

**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

ÇİNKO KAPLAMA ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ GERİ KAZANIMI

MERVE DÖNMEZ ÖZTEL

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

SAMSUN

2018

Her hakkı saklıdır.

TEZ ONAYI

Merve DÖNMEZ ÖZTEL tarafından hazırlanan “Çinko Kaplama Endüstrisi Atıksularının Geri Kazanımı” adlı tez çalışması 17/12/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman Prof.Dr. Feryal AKBAL
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Jüri Üyeleri

Başkan Prof.Dr. Nihal BEKTAŞ
Gebze Teknik Üniversitesi
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye Prof.Dr. Feryal AKBAL
Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye Prof.Dr. Mustafa IŞIK
Aksaray Üniversitesi
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye Doç.Dr. Ayşe KULEYİN
Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye Doç.Dr. Yıldırım TOPCU
Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım. .../.../20....

Prof.Dr. Bahtiyar ÖZTÜRK
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.



17.12.2018

Merve DÖNMEZ ÖZTEL

ÖZET

Doktora Tezi

ÇİNKO KAPLAMA ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ GERİ KAZANIMI

MERVE DÖNMEZ ÖZTEL

Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Feryal AKBAL

Bu çalışmada çinko kaplama endüstrisi atıksuyunun geri kazanılarak proses suyu olarak kullanılabilir hale getirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada ultrafiltrasyon (UF) membran prosesi ve elektrokimyasal arıtım prosesinin entegre olarak kullanıldığı hibrit sistem geliştirilmiştir. Çinko kaplama işlemi yapan metal sanayii sektöründen alınan numunede atıksu karakterizasyonu çalışmaları yapılmıştır. Çinko, kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), yağ ve gres, askıda katı madde (AKM), pH ve iletkenlik parametrelerine bakılmıştır. Deneysel işlem olarak, elektrokoagülasyon (EK) ve UF’da optimum çalışma koşulları belirlenmiştir. Hibrit sistemin etkisini incelemek üzere EK-UF işlemi ile ilgili çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Polivinilpirolidon (PVP) ve Poliakrilik asit (PAA) sodyum tuzu kullanılarak polimer destekli ultrafiltrasyon (PDUF) hibrit sistem ve polimer destekli EK-UF hibrit sistem çalışmaları yapılmıştır. EK-UF hibrit sistemde pH 9 değerinde 60 dakika proses süresinde %100’e yakın çinko giderim verimine ulaşılmıştır. Hibrit sistemde 3 A akım değerinde EK prosesinde çinko giderimi 5 dakika proses süresinde %60 seviyelerindeyken UF prosesi ile bu verim 5 dakika proses süresinde %94 seviyelerine ulaşmıştır. PVP destekli UF prosesinde çinko giderim veriminin pH 9 ve pH 11’de %100’e yakın olduğu belirlenmiştir. Polimer-UF etkisiyle çinko giderim verimi PVP:Zn (1:100) polimer değerinde 60 dakika proses süresinde %100’e yakın olmuştur. PVP destekli EK-UF deneylerinde pH 9 ve PVP:Zn (1:1000) değerinde 60 dakika proses süresinde %100’e yakın giderim verimine ulaşılmıştır. PAA destekli UF prosesinde çinko

giderim veriminin 60 dakika proses süresi sonunda PAA:Zn (1:1000) değeriinde UF etkisiyle %100'e yakın olduğu belirlenmiştir. PAA destekli EK-UF deneylerinde çinko giderim verimi 5 dakika proses süresinde yalnız polimer etkisiyle %39 seviyelerindeyken EK'un etkisiyle %89'a ulaşmıştır. 60 dakika proses süresinde ise verim %100'e yakın olmuştur.

Aralık 2018

Anahtar kelimeler: Çinko, Atıksu geri kazanımı, Elektrokoagülasyon, Polimer, Ultrafiltrasyon, Hibrit sistem



ABSTRACT

Doctaral Dissertation

RECOVERY OF ZINC PLATING INDUSTRY WASTEWATER

MERVE DÖNMEZ ÖZTEL

Ondokuz Mayıs University
Graduate School of Science
Environmental Engineering Department

Danışman: Prof. Dr. Feryal AKBAL

In this study, it is aimed to make the zinc plating industry wastewater recyclable as process water. In this context, a hybrid system was developed to integrate an ultrafiltration membrane process and an electrochemical treatment process. Firstly, samples were taken from the metal industry sector, which processes zinc plating. Wastewater characterization studies were carried out in wastewater samples. Zinc, chemical oxygen demand (COD), oil and grease, suspended solids (SS), pH and conductivity parameters were examined. Firstly, optimum operation conditions were determined for electrocoagulation (EC) and UF process in the experimental studies. Afterwards, studies on EC-UF process were conducted to evaluate the effect of hybrid system. In addition, polymer-assisted ultrafiltration (PAUF) hybrid system and polymer-assisted EC-UF hybrid system studies have been performed by using two different polymers (Polyvinylpyrrolidone (PVP) and Polyacrylic acid (PAA) sodium salt). In the EC-UF hybrid system, zinc removal efficiency of 100% was reached at 60 min at pH 9. In the hybrid system with 3 A current in the EC process, 60% zinc removal was achieved in 5 min. With the UF process, this yield reached 94% in 5 min. In the PVP-assisted UF process, the yield of zinc removal was found to be close to 100% at pH 9 and pH 11. The efficiency of zinc removal with the effect of polymer-UF was about close to 100% at 60 min in PVP: Zn (1: 100) polymer value. At the end of the 60 min, at pH 9 and PVP: Zn (1: 1000) values, 100% reduction efficiency for zinc was achieved. In the PAA-assisted UF process, the zinc removal efficiency was found to be close to 100% at the end of the 60 min and at PAA: Zn (1: 1000) polymer value. The efficiency of zinc removal in PAA-

assisted EC-UF experiments is 39% with only polymer effect at 5 min. With the effect of EC, removal efficiency was reached 89% with only polymer effect at 5 min. The yield was close to 100% at 60 min of process time.

December 2018

Key Words: Zinc, Wastewater recovery, Electrocoagulation, Polymer, Ultrafiltration
Hybrid system



ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Doktora dönemim ve tez çalışmam süresince karşılaştığım zorlukları aşmamda yardımcı olan, bana her türlü desteği veren, değerli bilgi ve katkılarıyla beni yönlendiren sayın hocam Prof.Dr. Feryal AKBAL'a derin teşekkürlerimi sunarım.

Öğrenim hayatım boyunca yanımda olan değerli bölüm hocalarıma teşekkür ederim.

Katkı, yardım ve desteklerinden dolayı Gebze Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği bölümü öğretim üyesi sayın Prof.Dr. Nihal BEKTAŞ'a, Aksaray Üniversitesi Çevre Mühendisliği bölümü öğretim üyesi sayın Prof.Dr. Mustafa IŞIK'a, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Çevre Mühendisliği bölümü öğretim üyesi sayın Doç.Dr. Ayşe KULEYİN'e ve Ondokuz Mayıs Üniversitesi Kimya Mühendisliği bölümü öğretim üyesi sayın Doç.Dr. Yıldırar TOPCU'ya çok teşekkür ederim.

Yaşamım boyunca her konuda benden yardım ve ilgilerini esirgemeyen, manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çok değerli aileme ve manevi desteğinin yanı sıra tez çalışmamın her aşamasında bana yardımcı olan çok değerli eşim Asım ÖZTEL'e ve sevgili oğlum Akif Eymen ÖZTEL'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2018, Samsun

Merve DÖNMEZ ÖZTEL

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xv
1.GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı.....	1
1.2. Tezin Kapsamı.....	3
2.KURUMSAL TEMELLER VE KAYNAK ÖZETLERİ.....	6
2.1. Endüstriyel Atıksu Kirliliği, Endüstriyel Atıksuların Arıtılması ve Geri Kazanımı.....	6
2.2. Endüstriyel Atıksuların Arıtımı ve Geri Kazanım Yöntemleri.....	10
2.3. Membran Yöntemler.....	10
2.3.1. Ultrafiltrasyon.....	13
2.3.2. Ağır Metallerin Membran Yöntemlerle Arıtımı.....	15
2.4. Elektrokoagülasyon.....	16
2.4.1. Elektrokoagülasyonda Çelik Elektrotlar.....	18
2.4.2. Elektrokoagülasyonu Etkileyen Faktörler.....	19
2.5. Hibrit Sistemler.....	20
2.6. Atıksu Mevzuatı.....	24
3.MATERYAL VE YÖNTEM.....	27
3.1. Metal Endüstrisi Sanayi Sektörünün Belirlenmesi ve Numune Alınması..	27
3.2. Atıksu Karakterizasyonu.....	28
3.2.1. Çinko Analizi.....	30
3.2.2. Kimyasal Oksijen İhtiyacı Analizi.....	30
3.2.3. Yağ ve Gres Analizi.....	30
3.2.4. Askıda Katı Madde Analizi.....	31
3.3. Elektrokoagülasyon Deney Düzenegi.....	31
3.4. Ultrafiltrasyon Deney Düzenegi.....	32
3.5. Hibrit Sistem Deney Düzenegi.....	33
4.BULGULAR VE TARTIŞMALAR.....	39
4.1. Saf Su ve Atıksu ile Denenen Akış Oranları.....	40
4.2. Yalnız Elektrokoagülasyon Prosesi ile Yürütülen Çalışmalar.....	42
4.2.1. Elektrokoagülasyonda pH'nın Etkisi.....	42
4.2.2. Elektrokoagülasyonda Akımın Etkisi.....	53
4.2.3. Elektrokoagülasyonda Zamanın Etkisi.....	60
4.3. Yalnız Ultrafiltrasyon Prosesi İle Yürütülen Çalışmalar.....	63
4.3.1. Ultrafiltrasyonda pH'nın Etkisi.....	64
4.4. Elektrokoagülasyon-Ultrafiltrasyon Hibrit Prosesi İle Yürütülen Çalışmalar.....	71
4.4.1. Hibrit Sistemde pH'nın Etkisi.....	72
4.4.2. Hibrit Sistemde Akımın Etkisi.....	84
4.5. Polimer Destekli Ultrafiltrasyon Prosesi ile Yürütülen Çalışmalar.....	93
4.5.1. Polivinilpirolidon Destekli Ultrafiltrasyon Prosesinde pH'nın Etkisi.....	94

4.5.2. Polivinilpirolidon Destekli Ultrafiltrasyon Prosesinde Polimer Konsantrasyonunun Etkisi.....	105
4.5.3. Polivinilpirolidon Destekli Elektrokoagülasyon-Ultrafiltrasyon Prosesi.....	113
4.5.4. Poliakrilikasit Destekli Ultrafiltrasyon Prosesinde Polimer Konsantrasyonunun Etkisi.....	119
4.5.5. Poliakrilikasit Destekli Elektrokoagülasyon-Ultrafiltrasyon Prosesi.....	127
4.6. Hibrit Proseslerin Karşılaştırılması.....	133
4.7. Hibrit Proseslerde Maliyet Açısından Karşılaştırma.....	137
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	139
KAYNAKLAR.....	144
ÖZGEÇMİŞ.....	152



SİMGELER VE KISALTMALAR

SİMGELER

A	Amper
Cl	Klor
cm	Santimetre
dk	Dakika
F	Flor
g	Gram
H ₂	Hidrojen gazı
H ₂ SO ₄	Sülfirik asit
K	Potasyum
kDa	Kilodalton
Da	Dalton
kWh	Kilowatsaat
L	Litre
mm	Milimetre
m ²	Metrekare
m ³	Metreküp
mg/L	Miligram/Litre
mL	Mililitre
N	Azot
Na	Sodyum
NaOH	Sodyum hidroksit
nm	Nanometre
O	Oksijen
O ₂	Oksijen gazı
PVP:Zn	Polivinilpirolidon:Çinko
PAA:Zn	Poliaksirilasitsodyumtuzu:Çinko
ppm	Konsantrasyon (mg çözünen/kg veya litre çözelti)
Si	Silisyum
S	Kükürt
W	Watt
Zn	Çinko

°C	Santigrat
µm	Mikrometre
µS/cm	Mikrosimens/santimetre

KISALTMALAR

AKM	Askıda Katı Madde
AAS	Atomik Absorbsiyon Spektrofotometresi
ÇAMF	Çarpaz Akış Mikrofiltrasyon
ED	Elektrodiyaliz
EK	Elektrokoagülasyon
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu
KMK	Kritik Misel Konsantrasyonu
KHP	Potasyum Hidrojen Fitalat
KOİ	Kimyasal Oksijen İhtiyacı
MDUF	Misel Destekli Ultrafiltrasyon
MF	Mikrofiltrasyon
NF	Nanofiltrasyon
PAA	Poliakrilikasit
PDUF	Polimer Destekli Ultrafiltrasyon
PVP	Polivinilpirolidon
SDS	Sodyum Dodosil Sülfat
TL	Türk Lirası
TO	Ters Osmoz
UF	Ultrafiltrasyon

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Avrupa’da sektörel su kullanımları.....	9
Şekil 2.2.	Türkiye’de sektörel su kullanımları.....	9
Şekil 2.3.	Membran şeması.....	11
Şekil 2.4.	Basınç sürücü kuvvetli membran prosesler ve gözenek boyutları..	12
Şekil 2.5.	İçi boşluklu fiberlerden oluşturulmuş batık tip membran modülleri.....	13
Şekil 2.6.	Ultrafiltrasyon (UF).....	14
Şekil 2.7.	Polimer destekli membran için şematik görünüm.....	22
Şekil 3.1.	Samsun Organize Sanayi Bölgesinde faaliyet gösteren sektörler..	28
Şekil 3.2.	Filtrasyon deney düzeneği.....	29
Şekil 3.3.	Elektrokoagülasyon deney düzeneği.....	32
Şekil 3.4.	Çalışmada kullanılan hallow fiber UF membranı.....	33
Şekil 3.5.	Hibrit sistem iş akım şeması.....	34
Şekil 3.6.	Hibrit sistem reaktörün üstten görünüşü.....	35
Şekil 3.7.	Hibrit sistem.....	35
Şekil 3.8.	Hibrit sistemde reaktörün üstten görünüşü.....	36
Şekil 3.9.	Hibrit sistem iş akım şeması (polimer destekli).....	36
Şekil 3.10.	(1) Proses suyu (2) EK (3) UF çıkış üstten görünüş.....	37
Şekil 3.11.	(1) Proses suyu (2) EK (3) UF çıkış.....	37
Şekil 3.12.	PAA	38
Şekil 3.13.	PVP.....	38
Şekil 4.1.	Saf su ve atıksu ile denenen akış oranı sonuçları.....	41
Şekil 4.2.	Atıksudan çinko giderimi (EK), (1 A, 4,8 mA/cm ²).....	46
Şekil 4.3.	Atıksudan KOİ giderimi (EK), (1 A, 4,8 mA/cm ²).....	46
Şekil 4.4.	Atıksudan yağ ve gres giderimi (EK), (1 A, 4,8 mA/cm ²).....	47
Şekil 4.5.	Atıksudan AKM giderimi (EK), (1 A, 4,8 mA/cm ²).....	47
Şekil 4.6.	Atıksudan çinko gideriminde zamana bağlı enerji tüketimi (EK), (1 A, pH 3-9).....	48
Şekil 4.7.	Atıksudan çinko gideriminde zamana ve pH’ya bağlı enerji tüketimi (EK), (1 A, 4,8 mA/cm ²).....	48
Şekil 4.8.	pH değerlerine bağlı olarak çinko türlerinin dağılımı.....	49

Şekil 4.9.	EK çamur karakterizasyonu.....	52
Şekil 4.10.	Atıksudan çinko giderimi (EK), (pH 9).....	57
Şekil 4.11.	Atıksudan KOİ giderimi (EK), (pH 9).....	57
Şekil 4.12.	Atıksudan yağ ve gres giderimi (EK), (pH 9).....	58
Şekil 4.13.	Atıksudan AKM giderimi (EK), (pH 9).....	58
Şekil 4.14.	Atıksudan çinko gideriminde zamana ve akıma bağlı enerji tüketimi (EK), (pH 9).....	59
Şekil 4.15.	Atıksudan çinko gideriminde zamana ve akıma bağlı kg çinko başına enerji tüketimi (EK), (pH 9).....	59
Şekil 4.16.	Atıksudan zamana bağlı çinko, KOİ, yağ ve gres ve AKM giderimi (EK), (1 A, 4,8mA/cm ² , pH 9).....	62
Şekil 4.17.	Atıksudan çinko gideriminde zamana bağlı enerji tüketimi (EK), (1 A, 4,8mA/cm ² , pH 9).....	62
Şekil 4.18.	Atıksudan çinko gideriminde zamana bağlı enerji tüketimi (EK), (1 A, 4,8mA/cm ² , pH 9)	63
Şekil 4.19.	Atıksudan çinko giderimi (UF).....	68
Şekil 4.20.	Atıksudan KOİ giderimi (UF).....	68
Şekil 4.21.	Atıksudan yağ ve gres giderimi (UF).....	69
Şekil 4.22.	Atıksudan AKM giderimi (UF).....	69
Şekil 4.23.	UF akı deney sonuçları	71
Şekil 4.24.	Atıksudan çinko giderimi (EK-UF), (1 A, 4,8 mA/cm ²).....	80
Şekil 4.25.	Atıksudan KOİ giderimi (EK-UF), (1 A, 4,8 mA/cm ²).....	80
Şekil 4.26.	Atıksudan yağ ve gres giderimi (EK-UF), (1 A, 4,8 mA/cm ²).....	81
Şekil 4.27.	Atıksudan AKM giderimi (EK-UF), (1 A, 4,8 mA/cm ²).....	81
Şekil 4.28.	Çinko gideriminde zamana bağlı enerji tüketimi, (EK-UF), (pH 3-9, 1 A, 4,8 mA/cm ²).....	82
Şekil 4.29.	Hibrit proseste atıksudan çinko gideriminde zamana ve pH'ya bağlı enerji tüketimi, (1 A, 4,8 mA/cm ²).....	82
Şekil 4.30.	Akı deney sonuçları (EK-UF).....	84
Şekil 4.31.	Atıksudan akıma bağlı çinko giderimi (EK-UF), (pH 9).....	90
Şekil 4.32.	Atıksudan akıma bağlı KOİ giderimi (EK-UF), (pH 9).....	90
Şekil 4.33.	Atıksudan akıma bağlı yağ ve gres giderimi (EK-UF), (pH 9).....	91
Şekil 4.34.	Atıksudan akıma bağlı AKM giderimi (EK-UF), (pH 9).....	91
Şekil 4.35.	Çinko gideriminde enerji tüketimi (EK-UF), (pH 9).....	92

Şekil 4.36.	EK-UF akı deney sonuçları	93
Şekil 4.37.	Polivinilpirolidon destekli ultrafiltrasyon prosesinde zamana ve pH'ya bağlı çinko giderimi, PVP:Zn (1:1000).....	102
Şekil 4.38.	Polivinilpirolidon destekli ultrafiltrasyon prosesinde zamana ve pH'ya bağlı KOI giderimi, PVP:Zn (1:1000).....	102
Şekil 4.39.	Polivinilpirolidon destekli ultrafiltrasyon prosesinde zamana ve pH'ya bağlı yağ ve gres giderimi, PVP:Zn (1:1000).....	103
Şekil 4.40.	Polivinilpirolidon destekli ultrafiltrasyon prosesinde zamana ve pH'ya bağlı AKM giderimi, PVP:Zn (1:1000).....	103
Şekil 4.41.	PVP destekli UF akı deney sonuçları.....	105
Şekil 4.42.	Atıksu için PVP:Zn değerine ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PVP destekli UF çinko giderimi deney sonuçları, pH 9.....	110
Şekil 4.43.	Atıksu için PVP:Zn değerine ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PVP destekli UF KOİ giderimi deney sonuçları, pH 9.....	110
Şekil 4.44.	Atıksu için PVP:Zn değerine ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PVP destekli UF yağ ve gres giderimi deney sonuçları, pH 9.....	111
Şekil 4.45.	Atıksu için PVP:Zn değerine ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PVP destekli UF AKM giderimi deney sonuçları, pH 9.....	111
Şekil 4.46.	PVP destekli UF akı deney sonuçları.....	112
Şekil 4.47.	Atıksu için zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PVP destekli EK-UF çinko giderimi deney sonuçları, pH 9; PVP:Zn (1:1000).....	116
Şekil 4.48.	Atıksu için zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PVP destekli EK-UF KOI giderimi deney sonuçları, pH 9; PVP:Zn (1:1000).....	116
Şekil 4.49.	Atıksu için zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PVP destekli EK-UF yağ ve gres giderimi deney sonuçları, pH 9; PVP:Zn (1:1000).....	117
Şekil 4.50.	Atıksu için zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PVP destekli EK-UF AKM giderimi deney sonuçları, pH 9; PVP:Zn (1:1000).....	117
Şekil 4.51.	PVP destekli EK-UF akı deney sonuçları, (pH 9; PVP:Zn (1:1000).....	118
Şekil 4.52.	PVP-EK çamur karakterizasyonu.....	119

Şekil 4.53.	Atıksu için PAA:Zn değerine ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PAA destekli UF çinko giderimi deney sonuçları, pH 9.....	124
Şekil 4.54.	Atıksu için PAA:Zn değerine ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PAA destekli UF KOİ giderimi deney sonuçları, pH 9.....	124
Şekil 4.55.	Atıksu için PAA:Zn değerine ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PAA destekli UF yağ ve gres giderimi deney sonuçları, pH 9.....	125
Şekil 4.56.	Atıksu için PAA:Zn değerine ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PAA destekli UF AKM giderimi deney sonuçları, pH 9.....	125
Şekil 4.57.	PAA destekli UF akı deney sonuçları.....	126
Şekil 4.58.	Atıksu için zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PAA destekli UF-EK çinko giderimi deney sonuçları, pH 9; PAA:Zn (1:1000).....	130
Şekil 4.59.	Atıksu için zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PAA destekli UF-EK KOİ giderimi deney sonuçları, pH 9; PAA:Zn (1:1000).....	130
Şekil 4.60.	Atıksu için zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PAA destekli UF-EK yağ ve gres giderimi deney sonuçları, pH 9; PAA:Zn (1:1000).....	131
Şekil 4.61.	Atıksu için zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PAA destekli UF-EK AKM giderimi deney sonuçları, pH 9; PAA:Zn (1:1000).....	131
Şekil 4.62.	PAA destekli EK-UF akı deney sonuçları	132
Şekil 4.63.	PAA-EK çamur karakterizasyonu.....	133
Şekil 4.64.	UF, EK-UF, PVP (PVP) destekli UF, PVP destekli EK-UF, PAA destekli UF ve PAA destekli UF-EK çinko giderimi deney sonuçları, (pH 9; 1 A; PVP:Zn (1:1000)).....	134
Şekil 4.65.	UF, PVP (PVP) destekli UF, PVP destekli EK-UF, PAA destekli UF ve PAA destekli UF-EK KOİ giderimi deney sonuçları, (pH 9; 1 A; PVP:Zn (1:1000)).....	135
Şekil 4.66.	UF, EK-UF, PVP (PVP) destekli UF, PVP destekli EK-UF, PAA destekli UF ve PAA destekli UF-EK yağ ve gres giderimi deney sonuçları, (pH 9; 1 A; PVP:Zn (1:1000)).....	135
Şekil 4.67.	UF, EK-UF, PVP (PVP) destekli UF, PVP destekli EK-UF, PAA destekli UF ve PAA destekli UF-EK AKM giderimi deney sonuçları, (pH 9; 1 A; PVP:Zn (1:1000)).....	136

Şekil 4.68.	Hibrit proseslerde ilk yatırım maliyeti karşılaştırması.....	138
Şekil 4.69.	Hibrit proseslerde işletme maliyeti karşılaştırması.....	138



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	Ağır metallerin arıtımı için bazı fiziko-kimyasal yöntemler ve temel avantajları/dezavantajları(Barakat, 2011).....	10
Çizelge 2.2.	Tipik membran sistemlerinin özellikleri (Aslan, 2016, Munir, 2006).....	11
Çizelge 2.3.	UF membranlarının endüstriyel uygulamaları(Koyuncu, 2018)....	15
Çizelge 2.4.	Polimer destekli UF ile ağır metal giderimi.....	24
Çizelge 3.1.	Atıksu karakterizasyonu.....	28
Çizelge 4.1.	Saf su ve atıksu ile denenen ultrafiltrasyon sistemi akış oranı sonuçları.....	41
Çizelge 4.2.	Atıksu için 1 amper akım ve pH 3 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen elektrokoagülasyon deney sonuçları.....	43
Çizelge 4.3.	Atıksu için 1 amper akım ve pH 5 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen elektrokoagülasyon deney sonuçları.....	43
Çizelge 4.4.	Atıksu için 1 amper akım ve pH 7 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen elektrokoagülasyon deney sonuçları.....	44
Çizelge 4.5.	Atıksu için 1 amper akım ve pH 8 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen elektrokoagülasyon deney sonuçları.....	44
Çizelge 4.6.	Atıksu için 1 amper akım ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen elektrokoagülasyon deney sonuçları.....	45
Çizelge 4.7.	Atıksu için 1 amper akım ve pH 11 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen elektrokoagülasyon deney sonuçları.....	45
Çizelge 4.8.	Atıksu için 0,5 amper akım ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen elektrokoagülasyon deney sonuçları.....	55
Çizelge 4.9.	Atıksu için 1 amper akım ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen elektrokoagülasyon deney sonuçları.....	55
Çizelge 4.10.	Atıksu için 2 amper akım ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen elektrokoagülasyon deney sonuçları.....	56
Çizelge 4.11.	Atıksu için 3 amper akım ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen elektrokoagülasyon deney sonuçları.....	56
Çizelge 4.12.	Atıksu için 1 amper akım ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen elektrokoagülasyon deney sonuçları.....	61
Çizelge 4.13.	Atıksu için pH 3 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen ultrafiltrasyon deney sonuçları.....	65
Çizelge 4.14.	Atıksu için pH 5 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen ultrafiltrasyon deney sonuçları.....	65

Çizelge 4.15.	pH 7 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen ultrafiltrasyon deney sonuçları.....	66
Çizelge 4.16.	Atıksu için pH 8 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen ultrafiltrasyon deney sonuçları.....	66
Çizelge 4.17.	pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen ultrafiltrasyon deney sonuçları.....	67
Çizelge 4.18.	Atıksu için pH 10 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen ultrafiltrasyon deney sonuçları.....	67
Çizelge 4.19.	Atıksu için pH ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilen ultrafiltrasyon akı deney sonuçları.....	70
Çizelge 4.20.	Atıksu için 1 amper akım ve pH 3 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen hibrit sistem deney sonuçları.....	74
Çizelge 4.21.	1 amper akım ve pH 5 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen hibrit sistem deney sonuçları.....	75
Çizelge 4.22.	Atıksu için 1 amper akım ve pH 7 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen hibrit sistem deney sonuçları.....	76
Çizelge 4.23.	Atıksu için 1 amper akım ve pH 8 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen hibrit sistem deney sonuçları.....	77
Çizelge 4.24.	1 amper akım ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen hibrit sistem deney sonuçları.....	78
Çizelge 4.25.	Atıksu için 1 amper akım ve pH 11 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen hibrit sistem deney sonuçları.....	79
Çizelge 4.26.	Atıksu için pH ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilen hibrit sistem akı deney sonuçları.....	83
Çizelge 4.27.	Atıksu için 0,5 amper akım ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen hibrit sistem deney sonuçları.....	86
Çizelge 4.28.	1 amper akım ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen hibrit sistem deney sonuçları.....	87
Çizelge 4.29.	Atıksu için 2 amper akım ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen hibrit sistem deney sonuçları.....	88
Çizelge 4.30.	Atıksu için 3 amper akım ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen hibrit sistem deney sonuçları.....	89
Çizelge 4.31.	Atıksu için akım ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilen hibrit sistem akı deney sonuçları.....	92
Çizelge 4.32.	Atıksu için PVP:Zn (1:1000) ve pH 3 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PDUF sonuçları.....	96
Çizelge 4.33.	Atıksu için PVP:Zn (1:1000) ve pH 5 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PDUF sonuçları.....	97

Çizelge 4.34.	Atıksu için PVP:Zn (1:1000) ve pH 7 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PDUF sonuçları.....	98
Çizelge 4.35.	Atıksu için PVP:Zn (1:1000) ve pH 8 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PDUF sonuçları.....	99
Çizelge 4.36.	Atıksu için PVP:Zn (1:1000) ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PDUF sonuçları.....	100
Çizelge 4.37.	Atıksu için PVP:Zn (1:1000) ve pH 11 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PDUF sonuçları.....	101
Çizelge 4.38.	Atıksu için pH ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilen polivinilpirolidon destekli ultrafiltrasyon akı deney sonuçları.....	104
Çizelge 4.39.	Atıksu için PVP:Zn (1:100) ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PDUF sonuçları.....	107
Çizelge 4.40.	Atıksu için PVP:Zn (1:1000) ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PDUF sonuçları.....	108
Çizelge 4.41.	Atıksu için PVP:Zn (1:10000) ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PDUF sonuçları.....	109
Çizelge 4.42.	Atıksu için polimer konsantrasyonuna ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilen polivinilpirolidon destekli ultrafiltrasyon akı deney sonuçları.....	112
Çizelge 4.43.	Atıksu için PVP:Zn (1:1000) ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen polimer destekli elektrokoagülasyon-ultrafiltrasyon sonuçları.....	115
Çizelge 4.44.	Atıksu için zamana bağlı olarak gerçekleştirilen polivinilpirolidon destekli elektrokoagülasyon-ultrafiltrasyon akı deney sonuçları...	118
Çizelge 4.45.	Atıksu için PAA:Zn (1:100) ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PDUF sonuçları.....	121
Çizelge 4.46.	Atıksu için PAA:Zn (1:1000) ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PDUF sonuçları.....	122
Çizelge 4.47.	Atıksu için PVP:Zn (1:10000) ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PDUF sonuçları.....	123
Çizelge 4.48.	Atıksu için PAA:Zn değerine ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilen poliakrilikasit destekli ultrafiltrasyon akı deney sonuçları.....	126
Çizelge 4.49.	Atıksu için PAA:Zn (1:1000) ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen polimer destekli elektrokoagülasyon-ultrafiltrasyon sonuçları.....	129
Çizelge 4.50.	Atıksu için polimer konsantrasyonuna ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilen poliakrilikasit destekli elektrokoagülasyon-ultrafiltrasyon akı deney sonuçları.....	132

Çizelge 4.51. Proses suyu ve EK, EK-UF, PVP-UF, PAA-UF, PVP-EK-UF, PAA-EK-UF prosesleri optimum koşullar için metal iyonu analiz sonuçları.....	137
---	-----



1.GİRİŞ

1.1. Tezin Amacı

Su kaynakları; iklim değışikliğı, nüfus artışı, kentleşme ve endüstrileşme gibi problemlerin tehdidi altındadır. Giderek kısıtlı hale gelen su kaynaklarına talep hızla artmakta ve endüstride kullanılan su miktarı kısıtlanmaktadır. Endüstriyel kuruluşlar için su temini; iklim değışikliğinin su kaynaklarına etkisi ile oldukça önemli bir konu haline gelmiştir. Günümüzde, deşarj standartlarını sağlayacak düzeyde arıtım uygulanan atıksular daha iyi bir su kalitesi elde etmek üzere ileri yöntemler ile arıtılarak yeniden kullanılabilir (Casani ve Knöchel, 2002; Esquerre vd, 2011; Ismail vd, 2011; Schulmeyer vd, 2011; Tsai ve Chou, 2004). Kullanılan su miktarı açısından bazı endüstriler geri kazanıma daha çok ihtiyaç duymaktadır. Metal endüstrisi bu endüstriler arasında en önemlilerden biridir.

