı anot olduğunda, farklı yardımcı çöktürücü derişimleri için yapılan çalışma ile tuzluluğu oluşturan iyonların derişimine etkisi Çizelge 9.9’da, giderim ve enerji tüketimine etkisi Çizelge 9.10’da verilmiştir.

Karıştırıcının anot olması durumunda yardımcı çöktürücü derişiminin iyonların derişimine etkisi Şekil 9.23-9.27’de, giderim ve enerji tüketimine etkisi Şekil 9.28-9.29’da reaktörün anot olması durumuyla karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir.

9.2.3. En iyi koşullarda elektrokoagülasyonla tuz giderimi sonuçları

9.2.3.1. pH’ın etkisinin araştırıldığı deney sonuçları

Parametrik olarak yapılan elektrokoagülasyon çalışmalarında en iyi sonuç demir reaktör anot, akım 3,0 A , süre 50 dk olduğunda ve 1 g yardımcı çöktürücü ilave edildiğinde gözlenmiştir. pH 9’da yapılan deneysel çalışma sonuçları Çizelge 9.11’de, pH’nın tuz giderimi ve enerji tüketimine etkisi Çizelge 9.12’de verilmiştir.

İncelenen farklı pH’ların toplam iyon derişimi, giderim ve enerji tüketimi değerlerini önemli ölçüde etkilemediği gözlenmiştir.

9.2.3.2. Karıştırma hızının etkisinin araştırıldığı deney sonuçları

En iyi çalışma koşulunda (demir reaktör anot, akım 3,0 A, süre 50 dk ve 1 g yardımcı çöktürücü ilavesi) 70 devir/dk karıştırma hızında yapılan çalışma sonuçları Çizelge 9.13’te, karıştırma hızının giderim ve enerji tüketimine etkisi Çizelge 9.14’te verilmiştir.

Karıştırma hızının artırılmasının iyonların her birinin derişimine önemli ölçüde etkisinin olmadığı, buna karşı % giderimi ve enerji tüketimini olumsuz yönde etkilediği gözlenmiştir.

9.2.3.3. Yardımcı çöktürücü olarak farklı madde kullanımının etkisinin araştırıldığı deney sonuçları

Demir reaktörün anot, akımın 3,0 A ve sürenin 50 dk olduğu çalışmada yardımcı çöktürücü olarak Al_2O_3 yerine Fe_2O_3 kullanılmıştır. En iyi yardımcı çöktürücü derişimi olan 1 g'da yapılan çalışma sonuçları Çizelge 9.15'te, giderim ve enerji tüketimine etkisi Çizelge 9.16'da verilmiştir.

Fe_2O_3 'ün özellikle klorür ve sodyum iyonlarının giderimini önemli ölçüde azalttığı ve enerji tüketimini artırdığı gözlenmiştir.

9.2.3.4. Farklı anot ve katot malzemelerinin kullanımının etkisinin araştırıldığı deney sonuçları

Demir reaktörün anot, alüminyum karıştırıcının katot olduğu 3,0 A, 50 dk süreli çalışmanın deney sonuçları Çizelge 9.17-9.18'de verilmiştir. Yapılan çalışmada farklı elektrot malzemelerinin kullanımının iyon derişimlerini, giderimi ve enerji tüketimini olumsuz yönde etkilediği gözlenmiştir.

9.2.4. Karma sistemle yapılan deneysel çalışma sonuçları

Koagülasyon, adsorbsiyon, elektrokoagülasyon ve elektrodiyalizden oluşan karma sistemde en yüksek giderimi sağlayan koşullarda (3,0 A, 50 dk) yapılan çalışma sonuçları Çizelge 9.19-9.20, en düşük enerji tüketimini sağlayan koşullardaki (0,75 A, 30 dk) sonuçlar da Çizelge 9.21-9.22'de verilmiştir.

Yapılan çalışmada karma sistem basamakları ile giderim ve tuz derişimi arasındaki ilişki Şekil 9.30-9.31'de verilmiştir. En düşük enerji tüketimiyle elde edilebilecek en iyi verimin araştırıldığı çalışma sonuçları Şekil 9.32-9.33'te verilmiştir.

Çizelge 9.1. Koagülasyonda iyon derişimlerinin değişimi

Koagülan	Kalan Derişim (mg/L)					
	Klorür (Cl ⁻)	Sülfat (SO ₄ ⁻)	Bikarbonat (HCO ₃ ⁻)	Sodyum (Na ⁺)	Kalsiyum (Ca ⁺⁺)	Magnezyum (Mg ⁺⁺)
Demir(II) sülfat	10.996,59	>700,00	63,44	7198,44	72,95	12,16
Demir(III) klorür	>14.750,00	>700,00	0,00	8121,00	82,16	1,22
Alum	12.096,25	>700,00	0,00	7877,59	96,19	2,43
Kireç+Demir(II)sülfat	12.596,09	>700,00	170,80	8069,44	94,99	88,28
Kireç+Demir(III)klorür	>14.750,00	537,50	146,40	7130,10	232,46	19,94
Kireç+ Alum	10.196,84	>700,00	146,40	4753,33	100,20	0,73

Çizelge 9.2. Koagülasyonda tuzluluk, pH ve iletkenlik değişimi

Koagülan	Tuzluluk		pH	İletkenlik (mS/cm)
	Kalan Derişim	Giderim (%)		
Demir(II) sülfat	19.043,58	25,34	4,33	49
Demir(III) klorür	23.654,38	7,26	2,01	72
Alum	20.772,46	18,56	3,65	62
Kireç+Demir(II)sülfat	21.718,60	14,85	10,30	47
Kireç+Demir(III)klorür	22.816,40	10,54	7,75	65
Kireç+ Alum	15.897,70	37,67	6,99	44

Çizelge 9.3. Reaktör anot iken elektrokoagülasyonda iyon derişimlerinin değişimi

Akım (A)	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Maksimum Sıcaklık (°C)	Kalan Derişim (mg/L)					
				Klorür (Cl ⁻)	Sülfat (SO ₄ ⁻)	Bikarbonat (HCO ₃ ⁻)	Sodyum (Na ⁺)	Kalsiyum (Ca ⁺⁺)	Magnezyum (Mg ⁺⁺)
0,75	30	3,30	26,0	13.995,66	487,50	146,40	5641,24	66,13	0,00
	60	3,00	28,5	12.696,06	413,75	141,52	5249,10	62,12	0,00
	90	2,30	29,0	12.537,50	262,50	137,62	4769,69	50,90	0,00
	120	2,15	31,0	11.396,47	250,00	108,48	4309,67	38,02	0,00
1,50	10	3,10	27,0	13.695,75	406,25	136,64	6852,54	74,15	0,00
	20	2,90	33,0	13.295,87	305,00	92,72	5922,46	70,14	0,00
	30	2,85	35,0	13.195,90	252,00	82,96	5883,59	60,12	0,00
	40	2,62	35,5	12.895,19	238,00	80,15	5642,94	50,10	0,00
	50	2,60	37,0	12.296,19	238,00	80,15	5149,51	50,10	0,00
2,25	10	4,20	34,5	13.395,80	398,70	112,43	5650,39	60,15	0,00
	20	3,90	44,0	13.295,08	298,20	78,08	5180,95	58,11	0,00
	30	3,60	48,0	12.696,06	242,30	78,08	4849,60	46,09	0,00
	40	3,40	52,0	11.396,46	230,00	77,92	4478,30	31,26	0,00
3,00	10	5,00	38,0	13.295,80	375,20	107,36	5581,26	44,09	0,00
	20	4,80	54,0	12.596,09	263,50	76,13	5060,12	42,08	0,00
	30	4,10	60,0	12.196,20	225,10	76,00	4549,74	40,08	0,00
	40	3,95	61,0	10.596,70	205,30	76,00	3896,47	22,44	0,00
	50	3,70	62,5	9197,15	200,00	76,00	3827,95	20,05	0,00

Çizelge 9.4. Reaktör anot iken elektrokoagülasyonda tuzluluk, pH, iletkenlik ve enerji tüketimi değişimi

Akım (A)	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Maksimum Sıcaklık (°C)	Tuzluluk		pH	İletkenlik (mS/cm)	Enerji Tüketimi (kWh/g),10 ⁻⁴
				Kalan Derişim (mg/L)	Giderim (%)			
0,75	30	3,30	26,0	20.336,93	20,27	8,01	44,01	2,4
	60	3,00	28,5	18.562,55	27,22	7,97	43,01	3,2
	90	2,30	29,0	17.758,21	30,38	7,82	41,01	3,3
	120	2,15	31,0	16.102,64	36,88	7,15	39,51	3,4
1,50	10	3,10	27,0	21.165,33	17,02	6,73	49,51	1,8
	20	2,90	33,0	19.686,19	22,82	6,19	49,01	2,5
	30	2,85	35,0	19.474,57	23,65	5,10	48,51	3,5
	40	2,62	35,5	18.906,38	25,87	4,58	47,02	4,0
	50	2,60	37,0	17.813,95	30,16	4,21	47,02	4,2
2,25	10	4,20	34,5	19.617,47	23,09	4,74	45,51	2,7
	20	3,90	44,0	18.910,42	25,86	4,26	45,00	4,4
	30	3,60	48,0	17.912,13	29,77	4,00	44,01	5,3
	40	3,40	52,0	16.213,94	36,43	4,00	46,51	5,5
3,00	10	5,00	38,0	19.403,71	23,92	4,49	45,01	4,1
	20	4,80	54,0	18.037,92	29,28	4,13	44,51	6,4
	30	4,10	60,0	17.087,12	33,01	4,09	44,01	7,3
	40	3,95	61,0	14.796,91	41,99	4,00	36,01	7,4
	50	3,70	62,0	13.321,15	47,77	4,00	35,00	7,6

Çizelge 9.5. Karıştırıcı anot iken elektrokoagülasyonda iyon derişimlerinin değişimi

Akım (A)	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Maks. Sıcaklık (°C)	Kalan Derişim (mg/L)					
				Klorür (Cl)	Sülfat (SO ₄)	Bikarbonat (HCO ₃)	Sodyum (Na ⁺)	Kalsiyum (Ca ⁺⁺)	Magnezyum (Mg ⁺⁺)
0,75	30	1,68	26,0	14.295,57	425,00	107,36	5835,31	72,95	0,00
	60	1,14	26,5	13.795,72	312,50	107,36	5168,25	64,53	0,00
	90	1,03	28,0	13.195,15	150,00	102,28	4992,00	61,32	0,00
	120	0,99	29,5	12.196,12	135,25	100,12	4554,22	50,10	0,00
1,50	10	3,26	31,5	14.195,59	415,20	185,44	7029,53	96,13	17,72
	20	3,05	32,0	13.995,94	353,70	180,56	6557,02	84,15	15,87
	30	2,65	35,0	13.895,69	271,50	97,60	5847,30	78,16	4,86
	40	2,23	36,5	13.595,78	188,75	97,10	5806,47	65,33	0,00
2,25	10	3,85	40,0	14.095,88	262,50	175,68	6434,57	70,14	5,12
	20	3,53	48,7	13.695,97	137,18	170,12	5430,43	64,13	0,00
	30	2,90	50,5	13.495,82	125,00	126,88	5289,26	60,12	0,00
	40	2,75	52,5	13.295,88	100,00	97,60	4839,11	56,12	0,00
3,00	10	5,60	41,0	13.595,72	205,72	112,24	5682,93	69,34	0,00
	20	5,18	45,0	13.095,94	112,50	110,12	5166,29	64,13	0,00
	30	5,12	50,5	12.696,04	112,50	101,50	4567,65	54,11	0,00
	40	5,05	57,0	12.196,22	100,00	95,10	4063,17	52,10	0,00

Çizelge 9.6. Karıştırıcı anot iken elektrokoagülasyonda tuzluluk, pH, iletkenlik ve enerji tüketimi değişimi

Akım (A)	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Maks. Sıcaklık (°C)	Tuzluluk		pH	İletkenlik (mS/cm)	Enerji Tüketimi (kWh/g), 10 ⁻⁴
				Kalan Derişim (mg/L)	Giderim (%)			
0,75	30	1,68	26,0	20.736,19	18,70	5,23	48,03	1,3
	60	1,14	26,5	19.448,36	23,75	5,48	47,03	1,4
	90	1,03	28,0	18.500,75	27,47	5,62	46,01	1,7
	120	0,99	29,5	17.035,81	33,21	5,82	45,53	1,8
1,50	10	3,26	31,5	21.939,61	13,98	5,98	53,01	2,3
	20	3,05	32,0	21.187,24	16,93	4,72	51,01	3,5
	30	2,65	35,0	20.195,11	20,82	4,18	50,03	3,7
	40	2,23	36,5	19.753,43	22,55	3,42	49,03	3,9
2,25	10	3,85	40,0	21.043,89	17,49	6,08	49,01	3,2
	20	3,53	48,7	19.497,70	23,56	5,19	48,07	4,4
	30	2,90	50,5	19.097,78	25,13	5,06	47,05	5,1
	40	2,75	52,5	18.388,71	27,90	4,63	45,03	5,8
3,00	10	5,60	41,0	19.665,95	22,90	5,86	47,03	4,8
	20	5,18	45,0	18.548,98	27,28	5,80	45,03	7,4
	30	5,12	50,5	17.531,80	31,26	5,63	45,00	9,6
	40	5,05	57,0	16.506,59	35,28	5,48	44,50	11,2

Çizelge 9.7. Reaktör anot iken yardımcı çöktürücü olarak Al₂O₃ kullanıldığında iyon derişimlerinin değişimi

Akım (A)	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Maks. Sıcaklık (°C)	Destek Elektrolit (g)	Kalan Derişim (mg/L)					
					Klorür (Cl)	Sülfat (SO ₄)	Bikarbonat (HCO ₃)	Sodyum (Na ⁺)	Kalsiyum (Ca ⁺⁺)	Magnezyum (Mg ⁺⁺)
3,00	50	4,20	49,0	0,5	9017,95	381,30	200,80	3368,24	28,86	0,00
	50	4,28	49,5	1,0	8097,49	350,00	117,12	3192,18	16,03	0,00
	50	4,30	51,0	1,5	8098,35	350,00	117,12	3192,97	8,82	0,00

Çizelge 9.8. Reaktör anot iken yardımcı çöktürücü olarak Al₂O₃ kullanıldığında tuzluluk, pH, iletkenlik ve enerji tüketimi değişimi