Ağır metaller, eser konsantrasyonlarda bile insan sağlığı için zararlı ve toksik özellikte olup çevresel ortamlarda artan konsantrasyonlarla birikim göstermektedirler. Bu bağlamda, metal endüstrisi atıksularının deşarjı alıcı ortam su kalitesini olumsuz etkilemektedir. Metal endüstrisi atıksuları uygun arıtma yöntemleri ile arıtılarak deşarj standartları sağlanabilmektedir. Ancak söz konusu endüstri hem su tüketimi hem de atıksu üretimi fazla olan endüstriler arasındadır. Bu nedenle metal endüstrisinde “atıksuların geri kazanımı ve yeniden kullanımı” yaklaşımı bir ihtiyaç olarak ortaya çıkmaktadır. Atıksuların geri kazanımı ile; endüstriyel tesislerin yeraltı ve içme suyu kaynaklarından veya şebekeden aldığı su miktarı azaltılacak, tatlı su kaynaklarının kullanımının önüne geçilecek, olası su kirliliğı önlenecek, su tasarrufu sağlanarak tesislere uzun vadede ekonomik anlamda katkıda bulunulacaktır.

Endüstriyel atıksuların geri kazanımı amacıyla özellikle membran prosesler etkin olarak kullanılmaktadır. Malzeme teknolojilerindeki gelişmeler sonucunda yeni membranların üretilmesi ve buna bağlı olarak hem ilk yatırım hem de işletme maliyetlerinin azalması, membran proseslerin kullanımındaki artışta etkili olmuştur. Birçok çözünmüş madde, nanofiltrasyon (NF) ve ters osmoz (TO) membranları

tarafından tutulabilmekte ancak mikrofiltrasyon (MF) ve UF membranları ile tutulamamaktadır. Bununla birlikte, MF ve UF membranları diğer proseslerle kombine edilerek atıksu geri kazanımı için dizayn edilebilirler. Son yıllarda su içinde çalışan (batık) membran filtrasyon sistemleri yaygınlaşmaya başlamış ve bu sayede yüksek kapasiteli uygulamalar için büyük maliyet avantajları doğmuştur. Ülkemizde “membran bioreaktör” teknolojisi ve “çöktürme, koagülasyon-ön filtrasyon-UF ve TO” sistemi kullanılarak atıksu geri kazanımının sağlandığı organize sanayi bölgeleri bulunmaktadır.

Atıksulardan ağır metallerin membran prosesler kullanılarak uzaklaştırılmasında, yaygın olarak, TO, NF, elektrodializ (ED) ve misel destekli ultrafiltrasyon (MDUF) (Innocenzi vd, 2018; Huang vd, 2017; Channarong vd, 2010; Zeftawy ve Mulligan, 2011) prosesleri kullanılmaktadır. NF ve TO proseslerinde görülen başlıca problemler, membrandaki kirlenme ve düşük membran geçirgenliğidir. Ayrıca yüksek enerji ve basınç gerektirmeleri dolayısıyla bu prosesler çoğunlukla ekonomik olmaktan uzak kalmaktadır. UF sistemleri ile atıksudan ağır metal giderimi mümkün olmamakta ancak son yıllarda gelişen ve çok fazla ilgi görmekte olan misel destekli UF, polimer ile fonksiyonelize edilmiş UF ya da farklı adsorbanlarla birlikte uygulanan UF gibi hibrit sistemler kullanılabilmektedir (Qiu ve Mao, 2013). Böylece, hem NF ve TO sistemlere göre daha düşük basınçla çalışılmakta hem de daha yüksek akı elde edilebilmektedir. Literatürde metal giderimi için çoğunlukla UF sistemlerinde polimerler kullanılmış olmakla birlikte, adsorpsiyon prosesi ve UF’un ve koagülasyon-flokülasyon prosesi ile UF’un birlikte kullanıldığı hibrit sistemlerle yapılan çalışmalar da bulunmaktadır.

Tez çalışmasının amacı, çinko kaplama endüstrisi atıksuyunun geri kazanılarak proses suyu olarak kullanılabilir hale getirilmesidir. Çalışmada bir UF membran prosesi ve bir elektrokimyasal arıtım prosesinin entegre bir şekilde çalışacağı hibrit bir sistem geliştirilerek, çinko kaplama endüstrisi atıksuyunun geri kazanımı için sistemin etkinliği araştırmak hedeflenmiştir. Elektro-UF sisteminin veriminin artırılması amacıyla, sistemin polimer/polielektrolit ilavesi ile desteklenerek metal iyonları ile kompleks oluşturma özelliği gösteren farklı polimerler incelenmiştir.

1.2. Tezin Kapsamı

Endüstriyel ürünlerin üretiminde ağır metallerin yoğun bir biçimde kullanılması nedeniyle, insanların ağır metallere maruz kalma oranı son yıllarda artmıştır. Genel olarak ağır metaller 1-10 ppm gibi düşük konsantrasyonlarda toksik etki gösterirken; civa ve kadmiyum gibi bazı metal iyonları ise 0,001-0,1 ppm gibi çok düşük konsantrasyonlarda bile toksik olabilmektedirler. Endüstriyel kaynaklı ağır metal kirliliğinin önlenmesi için ağır metal içeren atıksular alıcı ortamlara deşarj edilmeden önce arıtılarak ağır metal derişimlerinin yönetmeliklerde belirtilen deşarj standartlarını sağlaması gerekmektedir.

Metal içeren atıksuların arıtımında koagülasyon-flokülasyon ve kimyasal çöktürme yöntemleri fizikokimyasal arıtmada yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek konsantrasyonda ağır metal içeren endüstriyel atıksulardan ağır metallerin giderimi ve atıksuyun geri kazanımı hedeflendiğinde koagülasyon, elektrokoagülasyon, kimyasal çöktürme gibi alışlagelmiş arıtım yöntemleri yetersiz kalmaktadır. Bu bağlamda; çevresel ve ekonomik faktörler, teknolojinin gelişmesi ve yeni kanun ve yönetmeliklerin yürürlüğe girmesi gibi değişen ve daha sıkı şartlardan dolayı yeni uygun arıtma proseslerine ihtiyaç duyulmaktadır. TO, NF ve ED prosesleri atıksulardan ağır metallerin gideriminde etkilidir, ancak UF sistemi ile atıksudan ağır metal giderimi sağlanamamaktadır (Desai ve Murthy, 2012). Son yıllarda yapılan çalışmalarda kompleks ajanlarla desteklenen UF ve adsorpsiyon hibrit sistemi (Channarog vd, 2010) ve koagülasyon-flokülasyon sistemi ile UF'un birlikte kullanıldığı hibrit sistem (Du vd, 2014) metal giderimi amacıyla kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasında bir UF membran prosesi ile elektrokimyasal arıtım prosesinin entegre bir şekilde çalışacağı sürekli akış kontrollü elektro-UF sistemi geliştirilerek sistemin çinko kaplama endüstrisi atıksuyunun geri kazanımı için etkinliği ve verimliliği araştırılmıştır. Bu kapsamda öncelikli olarak UF membranı elektrokimyasal reaktör içerisinde batık olarak yerleşecek şekilde laboratuvar ölçekli elektro-UF sistemi tasarlanmıştır. Proje çalışmasında kullanılacak olan atıksu Samsun Organize Sanayi Bölgesinden çinko kaplama yapan bir işletmeden temin edilmiştir. Atıksuyun karakterizasyonunun belirlenmesi amacıyla çinko kaplama

işlemi uygulanan metal sanayii sektöründen alınan numunelerde pH, iletkenlik, çinko (Zn^{2+}), KOİ, AKM ve Yağ ve Gres parametreleri analiz edilmiştir.

Tasarlanan sistemde ilk işlem olarak temin edilen atıksu kum filtrasyonundan geçirilmiştir. Ultrafiltrasyon prosesi akış oranını gözlemlemek amacı ile sistem hem saf su hemde atıksu ile geçirilerek çalıştırılmıştır. Akı değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra yalnız EK prosesi ile deneysel çalışmalar yürütülmüştür. EK çalışmasında öncelikle belirlenen sabit akım değerinde (1 A), atıksuyun kendi iletkenlik değerinde ve 0-30 dakika zaman aralığında (5, 10, 15 ve 30) pH denemeleri yapılmıştır. pH 3, 5, 7, 8, 9 ve 11 olarak seçilerek deneyler yürütülmüştür. pH etkisinden sonra EK deneylerinde akımın/akım yoğunluğunun etkisine bakılmıştır. pH 9 değerinde ve 0-30 dakika zaman aralığında, 0,5, 1, 2 ve 3 A koşullarında deneyler yürütülmüştür. Son olarak 0-60 dakika proses süresinde (5, 10, 15, 30, 45 ve 60) zaman denemeleri yapılmıştır. İkinci olarak sistem yalnız UF prosesi ile çalıştırılmıştır. UF çalışmasında öncelikle 0-60 dakika proses süresinde (5, 15, 30 ve 60) pH 3, 5, 7, 8, 9 ve 11 değerlerinde pH denemeleri yapılmıştır. Her bir deney setinde UF sistemi akış oranı tespit edilerek akı değerleri hesaplanmıştır.

EK ve UF deneyleri sonucunda, elde edilen deneysel veriler ile hibrit sistem oluşturularak EK-UF deneyleri yürütülmüştür. Hibrit sistemde öncelikle belirlenen sabit akım değerinde (1 A), atıksuyun kendi iletkenlik değerinde ve 0-60 dakika proses süresinde (5, 15, 30 ve 60) pH denemeleri yapılmıştır. pH 3, 5, 7, 8, 9 ve 11 olarak seçilerek deneyler yürütülmüştür. pH etkisinden sonra EK-UF deneylerinde akımın/akım yoğunluğunun etkisine bakılmıştır. pH 9 değerinde ve 0-60 dakika proses süresinde, 0,5, 1, 2 ve 3 Amperde deneyler yürütülmüştür. Her bir deney setinde UF sistemi akış oranı tespit edilerek akı değerleri hesaplanmıştır.

Son olarak PDUF çalışmaları yapılmıştır. İki farklı polimer (PVP ve poliakrilik asit sodyum tuzu) kullanılmıştır. PVP destekli UF prosesinde öncelikle; atıksuyun çinko konsantrasyonuna göre belirlenen polimer konsantrasyonunda PVP:Zn (1:1000) ve 0-60 dakika proses süresinde (5, 15, 30 ve 60) pH 3, 5, 7, 8, 9 ve 11 değerlerinde denemeler yapılmıştır. pH etkisinden sonra PVP destekli UF deneylerinde polimer konsantrasyonunun etkisine bakılmıştır. pH 9 değerinde ve 0-60 dakika proses süresinde, 1:100-1:10000 PVP:Zn aralığında deneyler

yürütülmüştür. Her bir deney setinde UF sistemi akış oranı tespit edilerek akı değerleri hesaplanmıştır. PVP ve EK destekli UF hibrit sisteminde de sadece optimum koşullarda (pH 9, 1:1000 PVP:Zn ve 0-60 dakika proses süresinde (5, 15, 30 ve 60)) deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Poliakrilik asit sodyum tuzu destekli UF prosesinde de; pH 9 değerinde ve 0-60 dakika proses süresinde, 1:100-1:10000 PAA:Zn aralığında deneyler yürütülmüştür. Her bir deney setinde UF sistemi akış oranı tespit edilerek akı değerleri hesaplanmıştır. Poliakrilik asit sodyum tuzu ve EK destekli UF hibrit sisteminde de optimum koşullarda (pH 9, PAA:Zn (1:1000) ve 0-60 dakika proses süresinde (5, 15, 30 ve 60)) deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Projede kullanılacak olan hibrit sistem ile hem NF ve TO sistemlere göre daha düşük basınçla çalışılabilecek hem de daha yüksek akı sağlanabilecek arıtma sisteminin etkisi amaçlanmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Endüstriyel Atıksu Kirliliği, Endüstriyel Atıksuların Arıtılması ve Geri Kazanımı

Sanayileşmenin gittikçe artması, farklı endüstrilerin oluşması ve çevrenin oluşan bu endüstri kirleticilerinden direkt etkilenmesi, endüstriyel atıksu arıtımının ve atıksu geri kazanımının önem kazanmasına neden olmuştur. Tüm sektörlerde talep edilen su arttıkça yeraltı suyu tükenmekte, su ekosistemleri kirlenip kalitesiz hale gelmekte ve yeni su kaynaklarının geliştirilmesi günden güne daha pahalı hale gelmektedir. Küresel ısınmaya bağlı olarak görülen iklim değişikliği sonucu su potansiyelinde meydana gelen azalma ile birlikte artan nüfusun su talebinin artması, su kaynaklarının etkin kullanımını zorunlu kılmaktadır.

Ağır metal içeren endüstriyel atıksu akımları genellikle; elektrolitik kaplama ve metal yüzey işleme işlemleri gibi proseslerdeki çeşitli uygulamalar sonucu meydana gelebilmektedir. Metal kaplama, maden işletmeleri, gübre sanayi, deri, pil, kağıt endüstrisi, pestisitler gibi endüstrilerin hızlı gelişimi ve ağır metal atıksularının direkt ya da dolaylı yoldan doğaya salınımı özellikle de gelişmiş ülkelerde ağır metal kirliliğini arttırmıştır. Organik maddelerin aksine ağır metaller biyolojik olarak parçalanamamakta, kalıcı, canlı organizmasında birikimlere neden olmakta ve eser miktarlarda bile toksik etki gösterebilmektedirler.

Endüstriyel atıksular ağır metal olarak genellikle çinko, bakır, nikel, cıva, kadmiyum, kurşun ve krom içermektedir. Çinko, insan sağlığı için gerekli olan eser bir elementtir. Canlı dokuların fizyolojik fonksiyonları için önemlidir ve birçok biyokimyasal süreci düzenlemektedir. Ancak yüksek konsantrasyonlarda çinko; mide krampları, kusma, mide bulantısı ciltte tahriş ve anemi gibi önemli sağlık sorunlarına neden olmaktadır. Bu nedenle ağır metallerin atıksulardan etkin bir şekilde arıtılması oldukça önemlidir (Çağlarırnak ve Hepçimen, 2010).

Atıksu geri kazanımı ise birçok açıdan bakıldığında, seçim olmaktan çıkarak zorunlu hale gelmeye başlamıştır. Özellikle yeraltı suyu seviyesi azalmış bölgelerde, yüksek su tüketimi yapan endüstrilerin ham kuyu suyu kullanımlarını azaltarak, atıksuyu proses içerisinde tekrar kullanımını sağlayacak geri kazanım teknolojilerini

faaliyete geçirmek önemli bir gereksinim haline gelmiştir (Koyuncu 2018; Gupta ve Nayak, 2012; Munoz vd, 2006; Fu ve Wang, 2011).

Arıtılmış atıksuların geri kazanılarak yeniden kullanım alanları ana hatlarıyla aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Kentsel kullanım

- Parklar, rekreasyon alanları, spor tesisleri, otoyol kenarları
- Uydu kentlerde yeşil sahalar
- Ticari ve endüstriyel gelişme alanları
- Golf merkezleri
- Yangın söndürme
- Ticari ve endüstriyel alanlarda tuvalet pisuvarları
- İnşaat projelerinde toz kontrol ve beton üretimi
- Araç yıkama tesisleri

- Endüstriyel kullanım

- Soğutma suyu
- Proses suları
- Kazan besleme
- Tesis yeşil alan sulaması
- Yangın söndürme
- Ekipman ve saha yıkaması

- Zirai sulama

- Habitat, yüzeysel suların, rekreasyon alanların beslenmesi

- Yeraltı suyu beslenmesi/enjeksiyonu

- Sahil bölgelerinde tuzlu suyun yeraltı tatlı su kaynaklarına girişiminin engellenmesi

- Toprak-yeraltı suyu sisteminde daha ileri arıtım

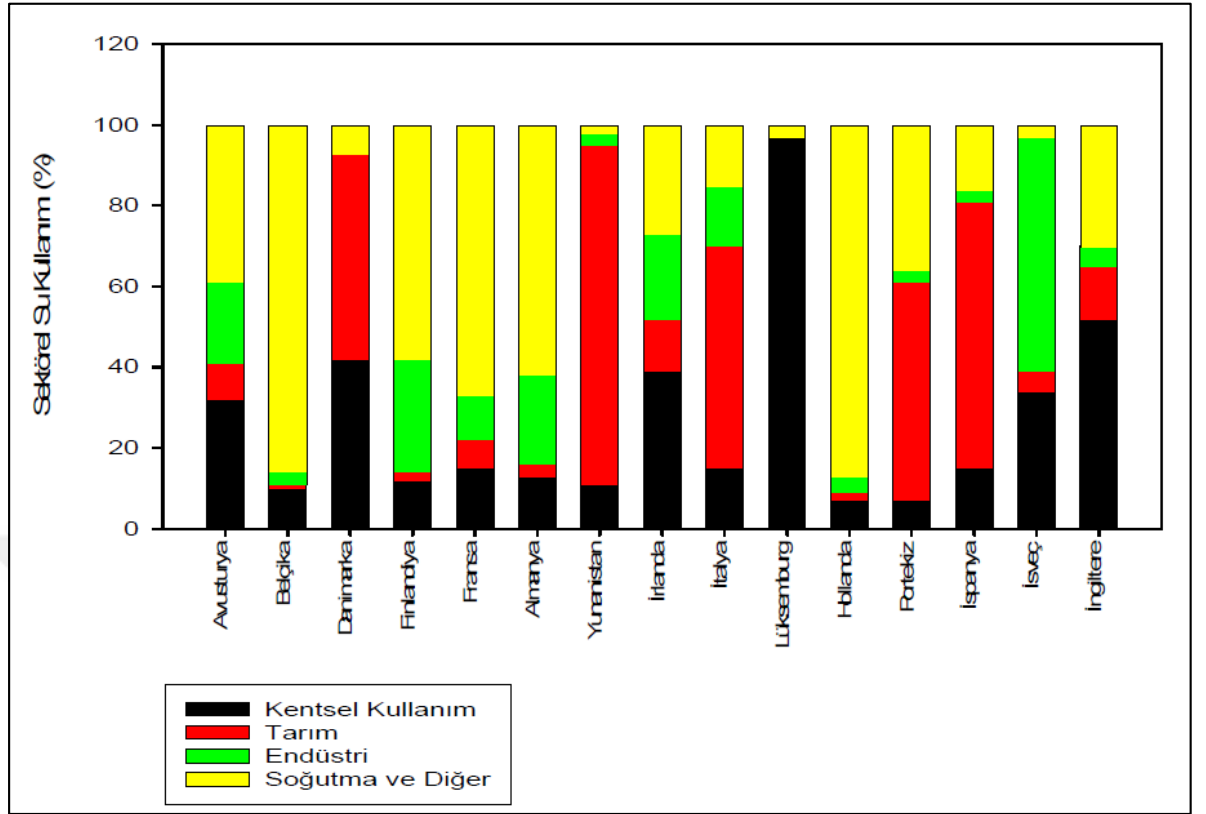
- İçme suyu veya kullanma suyu kalitesindeki akiferlerin beslenmesi
- Geri kazanılmış atıksuyun depolanması
- Aşırı yeraltı suyu pompalanması sonucu oluşabilecek göçüklerin engellenmesi (Asano vd, 2007).

Avrupa kıtası her ne kadar su kaynakları bakımından zengin olsa da son 10 yıllık süreçte su kıtlığı ve kalitesindeki bozulma gibi sorunların artmasıyla bu durum değişmiştir. Avrupa ülkelerinin yarısı (hemen hemen nüfusun % 70'i) bugün su sıkıntısıyla yüz yüzedir. Su sıkıntısı indeksi, ülkenin toplam su tüketiminin toplam yenilenebilir tatlı su kaynaklarına oranıyla belirlenmiştir. Buna göre % 10'dan daha düşük orana sahip olan ülkelerin su sıkıntısı riski düşüktür. %20'den fazla olan ülkeler ise su kıtlığı ile karşı karşıyadır ve kapsamlı bir su yönetimi uygulamalıdır. Şekil 2.1'de Avrupadaki sektörel su kullanımları verilmiştir (Özbay ve Kavaklı, 2008).

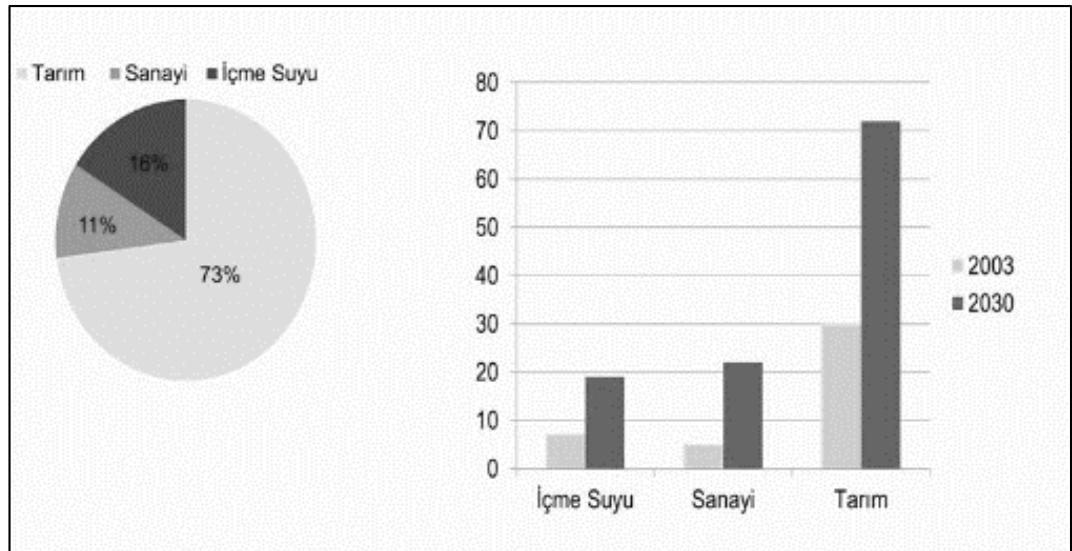
Ülkemiz için geri kazanılan atıksuların öncelikli yeniden kullanım alanları aşağıda belirtildiği gibi olup Şekil 2.2'de sunulmuştur (Aslan, 2007),

- ◆ Tarımsal sulama, park ve bahçe sulaması,
- ◆ Sanayi soğutma ve proses suyu olarak kullanılmasıdır.

Ülkemizde arıtılmış atıksuların sulama suyu olarak kullanılmasıyla ilgili yasal mevzuat 20 Mart 2010 tarih ve 27527 sayılı Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliğinde verilmiştir.



Şekil 2.1. Avrupa’da sektörel su kullanımları (Özbay ve Kavaklı, 2008)



Şekil 2.2. Türkiye’de sektörel su kullanımları (Aslan, 2007)

2.2. Endüstriyel Atıksuların Arıtım ve Geri Kazanım Yöntemleri

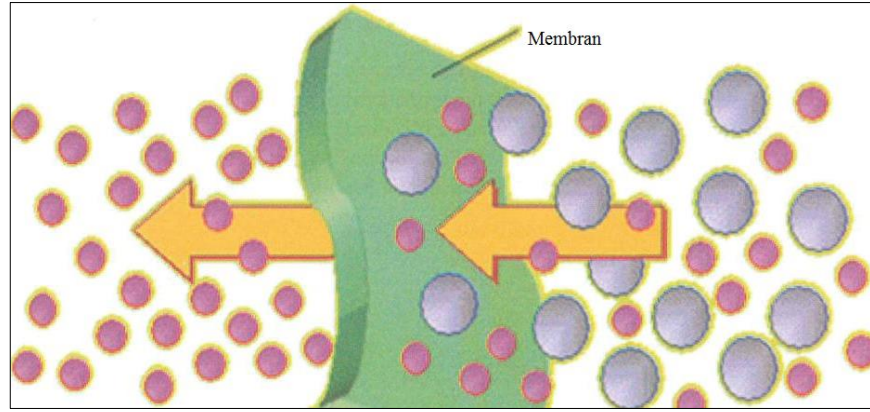
Ağır metal iyonlarını atıksudan uzaklaştırmak için iyon değişimi, adsorpsiyon, membran filtrasyonu, elektrokimyasal arıtım, koagülasyon gibi birçok yöntem kullanılmaktadır (Fu ve Wang, 2011, Ahmaruzzaman, 2011). Ağır metallerin arıtımı için bazı fiziko-kimyasal yöntemler ve temel avantajları/dezavantajları Çizelge 2.1’de sunulmaktadır (Barakat, 2011).

Çizelge 2.1. Ağır metallerin arıtımı için bazı fiziko-kimyasal yöntemler ve temel avantajları/dezavantajları (Barakat, 2011)

Arıtım metodları	Avantajlar	Dezavantajlar
Kimyasal çöktürme	Düşük sermaye maliyeti, basit işletme	Çamur üretimi, çamur bertarafı için
Yeni adsorbentlerle adsorpsiyon	Düşük maliyet, basit işletme koşulları, geniş pH aralığı, yüksek metal bağlama kapasitesi	Düşük seçicilik, atık ürün üretimi
Membran filtrasyonu	Küçük alan gereksinimi, düşük basınç, yüksek ayırma seçiciliği	Membran kirlenmesinden dolayı yüksek işletme maliyet
Elektrodiyaliz	Yüksek ayırma seçiciliği	Membran kirlenmesi ve enerji tüketiminden dolayı yüksek işletme maliyet
Fotokataliz	Organik madde ve metallerin aynı anda giderimi, daha az zararlı yan ürünler	Uzun devam süresi, sınırlı uygulama

2.3. Membran Yöntemler

Membranlar çevre, enerji ve endüstriyel alanda önemli bir yer kazanarak geniş bir uygulama alanı bulmaktadır. Membran uygulamalarında amaç, membran üzerinde bir çözelti karışımı içerisindeki bazı bileşenlerin geçişine izin verilirken, bazılarının ise tutulmasını sağlamaktır. Membran, bir karışımdaki bileşenlerin ayrılmasını sağlayabilen seçici bir bariyerdir (Şekil 2.3). Sızma ve adsorbsiyon difüzyon mekanizması vasıtasıyla bir sıvıdaki belli bileşenlerin veya maddelerin ayrılmasına izin verirken, geçişi istenmeyen bileşen ve maddeleri de tutulmasını sağlar.



Şekil 2.3. Membran Şeması (Aslan, 2016)

Membrandan süzüntü tarafına doğru bir geçişin olması için bir sürücü kuvvetin uygulanması gerekmektedir. Sürücü güç seçimi membranların özelliğine ve tutulması istenen bileşenlere bağlı olarak belirlenir. Çoğunlukla uygulanan sürücü kuvvetler aşağıda verilmiştir.

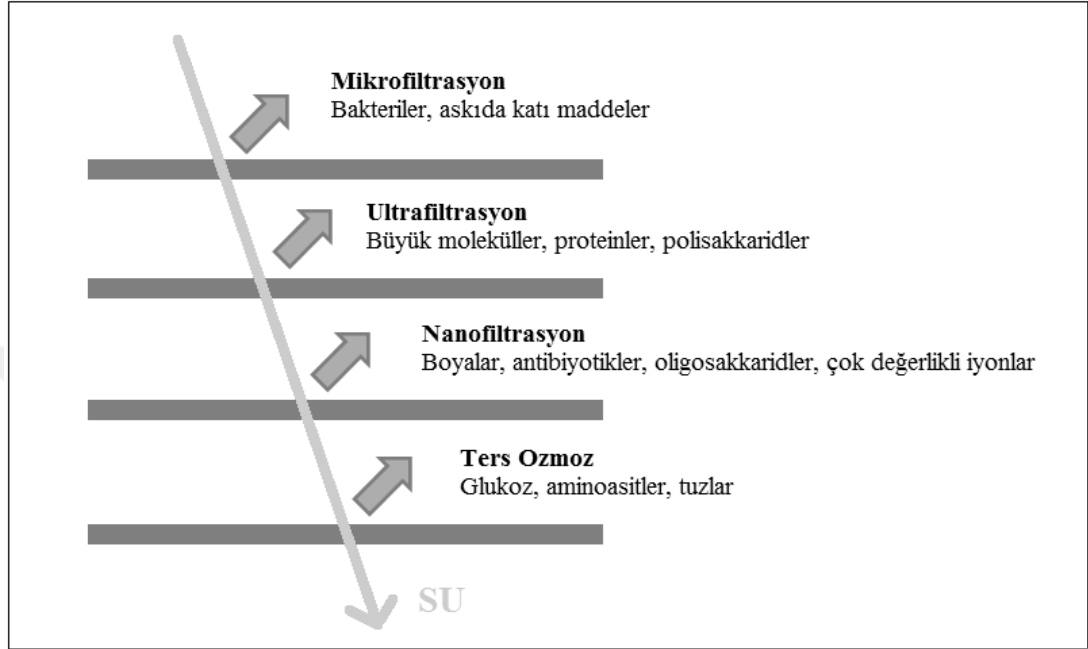
1. Basınç
2. Konsantrasyon
3. Elektriksel potansiyel
4. Sıcaklık farklılığı

olmak üzere dört ana grupta toplanır. Membran proseslerinde en yaygın sürücü kuvvet basınçtır. Genel olarak basınç sürücü kuvvet ile işletilen membran proseslerin özellikleri Çizelge 2.2'de verilmiştir (Aslan, 2016; Munir, 2006).

Çizelge 2.2. Tipik Membran Sistemlerinin Özellikleri (Aslan, 2016, Munir, 2006)

Parametreler	MF	UF	NF	RO
İşletme Basıncı (Bar)	1-4	2-7	10-40	15-100
Gözenek Boyutu (μm)	0,1-1,5	0,01-0,05	0,001-0,01	<0,0002
Moleküler ağırlık engelleme sınırı (MWCO) (Da)	>1000000	10000-100000	1000-100000	<1000
Boyut-Kesme Aralığı (μm)	0,1-20	0,005-0,1	0,001-0,01	0,001

Sürücü kuvveti basınç olan proseslerin, membran gözenek boyutuna ve giderdikleri bileşenlere bağlı olarak, yapılan bir sınıflandırması Şekil 2.4’de verilmiştir (Aslan, 2016).

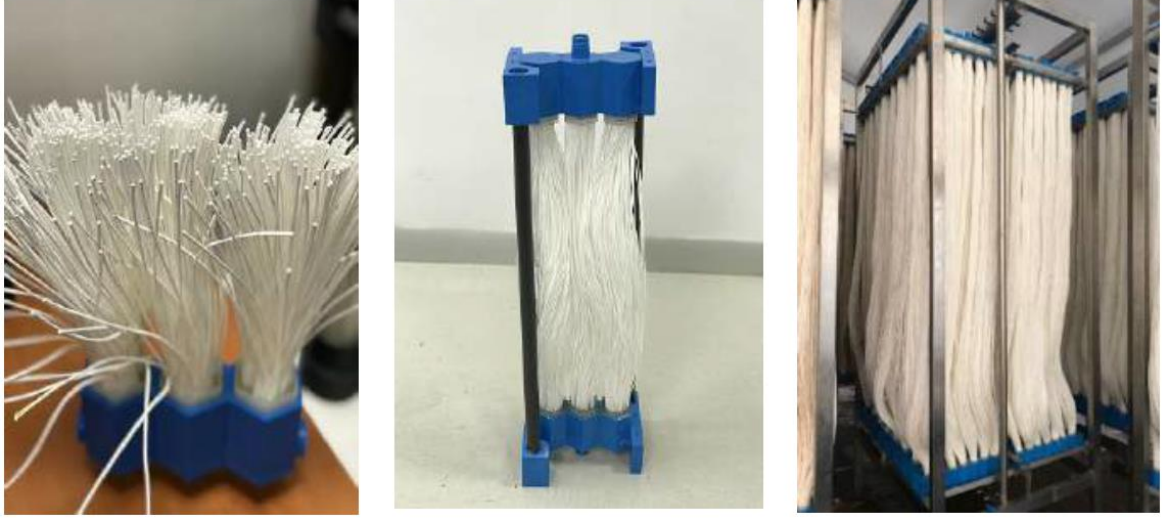


Şekil 2.4. Basınç sürücü kuvvetli membran prosesler ve gözenek boyutları (Aslan, 2016).

Membran modüllerinin üç tipi vardır; Tabaka, borusal ve hollow fiber (çukur, delikli) yapı. Tabaka benzeri membran modülleri arasında, düz çerçeve- levha membran modülleri ve spiral sargılı modüller en yaygın olanlarıdır.

Hollow fiber modüllerin en büyük avantajı, tek bir modül halinde çok büyük bir membran alanı oluşturma yeteneğidir. Örneğin, bir 20 cm çapında, 102 cm uzunluğunda spiral (spiral) sargılı modülü, yaklaşık 20-40 m² membran alana sahipken, eşdeğer hollow fiber modülü 100 mm çaplı fiberlerle doldurularak yaklaşık 600 m² membran alanı elde edilebilir (Aslan, 2016).

İçi boşluklu fiber modülleri, genellikle MF veya UF membranları olarak üretilmekte ve küçük partiküllerin giderimi için kullanılmaktadır. İçi boşluklu fiber membranların kullanıldığı bir modül tipi ise batık tip membran modülleridir. Batık tip membran modülleri genellikle atıksu arıtımında kullanılsa da içme suyu arıtımında da tercih edilebilmektedir. İçi boşluklu fiber membranlarından oluşan bir batık tip membran modülünün görünümü, Şekil 2.5’de verilmiştir.



Şekil 2.5. İçi boşluklu fiberlerden oluşturulmuş batık tip membran modülleri (Koyuncu, 2018)

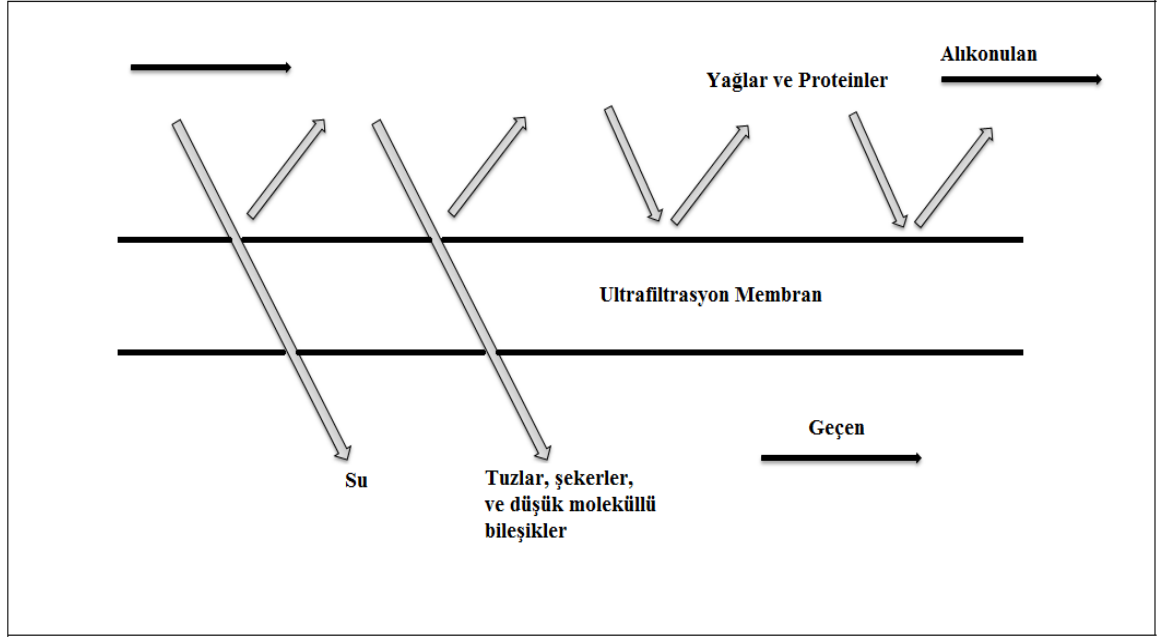
Membran prosesler giderilecek ve/veya ayrılacak bileşenlerin yapı ve durumuna bağlı olarak sınıflandırılabilir. Özellikle su arıtımı için önerilen membran prosesler; MF, UF, nanofiltrasyon, hiperfiltrasyon (TO), ED, mikrobiyal yakıt hücresi, membran distilasyonu olarak sınıflandırılır ve su arıtımında yaygın olarak kullanılırlar (Munir, 2006; Koyuncu, 2018).

2.3.1. Ultrafiltrasyon

UF, işletme açısından MF'a benzemektedir. UF membran delik çapı 0,05-1 mm arasında değişir. UF membranları üst tabaka kalınlığı, 50-250 mm arasında değişen ve yüksek geçirgenlik ve seçiciliği olan bir alt tabaka ile desteklenmiştir. Esas filtrasyon olayı üst tabakada meydana gelmektedir. Alt tabaka sadece üst tabakaya mesnet oluşturmaktadır.

UF membranları, akışkandan çözünmüş molekülleri ve küçük partikülleri ayırmak için kullanılırlar (Şekil 2.6). Ayırmada temel etken moleküler büyüklüğü olmakla beraber, molekül şekli ve yükü de rol oynamaktadır. UF membranlarında, maddelerin tutulma seviyeleri MWCO ile ifade edilmektedir. Her bir membran için bu değer üretici firmalarca verilmektedir. Belirli bir MWCO değerinin altındaki maddeler membranda tutulamazlar. UF membranları tarafından moleküler ağırlıkları,

1000-1000000 Da arasında değişen maddeler tutulurlar (Ng vd, 2018; Koyuncu, 2018).



şekil 2.6. Ultrafiltrasyon (Koyuncu, 2018)

UF membranları, membran tarafından tutulan maddelerin konsantre edilmesi veya membrandan geçen akışkanın saflaştırılması işlemlerinde kullanılmaktadır.

UF tesislerinin maliyeti tesis boyutuna, arıtılacak suyun tipine, dūřūnūlen ayırma iřlemine baęlı olarak deęiřir. Genelde UF tesisleri TO sistemlerinden çok daha kūūktūr. Bu deęerler ortalama TO sistemlerinin onda biri kadardır. Sistemin tasarımına baęlı olarak maliyetler deęiřmekle beraber, membran modūlūn deęiřtirilmesi maliyetin %30-50'sini ve pompa resirkūlasyon enerji ise maliyetlerinin %20-30'unu oluřurmaktadır (Baker, 2012; Koyuncu, 2018).

Atıksu arıtımında hem doğrudan kullanılabilirler hem de membran biyoreaktōr sistemleri içerisinde değerlendirilebilirler. UF membranlarının kullanıldığı çeşitli uygulamalara ۆrnekler izelge 2.3'de verilmiştir (Koyuncu, 2018).

Çizelge 2.3. UF membranlarının endüstriyel uygulamaları (Koyuncu, 2018)

Endüstri	Uygulamalar
Otomotiv ve ev aletleri	Elektroforetik boyaların durulama sularından ayrılması
Metal işleme	Metal işlemede kullanılan emülsiyonların geri kazanımı
Tekstil endüstrisi	Atıksu arıtımı
Gıda endüstrisi	Peyniraltı suyundan proteinlerin kazanımı Nişasta ve maya işleme artıklarından madde kazanımı Diyet süt üretimi, Yumurta beyazının konsantre edilmesi İçeceklerin sterilize edilmesi ve durulaştırılması
Kağıt endüstrisi	Atıksu arıtımı
İlaç endüstrisi	Çözeltilerin veya suların steril filtrasyonu Biyolojik olarak aktif maddelerin izolasyonu, safsızlaştırılması ve konsantre hale getirilmesi (enzimler, virüsler, nükleik asitler, spesifik proteinler) ve kanın fraksiyonlarına ayrılması
Su sektörü	NF veya TO öncesi ön arıtma, doğrudan su arıtımı için kullanım ve organik madde giderimi

2.3.2. Ağır Metallerin Membran Teknolojiler ile Arıtımı

Membran teknolojiler canlı yaşamı için oldukça zararlı etkileri olan ağır metallerin giderimi ve atıksu içerisinde bulunan bu metallerin geri kazanımı için de başarılı bir şekilde uygulanabilmektedir. Ağır metal gideriminde farklı tipteki membran proseslerin yüksek etkinlikleri, kolay işletimleri ve düşük alan gereksinimleri ile oldukça umut vadecici olduğu bilinmektedir. Ağır metallerin atıksudan arıtımı için NF, TO ve ED prosesleri kullanılmaktadır.

UF membranlarının gözenek boyutları, çözünmüş metal iyonlarından çok daha büyüktür. Bu nedenle UF membranları ile metal iyonlarını tutmak mümkün

değildir. Ağır metallerin UF ile giderimi için misel destekli ultrafiltrasyon (MDUF) ya da PDUF membranları kullanılmıştır. MDUF'ler ilk olarak 1980'lerde çözünmüş organik bileşikler ya da çok değerlikli metalleri su sistemlerinden ayırmak için kullanılmıştır. MDUF'un atıksu akımından metal iyonlarını başarılı bir şekilde ayırdığı kanıtlanmıştır. Bu ayırma tekniği yüzey aktif maddelerin atıksu içerisine eklenmesi ve kritik misel konsantrasyonuna (KMK) ulaşıldığında bu moleküllerin aglomere olarak metal iyonlarını bağlaması şeklinde gerçekleşmektedir. Böylelikle yüzey aktiflere bağlanan metal iyonları, gözenek çapı miselden daha küçük olan UF membranları tarafından tutulabilir hale gelmektedir. Fakat misel tarafından bağlanamayan türler hızlıca membrandan süzüntü tarafına geçmektedir. Yüksek tutunum elde edebilmek için kullanılacak yüzey aktif maddenin yükü tutulacak metal iyonunun yükünün zıttı olmalıdır. Genellikle bu işlem için anyonik bir yüzey aktif madde olan sodyum dodekil sülfat (SDS) kullanılmaktadır. Metal giderim etkinliği metal ve yüzey aktif madde konsantrasyonu, çözelti pH'sı, iyonik kuvvet ve membran işletim parametreleri ile ilgilidir. UF membranlarının yüzey aktifler ve polimerlerle birleştirilerek metallerin arıtıldığı ya da geri kazanıldığı sistemlere çokça rastlanmaktadır. UF prosesi ile ayrıca mineral, iyon seçici reçineler gibi adsorbanlarla oluşturulan sistemlerin kullanılmaya metal ayırımı gerçekleştirildiği bilinmektedir. UF membranları ile kompleksleşme temeline dayanan hibrit sistemler de metal ayırımı için kullanılmaktadır (Baker, 2012; Carolin vd, 2017; Koyuncu 2018).

2.4. Elektrokoagülasyon

Basit bir EK reaktörü, bir elektrolit içerisine daldırılmış bir anot ve bir katottan oluşmaktadır. Anot ve katot elektrotlar bir güç kaynağına bağlanır. Dışarıdan güç uygulandığı zaman katotta indirgenme olurken anotta yükseltgenme gerçekleşir. Elektrot hidroliz reaksiyonları sonucu oluşan metal hidroksit flokları sayesinde kısmi oksidasyon, koagülasyon, adsorpsiyon, çökelme ve flotasyon işlemleri eş zamanlı olarak gerçekleşerek renk, bulanıklık ve KOİ giderimi sağlanır. EK'da ağır metaller yüzey kompleksleşmesi ve elektrostatik çekim olarak genellikle iki mekanizma ile uzaklaştırılırlar. Adsorpsiyon ve doğrudan çökme gibi diğer mekanizmalarla da giderim mümkündür (Nayak, 2018; Segura vd, 2017).

EK proseslerinin birbirini takip eden üç asamadan oluştuğu kabul edilir (Un ve Aytac, 2013).

- Tüklenen elektrotların elektrolitik oksidasyonu ile koagülantların oluşumu,
- Kirleticilerin destabilizasyonu, partikül süspansiyonu ve emülsiyonların kırılması,
- Destabilize edilmiş fazlarda flokların toplanması.

Kirleticilerin destabilizasyon mekanizması, partikül süspansiyonu ve emülsiyonların kırılması aşağıdaki şekilde tanımlanabilir (Un ve Aytac, 2013);

- Tüklenen elektrotların çözünmesiyle meydana gelen iyonların etkileşimleri sonucunda çift tabakanın sıkıştırılması,
- Tüklenen elektrotların elektrokimyasal çözünmesiyle üretilen zıt iyonlar tarafından atıksu içinde var olan iyonik türlerin yük nötralizasyonu,
- Flok oluşumu

EK hücrelerinde fizyokimyasal reaksiyonlar da yer alabilir;

- Atıksu içindeki kirleticilerin katodik indirgenmesi,
- Kolloidal partiküllerin koagülasyonu,
- Çözelti içindeki iyonların elektroforetik parçalanması,
- Elektrotlarda üretilen O₂ ve H₂ kabarcıkları tarafından koagüle olmuş partiküllerin elektroflotasyonu,
- Katotta metal iyonların indirgenmesi,
- Diğer elektrokimyasal ve kimyasal prosesler.

EK işleminde elektrot ya da elektrot topluluğu genellikle doğru akım kaynağıyla etkileştirilir. Çözünmüş metal miktarı, çözelti içinden geçirilen elektriğin miktarına bağlıdır (Un ve Aytac, 2013). Akım yoğunluğu ve çözünmüş maddeler arasındaki ilişki Faraday kanunu ile açıklanabilir (eşitlik 2.1) (Mollah vd, 2004) :

$$m = \frac{I.t}{n.F} \quad (2.1)$$

Burada;

m:Çözünen elektrot materyalin miktarı (g)

I:Akım şiddeti (amper)

t:Zaman

F:Faraday sabiti (96,500 Coulomb/mol)

EK prosesinde metalleri “M” ile gösterecek olursak anot ve katottaki elektrokimyasal reaksiyonlar şu şekilde özetlenebilir:



Elektrotların prosesin işletme aşamasında suyla reaksiyona girmesiyle metal hidroksitler oluşacaktır. Sistemde arıtım bundan sonra başlar. Adsorbsiyon kapasitesi çok yüksek olan metal hidroksitlerin sudaki değişik kirletici parametreleri adsorbe ederek çökme yoluyla sudan uzaklaştırma prensibine dayanan bu arıtım işlemi sırasında elektrotlarda oluşan elektrokimyasal işlemler sonucu sudan çok küçük gaz kabarcıkları çıkmaya başlar. Bu gaz kabarcıklarının da elektroflotasyonun temelini oluşturduğunu düşünürsek, bazı kirleticiler EK sırasında elektroflotasyon yöntemiyle sudan uzaklaştırılır. Başka bir deyişle ortak olarak oluşan bu reaksiyon topluluğu neticesinde suyunda kirletici konsantrasyonu ve kirletici parametrelerine bağlı olarak yüksek bir giderim verimi elde edilebilmektedir (Nayak, 2018; Mollah vd, 2004).

2.4.1. Elektrokoagülasyonda çelik elektrotlar

Bir elektrokimyasal proseste en önemli parametrelerden biri elektrotun türüdür. EK’da yaygın olarak alüminyum ve demir elektrotlar kullanılmaktadır. Ancak son yıllarda alüminyum ve demir dışında çelik, grafit ve titanyum gibi maddeler elektrot olarak kullanılmaktadır.

Paslanmaz çeliklerde kimyasal bileşim değiştirilerek farklı özelliklerde alaşımlar elde edilir. Krom miktarı yükseltilerek veya nikel ve molibden gibi alaşım

elementleri katılarak korozyon dayanımı artırılabilir. Bunun dışında bakır, titanyum, alüminyum, silisyum, niyobyum, azot, kükürt ve selenyum gibi bazı elementlerle alaşımlama ile ilave olumlu etkiler sağlanabilir. Bu şekilde makine tasarımcıları ve imalatçıları değişik kullanımlar için en uygun paslanmaz çeliği seçme şansına sahip olurlar. Paslanmaz çeliklerde iç yapıyı belirleyen en önemli alaşım elementleri, önem sırasına göre krom, nikel, molibden ve mangandır. Bunlardan öncelikle krom ve nikel iç yapının ferritik veya ostenitik olmasını belirler.

Paslanmaz çelikler 5 ana grupta toplanırlar. Bu gruplandırma malzemelerin iç yapısına göre yapılmıştır. Bu gruplar içinde en yaygın olarak kullanılanlar ostenitik ve ferritik çelikler olup, bunların kullanımları tüm paslanmaz çelikler içinde %95'e ulaşır (Aran ve Temel, 2004a; Aran ve Temel, 2004b; Odabaş, 2007).

2.4.2. Elektrokoagülasyonu Etkileyen Faktörler

Akım Yoğunluğu; bir akümülatör veya diğer bir enerji kaynağından sağlanan elektriksel kuvvetin uygulanması sonucu akım oluşur. Akım kaynağı elektronları devrenin bir ucundan itip diğer ucundan çektiğinden bir elektron pompası görevi yapar (Can, 2002). EK sistemlerinde yüksek akım kullanıldığında elektriksel enerji boşa harcanmış olur. Daha da önemlisi aşırı akım yoğunluğu akım etkisinde önemli derecede azalmaya sebep olur. Akım yoğunluğu seçimi; pH ve sıcaklık gibi diğer parametreler de bağlıdır. Akım verimi akım yoğunluğuna olduğu kadar anyonların tipine de bağlıdır (Chen, 2004). Arıtılmış suyun kalitesi, üretilen iyonların miktarına (mg), akım üretimine ve zamana bağlıdır.

İletkenlik: su ve atıksu arıtımında iletkenliği artırmak için genellikle sofra tuzu kullanılır. Sofra tuzu elektrik yüküne katkı sağlar ve diğer anyonik türlerin (HCO_3^- , SO_4^{2-}) olumsuz etkilerini önemli derecede azaltır. Karbonat ve sülfat iyonlarının varlığı Ca^{2+} ve Mg^{2+} iyonlarının çökmesine yol açar ve akım veriminde azalma olur. Bu nedenle EK hücrelerinde % 20 Cl^- iyonlarının bulunması tavsiye edilir. NaCl ilavesi güç tüketiminin azalmasını da sağlar.

pH: su veya atıksuyun pH'sının etkisi metalhidroksitlerin çözünürlüğünde olduğu kadar akım veriminde de önemlidir. Arıtım performansı kirleticilerin yapısına bağlıdır. En iyi giderim verimi pH 7 civarında sağlanır fakat nötral pH'da güç

tüketimi iletkenlik değişimine bağlı olarak yüksektir. EK işleminden sonra asidik atık sularda suyun pH'sı artar (Wong vd, 2002).



pH'nın azalmasıyla birlikte anotta metal hidroksit oluşumunun yanında H⁺ salıverilir.

Bu reaksiyonlarda klor iyonları yer alır.



Yukarıdaki H⁺ oluşumu reaksiyonları ile pH'nın artması dengelenir. Alkali şartlarda pH'nın azalması ise diğer katyonlarla birlikte hidroksitin çökmesinden kaynaklanabilir (Chen, 2000).

Sıcaklık: EK çalışmalarında sıcaklığın etkisi üzerinde yapılmış araştırmalar sınırlıdır. Yapılan araştırmalarda 60°C'ye kadar maksimum akım verimi olduğu ve daha yüksek sıcaklıklarda akım veriminin azaldığı belirlenmiştir. Sıcaklığın artmasıyla akım veriminin artması, elektrot yüzeyindeki alüminyum oksit filminin ayrılma aktivitesinin artmasından kaynaklanır. Ayrıca sıcaklığın artması ile iletkenlik azalacağından enerji tüketimi azalacaktır (Chen, 2004; Nayak, 2018).