Akım (A)	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Maks. Sıcaklık (°C)	Destek Elektrolit (g)	Tuzluluk		pH	İletkenlik (mS/cm)	Enerji Tüketimi (kWh/g), 10 ⁻⁴
					Kalan Derişim (mg/L)	Giderim (%)			
3,00	50	4,20	49,0	0,5	12.997,15	49,04	11,4	38,00	8,4
	50	4,28	49,5	1,0	11.772,82	53,84	11,7	35,00	7,8
	50	4,30	51,0	1,5	11.767,26	53,86	12,1	35,01	7,8

Çizelge 9.9. Karıştırıcı anot iken yardımcı çöktürücü olarak Al_2O_3 kullanıldığında iyon derişimlerinin değişimi

Akım (A)	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Maks. Sıcaklık ($^{\circ}C$)	Destek Elektrolit (g)	Kalan Derişim (mg/L)					
					Klorür (Cl)	Sülfat (SO_4)	Bikarbonat (HCO_3)	Sodyum (Na^+)	Kalsiyum (Ca^{++})	Magnezyum (Mg^{++})
3,00	40	3,32	45,0	0,5	13.495,82	393,80	98,27	4293,30	58,12	0,00
	40	3,38	46,0	1,0	12.396,15	212,50	55,04	4229,39	48,09	0,00
	40	3,48	48,5	1,5	12.385,12	209,50	37,36	4137,53	47,90	0,00

Çizelge 9.10. Karıştırıcı anot iken yardımcı çöktürücü olarak Al_2O_3 kullanıldığında tuzluluk, pH, iletkenlik ve enerji tüketimi değişimi

Akım (A)	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Maks. Sıcaklık ($^{\circ}C$)	Destek Elektrolit (g)	Tuzluluk		pH	İletkenlik (mS/cm)	Enerji Tüketimi (kWh/g), 10^{-4}
					Kalan Derişim (mg/L)	Giderim (%)			
3,00	40	3,32	45,0	0,5	18.339,31	28,09	4,67	48,00	9,2
	40	3,38	46,0	1,0	16..941,17	33,58	4,21	43,51	7,9
	40	3,48	48,5	1,5	16.817,41	34,07	3,82	43,01	8,0

Çizelge 9.11. Reaktör anot iken yardımcı çöktürücü olarak Al_2O_3 (1 g) kullanıldığında, pH = 9'da iyon derişimleri

Akım (A)	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Maks. Sıcaklık ($^{\circ}C$)	Kalan Derişim (mg/L)					
				Klorür (Cl)	Sülfat (SO_4)	Bikarbonat (HCO_3)	Sodyum (Na^+)	Kalsiyum (Ca^{++})	Magnezyum (Mg^{++})
3,00	50	3,40	49,0	9796,96	205,12	87,60	3893,80	4,00	0,00

Çizelge 9.12. Reaktör anot iken yardımcı çöktürücü olarak Al_2O_3 (1 g) kullanıldığında pH= 9'da tuzluluk, pH, iletkenlik ve enerji tüketimi

Akım (A)	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Maks. Sıcaklık ($^{\circ}C$)	Tuzluluk		pH	İletkenlik (mS/cm)	Enerji Tüketimi (kWh/g), 10^{-4}
				Kalan Derişim (mg/L)	Giderim (%)			
3,00	50	3,40	49,0	13.987,48	45,16	11,6	40,00	7,4

Çizelge 9.13. Reaktör anot iken yardımcı çöktürücü olarak Al_2O_3 (1 g) kullanıldığında 70 devir/dk'da iyon derişimleri

Akım (A)	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Maks. Sıcaklık ($^{\circ}C$)	Kalan Derişim (mg/L)					
				Klorür (Cl)	Sülfat (SO_4)	Bikarbonat (HCO_3)	Sodyum (Na^+)	Kalsiyum (Ca^{++})	Magnezyum (Mg^{++})
3,00	50	2,67	50,5	11.196,53	57,50	90,20	4133,24	24,08	0,00

Çizelge 9.14 Reaktör anot iken yardımcı çöktürücü olarak Al_2O_3 (1 g) kullanıldığında, 70 devir/dk'da tuzluluk, pH, iletkenlik ve enerji tüketimi

Akım (A)	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Maksimum Sıcaklık ($^{\circ}C$)	Tuzluluk		pH	İletkenlik (mS/cm)	Enerji Tüketimi (kWh/g), 10^{-4}
				Kalan Derişim (mg/L)	Giderim (%)			
3,00	50	2,67	50,5	15.501,55	39,22	10,5	38,00	6,67

Çizelge 9.15. Reaktör anot iken yardımcı çöktürücü olarak Fe_2O_3 (1 g) kullanıldığında iyon derişimleri

Akım (A)	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Maks. Sıcaklık ($^{\circ}C$)	Kalan Derişim (mg/L)					
				Klorür (Cl)	Sülfat (SO_4)	Bikarbonat (HCO_3)	Sodyum (Na^+)	Kalsiyum (Ca^{++})	Magnezyum (Mg^{++})
3,00	50	3,60	51,0	10,996,59	350,00	429,44	3646,29	4,00	0,00

Çizelge 9.16. Reaktör anot iken yardımcı çöktürücü olarak Fe_2O_3 (1 g) kullanıldığında tuzluluk, pH, iletkenlik ve enerji tüketimi

Akım (A)	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Maksimum Sıcaklık ($^{\circ}C$)	Tuzluluk		pH	İletkenlik (mS/cm)	Enerji Tüketimi (kWh/g), 10^{-4}
				Kalan Derişim (mg/L)	Giderim (%)			
3,00	50	3,60	51,0	15.426,32	39,52	10,11	37,01	8,9

Çizelge 9.17. Reaktör anot iken alüminyum karıştırıcı katot olduğunda iyon derişimleri

Akım (A)	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Maks. Sıcaklık ($^{\circ}C$)	Kalan Derişim (mg/L)					
				Klorür (Cl)	Sülfat (SO_4)	Bikarbonat (HCO_3)	Sodyum (Na^+)	Kalsiyum (Ca^{++})	Magnezyum (Mg^{++})
3,00	50	3,60	51,0	9996,9	368,75	341,6	4547,50	40,08	0,00

Çizelge 9.18. Reaktör anot iken alüminyum karıştırıcı katot olduğunda tuzluluk, pH, iletkenlik ve enerji tüketimi

Akım (A)	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Maksimum Sıcaklık (°C)	Tuzluluk		pH	İletkenlik (mS/cm)	Enerji Tüketimi (kWh/g), 10 ⁻⁴
				Kalan Derişim (mg/L)	Giderim (%)			
3,00	50	3,60	51,0	15.294,83	40,03	11,1	38,00	8,8

Çizelge 9.19. Pıhtılaştırma, adsorbsiyon ve elektrokoagülasyon (3,0 A, 50 dk, 1 g Al₂O₃) basamaklarından geçen suyun 10 V gerilimde elektrodializle iyon derişimlerinin değışimi

Zaman (dk)	Akım (A)	Maksimum Sıcaklık (°C)	Kalan Derişim (mg/L)					
			Klorür (Cl ⁻)	Sülfat (SO ₄ ⁻)	Bikarbonat (HCO ₃ ⁻)	Sodyum (Na ⁺)	Kalsiyum (Ca ⁺⁺)	Magnezyum (Mg ⁺⁺)
10	0,50	25,0	599,81	45,00	3,75	31,38	2,41	0,00
20	0,44	27,0	500,22	12,50	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,38	29,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Çizelge 9.20. Pıhtılaştırma, adsorbsiyon ve elektrokoagülasyon (3,0 A, 50 dk, 1 g Al₂O₃) basamaklarından geçen suyun 10 V gerilimde elektrodializle tuzluluk, pH, iletkenlik ve enerji tüketimi değışimi

Zaman (dk)	Akım (A)	Maksimum Sıcaklık (°C)	Tuzluluk		pH	İletkenlik (mS/cm)	Enerji Tüketimi (kWh/g), 10 ⁻⁴
			Kalan Derişim (mg/L)	Giderim (%)			
10	0,50	25,0	1736,08	93,19	2,70	0,06	0,35
20	0,44	27,0	512,72	97,99	2,65	0,03	0,59
30	0,38	29,0	0,00	100,00	2,62	0,02	0,75

Çizelge 9.21. Pıhtılaştırma, adsorbsiyon ve elektrokoagülasyon (0,75 A, 30 dk) basamaklarından geçen suyun 10 V gerilimde elektrodializle iyon derişimlerinin değışimi

Zaman (dk)	Akım (A)	Maksimum Sıcaklık (°C)	Kalan Derişim (mg/L)					
			Klorür (Cl ⁻)	Sülfat (SO ₄ ⁻)	Bikarbonat (HCO ₃ ⁻)	Sodyum (Na ⁺)	Kalsiyum (Ca ⁺⁺)	Magnezyum (Mg ⁺⁺)
10	0,83	31,0	1670,47	275,00	1,72	25,36	14,03	0,00
20	0,38	31,5	599,82	112,5	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,25	33,0	0,00	62,50	0,00	0,00	0,00	0,00

Çizelge 9.22. Pıhtılaştırma, adsorbsiyon ve elektrokoagülasyon (0,75 A, 30 dk) basamaklarından geçen suyun 10 V gerilimde elektrodiyalizle tuzluluk, pH, iletkenlik ve enerji tüketimi değişimi

Zaman (dk)	Akım (A)	Maksimum Sıcaklık (°C)	Tuzluluk		pH	İletkenlik (mS/cm)	Enerji Tüketimi (kWh/g), 10 ⁻⁴
			Kalan Derişim (mg/L)	Giderim (%)			
10	0,83	31,0	1970,55	92,27	2,61	0,10	0,59
20	0,38	31,5	712,32	97,21	2,60	0,04	0,51
30	0,25	33,0	62,50	99,75	2,58	0,02	0,49

Çizelge 9.23. Karma sistemde (Elektrokoagülasyon: 3,0 A, 50 dk; Elektrodiyaliz: 10 V, 30 dk) iyon derişimlerinin değişimi

Süreç	Kalan Derişim (mg/L)					
	Klorür (Cl)	Sülfat (SO ₄)	Bikarbonat (HCO ₃)	Sodyum (Na ⁺)	Kalsiyum (Ca ⁺⁺)	Magnezyum (Mg ⁺⁺)
Koagülasyon	10.196,84	>700	146,40	4753,33	100,20	0,73
Adsorbsiyon	4398,64	>700	95,70	1647,05	40,08	0,00
Elektrokoagülasyon	2599,19	50,00	53,62	969,93	24,05	0,00
Elektrodiyaliz	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Çizelge 9.24. Karma sistemde (Elektrokoagülasyon: 3,0 A, 50 dk; Elektrodiyaliz: 10 V, 30 dk) tuzluluk, pH ve iletkenlik değişimi

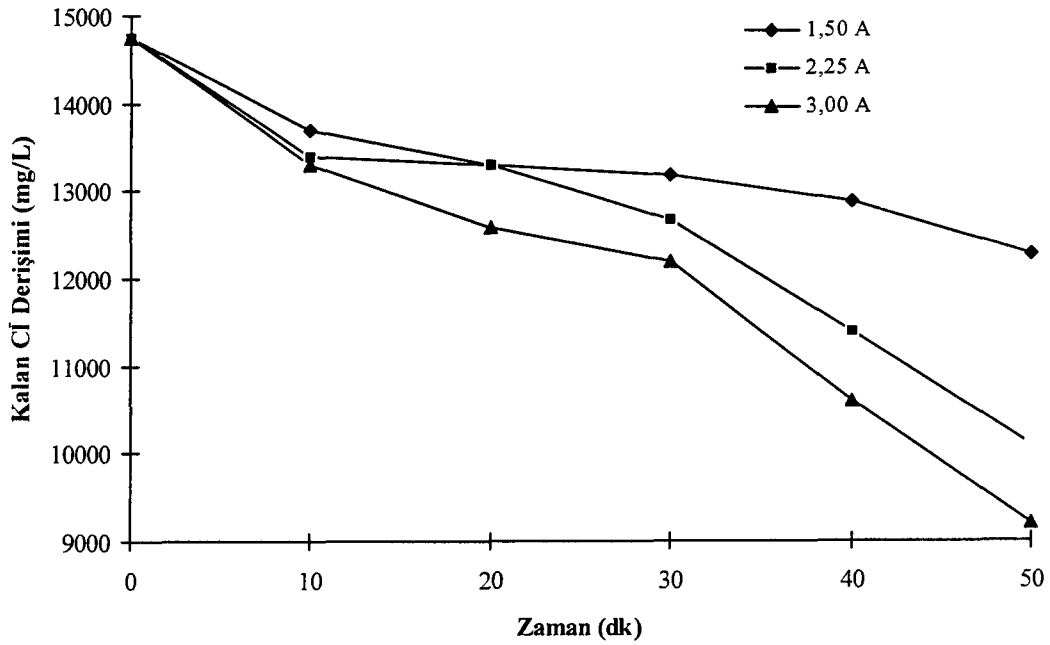
Süreç	Tuzluluk		pH	İletkenlik (mS/cm)
	Kalan Derişim (mg/L)	Giderim (%)		
Koagülasyon	15.897,70	37,67	6,99	44,00
Adsorbsiyon	6931,47	72,82	9,05	15,00
Elektrokoagülasyon	3696,79	85,51	6,60	8,01
Elektrodiyaliz	0,00	100,00	2,70	0,02

Çizelge 9.25. Karma sistemde (Elektrokoagülasyon: 0,75 A, 30 dk; Elektrodiyaliz: 10 V, 30 dk) iyon derişimlerinin değişimi