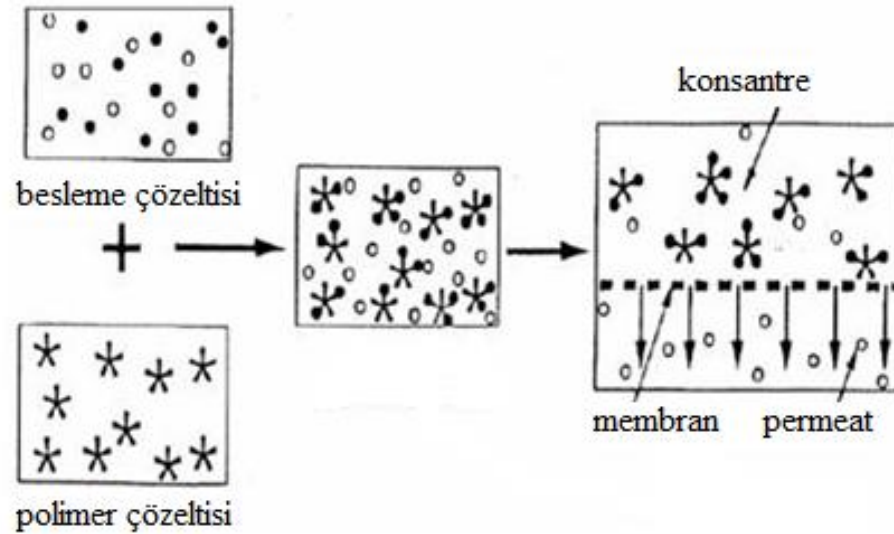
2.5. Hibrit Sistemler

Hibrit membran prosesleri MF ve UF membranlar kullanılarak su arıtımında yüksek seviyelerde katı-sıvı ayırma verimi elde edilmesine karşılık, bu tip membranlarla çözülmüş organik ve anorganik safsızlıklar etkin bir şekilde giderilememektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, etkili ve çok düşük basınç seviyelerinde işletilebilmeleri sebebiyle kolaylık ve ekonomiklik sağlayan MF, UF proseslerinin, alışla gelmiş arıtma prosesleri ile birleştirilerek hibrit uygulamalarla atık sulardan çözülmüş maddelerin ve safsızlıkların gideriminde kullanılabilecekleri görülmüştür. Bunlar arasından özellikle koagülasyon-MF, membran biyoreaktörler, vakum yürütücülü membran flotasyon, membran-ozonlama ve membran-EK sistemlerinin, su ve atıksu arıtımında önemli derecede dikkat çeken yenilikçi hibrit prosesler

olduğu görülmektedir (Suk and Matsuura, 2007). Changmai vd, 2019 sondaj sahasındaki yağlı atıksuların arıtımı için EK sonrasında MF prosesini uygulamışlardır. Yağ ve gres konsantrasyonunu sadece 20 dakika içinde 35 mg/L'den 10,2 mg/L'ye düşürmüşlerdir (Changmai vd, 2019). Sardari ve arkadaşları kanatlı işleme tesisi atıksularının arıtımında EK sonrasında UF prosesini kullanmışlardır. Artan ve yüksek akı değerlerine ulaşmışlardır (Sardari vd, 2018). Geleneksel membran arıtma sistemlerine kıyasla hibrit membran prosesleri, membran kirlenme problemlerinin giderilmesi, daha iyi akı ve daha yüksek giderme verimi elde edilmesinden dolayı tercih edilmektedir. Ayrıca hibrit membran prosesleri ile filtrasyon performansı iyileştirilmekte, enerji tüketimi ve geri yıkama süresi azaltılmaktadır. MF düşük basınçlı bir membran proses olup, kullanılan membranların gözenek boyutları metal iyonlarını tutabilecek boyutta değildir. Yenilikçi teknolojik yaklaşımlar ile atık sulardan ve içme sularından ağır metallerin gideriminde membran teknolojilerinin kullanımı giderek artmaktadır. Bu çalışmaların başında, seçici metal bağlayıcı malzemeler (polimer, suda çözünen oligomer, toz adsorban ve iyon değiştirici, demir hidroksit) kullanılarak düşük ya da yüksek metal içeren atık suların çapraz akış MF ve/veya UF uygulaması ile sulardan metallerin giderimi yer almaktadır. Bir diğer uygulama da EK ve membran prosesinin birarada EK/çapraz akış mikrofiltrasyon hibrit uygulaması ile yapılarak ağır metal giderimi şeklindedir. Bu proseste seçici metal bağlayıcı malzeme EK ünitesinde üretilmekte ve metal bağlı malzeme giderimi çapraz akış mikrofiltrasyon ünitesinde gerçekleştirilmektedir. Sorbent-membran hibrit sistemi, su arıtımında esas olarak, mikrobiyal kirleticilerin, bulanıklığın ve çözünmüş organik maddelerin gideriminde kullanılmaktadır. Özellikle sorbent-MF prosesinin sulardan ağır metal gideriminde yenilikçi teknolojilerden biri olarak kullanılabileceği ifade edilmiştir. Sorbent-MF sistemi, sinerjik bir çalışma ile iki etkin su arıtma prosesinin yararlı yönlerini birleştiren bir sistemdir. Bu sistemde yeterli temas süreleri sağlanmakta ve adsorpsiyonla giderime ilave olarak MF prosesi kullanılarak ilave giderim verimi elde edilmektedir. Sorbent-MF sistemi gelecek vaat eden bir hibrit membran uygulaması olup, bu prosesin su ve atıksuların ileri arıtımı ve geri kazanımı konusunda gelecekte yaygın olarak kullanılabileceği öngörülmektedir. Bu sistemle su ortamındaki metal iyonlarının, düşük işletme maliyetleri içeren MF hibrit prosesi ile

arıtımı sağlanabilmektedir. UF ve MF membranları, membran prosesleri ile ağır metal giderimde ön arıtma basamağı olarak kullanılarak NF ve TO mebranlarındaki kirlenmelerin ve yüzeydeki tıkanmaların önüne geçilerek proses verimi artırılabilineceği düşünülmüştür (Suk and Matsuura, 2007; Koyuncu, 2010).

PDUF yöntemi de metal iyonlarının uzaklaştırılması amacı ile kullanılmakta ve birer kolloid olan polimer moleküllerinin bu iyonlarla kompleksleşmesi sağlanmaktadır. Polimer moleküllerinin metal iyonu bağlama kapasiteleri çeşitli ligandlarla kopolimerleri (polikelatojenler) oluşturularak arttırılmaya çalışılmaktadır. Polimer destekli membran sisteminin şematik görünümü Şekil 2.7’de verilmektedir.



Şekil 2.7. Polimer destekli membran için şematik görünüm (Ay, 2007)

Polimerler; hafif, ucuz, mekanik özellikleri çoğu kez yeterli, kolay şekillendirilebilen, değişik amaçlarda kullanıma uygun, dekoratif, kimyasal açıdan inert ve korozyona uğramayan maddelerdir (Ay, 2007).

Genel olarak polimerlerin esasları karbon ve hidrojen atomlarıdır ancak çoğu zaman yapılarına O, Si, N, F, Cl, S, Na, K gibi atomlar da katılırlar. Polimerlerin yapısında bulunan ve sentetik polimerlerin üretiminde kullanılan ana kimyasallar (fonksiyonel gruplar ve monomerler) genellikle petrol, doğal gaz, kömür gibi fosil yakıtlardan sağlanır.

Polimerler, literatürde yapı ve özellik farklılıklarına göre çeşitli şekillerde sınıflandırılırlar;

- Ana zinciri oluşturan atomların türüne göre organik veya inorganik, kaynaklarına göre ise doğal veya sentetik polimerler,
- Meydana geldikleri ünite sayısına göre homopolimerler veya kopolimerler,
- İletkenlik özelliklerine göre polielektrolitler ve iyonomerler,
- Sentez tepkimelerinin mekanizmasına göre zincir büyümesi veya basamaklı polimerler
- Mol ağırlıklarının büyüklükleri açısından yüksek, orta ve düşük molekül ağırlıklı polimerler,
- Zincirlerinin fiziksel biçimlerine göre doğrusal, dallanmış ve çapraz bağlı polimerler (elastomerler ve termoplastik elastomerler veya plastomerler)
- Isı karşısındaki davranışlarına göre termoplastikler veya termosettingler (Charles and Carraher, 2003; Ateşok vd, 2008) .

PDUF yöntemi yardımıyla çeşitli metal iyonları %90-100 oranında ortamdan uzaklaştırılabilmektedirler. İşlem sonrasında atık sudaki kirlilikler başlangıçtakine nazaran çok daha küçük bir hacimde toplanacaklarından giderilmeleri ve/veya geri kazanımları çok daha kolay ve ekonomik olmaktadır (Taş, 2006). Çizelge 2.4’de ağır metal gideriminde kullanılan PDUF sistemi ile ilgili elde edilen veriler sunulmaktadır (Fu ve Wang, 2011). Polimer ve polielektrolit destekli UF prosesleri metal içerikli atıksu arıtımında kullanılmalarına rağmen bu konuda mevcut araştırmalar henüz yeni olup, çalışmalar devam etmektedir (Magenet vd, 2013; Ennigrou vd, 2014; Ennigrou vd, 2009; Kalaiselvi vd, 2013; Korus ve Loska, 2009). PDUF prosesleri ile ağır metal gideriminde kullanılabilecek polimer/polielektrolitler;

- Birinci grup; aljinat ve kitosan (Verbych vd, 2005; Osifo vd, 2017; Crini, vd, 2017) gibi doğal kökenli polimerler,
- İkinci grup; polietilenimin, sulfolanmış poli(vinil alkol) gibi sentezlenerek elde edilen polimerler,

- Üçüncü grup; polietilenimin ve poliakrilik asit gibi ticari polimerlerdir (Qui, ve Mao, 2013; Jiao vd, 2013).

Çizelge 2.4. PDUF ile ağır metal giderimi.

Membran	Surfaktan/Kompleks ajan	Ağır metal	Başlangıç Konsantrasyonu mg L ⁻¹	Giderim verimi
Polyethersulfone	PEI	Cu ²⁺ , Ni ²⁺	50	94, 100
Polyethersulfone	Carboxy methyl cellulose	Cu ²⁺ , Cr ²⁺ , Ni ²⁺	10	97,6, 99,5, 99,1
Amicon 8400	Sodium polyacrylate, PEI	Cr(III), Cr(VI)	5,5	82-100
Ceramic	Poly acrylic acid sodium	Cu ²⁺	160	99,5
Polysulfone	Poly ammonium acrylate	Cd(II)	1124	99

2.6. Atıksu Mevzuatı

2872 sayılı Çevre Kanunu 11. maddesinde; “üretim, tüketim ve hizmet faaliyetleri sonucunda oluşan atıkların alıcı ortamlara doğrudan veya dolaylı vermeleri uygun görülmeyen tesis ve işletmeler ile yerleşim birimleri atıklarını yönetmeliklerde belirlenen standart ve yöntemlere uygun olarak arıtmak ve bertaraf etmekle veya ettirmekle ve öngörülen izinleri almakla yükümlüdürler” denmektedir.

Çevre kanunu kapsamında aşağıda sunulan yönetmelikler, tebliğler ve genelgeler çıkarılarak uygulanmaktadır;

- 31.12.2004 tarih ve 25687 sayılı Resmi Gazate’de yayımlanarak yürürlüğe giren Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği

-10.10.2009 tarih ve 27372 sayılı Resmi Gazate’de yayımlanarak yürürlüğe giren Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Numune Alma ve Analiz Metodları Tebliği

-20.03.2010 tarih ve 27527 sayılı Resmi Gazate’de yayımlanarak yürürlüğe giren Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği

-10.10.2009 tarih ve 27372 sayılı Resmi Gazate’de yayımlanarak yürürlüğe giren Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği İdari Usuller Tebliği

-2006/15 Atıksu Arıtma Tesisleri İş Termin Planı Genelgesi

-2018/14 Atıksu Arıtma/Derin Deniz Deşarjı Tesisleri Proje Onayı Genelgesi

-14.12.2011 tarih ve 28142 sayılı Resmi Gazate’de yayımlanarak yürürlüğe giren Tekstil Sektöründe Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrol Tebliği

- 08.01.2006 tarih ve 26047 sayılı Resmi Gazate’de yayımlanarak yürürlüğe giren Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği

-27.06.2009 tarih ve 27271 sayılı Resmi Gazate’de yayımlanarak yürürlüğe giren Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği Hassas ve Az Hassas Su Alanları Tebliği

- 26.11.2005 tarih ve 26005 sayılı Resmi Gazate’de yayımlanarak yürürlüğe giren Tehlikeli Maddelerin Su ve Çevresinde Neden Olduğu Kirliliğin Kontrolü Yönetmeliği

- 06.01.2017 tarih ve 29940 sayılı Resmi Gazate’de yayımlanarak yürürlüğe giren Atıksu Toplama ve Uzaklaştırma Sistemleri Hakkında Yönetmelik

- 01.10.2010 tarih ve 27716 sayılı Resmi Gazate’de yayımlanarak yürürlüğe giren Çevre Kanununun 29. Maddesi Uyarınca Atıksu Arıtma Tesislerinin Teşvik Tedbirlerinden Faydalanmasında Uyulacak Usul ve Esaslara Dair Yönetmelik

31.12.2004 tarih ve 25687 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe giren Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği ilk olarak 1988 yılında çıkmıştır. Söz konusu yönetmelikte endüstriler üretim tiplerine göre gruplandırılmış ve on altı tane sektör oluşturulmuştur. Bunlar;

-Gıda sanayi

-İçki sanayi

-Maden sanayi

-Cam sanayi

-Kömür hazırlama işleme ve enerji üretimi

-Tekstil sanayi

-Petrol sanayi

-Deri, Deri Mamulleri

- Selüloz, kağıt, karton

-Kimya sanayi

-Metal sanayi

Endüstriyel atıksu kaynakları için belirlenen atıksu deşarj standartları Tablo 5'den Tablo 20'ye kadar verilmiştir. Tablosu bulunmayan sektörlerde işletmenin proses türü, kullanılan hammaddeler, kimyasallar ve benzeri hususlar, benzer sektörler ve Tablo 19 esas alınarak deşarj standartları ilgili idarece belirlendikten sonra Çevre ve Şehircilik Bakanlığının uygun görüşü alınarak uygulanır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

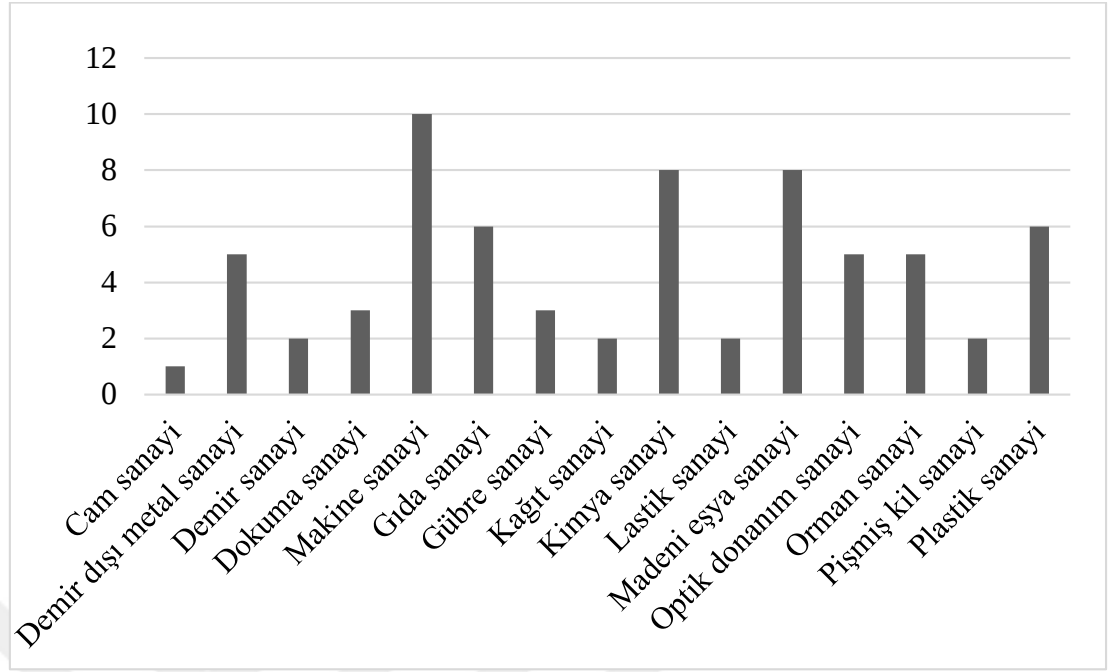
Tez çalışması kapsamında, aşağıda verilen iş ve işlemler sırasıyla uygulanmıştır;

1. Çinko kaplama işlemi yapan metal sanayii sektöründen numune alınması,
3. Alınan numunelerde atıksu karakterizasyonu çalışmalarının yapılması,
4. Hibrit sistemlerin kurulması,
5. Deneysel çalışmalar.

3.1. Metal endüstrisi sanayi sektörünün belirlenmesi ve numune alınması

Samsun Organize Sanayi Bölgesi'nde cam sanayi, demir dışı metal sanayi, kimya sanayi, plastik sanayi gibi farklı sektörler faaliyet göstermektedir. Metal sanayi, makine sanayi, optik donanım sanayi (tıbbi malzeme üretimi), kimya sanayi gibi sektörlerde metal kaplama işlemleri yapılmaktadır. Şekil 3.1'den de görüldüğü üzere metal kaplama yapan işletmelerin toplam sektörler içerisinde payı % 44'tür. Metal kaplama sektörlerinde, üretilen ürün türü ve özelliklerine bağlı olarak nikel, krom ve çinko kaplama işlemleri yaygın olarak yapılmaktadır. Madeni eşya sanayi, optik donanım sanayi ve demir dışı metal sanayi sektörlerinde ağırlıklı olarak çinko kaplama işlemi yapılmaktadır. Bu kapsamda çalışmada kullanılan atıksu Samsun ili Organize Sanayi bölgesinde faaliyet gösteren çinko kaplama işlemi yapan bir işletmeden temin edilmiştir (Samsun Organize Sanayi Bölge Müdürlüğü). Ayrıca çizelge 3.1'de sunulan atıksu karakterizasyonu analizlerle belirlenmiş olup elde edilen sonuçlar doğrultusunda çinko konsantrasyonunun atıksu karakterizasyonunda bulunan diğer metal iyonu konsantrasyonlarıyla karşılaştırdığımızda çok yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu yüzden deneysel çalışmalarda çinko metali analiz edilmiştir.

Çalışma kapsamında yapılması planlanan deneysel çalışmalara ilişkin ön fizibiliteden sonra gerekli olan atıksu miktarı tespit edilerek işletmeden işlem görmemiş atıksu numuneleri alınmıştır.



Şekil 3.1. Samsun Organize Sanayi Bölgesinde faaliyet gösteren sektörler

3.2. Atıksu Karakterizasyonu

Çinko kaplama yapan metal sanayii sektöründen alınan numunelerde Çizelge 3.1.’de verilen parametreler analiz edilmiş olup elde edilen sonuçlar yine aynı çizelgede verilmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde çoğu parametre için değerlerin, 31.12.2004 tarih ve 25687 sayılı Resmi Gazetede yayımlanarak yürürlüğe giren Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliğinde “Metal Sanayi Atıksuları” için verilen alıcı ortam deşarj standartlarından yüksek olduğu görülmektedir. Çalışmalara başlamadan önce numune alma işleminden sonra ham atıksu kum filtrasyonundan geçirilmiştir. Filtrasyon işleminde 2 cm çapında cam kolon kullanılmıştır. Filtre malzemesi olarak kuartz kumu kullanılmıştır. Filtre malzemesi, malzeme kaybını önlemek amacıyla cam yünü ile alttan ve üstten desteklenmiştir. Atıksu girişi kolonun alt bölümünden ve filtrat çıkışı kolonun üst bölümünden olacak şekilde ayarlanmıştır. Burada amaç atıksuyu içerisinde yer alan iri madde ve yüzücü iri maddelerden arındıracak bir ön işlemden geçirmektir. Deneyde kullanılan düzenek Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Ön işlemden geçirilmiş atıksuda ölçülen değerler atıksu başlangıç konsantrasyonu olarak alınmıştır. Hesaplamalar bu değerler üzerinden yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 3.1’de sunulmuştur.

Çizelge 3.1. Atıksu karakterizasyonu

Parametre	Birim	Atıksu konsantrasyonu	Mevzuat konsantrasyon değeri (SKKY Tablo 15.7)
KOİ	mg/L	212±9	200
AKM	mg/L	44±2	125
Yağ ve gres	mg/L	14±1	20
Çinko	mg/L	494±2	5
Alüminyum	mg/L	45,34±16,4	-
Molibden	mg/L	40,56±0,5	-
pH	-	2,6±0,7	6-9
Sıcaklık	°C	24±2,7	25
İletkenlik	µS/cm	1600±135	-



Şekil 3.2. Filtrasyon Deney Düzeneği

3.2.1. Çinko analizi

Çinko metali analizi atomik absorpsiyon spektrofotometresinde yapılmıştır (Alevli AAS UNICAM 929AA Spectrometer). Atomik absorpsiyon spektroskopisi (AAS), ışın kaynağından çıkan elektromanyetik dalganın gaz hâlindeki atomlar tarafından absorpsiyonu sonucu ışığın şiddetindeki azalmanın ölçülmesi ilkesine dayanarak çalışmaktadır. Atomik absorpsiyon cihazıyla litrede onda bir miligram dolaylarında konsantrasyonlar binde birkaç hata ile tayin edilirler (Standart methods, 2017, 3111B).

3.2.2. Kimyasal oksijen ihtiyacı analizi

KOİ deneyleri Standard Methods, 2017, 5220 D. metoduna göre yapılmıştır. İlk olarak standart metoda uygun olarak aşağıda belirtilen çözeltiler hazırlanmıştır;

-Parçalama çözeltisi (Potasyum dikromat - Civa sülfat çözeltisi)

-Sülfirik asit - Gümüş sülfat karışım çözeltisi

-Potasyum hidrojen fitalat (KHP)

Daha sonra KOİ standartlarının hazırlanmıştır. 2 mg/L - 80 mg/L konsantrasyon aralığında standartlar hazırlanmıştır. Konsantrasyona karşı spektrofotometrede okunan absorpsiyon değerlerinden oluşturulan kalibrasyon eğrisi denklemi $y=0,0022x+0,0272$ $r^2=0,9963$ olarak bulunmuştur. Hazırlanan standart çözeltiler reaktiflerle karıştırılıp 148 °C'de 2 saat ısınmaya bırakılarak 2 saat sonunda hazır olan standartların 600 nm dalga boyunda spektrofotometrede absorpsiyonları okunmuştur. Derişime karşılık absorpsiyon değerlerinden yararlanılarak kalibrasyon eğrisi elde edilmiş olup elde edilen eğri yardımıyla KOİ konsantrasyonu bilinmeyen numundeki KOİ konsantrasyonları hesaplanmıştır.

3.2.3. Yağ ve gres analizi

Yağ ve gres tayini benzer fiziksel karakteristikleri olan madde grupları solvent içerisinde ortak çözünürlükleri esasına göre toplu biçimde kantitatif olarak

belirlenmesi esasına göre yapılmıştır. Bu nedenle, yağ ve gres terimi, hidrokarbonları, yağ asitlerini, sabunları, hayvansal yağları, bitkisel yağları ve asitli bir numuneden çözücü vasıtasıyla çıkarılan ve test sırasında uçmayan diğer maddeleri kapsamaktadır.

Yağ ve gres tayininde gravimetrik yöntem kullanılmıştır. Gravimetrik yöntemde izlenen yol; ayırma hunisine 50 mL analizlenecek örnek alınarak üzerine yaklaşık 20 mL kadar hekzan ilave edilir. Çalkalanarak yağın hekzan fazına geçmesi sağlanır. Bir müddet dinlendikten sonra örnek kısmı atılarak hekzan fazı tartılan beher içine alınır. Çeker ocakta hekzan tamamen uçana kadar ısıtıldı. Beher başlangıçta ve sonunda tartılarak iki tartım arası fark alınıp hesaplama yapılmıştır (Standart methods, 2017, 5520).

3.2.4. Askıda katı madde analizi

AKM tayini Standard Methods, 2017, 2540 metoduna göre yapılmıştır. Filtre süzme setine yerleştirilerek bir yandan vakum uygulanarak filtre 3 kez 20 şer mL distile suyla yıkandı. Filtrede hiç su kalmayınca kadar vakum uygulaması sürdürüldü ve yıkama suları döküldü. Bu filtre etüvde 103-105°C’de bir saat kurutuldu ve havadaki nemden etkilenmemesi ve tam kuruması için desikatörde tutuldu. Sabit tartıma gelmiş olan filtre dikkatli bir şekilde desikatörden alınarak tartıldı, 100 mL numune alınarak filtreden süzüldü. Süzüntü kalıntısının ağırlığından AKM bulundu. Tartım işlemlerinde Precisa LS220A hassas terazi kullanılmıştır.

3.3. Elektrokoagülasyon Deney Düzenegi

EK deneyleri Şekil 3.3.’de gösterilen deney düzeneginin ilk bölümünde gerçekleştirilmiştir. Akım ve voltaj kontrolü CW INSTEK marka güç kaynağı ile sağlanmıştır. Reaktördeki karıştırma işlemi PHONENIX marka magnetik karıştırıcı ile gerçekleştirilmiştir. Elektrolitik reaktör 15 cm x 15 cm x 10 cm boyutlarında ve 2000 mL (1000 mL + 1000 mL) elektrolit almaktadır. Elektrolitik reaktörde 1 anot 1 katot olmak üzere toplam 2 adet monopolar paralel bağlı elektrot kullanılmıştır. Elektrotlar 2 cm aralıklarla yerleştirilmiş ve tamamen elektrolite batmış durumdadır.

Elektrot materyali olarak toplam 209 cm² aktif yüzey alanına sahip çelik plakalar kullanılmıştır.

EK işleminde elektrotlar elektrokoagülatöre yerleştirildikten sonra sistem çalıştırılmıştır. Güç kaynağı üzerinde istenen akım ayarlaması yapıldıktan sonra deney başlatılmıştır.

Deneylerde kullanılan elektrot plakalar deneylerden hemen önce saf sudan geçirilip kurutulmuştur. Yalnız EK çalışmalarında deney bitiminden hemen sonra numuneler alınarak filtre kağıdından süzölmüştür. pH ayarlaması için H₂SO₄ ve NaOH çözeltileri kullanılmıştır. pH ve İletkenlik ölçümlerinde Thermo Scientific Orion Star A215 cihaz kullanılmıştır.



Şekil 3.3. Elektrokoagülasyon Deney Düzenegi

3.4. Ultrafiltrasyon Deney Düzenegi

Çalışmada hallow fiber UF membranı kullanılmıştır (Şekil 3.4). Sistemde atıksu 10 KDa molekül boyutlarında UF membran kullanılmıştır. UF membranında membranın molekül ağırlığı ayırma sınırı literatürden elde edilen bilgiler doğrultusunda 10 KDa olarak belirlenmiştir (Magenet vd, 2013; Ennigrou vd, 2009; Ennigrou vd, 2014).

Deneyler, süzüntü ayrı bir kapta toplanırken konsantrenin besleme tankına geri devir ettirilerek beslemenin zamanla konsantre edildiği konsantrasyon modunda yürütülmüştür. Deneyler esnasında atmosfer basıncı üzerine çıkılmamış olup filtrasyon döngüsü 60 dk olarak alınmıştır. Elde edilen süzüntülerin analitik ölçümleri yapılmıştır.



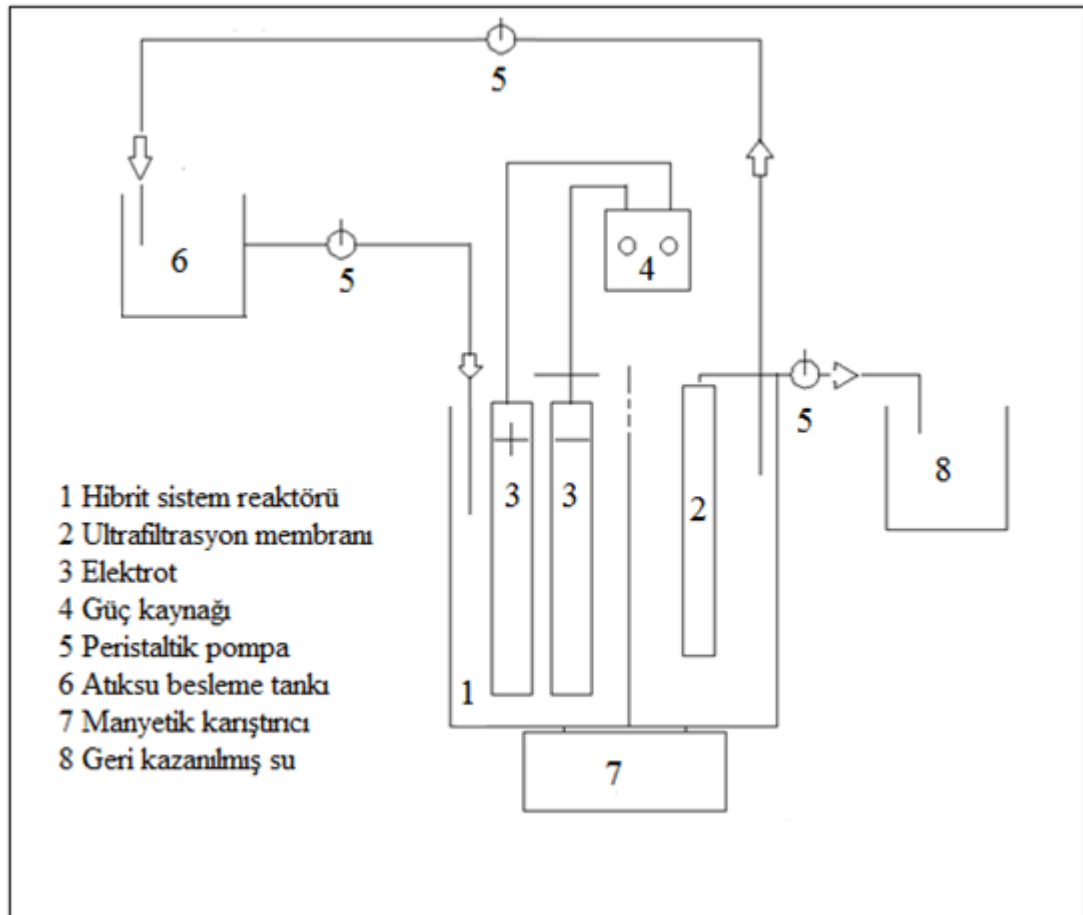
Şekil 3.4. Çalışmada kullanılan hallow fiber UF membranı

3.5. Hibrit Sistem Deney Düzenegi

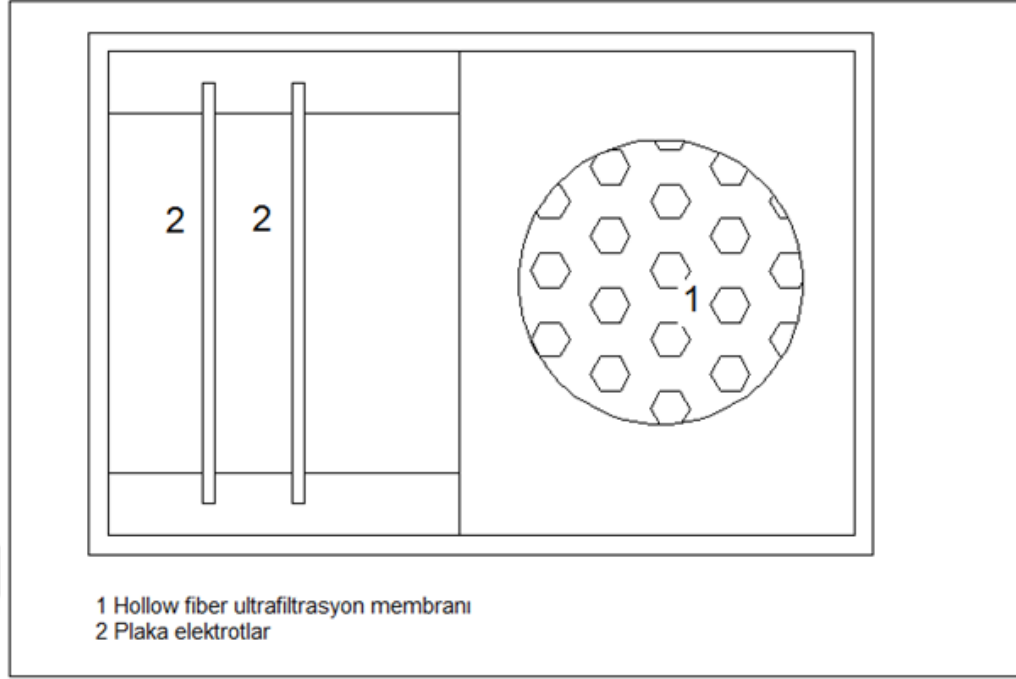
Sistem Şekil 3.5, 3.6, 3.7 ve 3.8’de gösterildiği üzere dizayn edilmiştir. Hollow fiber UF membranı borsal olarak reaktörün sağ bölümüne, anot ve katot plakalar ise sol bölümüne yerleştirilmiştir. Atıksu membrana yan duvarlardan giriş yapmakta olup membran orta bölümünden arıtılmış su çıkışı sağlanmaktadır. Retentat ise membranın olduğu ikinci bölümde kalarak atıksu besleme tankına geri devrettirilmektedir. Atıksu besleme tankından peristaltik pompa aracılığı ile atıksu reaktöre beslenmektedir. Reaktörün birinci bölümü manyetik karıştırıcı ile karıştırılmaktadır.

EK-UF, Polimer destekli EK-UF proseslerinde iş akım şeması Şekil 3.5’de gösterildiği şekildedir. Yalnız PDUF hibrit sistemde ise Şekil 3.9’da gösterilen iş akım şemasına uygun olarak deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Şekil 3.10 ve 3.11’de atıksu (proses suyu), hibriti sistem deneylerinde işlemleri görmüş elektrokoagülasyon ve

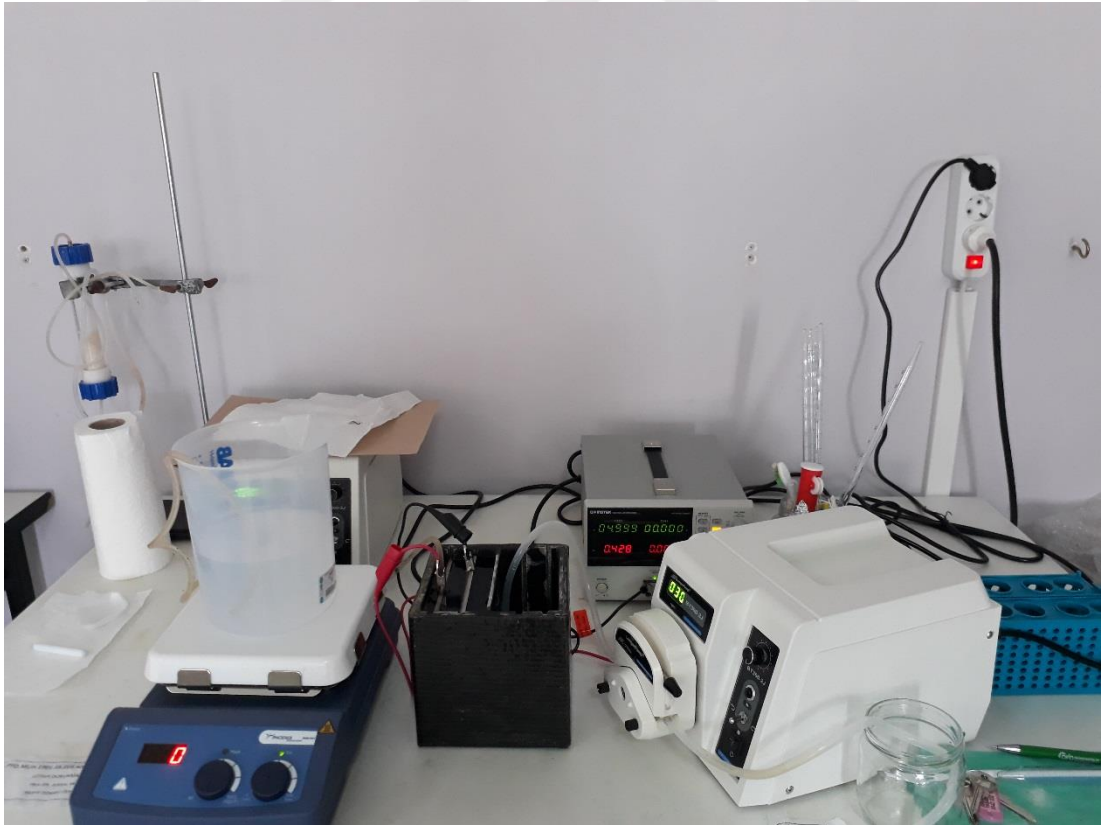
ultrafiltrasyon prosesleri çıkış suları sunulmuştur. Çelik elektrotlar kullanılarak gerçekleştirilen elektrokoagülasyon prosesi mekanizmasını anlayabilmek için sistemde elektrolit çözeltisi olarak saf su kullanılarak 3 A akım değerinde 60 dakika elektroliz süresinde proses çalıştırılmıştır. Deney sonucunda işlem görmüş suda ağır metal analizi yapılmıştır. İşlem görmüş suda 3 mg/L demir, 1,8 mg/L alüminyum ve 1,9 mg/L molibden metali tespit edilmiştir. Deneylerde metal konsantrasyonunu tayin etmek için Perkinelmer Optima 2100 DV ICP-OES- USA (Eşzamanlı İndüktif Eşleşmiş Plazma-Optik Emisyon Spektrometresi) kullanılmıştır. Şekil 3.10 ve 3.11’de görüldüğü gibi elektrokoagülasyon prosesi çıkış suyunda çelik elektrotlardan çözünen metal iyonlarından kaynaklı suda sarımtırak bir renk meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 3.5. Hibrit sistem iş akım şeması



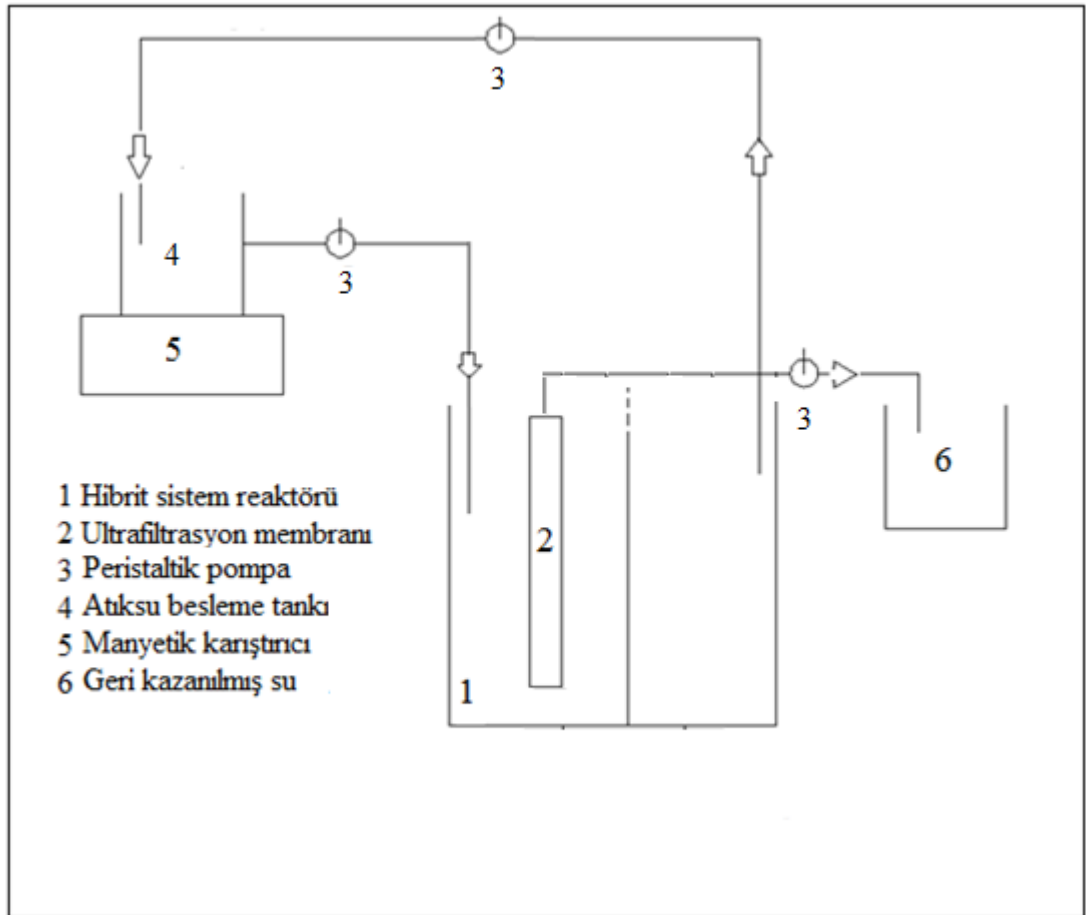
Şekil 3.6. Hibrit sistem reaktörün üstten görünüşü



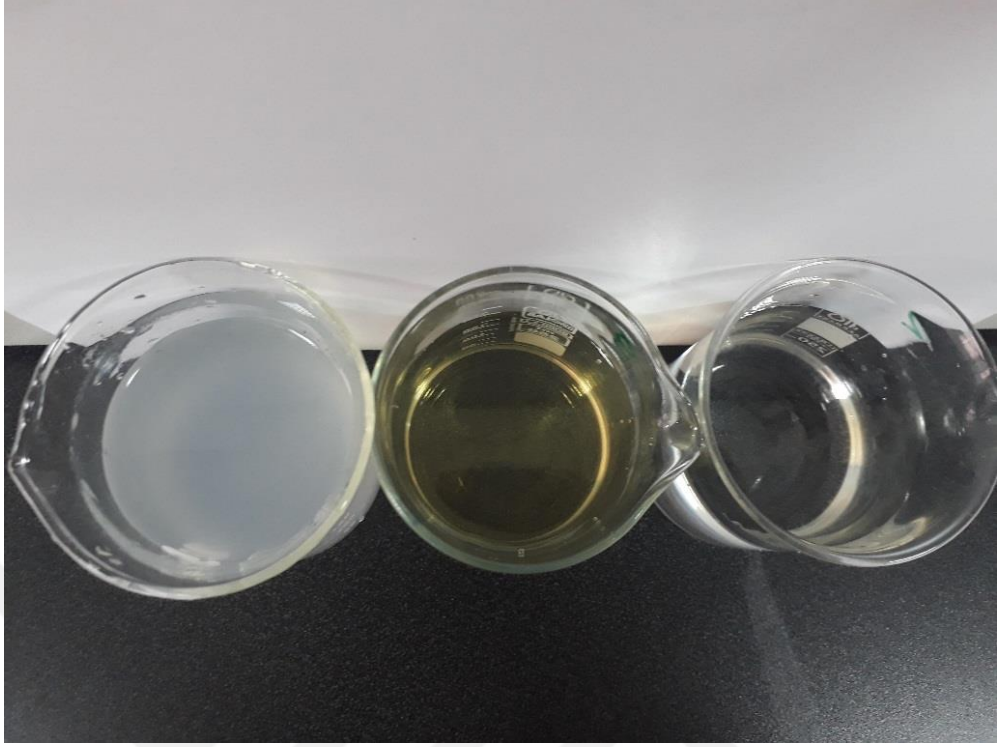
Şekil 3.7. Hibrit sistem



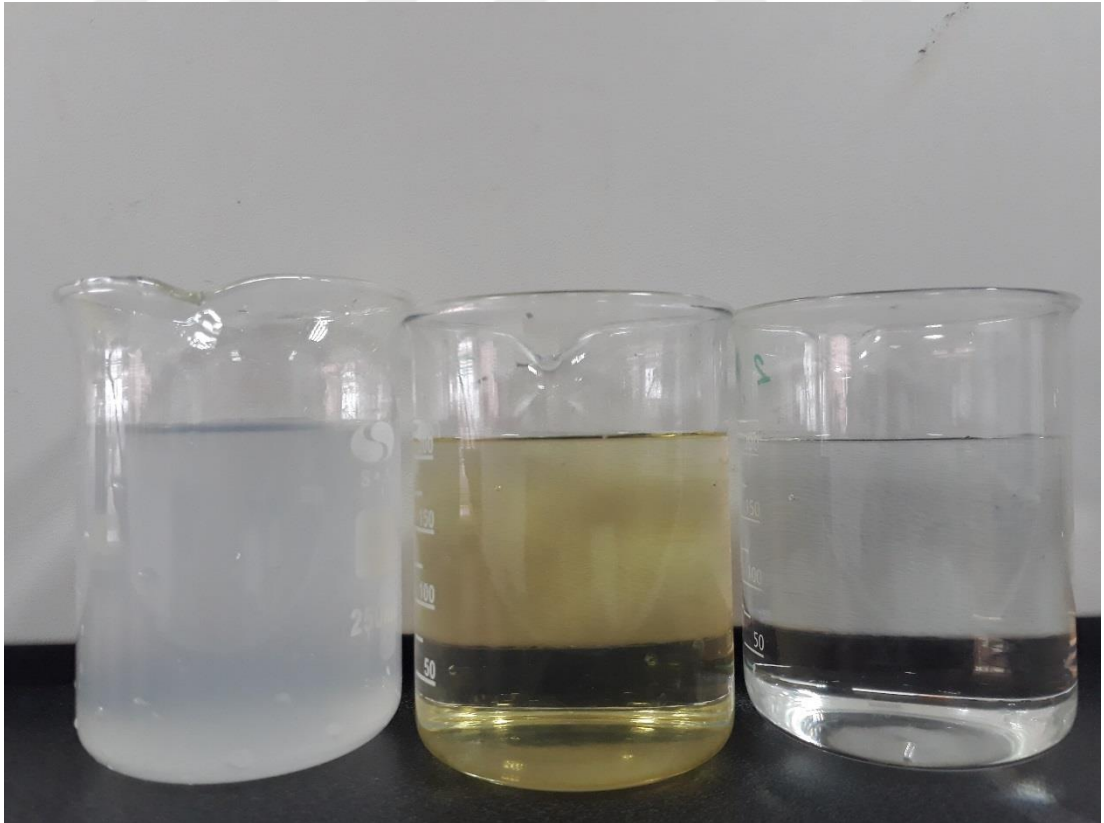
Şekil 3.8. Hibrit sistemde reaktörün üstten görünüşü



Şekil 3.9. Hibrit sistem iş akım şeması (polimer destekli)

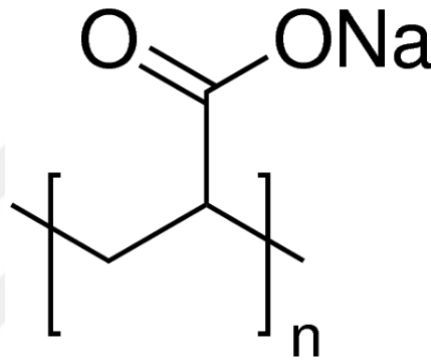


Şekil 3.10. (1) Proses suyu (2) EK (3) UF çıkış üstten görünüş

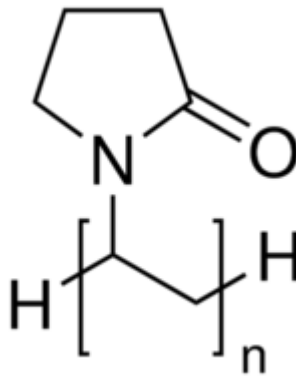


Şekil 3.11. (1) Proses suyu (2) EK (3) UF çıkış

Polimer olarak; PAA (Şekil 3.12) ve PVP 40 (Şekil 13) kullanılmıştır. PAA ataktik bir yapı gösterir. Yani simetrik olmayan monomerlerden meydana gelmiş ve simetrik olmayan grup zincir boyunca gelişigüzel dizilmiştir. Su, metanol, etanol, dioksan, etilen glikol, 2-metoksietanol ve asetik asit içinde çözünür. PVP, oldukça polar ve amfoterik yapıda, suda çözünebilen bir polimerdir. PVP'nin, özellikle su içindeki iyi çözünürlüğü, hidrofilik ve hidrofobik maddeler ile güçlü kompleks yeteneği ve toksik olmayan karakteri benzersiz fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlanmaktadır (Koç, 2016).



Şekil 3.12. PAA (Sigma, güvenlik bilgi formu)



Şekil 3.13. PVP 40 (Sigma, güvenlik bilgi formu)

4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Bu çalışmada, çinko kaplama endüstrisi atıksuyunun geri kazanım özelliği araştırılmıştır. Bu amaçla çinko kaplama endüstrisi atıksuyunun geri kazanımına yönelik olarak hibrit EK-UF ve PDUF sistemleri kullanılarak ağır metal giderimi gerçekleştirilmiştir.

Bu kapsamda öncelikli olarak UF membranı elektrokimyasal reaktör içerisinde batık olarak yerleşecek şekilde laboratuvar ölçekli elektro-UF sistemi tasarlanmıştır. Proje çalışmasında kullanılan atıksu Samsun Organize Sanayi Bölgesinden çinko kaplama yapan bir işletmeden temin edilmiştir. Atıksuyun karakterizasyonunun belirlenmesi amacıyla çinko kaplama işlemi uygulanan metal sanayii sektöründen alınan numunelerde pH, İletkenlik, Çinko (Zn^{2+}), KOİ, AKM ve yağ ve gres parametreleri analiz edilmiştir.

Tasarlanan sistemde ilk işlem olarak temin edilen atıksu kum filtrasyonundan geçirilmiştir. Ultrafiltrasyon prosesi akış oranını gözlemlemek amacı ile sistem hem saf su hemde atıksu ile geçirilerek çalıştırılmıştır. Akı değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra yalnız EK prosesi ile deneysel çalışmalar yürütülmüştür. EK çalışmasında öncelikle belirlenen sabit akım değerinde (1 A), atıksuyun kendi iletkenlik değerinde ve 0-30 dakika zaman aralığında (5, 10, 15 ve 30 dak.) pH denemeleri yapılmıştır. Deneyler pH 3, 5, 7, 8, 9 ve 11 değerlerinde yürütülmüştür. Uygun pH değerinin belirlenmesinden sonra EK deneylerinde akımın etkisine bakılmıştır. Akım deneyleri pH 9 değerinde ve 0-30 dakika zaman aralığında, 0,5, 1, 2 ve 3 Amperde yürütülmüştür. Son olarak 0-60 dakika proses süresinde (5, 10, 15, 30, 45 ve 60 dak.) süre denemeleri yapılmıştır. İkinci olarak sistem yalnız UF prosesi ile çalıştırılmıştır. UF çalışmasında öncelikle 0-60 dakika proses süresinde (5, 15, 30 ve 60 dak.) pH 3, 5, 7, 8, 9 ve 11 değerlerinde pH denemeleri yapılmıştır. Her bir deney setinde UF sistemi akış oranı tespit edilerek akı değerleri hesaplanmıştır.

EK ve UF deneyleri ayrı ayrı olarak denendikten sonra hibrit sistem oluşturularak EK-UF deneyleri yürütülmüştür. Hibrit sistemde öncelikle belirlenen sabit akım değerinde (1 A), atıksuyun kendi iletkenlik değerinde ve 0-60 dakika proses süresinde (5, 15, 30 ve 60 dak.) pH denemeleri yapılmıştır. pH 3, 5, 7, 8, 9 ve 11 olarak seçilerek deneyler yürütülmüştür. pH etkisinden sonra EK-UF

deneylerinde akımın etkisi incelenmiştir. pH 9 değerinde ve 0-60 dakika proses süresinde, 0,5, 1, 2 ve 3 Amperde deneyler yürütülmüştür. Her bir deney setinde UF sistemi akış oranı tespit edilerek akı değerleri hesaplanmıştır.

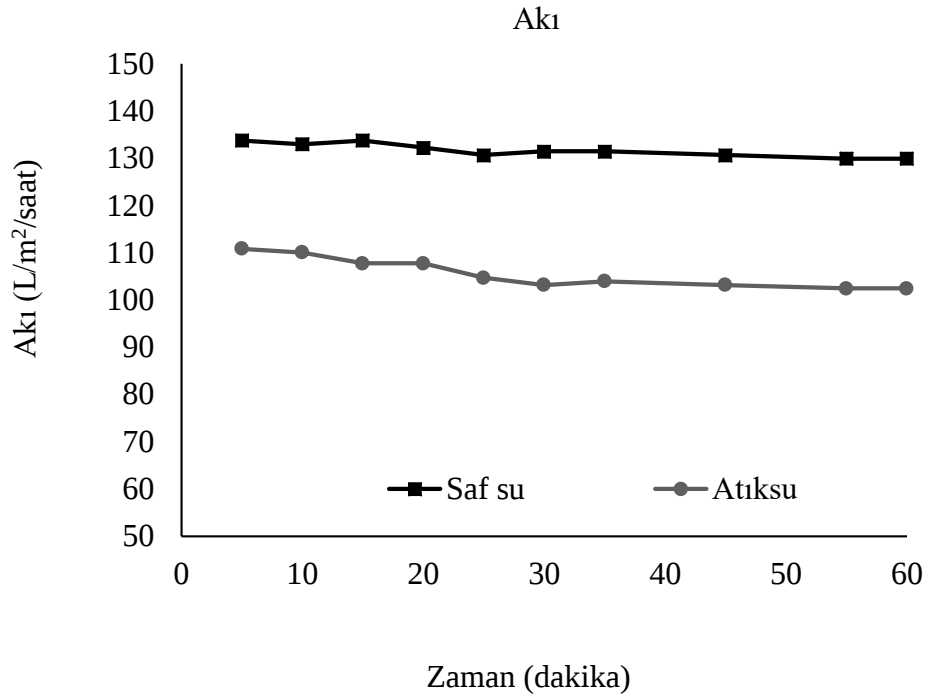
Son olarak PDUF çalışmaları yapılmıştır. İki farklı polimer (PVP ve poliakrilik asit sodyum tuzu) kullanılmıştır. PVP destekli UF prosesinde öncelikle; atıksuyun çinko konsantrasyonuna göre belirlenen polimer konsantrasyonunda PVP:Zn (1:1000) ve 0-60 dakika proses süresinde (5, 15, 30 ve 60 dak.) pH 3, 5, 7, 8, 9 ve 11 değerlerinde denemeler yapılmıştır. Uygun pH etkisinin belirlenmesinden sonra PVP destekli UF deneylerinde polimer konsantrasyonunun etkisi incelenmiştir. pH 9 değerinde ve 0-60 dakika proses süresinde, PVP:Zn 1:100-1:10000 aralığında deneyler yürütülmüştür. Her bir deney setinde UF sistemi akış oranı tespit edilerek akı değerleri hesaplanmıştır. PVP ve EK destekli UF hibrit sisteminde de sadece optimum koşullarda pH 9, PVP:Zn (1:1000) ve 0-60 dakika proses süresinde (5, 15, 30 ve 60 dak.) deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Poliakrilik asit sodyum tuzu destekli UF prosesinde de; pH 9 değerinde ve 0-60 dakika proses süresinde, PAA:Zn 1:100-1:10000 aralığında deneyler yürütülmüştür. Her bir deney setinde UF sistemi akış oranı tespit edilerek akı değerleri hesaplanmıştır. PAA ve EK destekli UF hibrit sisteminde de optimum koşullarda pH 9, PAA:Zn (1:1000) ve 0-60 dakika proses süresinde (5, 15, 30 ve 60 dak.) deneysel çalışmalar yürütülmüştür.

4.1. Saf Su ve Atıksu ile Denenen Akış Oranları

İşletmeden alınan arıtılmamış (ham) çıkış suyunun ve saf suyun kullanıldığı 60 dakikalık UF membran çalışmasında elde edilen süzüntü akılarına ait sonuçlar Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1’de verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi 60 dakika proses süresinde akıda bir miktar azalma olmuştur. Ancak 30 dakikadan sonra azalma göz ardı edilebilecek düzeyde olup 60. dakikaya kadar kararlı durumdadır.

Çizelge 4.1. Saf su ve atıksu ile denenen UF sistemi akış oranı sonuçları

Zaman (dakika)	Saf su		Atıksu	
	Akış oranı	Ak ₁	Akış oranı	Ak ₁
	(mL/dakika)	(L/m ² .saat)	(mL/dakika)	(L/m ² .saat)
0				
5	17,50	133,76	14,50	110,83
10	17,40	132,99	14,40	110,06
15	17,50	133,76	14,10	107,77
20	17,30	132,23	14,10	107,77
25	17,10	130,70	13,70	104,71
30	17,20	131,46	13,50	103,18
35	17,20	131,46	13,60	103,95
45	17,10	130,70	13,50	103,18
55	17,00	129,94	13,40	102,42
60	17,00	129,94	13,40	102,42



Şekil 4.1. Saf su ve atıksu ile denenen akış oranı sonuçları

4.2. Yalnız Elektrokoagülasyon Prosesi ile Yürütülen Çalışmalar

Bu bölümde çelik elektrotlar kullanılarak EK yöntemiyle çinko kaplama atıksuyunun arıtılabilirliği araştırılmıştır. Burada amaç hibrit proses çalışmalarından önce deneysel koşulları belirlemek ve elde edilen sonuçlar ile çalışmada kullanılan diğer prosesler arasında karşılaştırma yaparak atıksu geri kazanımını hedeflemektir.

EK küçük kolloidal partiküllerin kararlı hale getirilip giderilmesinde etkili bir prosestir. EK’da daha az ve daha kararlı çamur oluşmaktadır. Ekipmanlarının kullanımı ve işletmesi kolaydır ve kimyasal madde eklenmesine gerek yoktur (İlhan vd, 2007). Gerek etkin verim ve gerekse kolay işletme şartları nedeniyle yaygın kullanım alanı bulan bir yöntem olması nedeniyle UF prosesi ile entegre bir şekilde çalışacak elektrokimyasal yöntem olarak tercih edilmiştir.