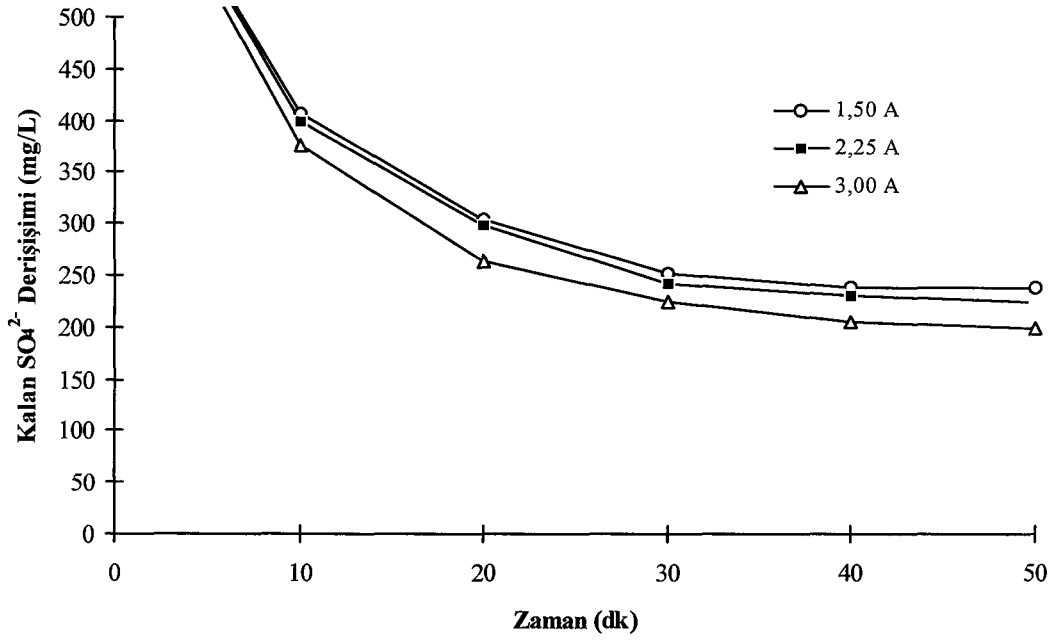
Süreç	Kalan Derişim (mg/L)					
	Klorür (Cl)	Sülfat (SO ₄)	Bikarbonat (HCO ₃)	Sodyum (Na ⁺)	Kalsiyum (Ca ⁺⁺)	Magnezyum (Mg ⁺⁺)
Koagülasyon	10.196,84	>700	146,40	4753,33	100,20	0,73
Adsorbsiyon	4398,64	>700	95,70	1647,05	40,08	0,00
Elektrokoagülasyon	4298,67	425,00	60,57	1136,46	26,03	0,00
Elektrodiyaliz	0,00	62,50	0,00	0,00	0,00	0,00

Çizelge 9.26. Karma sistemde (Elektrokoagülasyon: 0,75 A, 30 dk; Elektrodiyaliz: 10 V, 30 dk) tuzluluk, pH ve iletkenlik değişimi

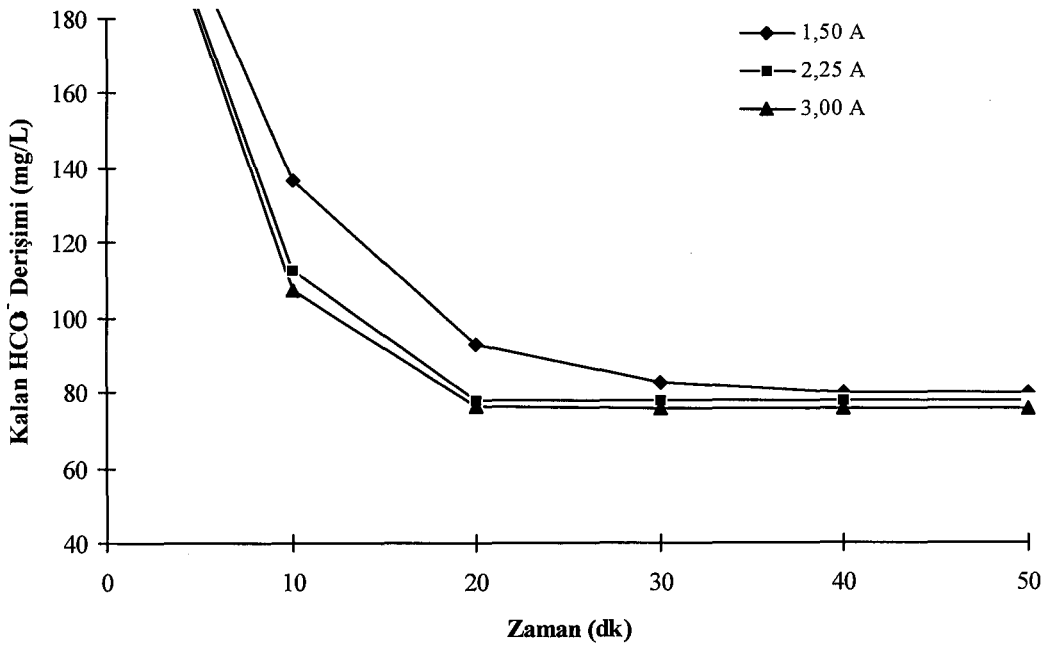
Süreç	Tuzluluk		pH	İletkenlik (mS/cm)
	Kalan Derişim (mg/L)	Giderim (%)		
Koagülasyon	15.897,70	37,67	6,99	44,00
Adsorbsiyon	6931,47	72,82	9,05	15,00
Elektrokoagülasyon	5946,73	76,68	4,63	10,01
Elektrodiyaliz	62,50	99,75	2,61	0,02



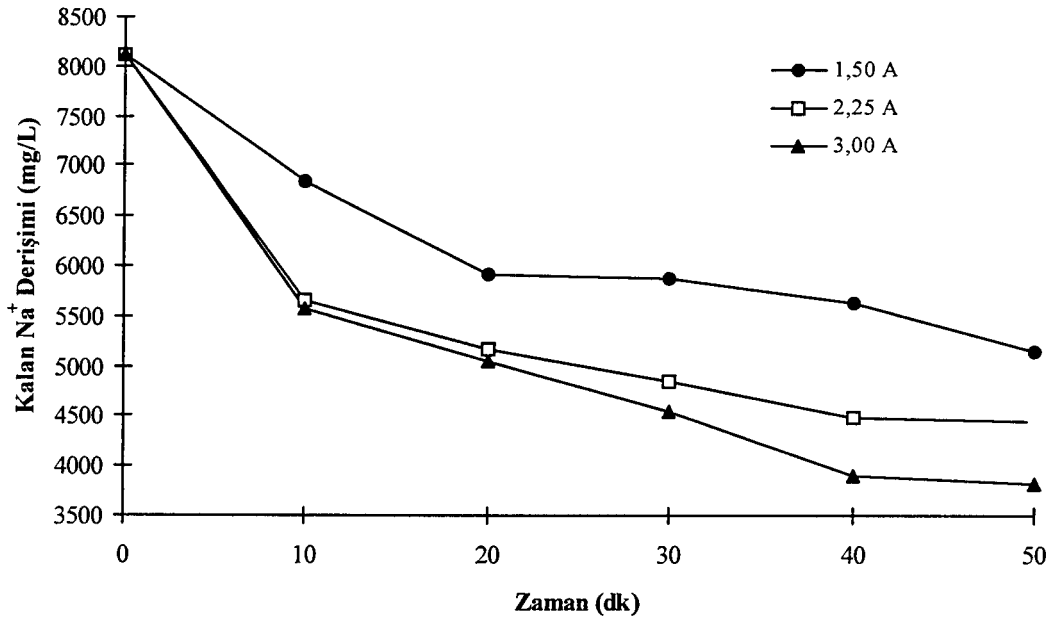
Şekil 9.1. Reaktör anot iken klorür iyonu derişiminin zamanla değişimi



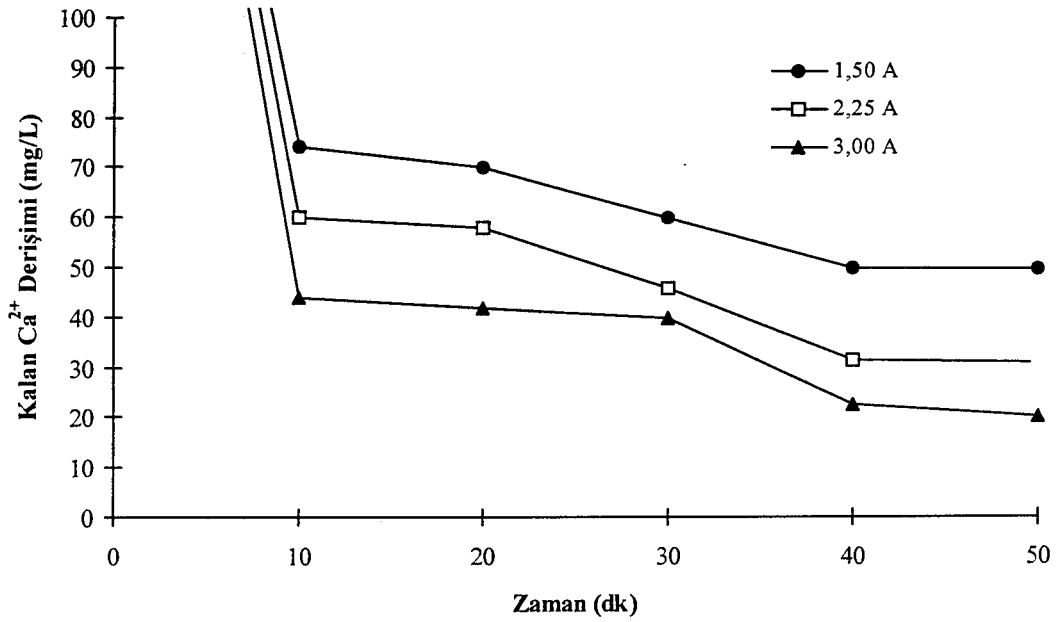
Şekil 9.2. Reaktör anot iken sülfat iyonu derişiminin zamanla değişimi



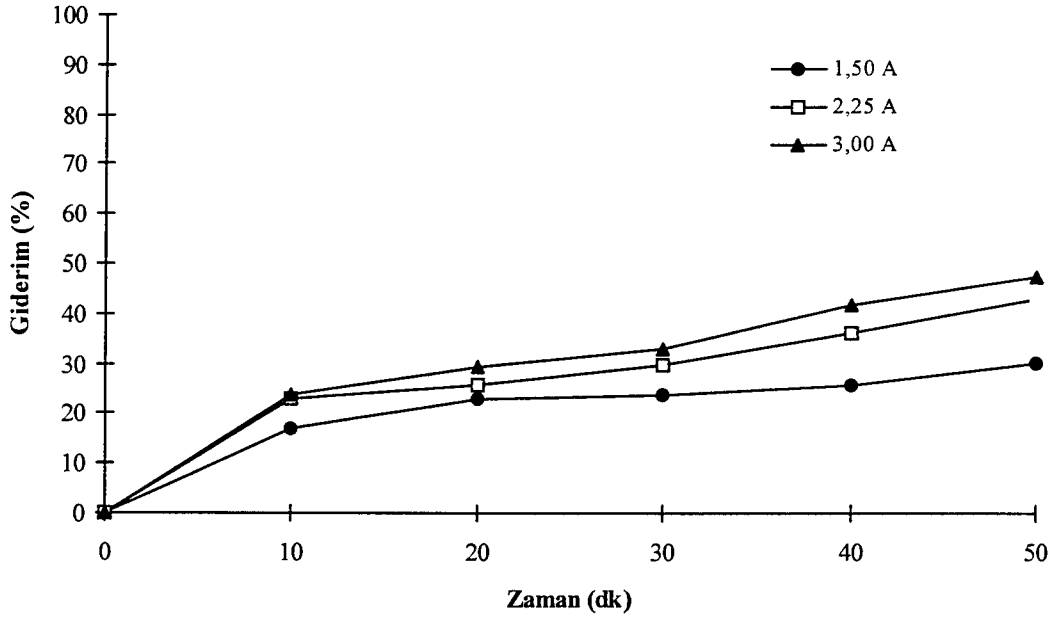
Şekil 9.3. Reaktör anot iken bikarbonat iyonu derişiminin zamanla değişimi



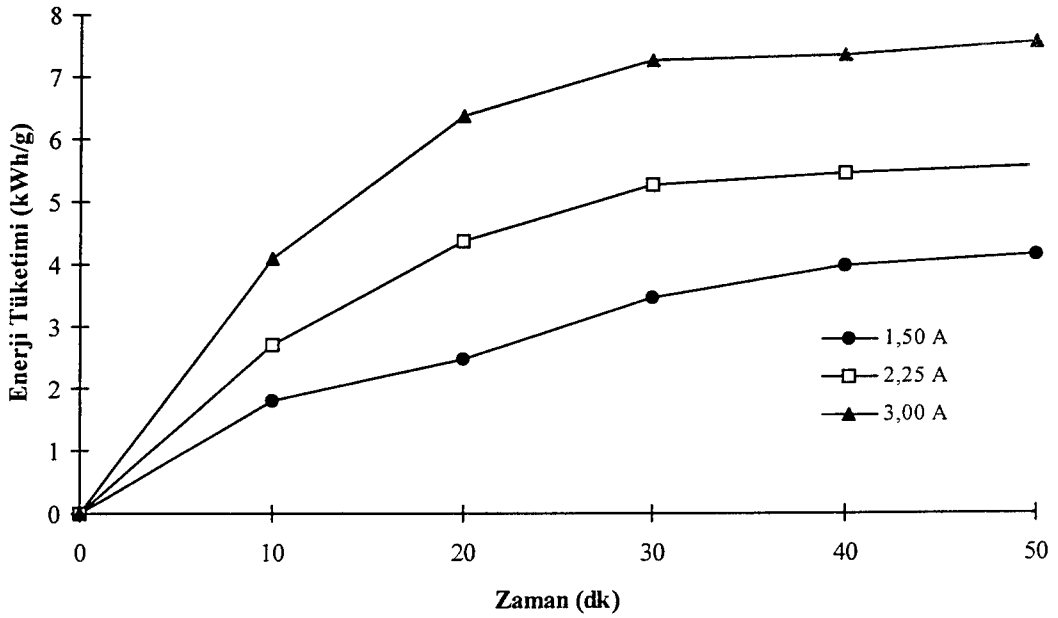
Şekil 9.4. Reaktör anot iken sodyum iyonu derişiminin zamanla değişimi