EK’da giderim verimi üzerine pH, akım yoğunluğu, zaman gibi parametrelerin etkileri araştırılmış olup, bu parametrelerin etkileri aşağıda detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

4.2.1. Elektrokoagülasyonda pH’nın etkisi

Çözelti pH değeri EK prosesini önemli ölçüde etkileyen bir parametredir. Metalik elektrotların çözünmesi pH değerine bağlıdır (Chen vd, 2018; Xu vd, 2017). Bu bölümde atıksu pH’sının çinko giderim verimi üzerine olan etkisi incelenmiştir. Çinko konsantrasyonu 494,1 mg/L olan atıksu için akım sabit tutularak farklı pH ve zaman değerlerinde deneyler yürütülmüştür. pH; 3, 5, 7, 8, 9 ve 11 olarak seçilmiştir. Bu amaçla deneysel çalışmalardan önce atıksuyun pH’sı H_2SO_4 veya NaOH kullanılarak istenilen seviyelere getirilmiştir. Deney şartları ve sonuçlar bütün parametreler için sırasıyla Çizelge 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 ve 4.7 ve Şekil 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 ve 4.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Atıksu için 1 amper akım ve pH 3 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen EK deney sonuçları

Zaman	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	Sıcaklık	pH	İletkenlik	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi	Elektrot tüketimi	Enerji tüketimi	Faraday	kWh/kg Çinko
dakika	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		µS/cm	%	%	%	%	mg/m ³	kWh/m ³	F/m ³	
0	494,1	213	14,30	44,20	23,90	3	1684	0	0	0	0	0	0	0	0
5	483,5	200	3,50	8,70	-	-	-	2,15	5,80	75,52	80,32	0,00003	0,42	3,11x10 ⁻⁰⁶	39,31
10	472,8	195	1,90	4,0	-	-	-	4,31	8,57	86,71	90,27	0,00005	0,83	6,22 x10 ⁻⁰⁶	39,12
15	467,3	181	0,20	2,10	-	-	-	5,42	15	98,60	95,25	0,00008	1,25	9,33 x10 ⁻⁰⁶	46,64
30	387,9	163	0,004	1,80	23,90	3,50	1829	21,49	23,33	99,97	95,93	0,00015	2,50	1,87 x10 ⁻⁰⁵	23,54

Çizelge 4.3. Atıksu için 1 amper akım ve pH 5 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen EK deney sonuçları

Zaman	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	Sıcaklık	pH	İletkenlik	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi	Elektrot tüketimi	Enerji tüketimi	Faraday	kWh/Kg Çinko
dakika	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		µS/cm	%	%	%	%	mg/m ³	kWh/m ³	F/m ³	
0	494,1	213	14,30	44,2	23,9	5	1684	0	0	0	0	0	0	0	0
5	445,5	186	3,70	7,5	-	-	-	9,84	12,37	74,13	83,03	0,00008	0,42	3,11 x10 ⁻⁰⁶	8,57
10	431,2	171	1,40	5,1	-	-	-	12,73	19,62	90,21	88,46	0,00009	0,83	6,22 x10 ⁻⁰⁶	13,25
15	403,5	167	0,40	1,8	-	-	-	18,34	21,36	97,20	95,93	0,00012	1,25	9,33 x10 ⁻⁰⁶	13,80
30	374,5	157	0,002	0,9	23,9	5,30	1844	24,21	26,29	99,99	97,96	0,00018	2,50	1,87 x10 ⁻⁰⁵	20,90

Çizelge 4.4. Atıksu için 1 amper akım ve pH 7 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen EK deney sonuçları

Zaman	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	Sıcaklık	pH	İletkenlik	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi	Elektrot tüketimi	Enerji tüketimi	Faraday	kWh/Kg Çinko
dakika	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		µS/cm	%	%	%	%	mg/m ³	kWh/m ³	F/m ³	
0	494,1	213	14,3	44,2	23,9	7	1684								
5	404,1	177	3,5	7,7	-	-	-	18,22	16,94	75,52	82,58	0,0003	0,42	3,11 x10 ⁻⁰⁶	4,63
10	375,6	165	1,2	5,2	-	-	-	23,98	22,25	91,61	88,24	0,0005	0,83	6,22 x10 ⁻⁰⁶	7,03
15	312,2	167	0,3	1,4	-	-	-	36,81	21,45	97,90	96,83	0,0008	1,25	9,33 x10 ⁻⁰⁶	6,87
30	297,3	148	0,003	1,1	23,9	7,2	1862	39,83	30,52	99,98	97,51	0,0015	2,50	1,87 x10 ⁻⁰⁵	12,70

Çizelge 4.5. Atıksu için 1 amper akım ve pH 8 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen EK deney sonuçları

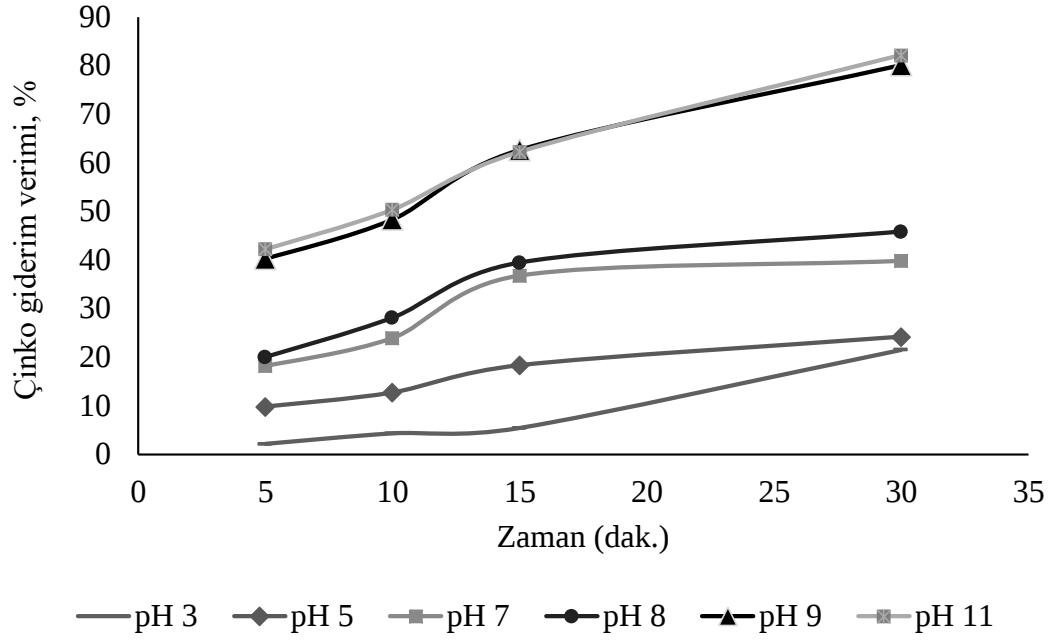
Zaman	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	Sıcaklık	pH	İletkenlik	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi	Elektrot tüketimi	Enerji tüketimi	Faraday	kWh/Kg Çinko
dakika	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		µS/cm	%	%	%	%	mg/m ³	kWh/m ³	F/m ³	
0	494,1	213	14,3	44,2	23,9	8	1684	0	0	0	0	0	0	0	0
5	395,1	171	2,8	6,7	-	-	-	20,04	19,48	80,42	84,84	0,0007	0,42	3,11 x10 ⁻⁰⁶	4,21
10	355,1	159	1,1	6,2	-	-	-	28,13	25,308	92,31	85,97	0,0009	0,83	6,22 x10 ⁻⁰⁶	5,99
15	299,1	142	0,088	1,3	-	-	-	39,47	33,158	99,38	97,06	0,0013	1,25	9,33 x10 ⁻⁰⁶	6,41
30	267,6	136	0,002	0,6	23,9	8,4	1881	45,84	36,07	99,99	98,64	0,0019	2,50	1,87 x10 ⁻⁰⁵	11,04

Çizelge 4.6. Atıksu için 1 amper akım ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen EK deney sonuçları

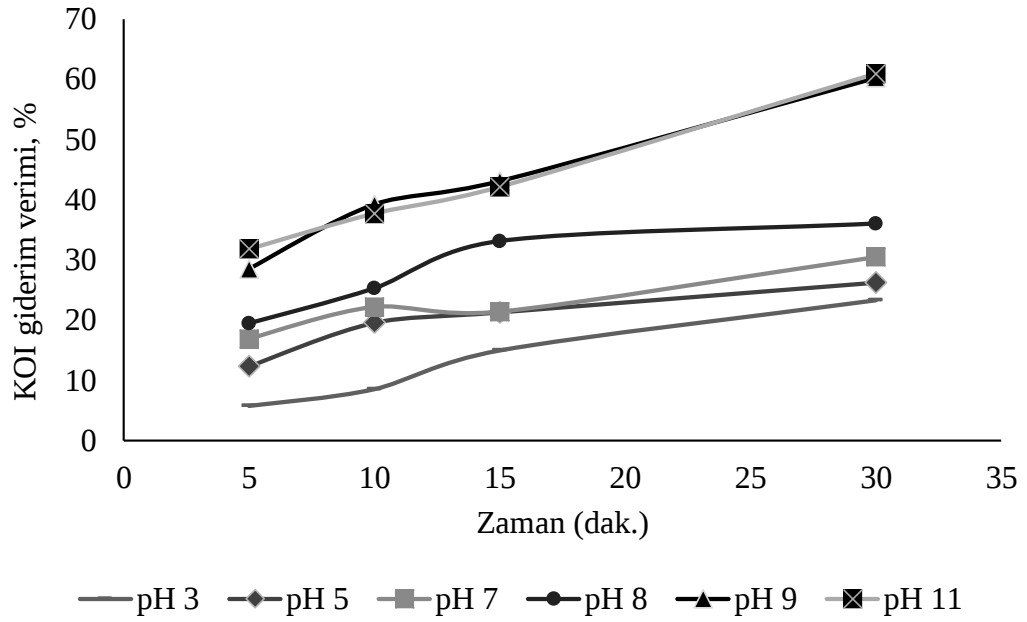
Zaman	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	Sıcaklık	pH	İletkenlik	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi	Elektrot tüketimi	Enerji tüketimi	Faraday	kWh/Kg Çinko
dakika	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		µS/cm	%	%	%	%	mg/m ³	kWh/m ³	F/m ³	
0	494,1	213	14,3	44,2	23,9	9	1684	0	0	0	0	0	0	0	0
5	295,1	152	3,1	11	-	-	-	40,28	28,55	78,32	75,11	0,001	0,4167	3,11 x10 ⁻⁰⁶	2,10
10	255,1	129	0,9	5,2	-	-	-	48,37	39,27	93,71	88,24	0,008	0,8333	6,22 x10 ⁻⁰⁶	3,49
15	184,4	121	0,1	2,3	-	-	-	62,68	43,12	99,30	94,80	0,013	1,25	9,33 x10 ⁻⁰⁶	4,04
30	98,2	84,5	0,009	1	23,9	9,3	1887	80,13	60,28	99,94	97,74	0,05	2,5	1,87 x10 ⁻⁰⁵	6,31

Çizelge 4.7. Atıksu için 1 amper akım ve pH 11 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen EK deney sonuçları

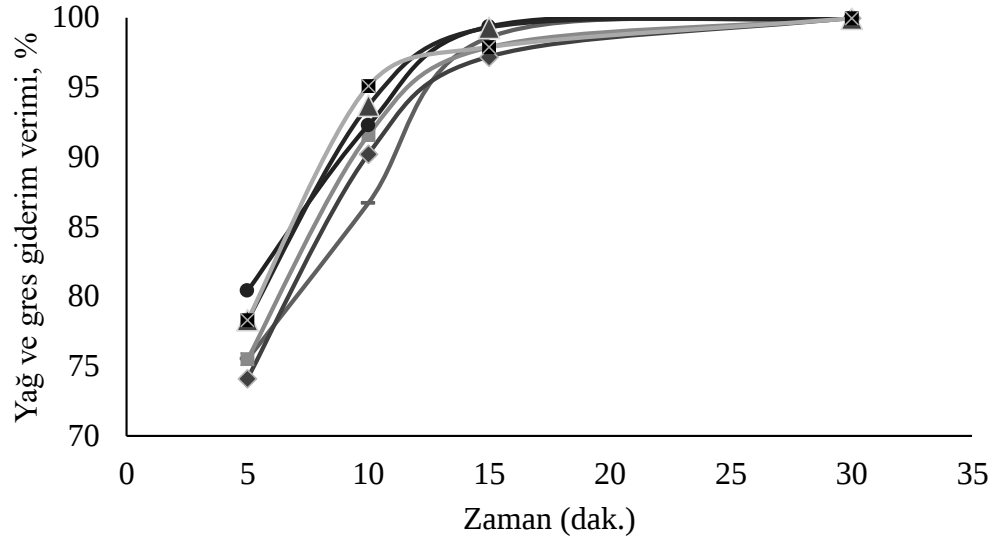
Zaman	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	Sıcaklık	pH	İletkenlik	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi	Elektrot tüketimi	Enerji tüketimi	Faraday	kWh/Kg Çinko
dakika	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		µS/cm	%	%	%	%	mg/m ³	kWh/m ³	F/m ³	
0	494,1	213	14,3	44,2	23,9	11	1684								
5	285,4	145	3,1	9,3	-	-	-	42,24	31,84	78,32	78,96	0,002	0,42	3.11 x10 ⁻⁰⁶	1,99
10	245,2	132	0,7	4,6	-	-	-	50,37	37,76	95,10	89,59	0,009	0,83	6.22 x10 ⁻⁰⁶	3,35
15	186,4	123	0,3	3,3	-	-	-	62,28	42,18	97,90	92,53	0,018	1,25	9.33 x10 ⁻⁰⁶	4,06
30	88,2	83	0,005	0,7	23,9	11,4	1893	82,15	60,98	99,97	98,41	0,04	2,5	1.87 x10 ⁻⁰⁶	6,16



Şekil 4.2. Atıksudan çinko giderimi (EK), (1 A, 4,8 mA/cm²)

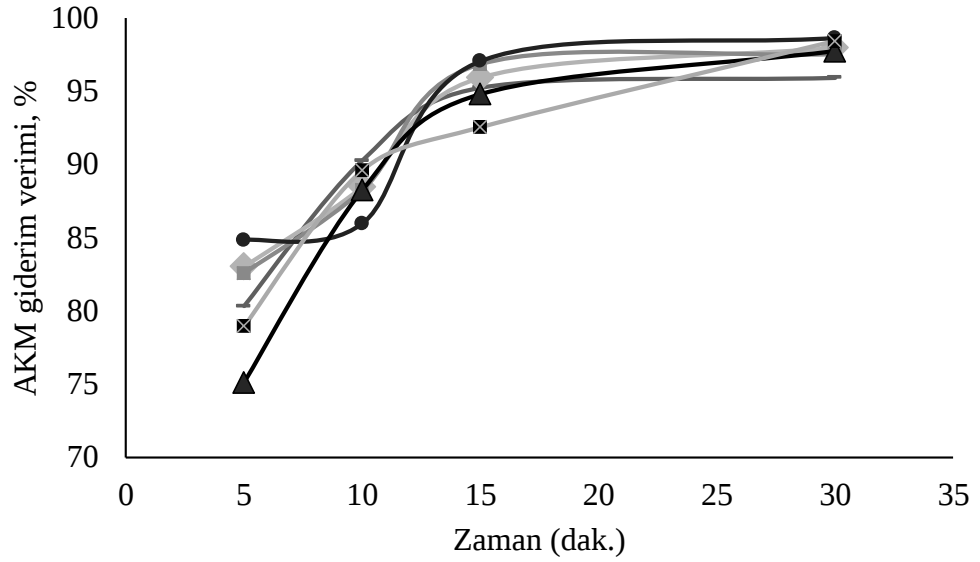


Şekil 4.3. Atıksudan KOİ giderimi (EK), (1 A, 4,8 mA/cm²)



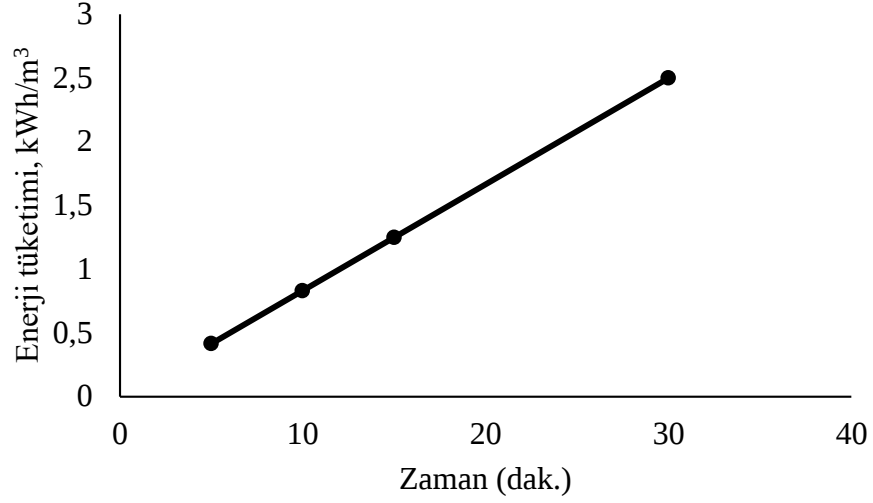
— pH 3 —◆— pH 5 —■— pH 7 —●— pH 8 —▲— pH 9 —×— pH 11

Şekil 4.4. Atıksudan yağ ve gres giderimi (EK), (1 A, 4,8 mA/cm²)

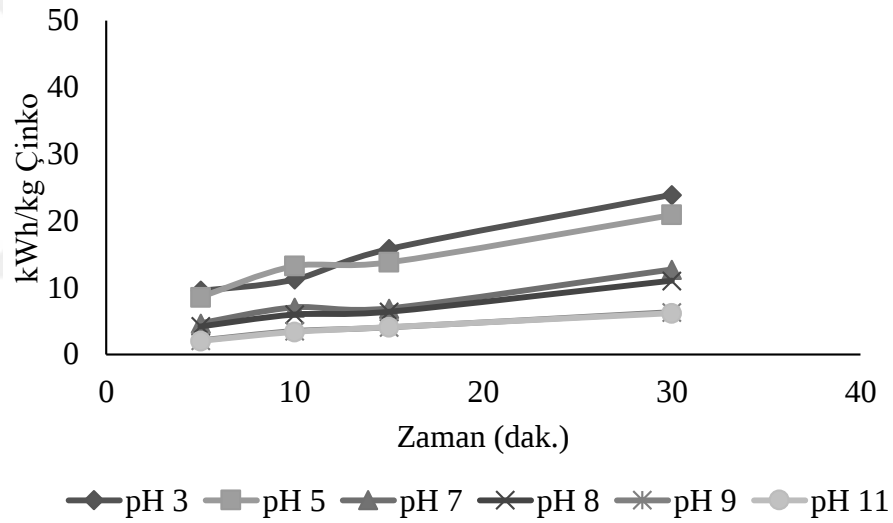


— pH 3 —◆— pH 5 —■— pH 7 —●— pH 8 —▲— pH 9 —×— pH 11

Şekil 4.5. Atıksudan AKM giderimi (EK), (1 A, 4,8 mA/cm²)



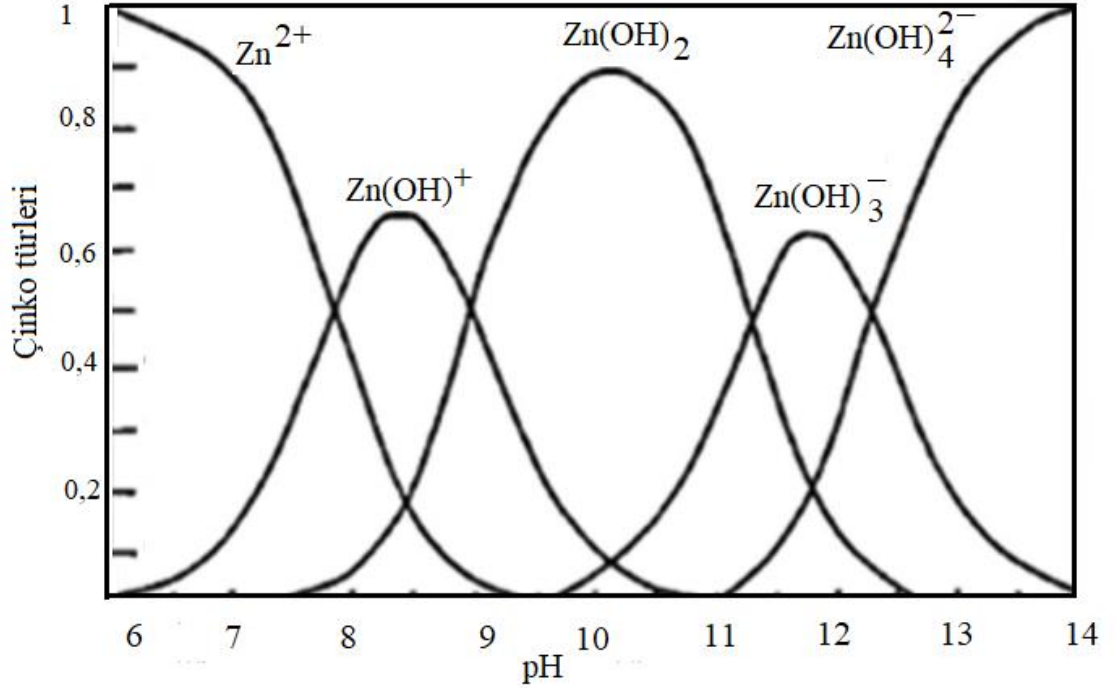
Şekil 4.6. Atıksudan çinko gideriminde zamana bağlı enerji tüketimi (EK), (1 A, 4,8mA/cm², pH 3-9)



Şekil 4.7. Atıksudan çinko gideriminde zamana ve pH'ya bağlı enerji tüketimi (EK), (1 A, 4,8 mA/cm²)

Şekil 4.2'den de görüldüğü gibi çinko giderimi asidik pH değerlerinde düşüktür. Ancak pH arttıkça giderim verimliliği artmaktadır. En iyi verim pH 9 ve 11 değerlerinde elde edilmiştir. Çelik anot-çelik katot elektrot çifti ile yapılan EK deneylerinde 4,8 mA/cm² akım yoğunluğunda ve pH 3 değerinde 5 dk elektroliz süresinde % 2 çinko giderim verimi elde edilirken aynı sürede pH 9'da % 40 ve pH 11'de % 42 verim elde edilmiştir. pH 9 ve 11'de 30 dakikalık deney sonunda ise sırasıyla %80 ve %82 çinko giderim verimine ulaşılmıştır. Bu süre (30 dakika) sonunda enerji tüketimi ise 0,4 Wh'ten 2,5 Wh'e ulaşmıştır. Şekil 4.7'den de görüldüğü üzere pH değerlerinde ise zamanla enerji tüketimi artmakla birlikte alkali

değerlerde daha düşük seviyelerdedir. KOİ giderim verimi ise 30 dk deney süresi sonunda pH 3 değerinde %23 iken pH 9 ve pH 11 değerlerinde %60 seviyelerine ulaşmıştır. Yağ ve gres ile AKM parametreleri incelendiğinde ise giderim verim 30 dakika sonunda bütün pH değerlerinde %95 üzerindedir.



Şekil 4.8. pH değerlerine bağlı olarak çinko türlerinin dağılımı (Heakal vd, 2018)

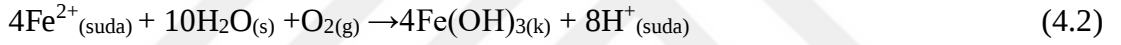
Şekil 4.8'de çinko hidroksitlerin pH'a bağlı olarak dağılımları verilmiştir (Heakal vd, 2018). Şekil 4.8 verilerini kullanılarak pH 9-11 aralığında çinko metalin hidroksit halinde çökeldiği görülmektedir. Bu durum elde edilen deneysel sonuçları desteklemektedir. pH 9 ve pH 11 değerlerinde yüksek giderim verimlerine ulaşılmıştır. Birbirine yakın olmakla beraber maksimum giderim verimi pH 11 değerinde elde edilmiştir. Ancak 31.12.2004 tarih ve 25687 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe giren Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği Tablo 15.7'de çinko kaplama tesisleri için metal sanayi atıksularının alıcı ortama deşarj standartlarında pH 6-9 olarak verilmiştir. Atıksu geri kazanımı kapsamında değerlendirildiğinde metal kaplama yapan işletmelerde istenen proses suyu özelliklerinde yumuşak sular için kabul edilebilir pH 7,5-8 aralığındadır. Optimum pH değeri 9 olarak belirlenmiştir. Koby ve arkadaşları EK prosesinde metal işleme atıksularının arıtılması üzerine bir çalışma yapmışlardır. KOİ, renk, krom, nikel ve çinko parametrelerini incelemişlerdir. Akım yoğunluğu, başlangıç pH değeri ve reaksiyon

süresinin arıtım veriminde etkili olduğunu belirlemişlerdir. KOİ, renk, krom, nikel ve çinko giderim verimini sırasıyla %76,2, %99,9, %98,9, %96,3 ve %99,8 olarak bulmuşlardır (Koby vd, 2018).

Elektrokimyasal arıtmada Fe (II) ve Fe (III) oksidasyonu ile Fe(OH)_n oluşur. Aşağıda gösterilen her iki mekanizma da demir hidroksitin üretimi için önemlidir. Fe iyonları çeşitli monomerik ve polimerik FeOH²⁺, Fe(OH)²⁺, Fe₂(OH)₂⁴⁺, Fe(H₂O)₅OH²⁺, Fe(H₂O)₄(OH)²⁺, Fe₂(H₂O)₈(OH)₂⁴⁺ türlerin oluşumuna yol açmaktadır (Mollah vd, 2004).

1.Mekanizma:

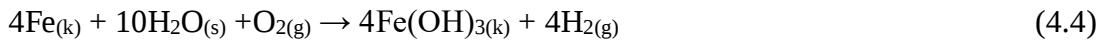
Anot:



Katot:



Toplam:



2.Mekanizma:

Anot:



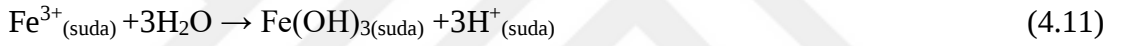
Katot:



Toplam:



Fe^{3+} iyonları asidik şartlarda $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ ve $\text{Fe}(\text{OH})_3$ türleri oluşturabilir.



Alkali şartlarda $\text{Fe}(\text{OH})_6^-$ ve $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ iyonları da oluşabilir (Mollah vd, 2001).

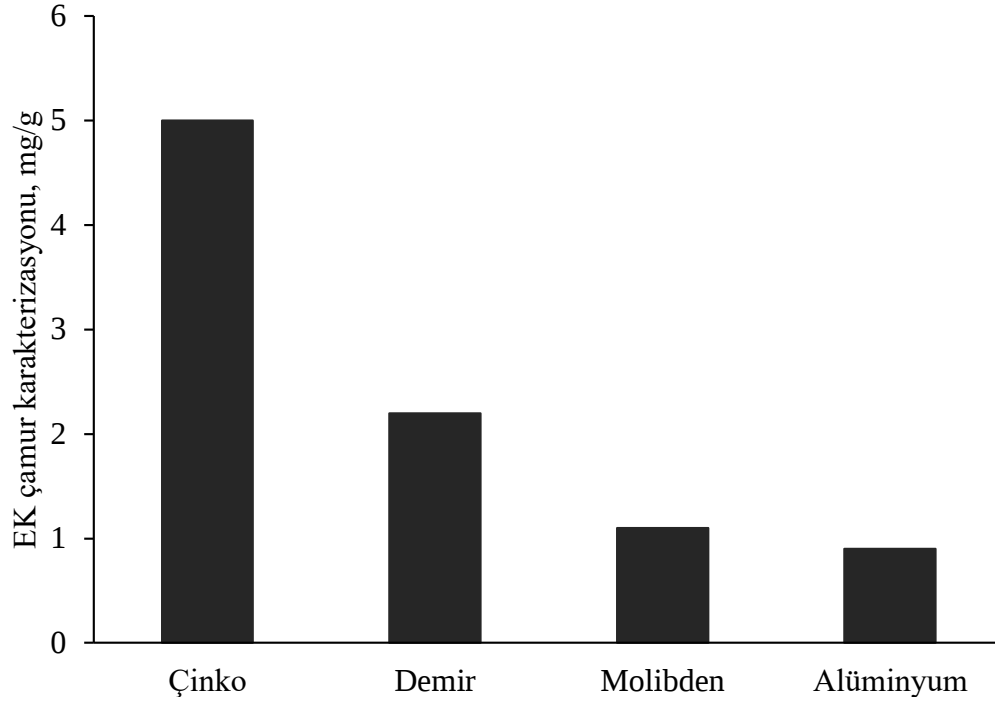
Düşük pH'larda (pH5-pH9) Al (III) ve $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ gibi katyonik monomerik türler üretilir ve sonuçta aşağıdaki reaksiyonların takibinde $\text{Al}_n(\text{OH})_{3n}$ oluşur.



Sistem içinde $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$ ve $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ gibi diğer iyonik türlerin oluşması sulu ortamın pH'sına bağlıdır (Mollah ve ark., 2001).

Çelik elektrotlar kullanılarak gerçekleştirilen elektrokoagülasyon prosesinde elektrokoagülasyon mekanizmasını anlayabilmek için 1 A akım ve pH 9 değerinde 60 dakika elektroliz süresinde proses atıksu ile çalıştırılmıştır. Deney sonucunda EK prosesinde oluşan çamurda ağır metal analizi yapılmıştır. Çamurda 5 mg/g çinko,

2,2 mg/g demir, 1,1 mg/g molibden ve 0,9 mg/g alüminyum metali tespit edilmiştir (%53,7 çinko, %24,9 demir, %11,8 molibden ve %9,6 alüminyum) (Şekil 4.9). Deneylerde metal iyonu konsantrasyonunu tayin etmek için Perkinelmer Optima 2100 DV ICP-OES- USA (Eşzamanlı İndüktif Eşleşmiş Plazma-Optik Emisyon Spektrometresi) kullanılmıştır.



Şekil 4.9. EK çamur karakterizasyonu

Oluşan demir hidroksit ve alüminyum hidroksit iyonları atıksu içerisinde bulunan çinko ve diğer kirleticilerde beraberinde giderebilirler. Tükenen elektrot olarak çelik plakaların kullanımının hem anyonik hem de katyonik türlerde uygun olduğu görülmektedir. Ayrıca su içerisinde anotta oksijen kabarcıkları oluşurken katotta ise hidrojen üretilmektedir. Bu kabarcıklar floküle olmuş kirleticilerin yüzeye doğru hareketine neden olmaktadır. Alkali şartlarda oluşan demir hidroksit iyonları ve çökebilir formda oluşan çinko hidroksit iyonları, deneysel çalışmada pH 9 ve pH 11 değerinde elde edilen yüksek giderim verimini doğrulamaktadır. Elde edilen sonuçlardan çinko giderim mekanizmasında çökebilir çinko iyonları ve demir iyonlarının etkili olduğu söylenebilir (Mollah vd, 2001).