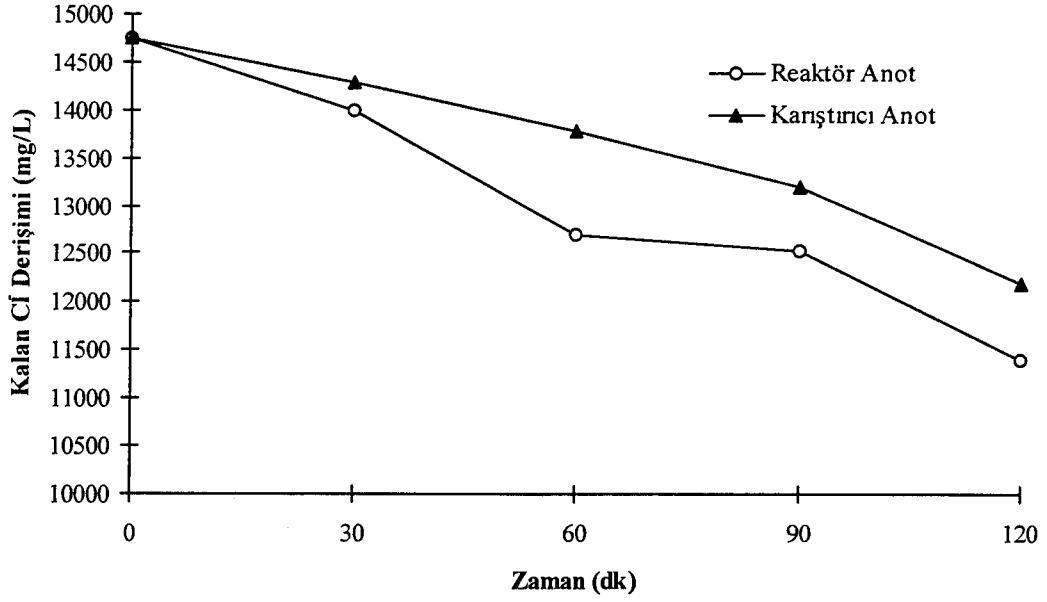
Şekil 9.5. Reaktör anot iken kalsiyum iyonu derişiminin zamanla değişimi



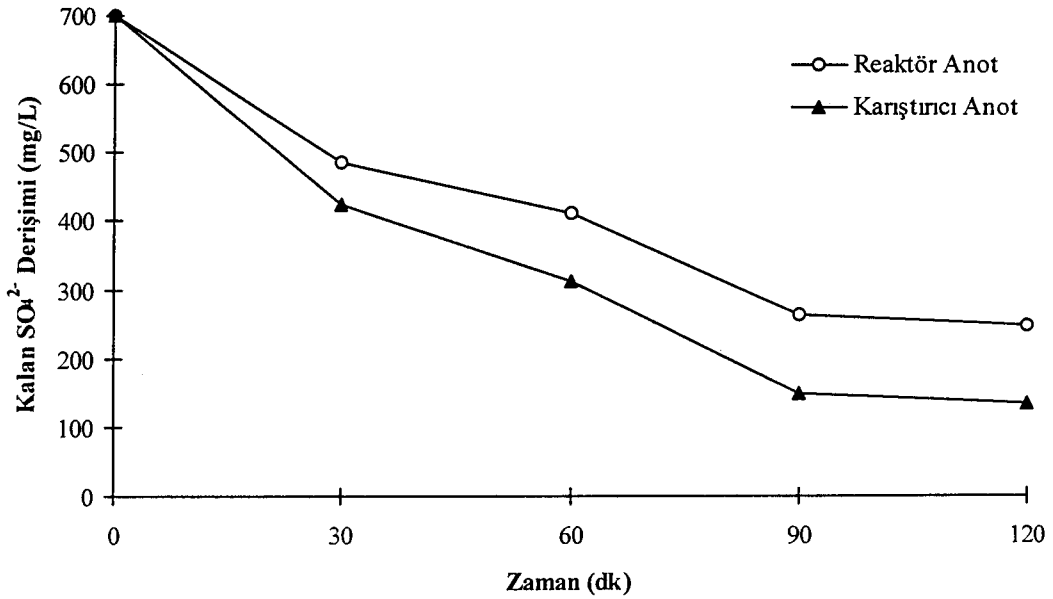
Şekil 9.6. Reaktör anot iken % giderimin zamanla değişimi



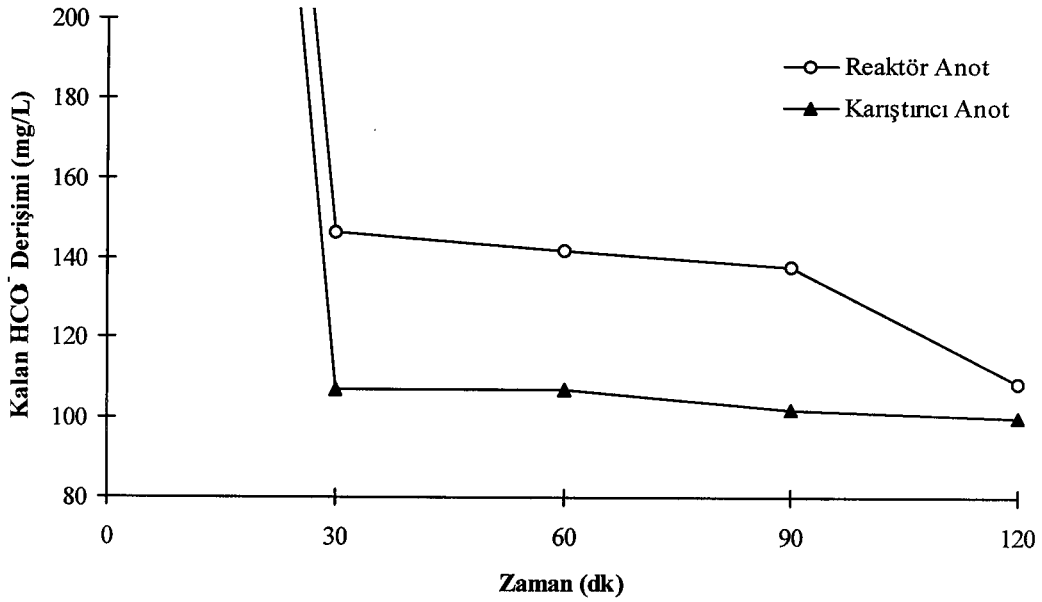
Şekil 9.7. Reaktör anot iken enerji tüketiminin zamanla değişimi



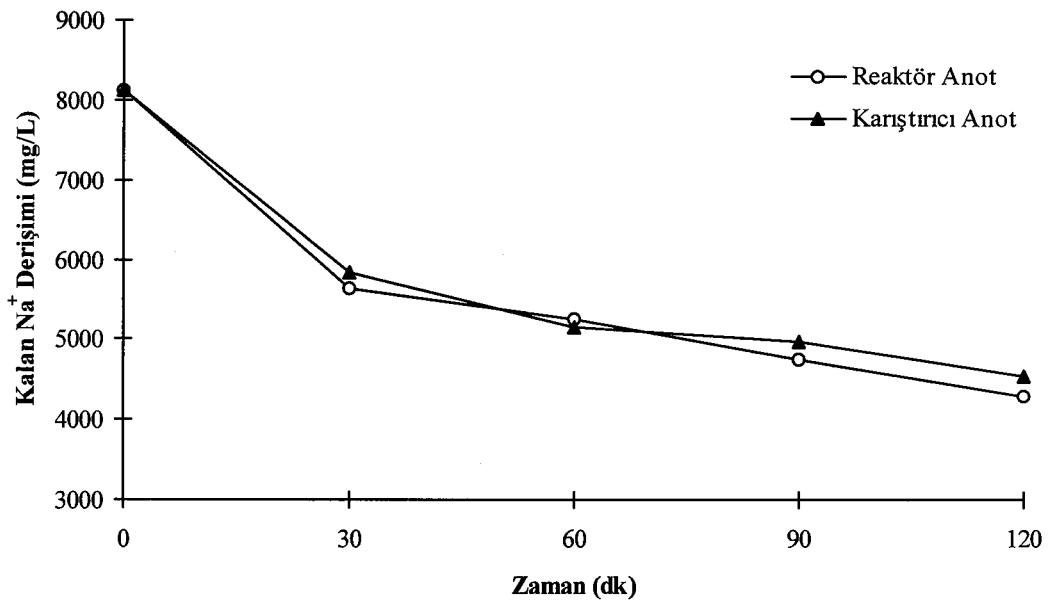
Şekil 9.8. Klorür iyonu derişiminin farklı reaktör ve karıştırıcı polarizasyonlarında zamanla değişimi (Akım=0,75 A)



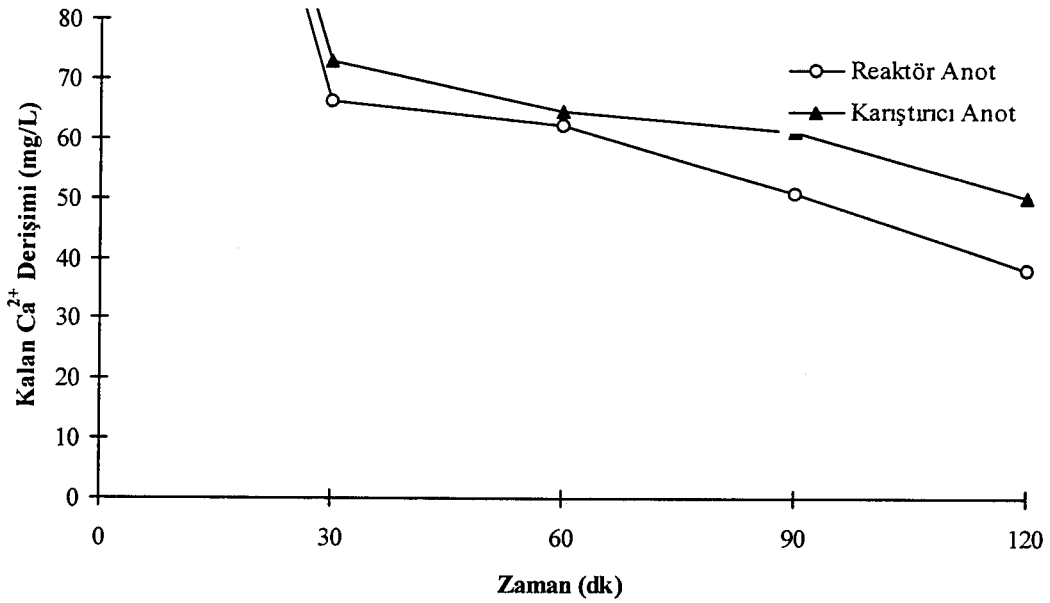
Şekil 9.9. Sülfat iyonu derişiminin farklı reaktör ve karıştırıcı polarizasyonlarında zamanla değişimi (Akım=0,75 A)



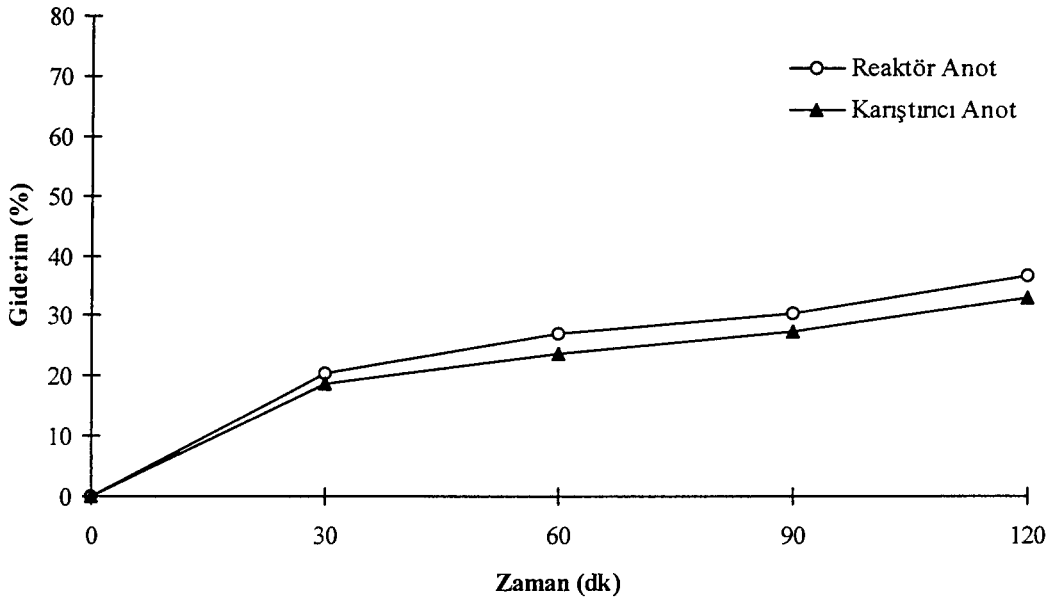
Şekil 9.10. Bikarbonat iyonu derişiminin farklı reaktör ve karıştırıcı polarizasyonlarında zamanla değişimi (Akım=0,75 A)



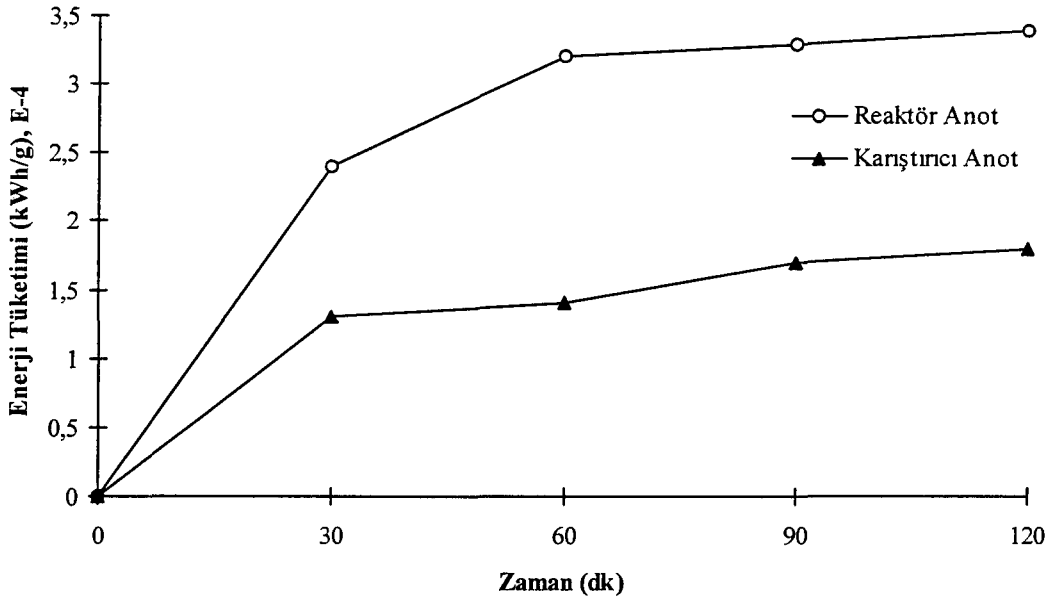
Şekil 9.11. Sodyum iyonu derişiminin farklı reaktör ve karıştırıcı polarizasyonlarında zamanla değişimi (Akım=0,75 A)