4.2.2. Elektrokoagülasyonda akımın etkisi

Bu bölümde akım yoğunluğunun arıtma verimi üzerine etkisi araştırılmıştır. Çelik anot – çelik katot elektrot çifti ile yapılan deneyler sırasında pH (9) ve zaman (60 dakika) sabit tutularak 0,5-3 amper akım ve 2,4-14,4 mA/cm² aralığında çeşitli akım yoğunlukları uygulanmıştır. Deney şartları ve sonuçları Çizelge 4.8-4.11’de ve Şekil 4.10-4.15’de gösterilmiştir. Sonuçlardan da görüleceği gibi akım yoğunluğu arttıkça giderim verimleri artmıştır. 5 dakika elektroliz süresinde 0,5 Amper akımda (2,4 mA/cm² akım yoğunluğu) % 28 çinko giderim verimi gözlenirken 3 Amper akımda (14,4 mA/cm² akım yoğunluğu) bu değer % 71’e çıkmıştır. Akım yoğunluğu artırıldıkça elektrotlar arası potansiyel farkı arttığından dolayı 14,4 mA/cm²’de enerji tüketimi 5 dakika proses süresinden 30 dakika proses süresine kadar 0,4 Wh’dan 2,8 Wh’e çıkmıştır. Elektrolit iletkenliğinin sabit tutulduğu, değişen akım yoğunluklarında gerçekleştirilen deneylerde, akım yoğunluğundaki artışla elektrotlar arası potansiyel farkı artmıştır. Dolayısıyla akım yoğunluğu arttıkça her bir deney için enerji tüketimi de artmıştır (Şekil 4.14-4.15). Akım yoğunluğu enerji tüketimine doğrudan etki etmekle beraber elektrotlar arası potansiyeli etkilediği için dolaylı olarak da etki etmektedir. KOİ giderim verimi ise 30 dk deney süresi sonunda 0,5 A akım değerinde %41 iken 3 A akım değerinde %89 seviyelerine ulaşmıştır. Yağ ve gres ile AKM parametreleri incelendiğinde ise giderim verim 30 dakika sonunda bütün pH değerlerinde %97 üzerindedir. Oden ve Erkan EK prosesi ile metal kaplama atıksularının arıtımı üzerinde bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında KOİ, renk, çinko ve nikel parametrelerini incelemişlerdir. pH, reaksiyon süresi ve akım yoğunluğu gibi işletme parametrelerinin etkisini incelemişlerdir. Demir elektrotların kullanıldığı çalışmada 16-48 mA/cm² akım yoğunluğunda çalışmışlardır. Çinko parametresi için 30 mA/cm² akım yoğunluğu optimum işletme parametresi olarak belirlenmiştir. pH 9 değerinde 20 dakika reaksiyon süresinde ve 16 mA/cm² akım yoğunluğunda ise %89 çinko giderim verimi elde etmişlerdir (Oden ve Erkan, 2018). Şekil 4.9’da görüldüğü üzere 5 dakika elektroliz süresinde 0,5 A akımda % 28, 1 A akımda %40, 2A akımda %62 ve 3 A akımda % 71 giderim verimi elde edilmiştir. 60 dakika elektroliz süresinde ise 0,5 A akımda %41 giderim verimine ulaşılırken 1 A, 2 A ve 3 A akımda giderim verimi her üç akım değerinde de %80 üzerinde bulunmuştur. Elde edilen sonuçlara bağlı olarak akım yoğunluğunun artması ile

enerji tüketiminin artması durumu da göz önünde bulundurularak optimum akım değeri 1 A olarak belirlenmiştir.



Çizelge 4.8. Atıksu için 0,5 amper akım ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen EK deney sonuçları

Zaman	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	Sıcaklık	pH	İletkenlik	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi	Elektrot tüketimi	Enerji tüketimi	Faraday	kWh/Kg Çinko
dakika	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		µS/cm	%	%	%	%	mg/m ³	kWh/m ³	(F/m ³)	
0	494,1	213	14,3	44,2	23,9	9	1684	0	0	0	0	0	0	0	0
5	354,8	174	6,6	26,4	-	-	-	28,19	18,02	53,85	40,27	0,0009	0,35	3,11 x10 ⁻⁰⁶	2,5126
10	334,1	144	4,5	10,2	-	-	-	32,38	32,54	68,53	76,92	0,002	0,7	6,22x10 ⁻⁰⁶	4,375
15	324,6	133	2,9	8,3	-	-	-	34,30	37,29	79,72	81,22	0,008	1,05	9,33x10 ⁻⁰⁶	6,1947
30	290,6	115	3	5,1	23,9	9,2	1775	41,19	46,18	79,02	88,46	0,015	2,1	1,87x10 ⁻⁰⁵	10,319

Çizelge 4.9. Atıksu için 1 amper akım ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen EK deney sonuçları

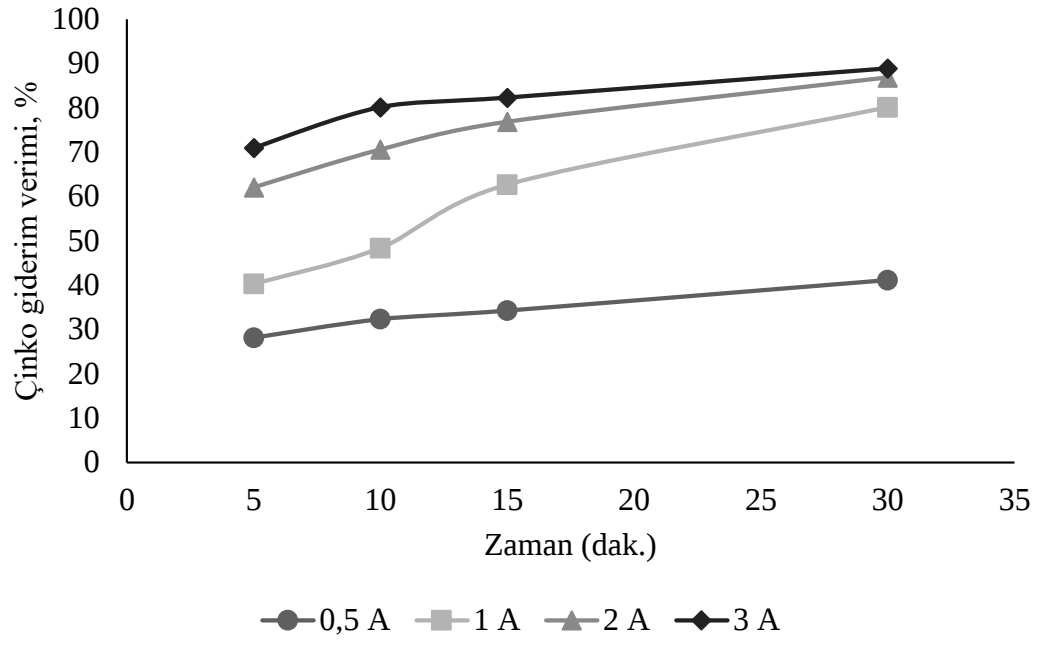
Zaman	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	Sıcaklık	pH	İletkenlik	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi	Elektrot tüketimi	Enerji tüketimi	Faraday	kWh/Kg Çinko
dakika	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		µS/cm	%	%	%	%	mg/m ³	kWh/m ³	F/m ³	
0	494,1	213	14,3	44,2	23,9	9	1684	0	0	0	0	0	0	0	0
5	295,1	152	3,1	11	-	-	-	40,28	28,55	78,32	75,11	0,001	0,4167	3,11 x10 ⁻⁰⁶	2,10
10	255,1	129	0,9	5,2	-	-	-	48,37	39,27	93,71	88,24	0,008	0,8333	6,22 x10 ⁻⁰⁶	3,49
15	184,4	121	0,1	2,3	-	-	-	62,68	43,12	99,30	94,80	0,013	1,25	9,33 x10 ⁻⁰⁶	4,04
30	98,2	84,5	0,009	1	23,9	9,3	1887	80,13	60,28	99,94	97,74	0,05	2,5	1,87 x10 ⁻⁰⁵	6,31

Çizelge 4.10. Atıksu için 2 amper akım ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen EK deney sonuçları

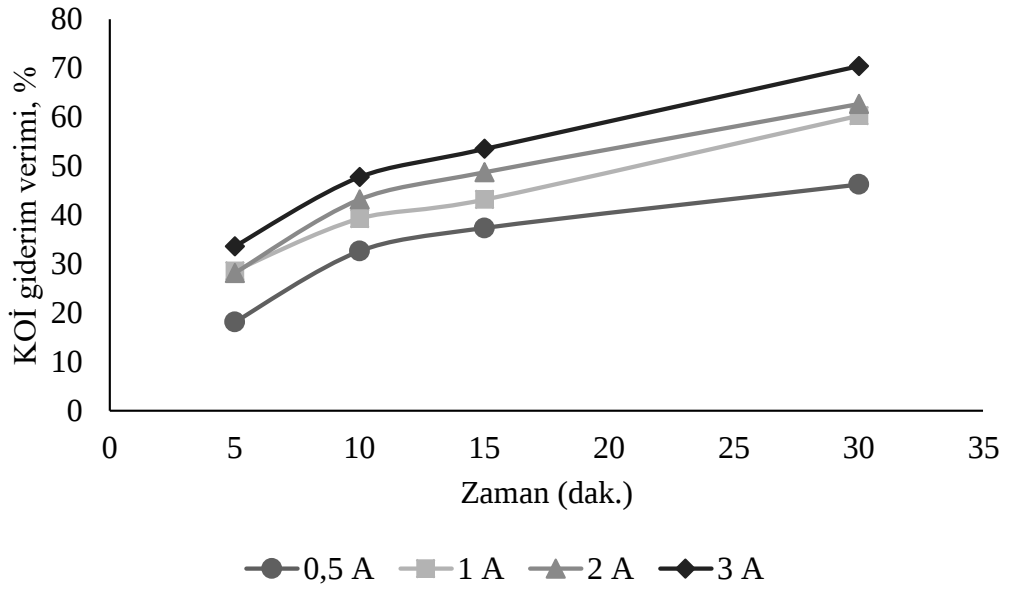
Zaman	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	Sıcaklık	pH	İletkenlik	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi	Elektrot tüketimi	Enerji tüketimi	Faraday	kWh/Kg Çinko
dakika	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		µS/cm	%	%	%	%	mg/m ³	kWh/m ³	(F/m ³)	
0	494,1	213	14,3	44,2	23,9	9	1684	0	0	0	0	0	0	0	0
5	187,3	153	3,2	10,2	-	-	-	62,09	28,08	77,62	76,92	0,03	0,44	3,11 x10 ⁻⁰⁶	1,44
10	145,2	121	0,8	7,1	-	-	-	70,61	43,12	94,41	83,94	0,09	0,88	6,22 x10 ⁻⁰⁶	2,53
15	114,4	109	0,3	3,3	-	-	-	76,85	48,67	97,90	92,53	0,28	1,33	9,33 x10 ⁻⁰⁶	3,49
30	65,1	79,5	0,007	0,8	23,9	9,5	1899	86,82	62,63	99,95	98,19	0,4	2,65	1,87 x10 ⁻⁰⁵	6,18

Çizelge 4.11. Atıksu için 3 amper akım ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen EK deney sonuçları

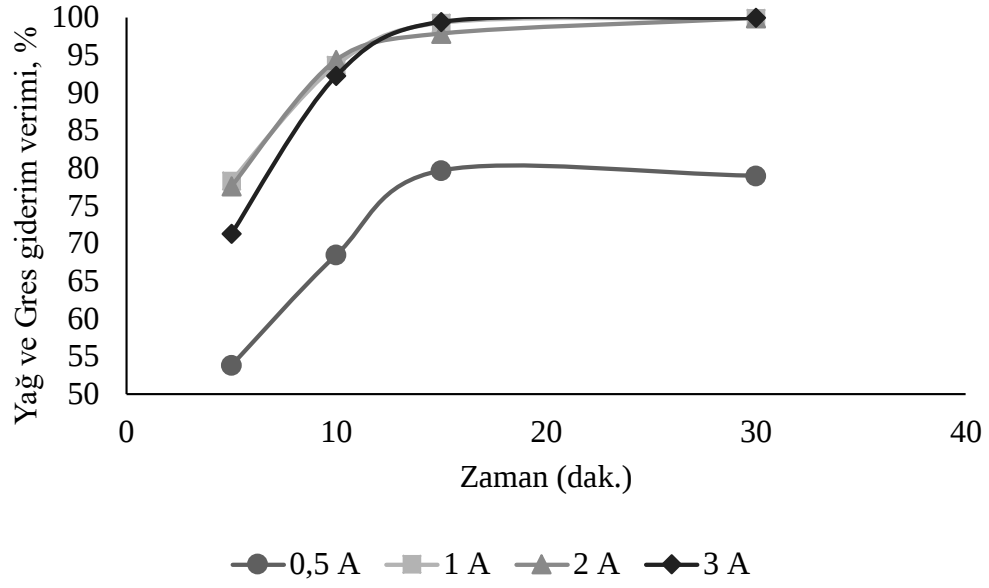
Zaman	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	Sıcaklık	pH	İletkenlik	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi	Elektrot tüketimi	Enerji tüketimi	Faraday	kWh/Kg Çinko
dakika	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		µS/cm	%	%	%	%	mg/m ³	kWh/m ³	(F/m ³)	
0	494,1	213	14,3	44,2	23,9	9	1684	0	0	0	0	0	0	0	0
5	143,2	141	4,1	8,8	-	-	-	71,02	33,58	71,33	80,09	0,08	0,475	3,11 x10 ⁻⁰⁶	1,35
10	98	111	1,1	5,2	-	-	-	80,17	47,73	92,31	88,23	0,15	0,95	6,22 x10 ⁻⁰⁶	2,40
15	87,4	99	0,08	1,3	-	-	-	82,31	53,46	99,44	97,06	0,31	1,425	9,33 x10 ⁻⁰⁶	3,50
30	55	63	0,002	0,3	23,9	9,6	1994	88,87	70,39	99,99	99,32	0,7	2,85	1,87 x10 ⁻⁰⁵	6,49



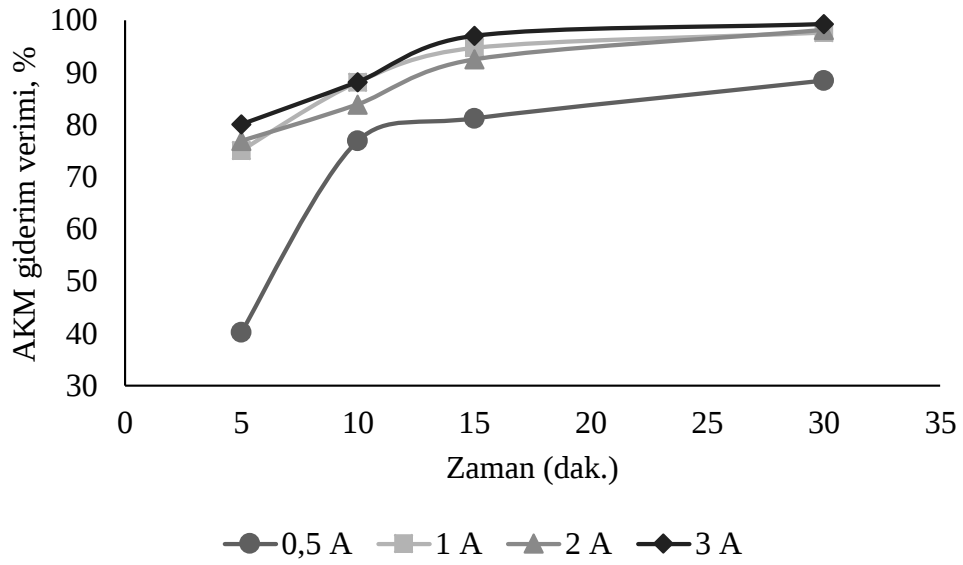
Şekil 4.10. Atıksudan çinko giderimi (EK), (pH 9)



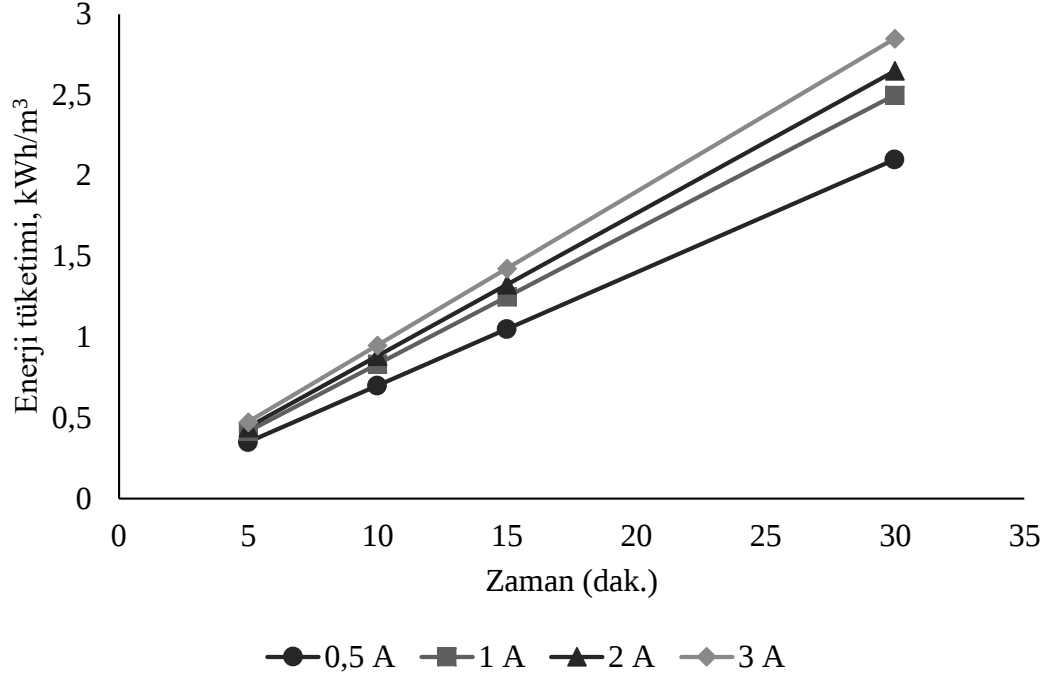
Şekil 4.11. Atıksudan KOİ giderimi (EK), (pH 9)



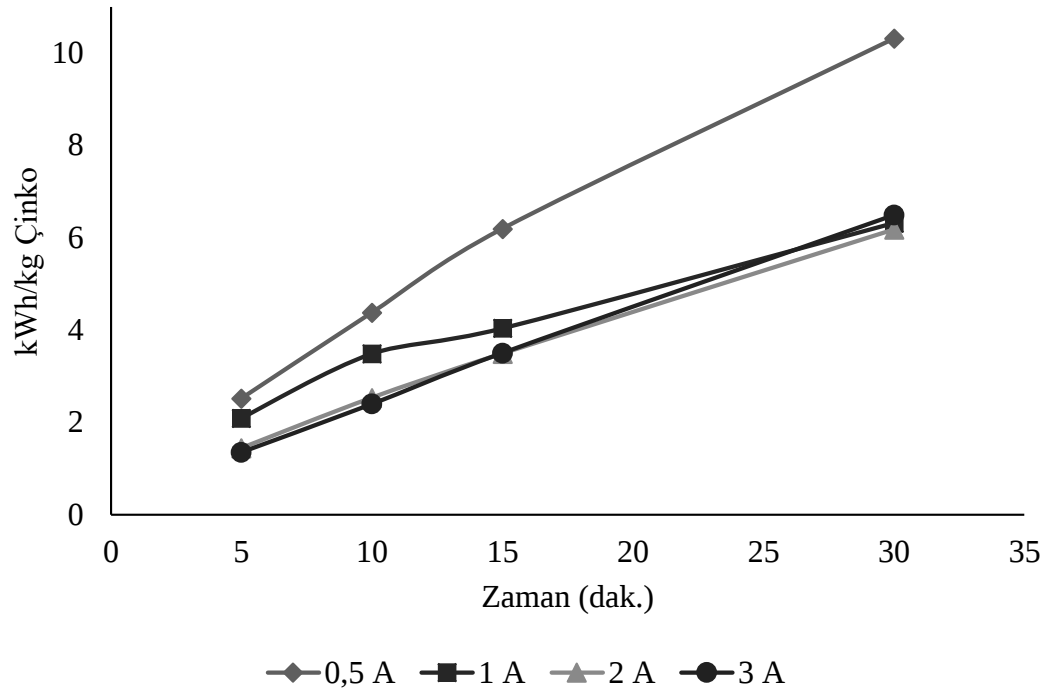
Şekil 4.12. Atıksudan yağ ve gres giderimi (EK), (pH 9)



Şekil 4.13. Atıksudan AKM giderimi (EK), (pH 9)



Şekil 4.14. Atıksudan çinko gideriminde zamana ve akıma bağlı enerji tüketimi (EK), (pH 9)



Şekil 4.15. Atıksudan çinko gideriminde zamana ve akıma bağlı kg çinko başına enerji tüketimi (EK), (pH 9)

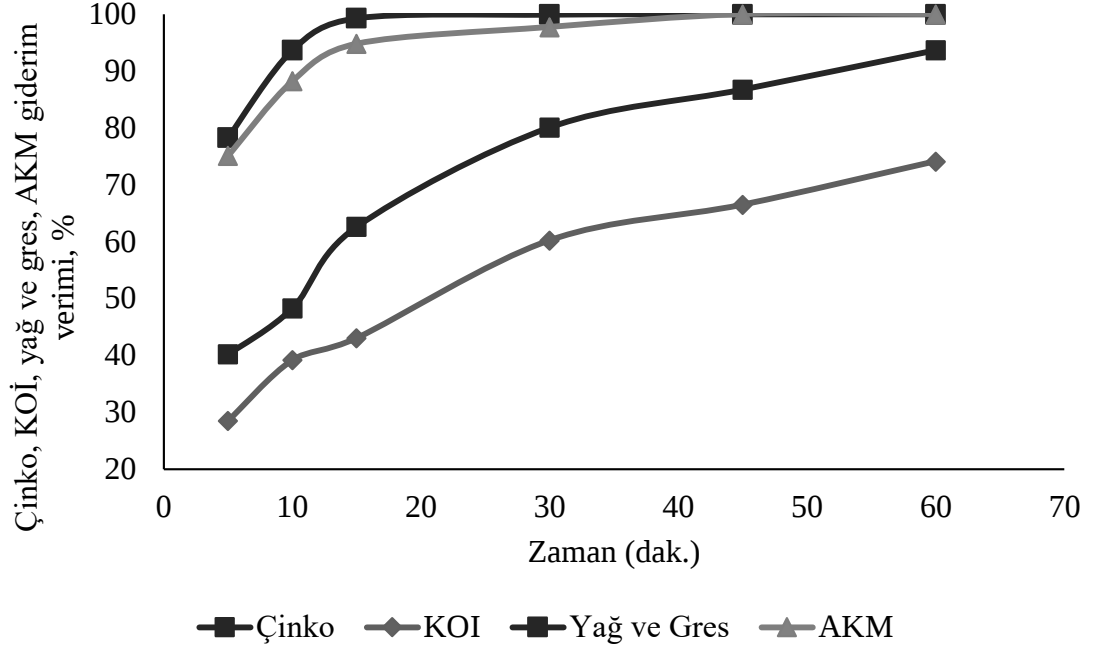
4.2.3. Elektrokoagülasyonda zamanın etkisi

pH ve akım denemeleri yapılırken çalışmalar zamana karşı yapılmıştır. Ancak maliyet ve suyun kullanım özelliği göz önünde bulundurularak 1 A akım ve pH 9 değerinde daha detaylı zaman denemeleri yapılarak giderim verimleri değerlendirilmiştir. Deneylere ilişkin sonuçlar Çizelge 4.12’de ve Şekil 4.16-4.18’de verilmiştir.

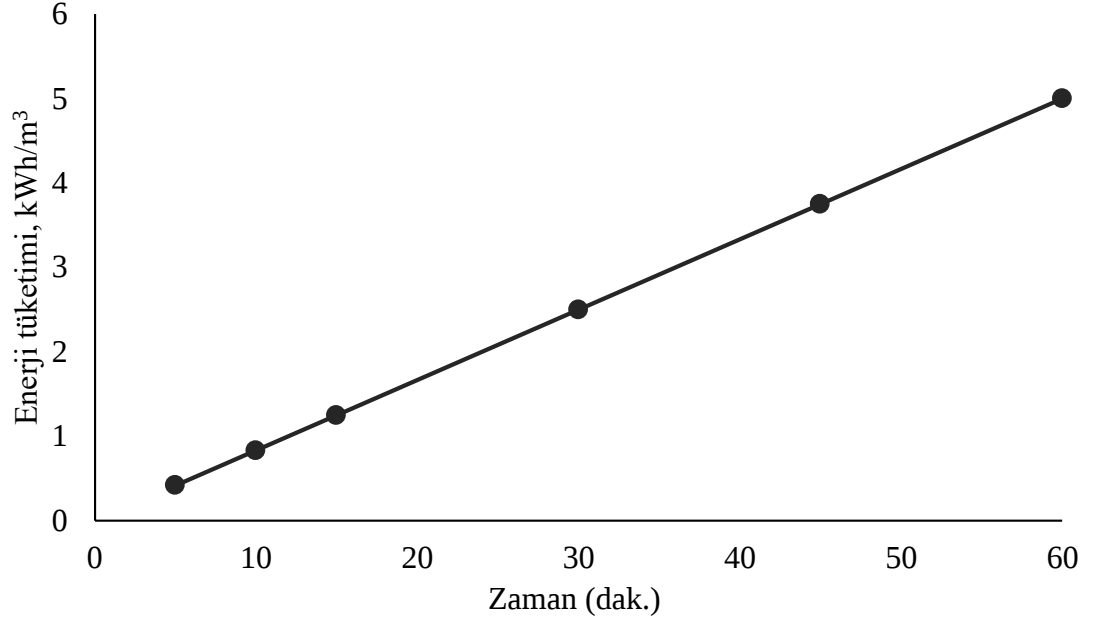


Çizelge 4.12. Atıksu için 1 amper akım ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen EK deney sonuçları

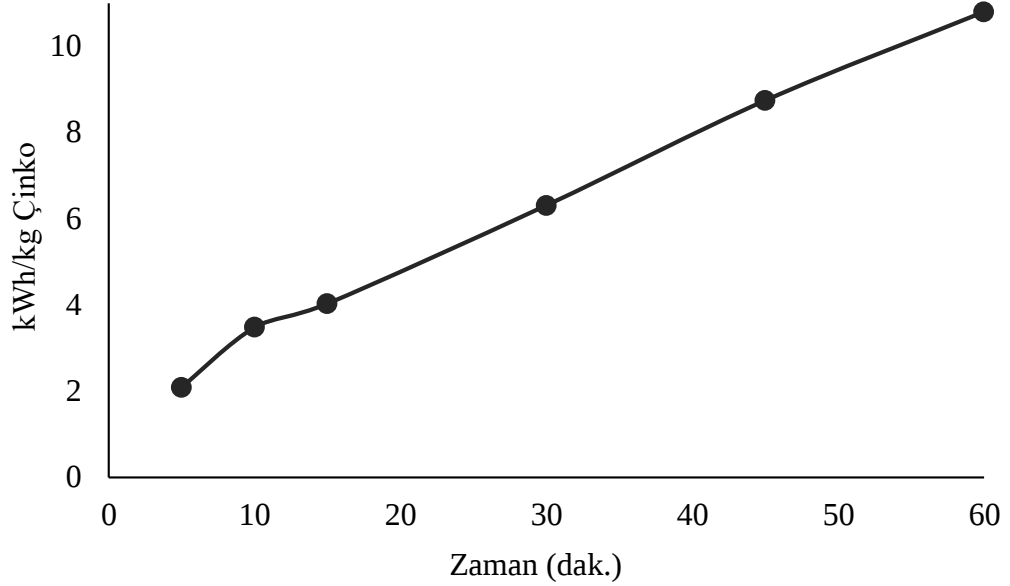
Zaman	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	Sıcaklık	pH	İletkenlik	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi	Elektrot tüketimi	Enerji tüketimi	Faraday	kWh/Kg Çinko
dakika	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		µS/cm	%	%	%	%	mg/m ³	kWh/m ³	(F/m ³)	
0	494,1	213	14,3	44,2	23,9	9	1684	0	0	0	0	0	0	0	0
5	295,1	152	3,1	11	-	-	-	40,28	28,55	78,32	75,11	0,005	0,42	3,11 x10 ⁻⁰⁶	2,09
10	255,1	129	0,9	5,2	-	-	-	48,37	39,27	93,71	88,24	0,008	0,83	6,22 x10 ⁻⁰⁶	3,49
15	184,4	121	0,1	2,3	-	-	-	62,68	43,12	99,30	94,80	0,013	1,25	9,33 x10 ⁻⁰⁶	4,04
30	98,2	84,5	0,009	1	-	-	-	80,13	60,28	99,94	97,74	0,05	2,5	1,87 x10 ⁻⁰⁵	6,31
45	65,3	71,2	0	0	-	-	-	86,78	66,53	100	100	0,15	3,75	2,80 x10 ⁻⁰⁵	8,74
60	31,2	55	0	0	23,9	9,3	1897	93,70	74,15	100	100	0,4	5	3,73 x10 ⁻⁰⁵	10,80



Şekil 4.16. Atıksudan zamana bağlı çinko, KOİ, yağ ve gres ve AKM giderimi (EK), (1 A, 4,8mA/cm², pH 9)



Şekil 4.17. Atıksudan çinko gideriminde zamana bağlı enerji tüketimi (EK), (1 A, 4,8mA/cm², pH 9)



Şekil 4.18. Atıksudan çinko gideriminde zamana bağlı enerji tüketimi (EK), (1 A, 4,8mA/cm², pH 9)

Çizelge 4.12’de ve Şekil 4.16-4.18’den de görüldüğü üzere sabit pH ve akım şartlarında deney süresi 60. dakikaya kadar uzatılmıştır. Tüm parametrelerde 60. dakika sonunda yüksek giderim verimlerine ulaşılmıştır. Ancak enerji tüketimi göz önünde bulundurulduğunda 30 dakika proses süresinden sonra enerji tüketiminde 2 kat artış söz konusu olmuştur. Enerji tüketimi 2,5 Wh değerinden 5 Wh değerine ulaşmıştır.