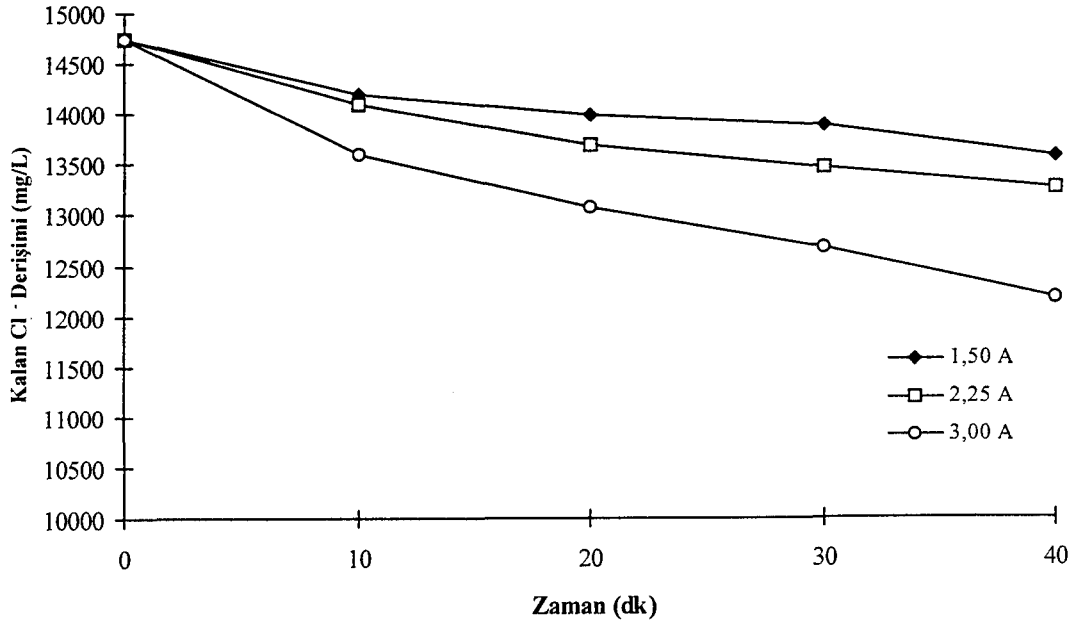
Şekil 9.12. Kalsiyum iyonu derişiminin farklı reaktör ve karıştırıcı polarizasyonlarında zamanla değişimi (Akım=0,75 A)



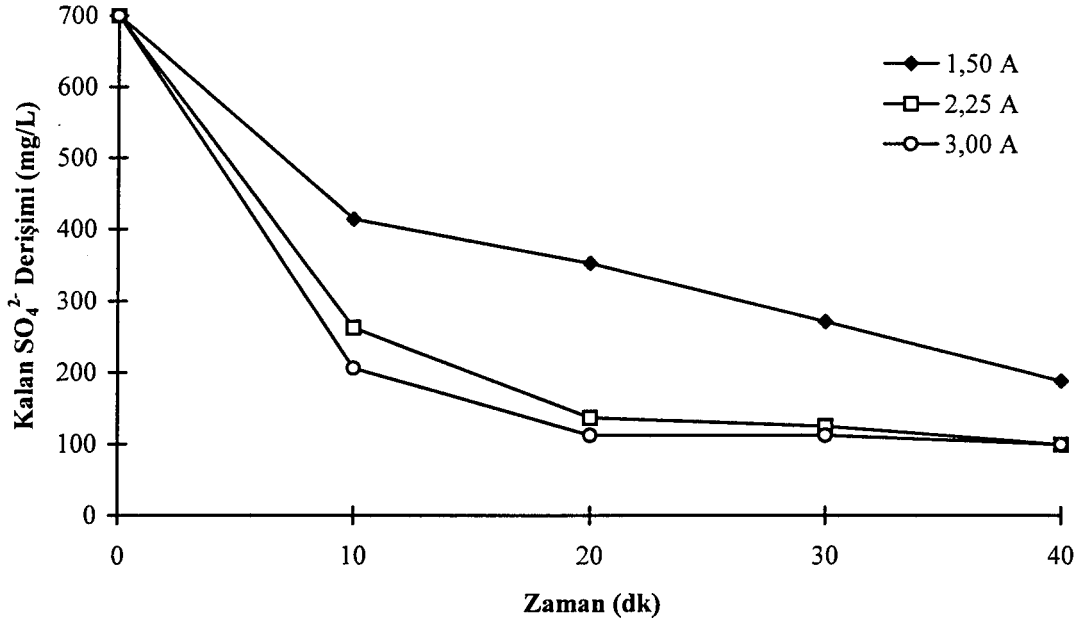
Şekil 9.13. % giderimin farklı reaktör ve karıştırıcı polarizasyonlarında zamanla değişimi (Akım=0,75 A)



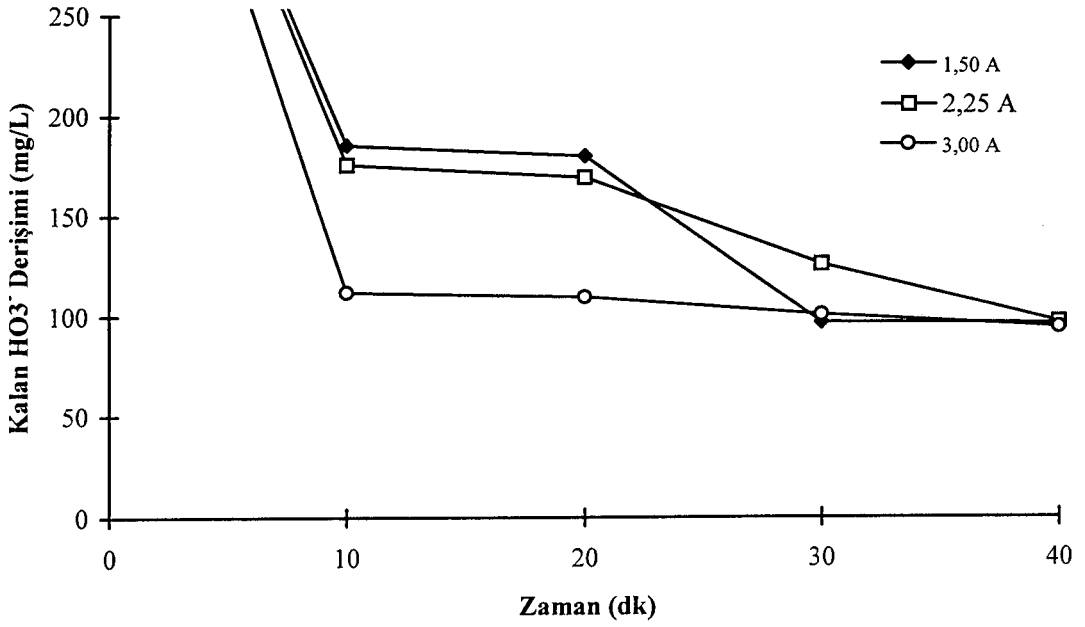
Şekil 9.14. Enerji tüketiminin farklı reaktör ve karıştırıcı polarizasyonlarında zamanla değişimi (Akım=0,75 A)



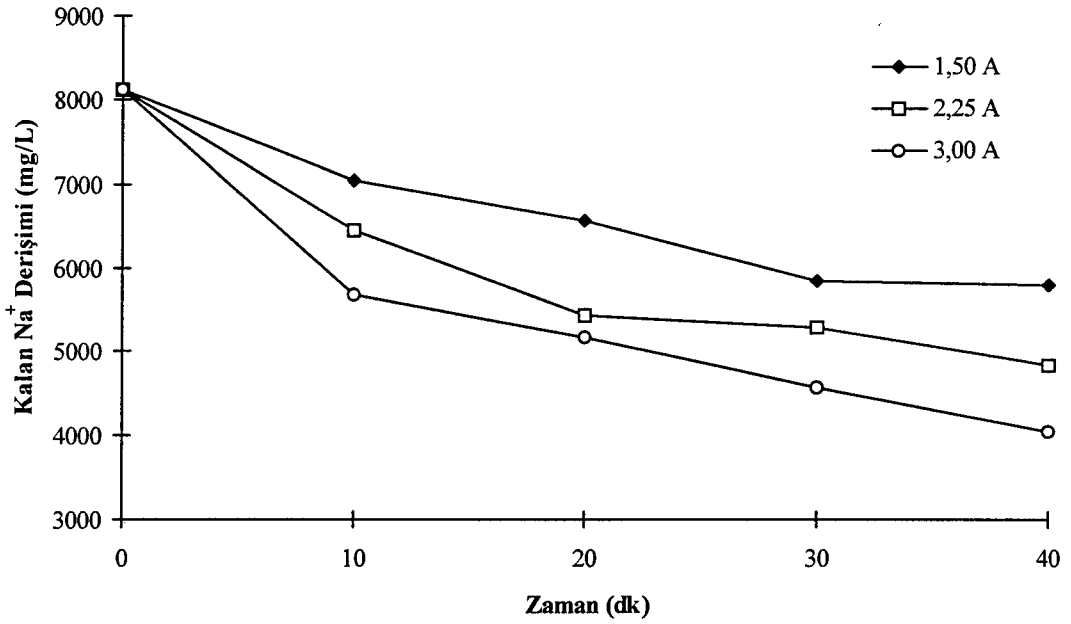
Şekil 9.15. Karıştırıcı anot iken klorür iyonu derişiminin zamanla değişimi



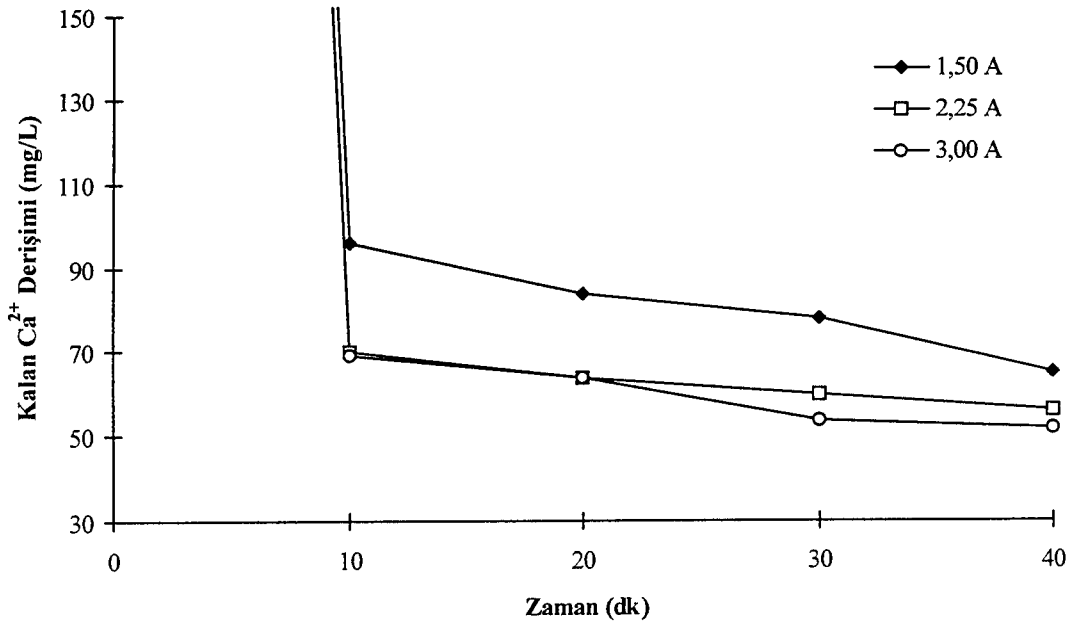
Şekil 9.16. Karıştırıcı anot iken sülfat iyonu derişiminin zamanla değişimi



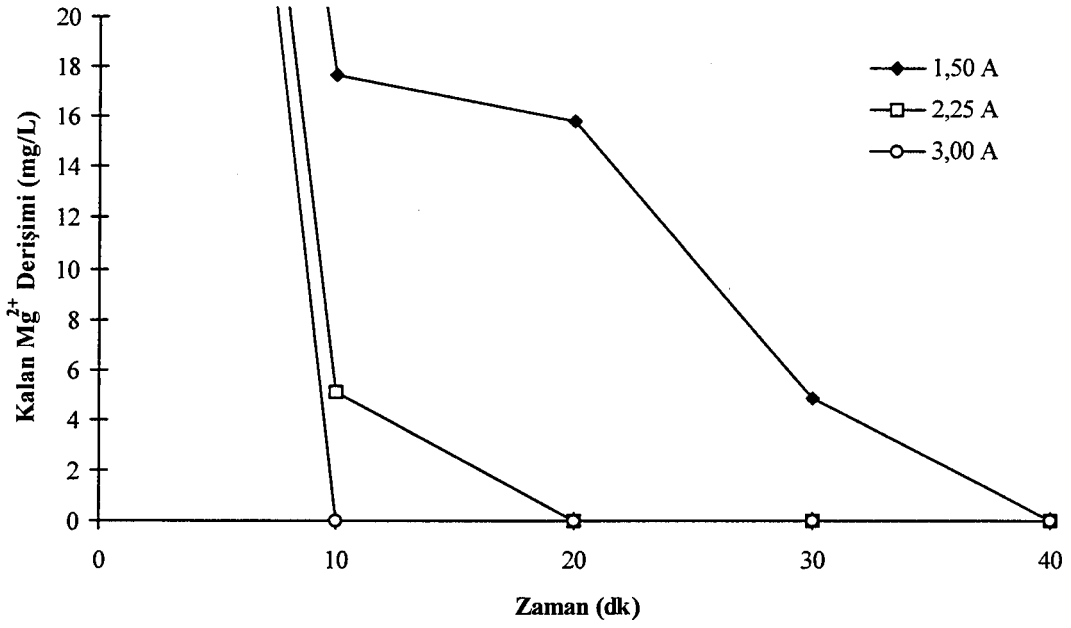
Şekil 9.17. Karıştırıcı anot iken bikarbonat iyonu derişiminin zamanla değişimi



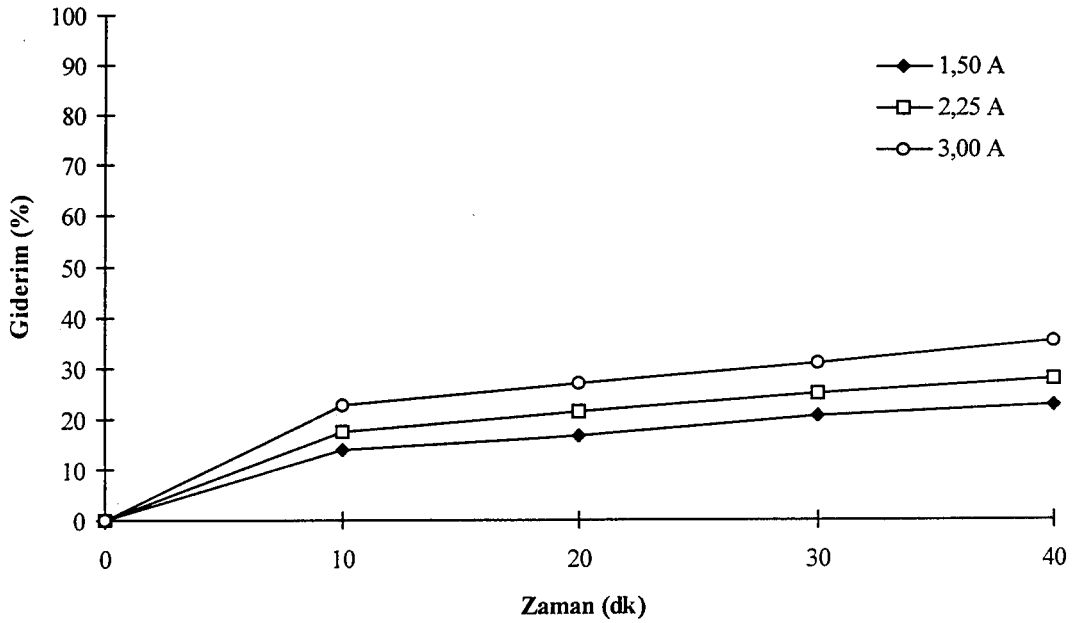
Şekil 9.18. Karıştırıcı anot iken sodyum iyonu derişiminin zamanla değişimi



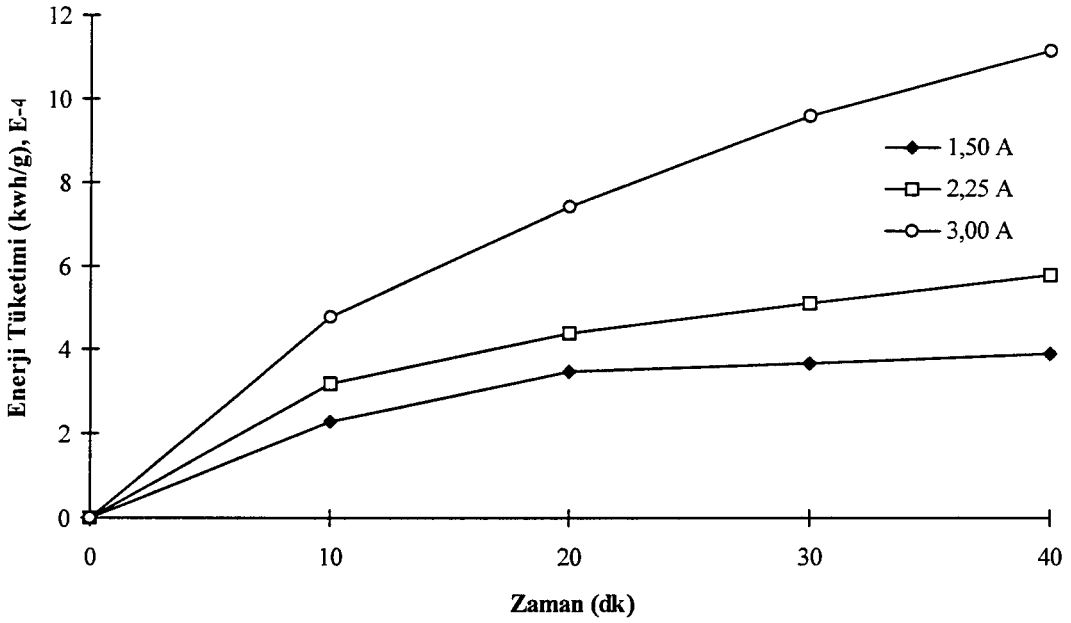
Şekil 9.19. Karıştırıcı anot iken kalsiyum iyonu derişiminin zamanla değişimi



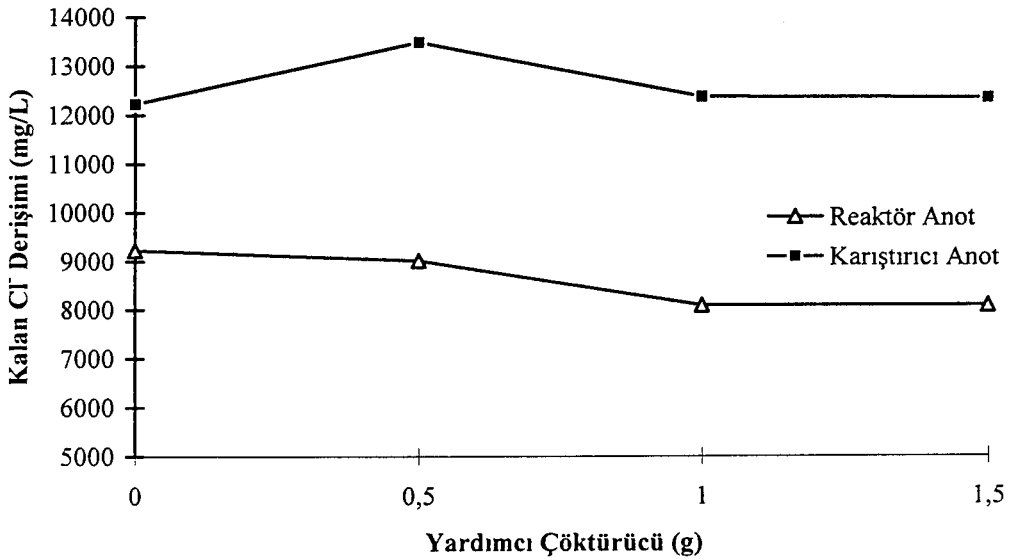
Şekil 9.20. Karıştırıcı anot iken magnezyum iyonu derişiminin zamanla değişimi



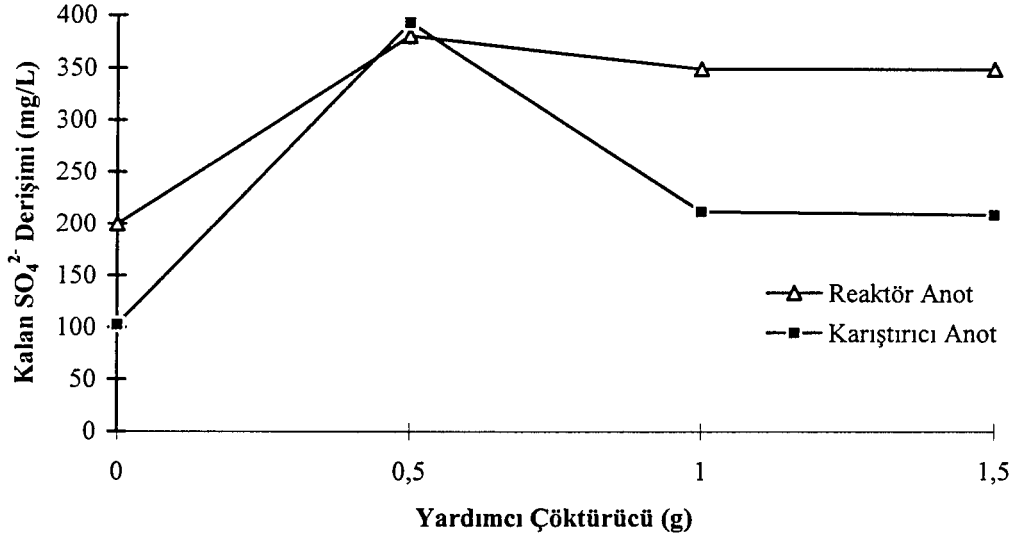
Şekil 9.21. Karıştırıcı anot iken % giderimin zamanla değişimi



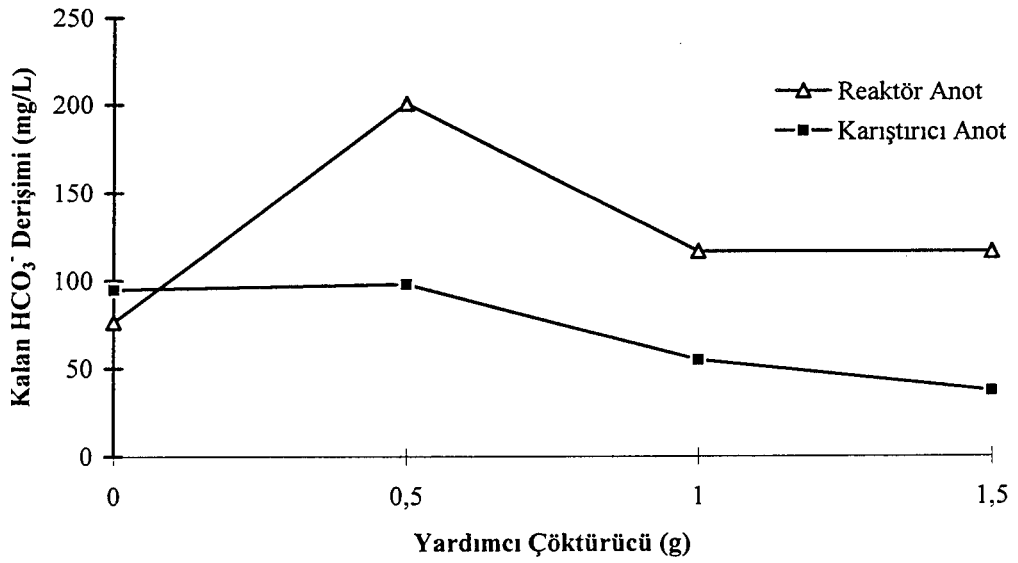
Şekil 9.22. Karıştırıcı anot iken enerji tüketiminin zamanla değişimi



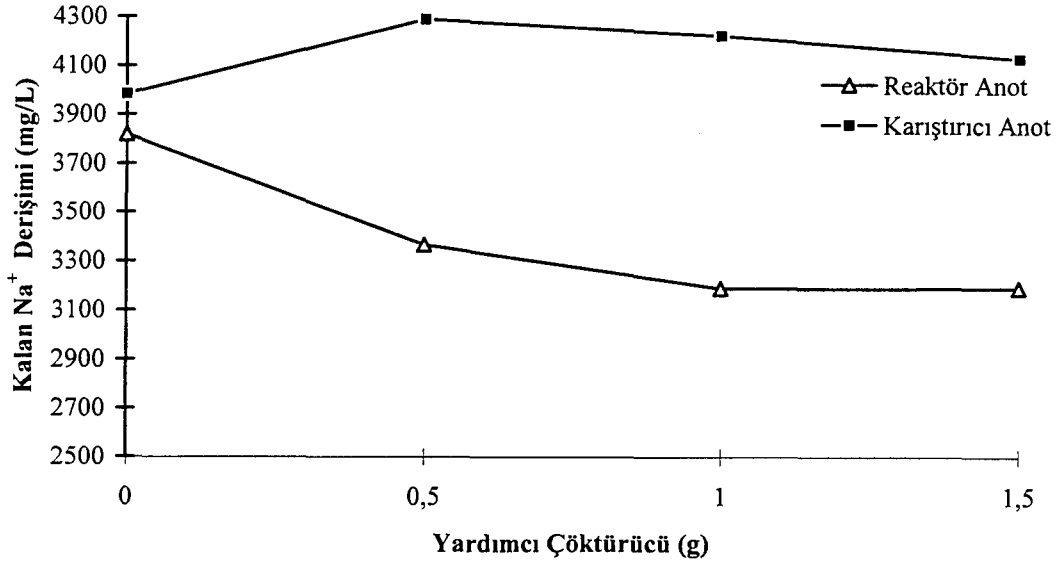
Şekil 9.23. Reaktörün ya da karıştırıcının anot olduğu durumda yardımcı çöktürücü (Al_2O_3) derişiminin klorür derişimine etkisi



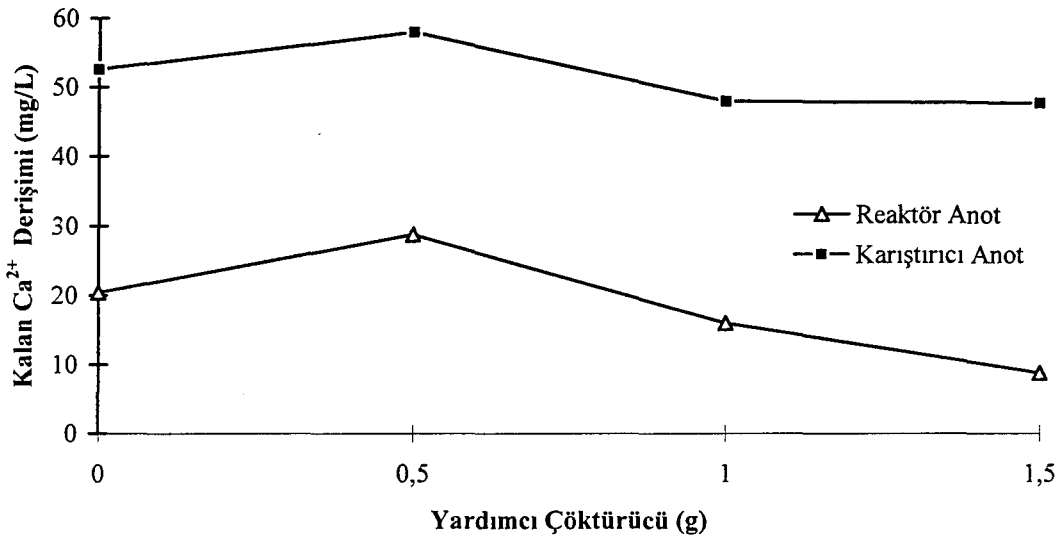
Şekil 9.24. Reaktörün ya da karıştırıcının anot olduğu durumda yardımcı çöktürücü (Al_2O_3)derişiminin sülfat derişimine etkisi



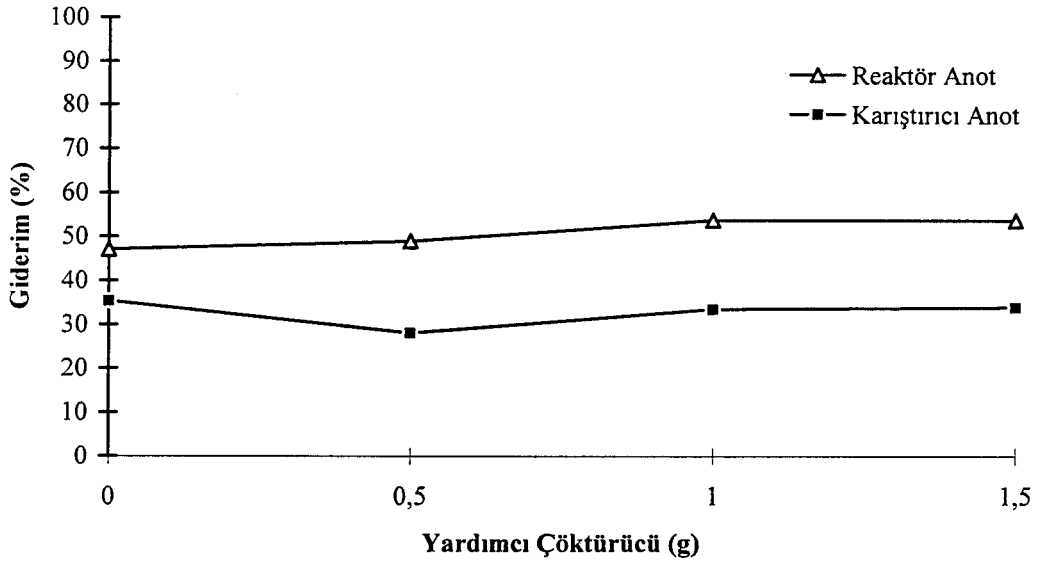
Şekil 9.25. Reaktörün ya da karıştırıcının anot olduğu durumda yardımcı çöktürücü (Al_2O_3)derişiminin bikarbonat derişimine etkisi



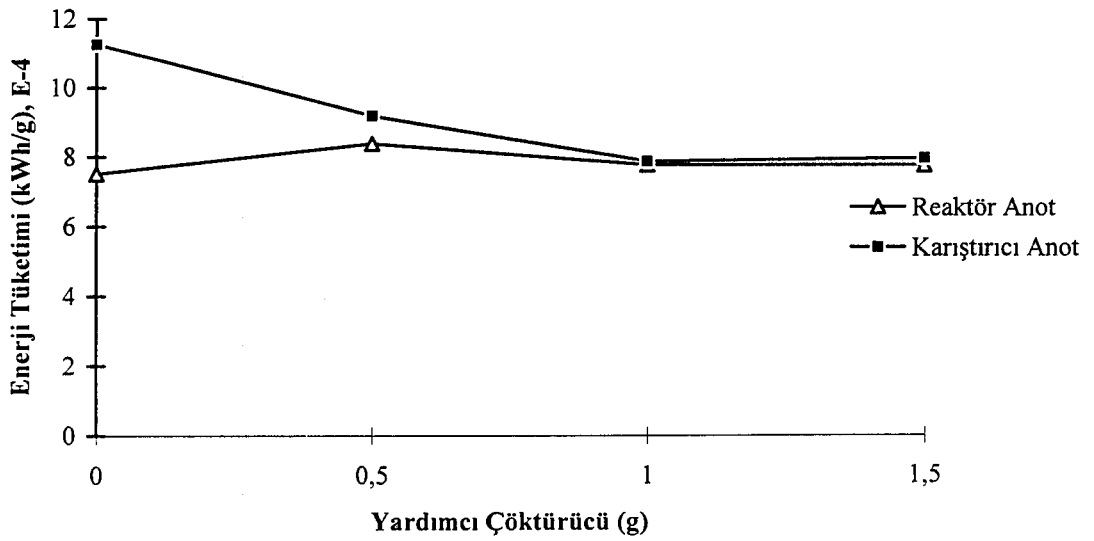
Şekil 9.26. Reaktörün ya da karıştırıcının anot olduğu durumda yardımcı çöktürücü (Al_2O_3)derişiminin sodyum derişimine etkisi



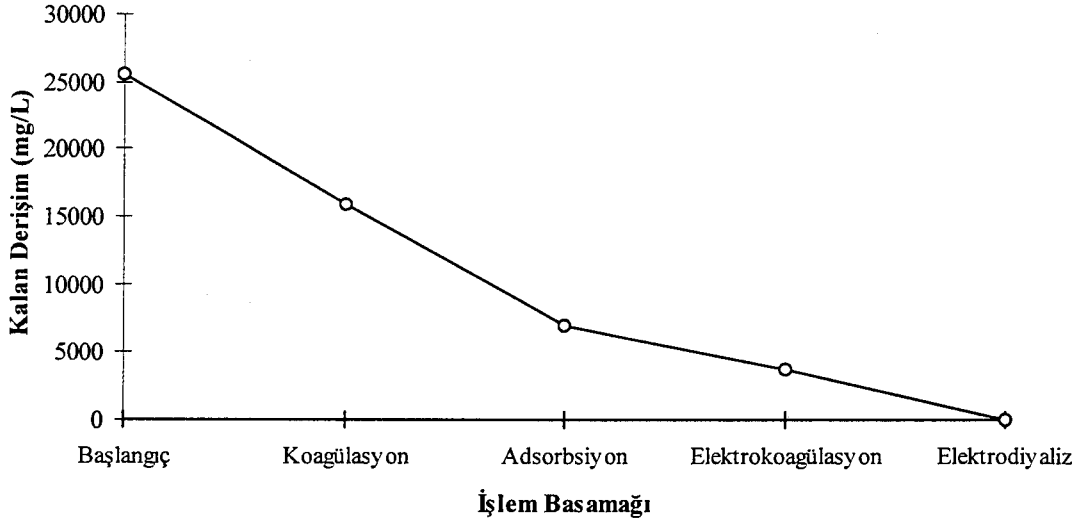
Şekil 9.27. Reaktörün ya da karıştırıcının anot olduğu durumda yardımcı çöktürücü (Al_2O_3)derişiminin kalsiyum derişimine etkisi



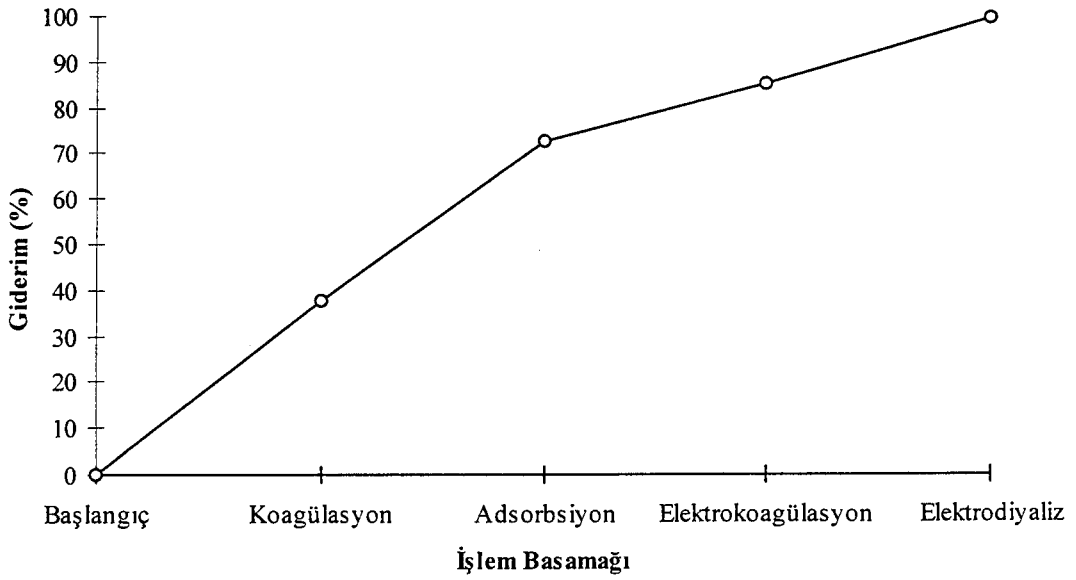
Şekil 9.28. Reaktörün ya da karıştırıcının anot olduğu durumda yardımcı çöktürücü (Al_2O_3) derişiminin % giderime etkisi



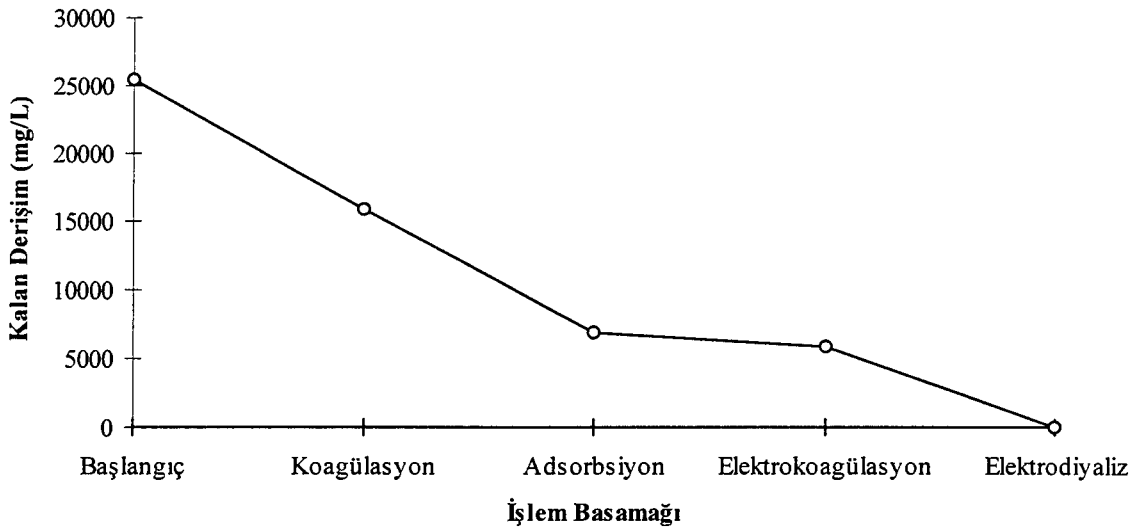
Şekil 9.29. Reaktörün ya da karıştırıcının anot olduğu durumlarda yardımcı çöktürücü (Al_2O_3) derişiminin enerji tüketimine etkisi



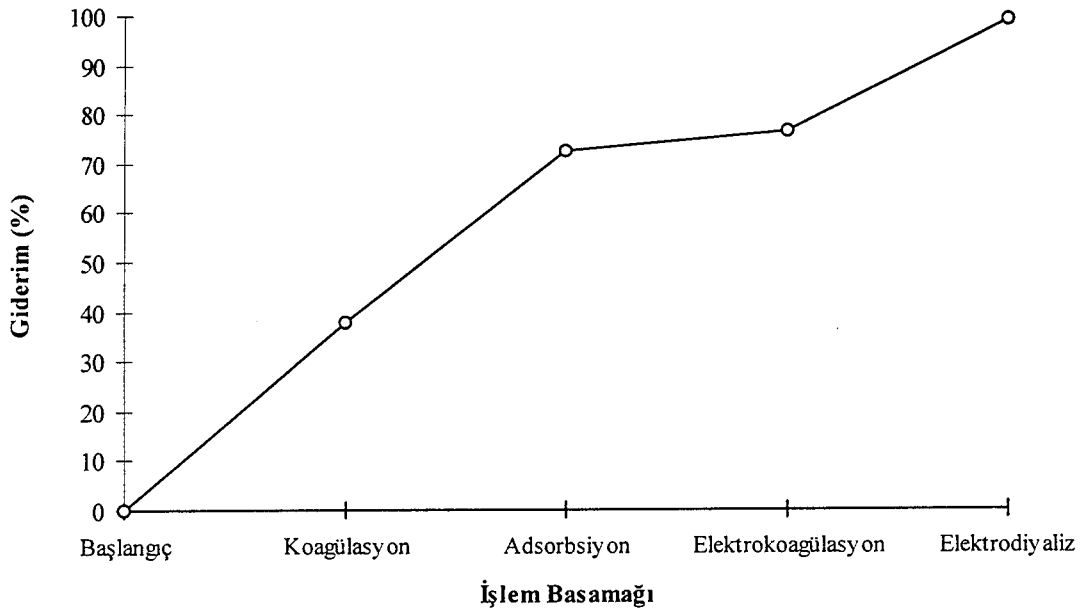
Şekil 9.30. Karma sistemde işlem basamaklarının toplam tuzluluk derişimine etkisi (elektrokoagülasyon: 3,0 A, 50 dk; elektrodiyaliz: 10 V, 30 dk)



Şekil 9.31. Karma sistemde işlem basamaklarının giderime etkisi (elektrokoagülasyon: 3,0 A, 50 dk; elektrodiyaliz: 10 V, 30 dk)



Şekil 9.32. Karma sistemde işlem basamaklarının toplam tuzluluk derişimine etkisi (elektrokoagülasyon: 0,75 A, 30 dk; elektrodiyaliz: 10V, 30 dk)



Şekil 9.33. Karma sistemde işlem basamaklarının giderime etkisi (elektrokoagülasyon: 0,75 A, 30 dk; elektrodiyaliz: 10V, 30 dk)

10. BULGULAR, YORUM ve ÖNERİLER

Bu çalışmada petrol drenaj kuyu sularındaki tuzluluğu oluşturan iyonların giderimi çalışılmıştır. Önçalışma olarak model atıksu, elektrodiyaliz hücresine doğrudan beslenmiştir. Fakat iyonların derişiminin yüksek olması nedeniyle işlem başarısız olmuştur. Bu nedenle model atıksuyun tuzluluğunun giderilmesi için önışlem gerektiği sonucuna varılmıştır. Çalışmada önışlem olarak koagülasyon denenmiştir. Çeşitli koagülanların farklı dozajlarında işlem yapılmış, kullanılan koagülanın cinsi ve miktarına göre tuzluluğun önemli oranda giderilebileceği gözlenmiştir. Koagülasyon çalışmasında, önce koagülanlar ayrı ayrı, daha sonra kireçle birlikte kullanılmıştır. Kireçle birlikte alum kullanıldığında en iyi sonuca ulaşılmıştır.

Yapılan çalışmada elektrokoagülasyonda demir elektrotlar kullanılmış, 10-40 dk'daki giderimler, reaktörün anot ve katot olması durumlarında incelenmiştir. En iyi giderimler reaktör anot olduğunda gözlenmiştir. Başlangıç derişimi, diğer iyonların derişimine göre daha az olan magnezyum iyonu, reaktörün ve karıştırıcının anot olduğu durumlarda 0,75 A, 30 dk'da % 100 giderilebilmiştir (Bkz. Çizelge 9.1-9.3).

Doğrudan elektrokoagülasyon çalışması ile reaktörün anot olduğu durumda, toplam tuzluluk giderimi % 47,77'ye ulaşmıştır (Bkz. Çizelge 9.4). Çalışmalarda akım ve süre artıka giderimin de arttığı gözlenmiştir. Fakat süreyle birlikte sıcaklık da önemli oranda artmaktadır ve sıcaklık artışıyla buharlaşma hızlandığından, giderim azalmaktadır. Bu nedenle çalışmada akım en fazla 3,0 A'e çıkarılmış ve süre 40 dk olarak belirlenmiştir. Giderimin daha iyi olabileceği düşünülen akım değerlerinde süre artırılmış, ancak bunun giderime önemli bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir.

Giderimi arttırabilmek için saptanan en iyi koşullarda farklı miktarlarda destek elektrolit ilave edilmiştir. 1 ve 1,5 g destek elektrolit ilavesi ile giderimde fazla bir artış olmadığı gözlenmiş ve ekonomik olması açısından 1 g tercih edilmiştir (Bkz. Çizelge 9.8-9.10). Deneylerde optimum koşulları sağlamak üzere destek elektrolit, pH, karıştırma hızları değiştirilerek çalışma yapılmış, pH'ın ve karıştırma hızının etkili olmadığı saptanmıştır.

En iyi elektrokoagülasyonun gözlendiği koşullarda, farklı malzemelerden yapılmış anot ve katot (demir reaktör anot, alüminyum karıştırıcı katot) denenmiş, fakat başarı sağlanamamıştır.

Son olarak koagülasyon, adsorbsiyon, elektrokoagülasyon ve elektrodiyalizden oluşan karma sistem denenmiştir. Koagülasyondan sonra adsorbsiyon işlemi (adsorban olarak curuf kullanılmıştır) uygulanan suya elektrokoagülasyon (3,0 A, 50 dk) uygulanmıştır. Buradan alınan su, elektrodiyalize tabi tutulmuştur. Tuzluluk giderimi % 100'e ulaşmıştır. Ayrıca enerji tüketimini azaltmak amacıyla adsorbsiyondan çıkan suya 0,75 A, 30 dk elektrokoagülasyon uygulanmış, daha sonra su, elektrodiyalize (10 V, 30 dk) tabi tutulmuştur. Bu çalışma sonucunda ise giderim, % 99,75'e varmıştır.

Yapılan bu çalışma, atıksudaki tuzluluğu oluşturan iyonların giderimi açısından oldukça iyi olmakla birlikte, iki elektrokimyasal yöntemin ard arda uygulanması nedeniyle maliyet açısından uygulanabilirliği tartışılmalıdır. Bu nedenle, pilot ölçekte yapılacak denemelerle tam bir maliyet analizi yapılarak bir sonuca varılabilir.

KAYNAKLAR

1. ATALAY, T., *Otomotiv Sektöründe Çevre Sorunları*, II. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi Bildirileri, TMMOB Çevre Mühendisleri Odası, İstanbul, 1997.
2. TÜZÜN, H.T., *TS EN ISO 14000 Çevre Yönetim Sisteminin Maddeleri ve Faydaları*, II. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi Bildirileri, TMMOB Çevre Mühendisleri Odası, İstanbul, 1997.
3. GÜLŞEN, H., YEŞİLNACAR, M.İ., YILDIZ, O., GERGER, R., *Evsel Atıksularda Biyolojik Azot ve Fosfor Giderimi*, II. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi Bildirileri, TMMOB Çevre Mühendisleri Odası, İstanbul, 1997.
4. AKAY, B., *Temiz Üretim Teknolojilerinin Kullanımı ve Bu Konuda TÜBİTAK-MAM' in Rolü*, II. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi Bildirileri, TMMOB Çevre Mühendisleri Odası, İstanbul, 1997.
5. ÖZBAŞARAN, M., GÖRGÜN, E., SÖZEN, S., *Türkiye' de Çevre Mühendisliğinin Konumu*, II. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi Bildirileri, TMMOB Çevre Mühendisleri Odası, İstanbul, 1997.
6. KARPUZCU, M., *Çevre Kirlenmesi ve Kontrolü*. Boğaziçi Üniversitesi Çevre Bilimleri Enstitüsü Yayınları, İstanbul, 1991.
7. SCOTT, K., *Handbook of Industrial Membranes*. Elsevier Science Publishers Ltd., England, 1995.
8. Nitratın Sudan Elektrokimyasal Yöntemlerle Uzaklaştırılması., KOPARAL, A.S. Doktora Tezi., Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 1996, 180s. (Yayımlanmamış)
9. DURAN, M., ve DEMİRER, G.N., *Su Arıtımında Temel İşlemler*. TMMOB Çevre Mühendisleri Odası, Ankara, 1997.
10. Bakır İyonlarının Seyreltik Çözeltilerden Elektrokimyasal Yolla Uzaklaştırılması., ÖZEL, E. Yüksek Lisans Tezi., Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 1994, 128 s. (Yayımlanmamış)
11. MUSLU, Y., *Atıksuların Arıtılması*. İTÜ Matbaası, İstanbul, 1994.
12. Hidrojen Sülfür Gazının Özellikleri, Hava Kalitesine Etkileri, Analiz ve Giderilme Yöntemleri., GERÇEL, H.F., ve KOPARAL, A.S. Lisans Tezi., Anadolu Üniversitesi Mühendislik - Mimarlık Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, 1989, 30 s. (Yayımlanmamış)

KAYNAKLAR (Devam)

13. ŞENGÜL, F., ve MÜEZZİNOĞLU, A., *Çevre Kimyası*. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir, 1993.
14. JACKSON, G.B., *Applied Water and Spent Water Chemistry, A Laboratory Manual*. Von Nostrand Reinhold, New York, 1993.
15. USLU, O., ve TÜRKMAN, A., *Su Kirliliği ve Kontrolü*. TC. Başbakanlık Çevre Genel Müdürlüğü Yayınları Eğitim Dizisi, Ankara, 1987.
16. CORBİTT, R.A., *Standart Handbook of Environmental Engineering*. McGraw Hill Inc., USA, 1990.
17. TRAIN, R.E., *Quality Criteria for Water*. Castle House Pub. Ltd., England, 1979.
18. HARRISON, R.M., (Ed) *Pollution Causes, Effects & Control*: Royal Society of Chemistry, Great Britain, 1993.
19. SAWYER, N.C., McCARTY, P.L., and PARKIN, G.F., *Chemistry for Environmental Engineering*. McGraw Hill Int. Editions, Singapore, 1994.
20. NEMEROW, N.L., *Industrial Water Pollution, Origines, Characteristics and Treatment*. Addison - Wesley Publishing Company, USA, 1978.
21. BOELTER, A.M., LAMMING, F.N., FARAG, A.M., and BERGMAN, H.L., *Environmental Effects of Saline Oil-Field Discharges on Surface Waters*, Environmental Toxicology and Chemistry, 11, 1187-1195, 1992.
22. CANTER, L.W., and KNOX, R.C., *Groundwater Pollution Control*. Lewis Pub. Inc. Michigan, 1986.
23. GODINO, M.P., RINCON, L.P.C., and MENGUAL, J.I., *Water Production from Brines by Membrane Distillation*, Desalination, 108, 91-97, 1996.
24. MAVROV, V., CHMIEL, H., HEITELE, B., and RÖGENER, F., *Desalination of Surface Water to Industrial Water with Lower Impact on the Environment. Part I: New Technological Concept*, Desalination, 108, 159-166, 1996.
25. ADHIKARY, S.K., NARAYANAN, P.K., THAMPY, S.K., DAVE, N.J., CHAUHAN, D.K., and İNDUSEKHAR, V.K., *Desalination of Brackish Water of Higher Salinity by Electrodialysis*, Desalination, 84, 189-200, 1991.

KAYNAKLAR (Devam)

26. ABDULA'ALY, A.I., and CHAMMEM, A.A., *Groundwater Treatment in the Central Region of Saudi Arabia*, Desalination, 96, 203-214, 1994.
27. GLUECKSTERN, P., and PRIEL, M., *Optimized Brackish Water Desalination Plants with Minimum Impact on the Environment*, Desalination, 108, 19-26, 1996.
28. BANNOUD, A., *The Electrochemical Way of Removing the Hardness of Water*, Desalination, 93, 1-3, 545-555, 1993.
29. NARAYANAN, P.K., THAMPY, S.K., DAVE, N.J., CHAUHAN, D.K., MAKVANA, B.S., ADHIKARY, S.K., and INDUSEKHAR, V.K., *Performance of the first Sea Water Electrodialysis Desalination Plant in India*, Desalination, 84, 201-211, 1991.
30. GNUSIN, N.P., ALEKSEEVA, S.L., and LUKIANETS, I.G., *Kinetics of the Precipitation of Hardness Salts from Natural Waters*, Khim. Tekhnol. Vody., 11, 10, 910-912, 1989.
31. RENK, R.R., *Electrocoagulation of Tar Sand and Oil-Shale Wastewaters*, Energy Prog., 8,4, 205-208, 1988.
32. WU, J., XIA, H., LIU, H., and ZHANG, L., *Economic Benefits of a New Treatment Technique for Boiler Feed Water*, Shuichuli Jishu, 16, 2, 154-157, 1990.
33. POLETAEV, L.N., AGAMALIEV, M.M., MALAKHOV, I.A., and MANAFOW, Sh. M., *Study of the Effectiveness of Demineralization of Ca-HCO₃-ion exchange Treated Salty Water by Precipitation of CaCO₃*, Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Energ. Ob'edin. SNG. Energ., 11,12, 86-89, 1994.
34. MALYUTA, G.N., *Removal of Calcium and Magnesium Compounds from Wastewaters*, Izobreteniya, 20, 87, 1992.
35. PAWLOWSKI, L., WASAG, H., TRACZ, J., and KOWALSKI, Z., *Simultaneous Decarbonation and Coagulation of Water*, (Politechnika Lubelska) PL 147, 582, 30 Jun. 1989, Appl. 250, 258, 29 Oct. 1984, 5pp.
36. TSUBAKIZAKI, S., MORIMOTO, T., and IZUMI, J., *Removal of Calcium from Seawater by Adsorption on Alumina*, JPN Kokai Tokyo Koho JP. 01, 284, 384, 15 Nov. 1989, Appl. 88/112, 374, 11 May 1988, 3 pp.

KAYNAKLAR (Devam)

37. MALAKHOV, I.A., AGAMALIEV, M.M., POLETAEV, L.N., and MANAFOV, Sh. M., *Partial Softening, Decarbonation and Demineralization of Brackishwater*, Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Energ., 4, 99-103, 1991.
38. SHİSHCHENKO, V.V., and BELYAEV, E.I., *Hydrolysis of Calcium Carbonate in Carbonate Removal from Geothermal Brines*, Khim. Tekhnol. Vody, 11, 10, 913-14, 1989.
39. MATSUDA, K., and KOSAKA, I., *Purification of Aqueous Alkali Metal Chloride Solution*, JPN Kokai Tokkyo Koho JP. 04. 04. 092 (92-04, 092) 08 Jan. 1992, Appl. 90/102, 482, 17 Apr. 1990, 7pp.
40. Lİ, C., and SU, T., *Magnesium Containing Wastewater Treatment*, Faming Zhuanli Shenqing Gongkai Shuomingshu CN, 1, 052, 100, 12 Jun.1991, Appl. 89, 108, 899, 27 Nov. 1989, 4pp.
41. KOZLAK, W., and PYSIAK, J., *Treatment of Wastewater from Petroleum Desalination Facility*, Przem. Chem., 69, 5, 229-231, 1990.
42. KÖSEOĞLU, K., *Fiziko- Kimyasal Arıtma Sistemleri*, Atıksu Arıtma Sistemlerinin İşletilmesi Semineri, Çevre Teknolojisi Uygulayıcıları Derneği, İstanbul, 1996.
43. ARIK, P., *Pamuklu Tekstil Endüstrisi Atıksu Arıtımında Alternatif Prosesler (Atıksu Arıtma Prosesi Seçimiyle İlgili Bir Örnekleme)*, Çevre Teknolojisi Uygulayıcıları Derneği Atıksu Arıtma Tesislerinin İşletilmesi Semineri, İstanbul, 1996.
44. Elektrokoagülasyon-Elektroflotasyon., ÜNAL, S. İleri Arıtım Teknikleri Ders Projesi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 1996, 21 s. (Yayımlanmamış)
45. ÖĞÜTVEREN, Ü.B., KOPARAL, A.S., ve GÖNEN, N., *Removal of Dye Stuffs from Wastewater: Electrocoagulation of Acilan Blau Using Soluble Anode*, Jo. Env. Science and Health Part A- Env. Sci. and Eng., 27,5, 1237-1247, 1992
46. ÖĞÜTVEREN, Ü.B. and KOPARAL A.S., *Eelctrocoagulation for oil-water emulsion teratment*, Journal of Environmental Science and Health, Part A, Environmental Science and Engineering A 32, (9 & 10), 2507-2520,1997,
47. FARKAS, J., and MITCHELL, G.D., *An Electrochemical Treatment Process for Heavy Metal Recovery From Wastewaters*, AIChE Symposium Series, No: 243, Vol: 81, 57-66, 1985.

KAYNAKLAR (Devam)

48. RAUTENBACH, R., and ALBERT, R., *Membrane Processes*. John Wiley & Sons Ltd., USA, 1989
49. TUWINER, S.B., *Diffusion and Membrane Technology*. Reinhold, NewYork, 1962.
50. ANONYMOUS, Ionics Inc. Watertown, MA 02172, USA, 1984.
51. LACEY, R.E., (Ed) *Membrane Processes for Industry*. Southern Research Institute, Birmingham, 1966.
52. SCOTT, K., and HUGHES, R., (Ed.) *Industrial Membrane Separation Technology*. Published by Blackie Academic & Professional, an Imprint of Chapman & Hall, Great Britain, 1996.

Ek 1. Sülfat iyonu derişiminin okunduğu çalışma doğrusu