4.3. Yalnız Ultrafiltrasyon prosesi ile Yürütülen Çalışmalar

Bu bölümde yalnız UF prosesi kullanılarak atıksuda kirletici giderim verimi incelenmiştir. Burada amaç hibrit proses çalışmalarından önce elde edilen sonuçlar ile çalışmada kullanılan diğer prosesler arasında karşılaştırma yaparak hibrit sistemin etkisini ortaya koymaktır. UF’da giderim verimi üzerine pH ve zaman parametrelerinin etkileri araştırılmış olup, bu parametrelerin etkileri aşağıda detaylı bir şekilde ele alınmıştır. UF deneylerinde 1 bar basıncın üzerine çıkılmamıştır. 10 KDa molekül ağırlığı ayırma sınırında UF membranı kullanılmıştır.

4.3.1. Ultrafiltrasyonda pH'nın etkisi

Bu bölümde atıksu pH'sının çinko giderim verimi üzerine olan etkisi incelenmiştir. Çinko konsantrasyonu 494,1 mg/L olan atıksu için farklı pH ve zaman değerlerinde deneyler yürütülmüştür. Deneyler pH; 3, 5, 7, 8, 9 ve 11 olarak seçilmiştir. Bu amaçla deneysel çalışmalardan önce atıksuyun pH'sı H_2SO_4 veya NaOH kullanılarak istenilen seviyelere getirilmiştir. Deney şartları ve sonuçlar bütün parametreler için sırasıyla Çizelge 4.13-4.18 ve Şekil 4.19-4.22'de gösterilmiştir. Şekil 4.19'dan da görüldüğü üzere asidik ve nötr pH değerlerinde çinko giderimi gerçekleşmemiştir. pH 8 değerinde 60. dk'da %2, pH 9'da %20 ve pH 11'de %26 çinko giderimi olmuştur. KOİ giderimi ise 30 dakika proses süresinde bütün pH değerlerinde %40-50 aralığındadır (Şekil 4.20). Yağ ve gres ile AKM giderim verimi bütün pH deneylerinde %100'e ulaşmıştır (4.21-4.22). Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde UF prosesi ile yalnızca 10-100 nm boyutundaki kirleticiler giderilmektedir ve UF membranı metalin kolaylıkla geçmesine izin verir. Bu yüzden metal gideriminde UF genellikle farklı proseslerle kombine edilerek kullanılır (Carolin vd, 2017). Zamanla akı azalması ise bütün pH değerlerinde %9 seviyelerinde olmuştur (Şekil 4.23).

Çizelge 4.13. Atıksu için pH 3 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen UF deney sonuçları

Zaman	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	İletkenlik	Sıcaklık	pH	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi
dakika	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µS/cm	°C		%	%	%	%
0	494,1	212,73	14,3	44,2	1684	23,9	3	0	0	0	0
5	494,1	189,4	1,1	0	-	-	-	0	10,97	92,31	100
15	494	141,5	0	0	-	-	-	0,02	33,48	100	100
30	494	138,5	0	0	-	-	-	0,02	34,89	100	100
60	494,1	123,5	0	0	1968	23,9	3,53	0	41,95	100	100

Çizelge 4.14. Atıksu için pH 5 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen UF deney sonuçları

Zaman	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	İletkenlik	Sıcaklık	pH	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi
dakika	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µS/cm	°C		%	%	%	%
0	494,1	212,73	14,3	44,2	1684	23,9	5	0	0	0	0
5	494	168,6	1,2	0	-	-	-	0,02	20,74	91,61	100
15	494	142,2	0	0	-	-	-	0,02	33,15	100	100
30	493,9	119,8	0	0	-	-	-	0,04	43,68	100	100
60	493,8	112,1	0	0	1943	23,9	5,3	0,06	47,30	100	100

Çizelge 4.15. Atıksu için pH 7 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen UF deney sonuçları

Zaman	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	İletkenlik	Sıcaklık	pH	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi
dakika	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µS/cm	°C		%	%	%	%
0	494,1	212,73	14,3	44,2	1684	23,9	7	0	0	0	0
5	493,8	165,6	1,2	0	-	-	-	0,06	22,15	91,61	100
15	493,7	142,3	0	0	-	-	-	0,08	33,11	100	100
30	493,8	118,2	0	0	-	-	-	0,06	44,44	100	100
60	493,6	110	0	0	1972	23,9	7,2	0,10	48,29	100	100

Çizelge 4.16. Atıksu için pH 8 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen UF deney sonuçları

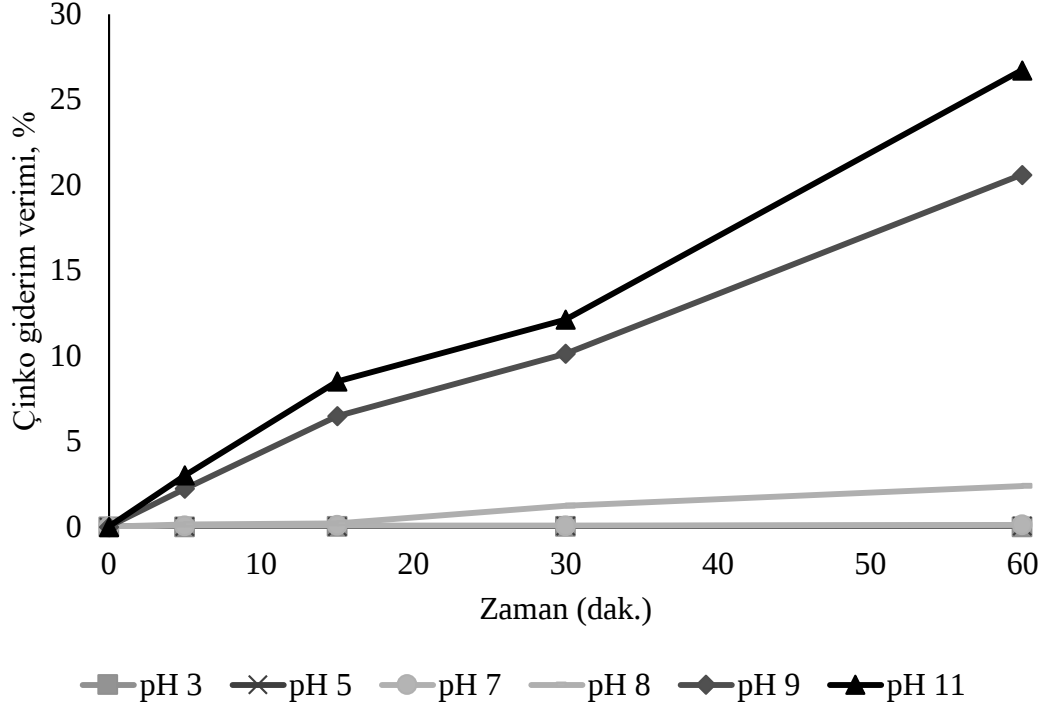
Zaman	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	İletkenlik	Sıcaklık	pH	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi
dakika	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µS/cm	°C		%	%	%	%
0	494,1	212,73	14,3	44,2	1684	23,9	8	0	0	0	0
5	493,4	161,4	1,3	0	-	-	-	0,14	24,13	90,91	100
15	493,1	141,7	0	0	-	-	-	0,20	33,39	100	100
30	488	113,6	0	0	-	-	-	1,24	46,60	100	100
60	482,3	100,2	0	0	1978	23,9	8,14	2,39	52,90	100	100

Çizelge 4.17. Atıksu için pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen UF deney sonuçları

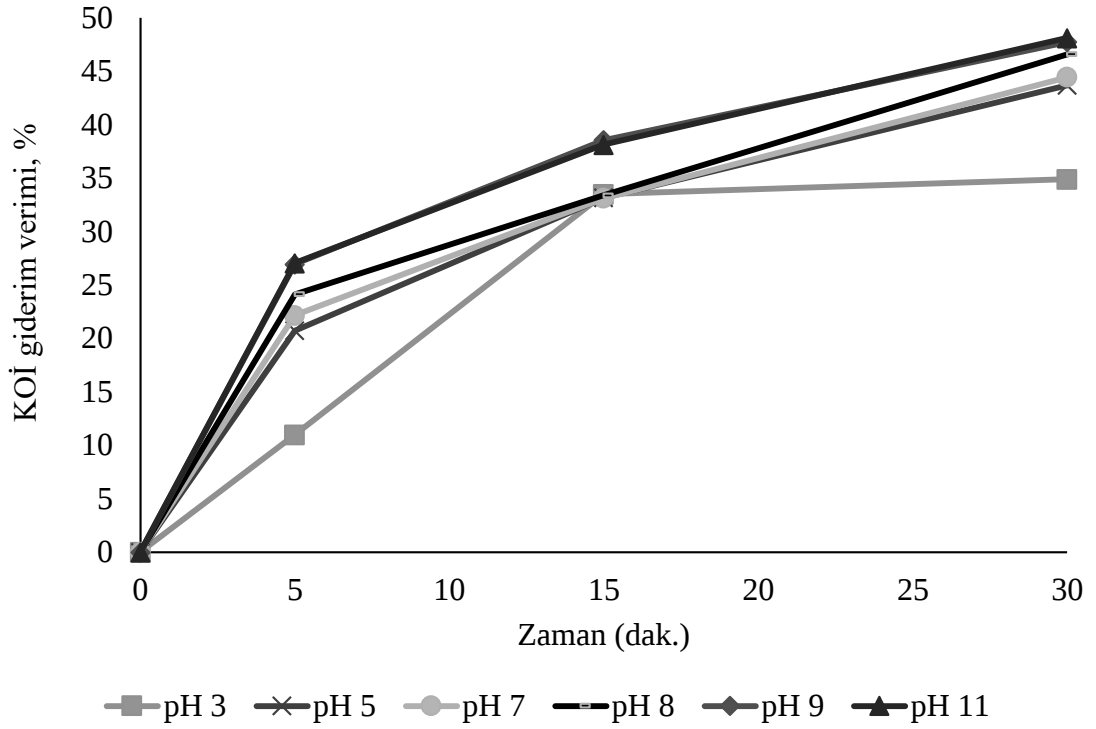
Zaman	Çinko	KOI	Yağ ve Gres	AKM	İletkenlik	Sıcaklık	pH	Çinko giderim verimi	KOI giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi
dakika	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µS/cm	°C		%	%	%	%
0	494,1	212,73	14,3	44,2	1684	23,9	9	0	0	0	0
5	483,1	155,4	1,1	0	-	-	-	2,23	26,95	92,31	100
15	462,1	130,7	0	0	-	-	-	6,48	38,56	100	100
30	444,1	111,2	0	0	-	-	-	10,12	47,73	100	100
60	392,3	95,4	0	0	1975	23,9	9,33	20,60	55,15	100	100

Çizelge 4.18. Atıksu için pH 10 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen UF deney sonuçları

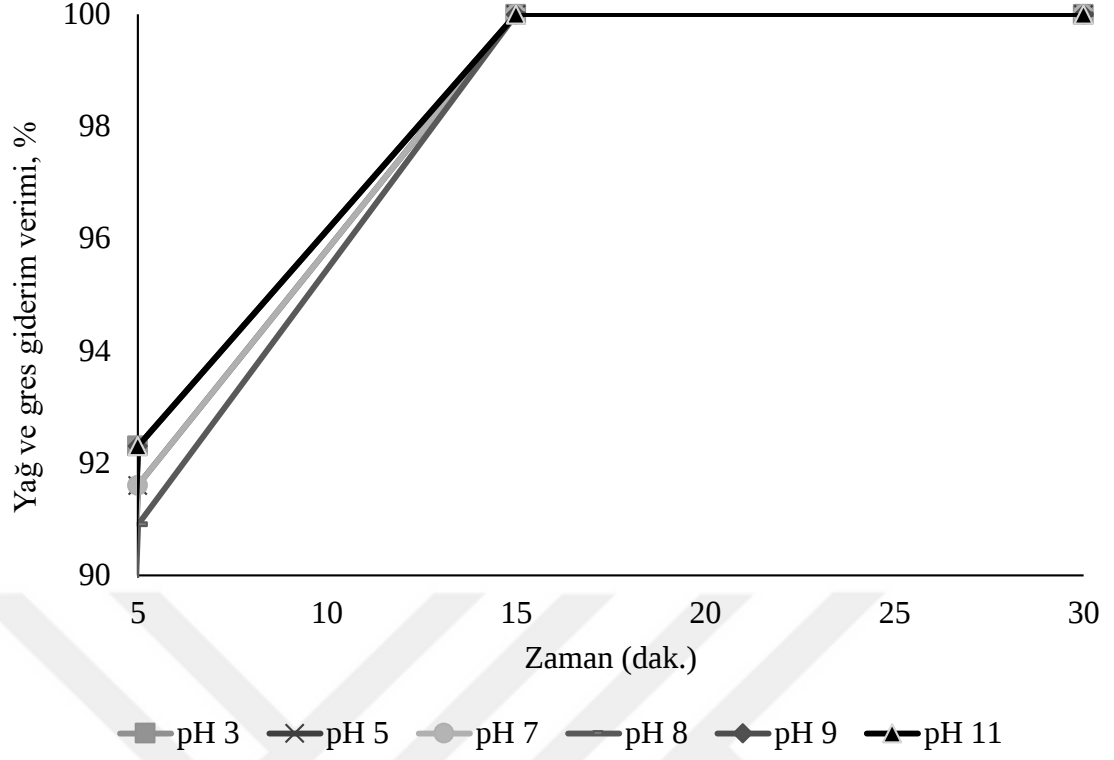
Zaman	Çinko	KOI	Yağ ve Gres	AKM	İletkenlik	Sıcaklık	pH	Çinko giderim verimi	KOI giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi
dakika	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µS/cm	°C		%	%	%	%
0	494,1	212,73	14,3	44,2	1684	23,9	11	0	0	0	0
5	479,2	155,2	1,1	0	-	-	-	3,02	27,04	92,31	100
15	452,1	131,6	0	0	-	-	-	8,5	38,14	100	100
30	434,2	110,4	0	0	-	-	-	12,12	48,10	100	100
60	362,1	90,4	0	0	1972	23,9	11,51	26,72	57,50	100	100



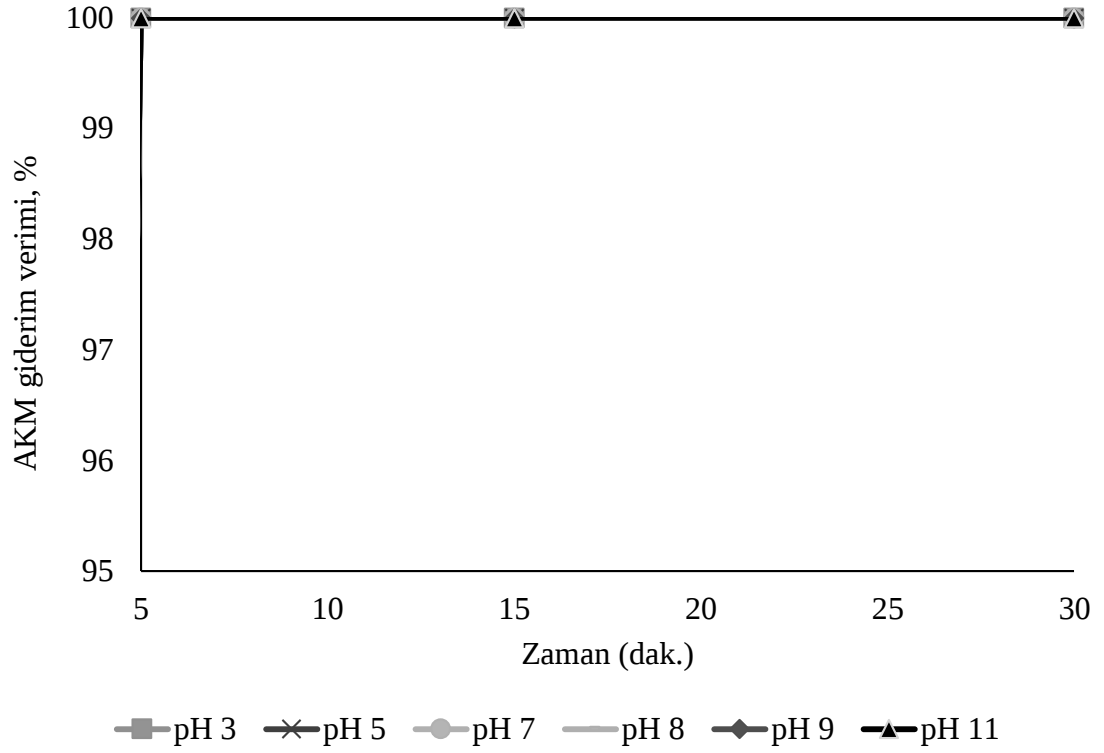
Şekil 4.19. Atıksudan çinko giderimi (UF)



Şekil 4.20. Atıksudan KOİ giderimi (UF)



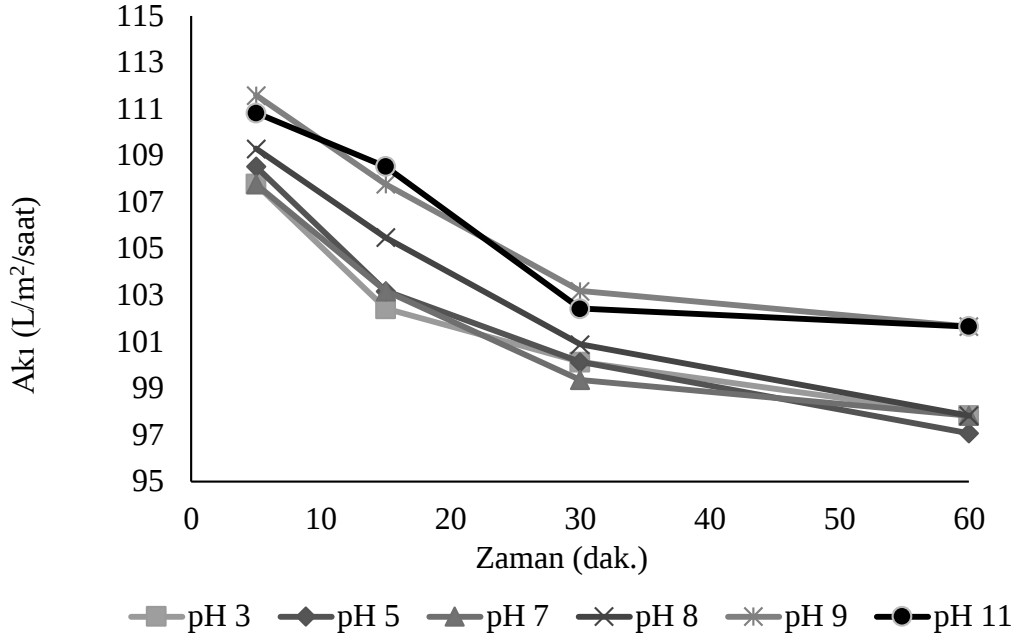
Şekil 4.21. Atıksudan yağ ve gres giderimi (UF)



Şekil 4.22. Şekil 4.20. Atıksudan AKM giderimi (UF)

Çizelge 4.19. Atıksu için pH ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilen UF akı deney sonuçları

pH 3			pH 5		pH 7	
Zaman (dakika)	Akış oranı (mL/dakika)	Akı (L/m ² .saat) UF	Akış oranı (mL/dakika)	Akı (L/m ² .saat) UF	Akış oranı (mL/dakika)	Akı (L/m ² .saat) UF
5	14,1	107,77	14,2	108,54	14,1	107,77
15	13,4	102,42	13,5	103,18	13,5	103,18
30	13,1	100,13	13,1	100,13	13	99,36
60	12,8	97,83	12,7	97,07	12,8	97,83
pH 8			pH 9		pH 11	
Zaman (dakika)	Akış oranı (mL/dakika)	Akı (L/m ² .saat) UF	Akış oranı (mL/dakika)	Akı (L/m ² .saat) UF	Akış oranı (mL/dakika)	Akı (L/m ² .saat) UF
5	14,3	109,29	14,6	111,59	14,5	110,83
15	13,8	105,47	14,1	107,77	14,2	108,54
30	13,2	100,89	13,5	103,18	13,4	102,42
60	12,8	97,83	13,3	101,66	13,3	101,66



Şekil 4.23. UF akı deney sonuçları

4.4. Elektrokoagülasyon-Ultrafiltrasyon Hibrit Prosesi ile Yürütülen Çalışmalar

Bu bölümde çelik elektrotlar kullanılarak EK-UF yöntemiyle çinko kaplama atıksuyunun arıtılabilirliği araştırılmıştır. EK ve UF deneyleri ayrı ayrı olarak denendikten sonra hibrit sistem oluşturularak EK-UF deneyleri yürütülmüştür. EK destekli UF çalışmaları ile ilgili literatür incelendiğinde; Sardari vd, 2018; yapmış oldukları çalışmalarında kanatlı hayvan işleme atıksularının arıtımında EK ardından UF prosesinin kullanmışlardır. Yağ ve gres ve toplam AKM parametrelerini incelemişlerdir. 5 dakika EK proses süresinde bu parametrelerde %85 giderim verimi elde ederek yalnız UF prosesi kullandıkları duruma kıyasla EK-UF prosesi ile düşük akı azalması tespit etmişlerdir. Sasson vd, 2011; kolloidal kirliliğin azaltılması için EK-membran filtrasyonu hibrit sistem konulu çalışmalarında UF ve MF membranlarını kullanmışlardır. EK ön işlemi olmadan yalnız membran prosesleri kullandıklarında membranlarda ciddi kirlenmeler gözlemlemişlerdir. Kumarasinghe vd, 2009; madencilik faaliyeti ile kirlenen sudan EK-UF hibrit prosesi ile ağır metal giderimi üzerine bir çalışma yapmışlardır. EK ve EK-UF hibrit sistemde zaman, pH ve akım yoğunluğunun etkilerini incelemişlerdir. Ağır metal olarak bakır, kurşun ve kadmium iyonları analiz edilmiştir. Ağır metal gideriminde EK-UF hibrit sistemin yüksek çözelti pH değerlerinde çok etkili olduğunu asidik koşullarda ise giderim veriminin çok düşük değerlerde olduğunu bulmuşlardır. Han vd, 2015; Sülfonatlı

hümik asidin hibrit EK-UF prosesi ile giderimi konulu çalışmalarında akım yoğunluğunun ve elektroliz süresinin artması ve pH'nın azalması durumunda sülfonatlı hümik asit giderim veriminin arttığını görmüşlerdir. 5 kDa, 8kDa ve 10 kDa UF membranını karşılaştırmış ve 5 kDa UF membranı ile hibrit sistemde %95'den daha yüksek giderim verimine ulaşmışlardır.

Hibrit sistemde öncelikle belirlenen sabit akım değerinde (1 A), atıksuyun kendi iletkenlik değerinde (1600 $\mu\text{S}/\text{cm}$) ve 0-60 dakika proses süresinde (5, 15, 30 ve 60) pH denemeleri yapılmıştır. Deneyler pH 3, 5, 7, 8, 9 ve 11 değerlerinde yürütülmüştür. pH etkisinin belirlenmesinden sonra EK-UF deneylerinde akımın/akım yoğunluğunun etkisi incelenmiştir. Deneyler pH 9 değerinde ve 0-60 dakika proses süresinde, 0,5, 1, 2 ve 3 Amperde deneyler yürütülmüştür. Her bir deney setinde UF sistemi akış oranı tespit edilerek akı değerleri hesaplanmıştır. Bu parametrelerin etkileri aşağıda detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

4.4.1. Hibrit sistemde pH

Bu bölümde atıksu pH'sının çinko giderim verimi üzerine olan etkisi incelenmiştir. Çinko konsantrasyonu 494,1 mg/L olan atıksu için akım sabit tutularak farklı pH ve zaman değerlerinde deneyler yürütülmüştür. pH; 3, 5, 7, 8, 9 ve 11 olarak seçilmiştir. Bu amaçla deneysel çalışmalardan önce atıksuyun pH'sı H_2SO_4 veya NaOH kullanılarak istenilen seviyelere getirilmiştir. Deney şartları ve sonuçlar bütün parametreler için sırasıyla Çizelge 4.20-4.25 ve Şekil 4.24-4.29'de gösterilmiştir.

Şekil 4.24'den de görüldüğü gibi çinko giderimi asidik pH değerlerinde düşüktür. Ancak pH arttıkça giderim verimliliği artmaktadır. En iyi verim pH 9 ve 11 değerlerinde elde edilmiştir. Çelik anot-çelik katot elektrot çifti ile yapılan hibrit sistem deneylerinde 4,8 mA/cm^2 akım yoğunluğunda ve pH 3 değerinde 5 dk elektroliz süresinde % 5 çinko giderim verimi elde edilirken aynı sürede pH 9'da % 89 verim elde edilmiştir. pH 9'da 60 dakikalık proses süresi sonunda ise %100'e yakın çinko giderim verimine ulaşılmıştır. Bu süre (60 dakika) sonunda enerji tüketimi ise 0,42 Wh'ten 5 Wh'e ulaşmıştır. Şekil 4.29'dan da görüldüğü üzere 1 kg çinko başına enerji tüketim ise; pH 3 değerinde 5 dakika proses süresinde 35 kWh/kg iken 60 dakika proses süresinde 29 kWh/kg değerine düşmüştür. pH 9'da ise 60 dakika sonunda enerji tüketimi 10,89 kWh/kg olarak belirlenmiştir. Enerji tüketimi

Çinko giderim verimine bağlı olarak alkali değerlerde daha dk seviyelerdedir. Hibrit sistemde KOİ giderim verimi ise 60 dk deney süresinde pH 3 değerinde %35 iken pH 9 değerlerinde %93 seviyelerine ulaşmıştır. Yağ ve Gres ile AKM parametreleri incelendiğinde ise giderim verim 60 dakika proses süresinde bütün pH değerlerinde %100'e yakın değerdedir. Akıdaki değişime ilişkin sonuçlar ise izelge 4.26'da sunulmuştur. Çizelge 4.26 ve şekil 4.30'da görüldüğü üzere pH 3 değerinde zamanla akı azalması %4 seviyelerinde olmuştur. Ancak pH 5 değerinden sonra akıda artış meydana gelmiştir. Bu artış alkali değerlerde ortalama %10 seviyelerinde olmuştur. EK prosesi hibrit sistemde UF'da akıyı olumlu yönde etkilemiştir.

Hibrit sistemin performansı değerlendirildiğinde pH 9'da EK prosesinde çinko giderimi 5 dakika proses süresinde %40 seviyelerindeyken UF prosesi ile bu verim 5.dakikada %89 seviyelerine ulaşmıştır. 60. dakika ise EK prosesinde çinko giderimi %94 seviyelerindeyken UF prosesi ile bu verim %100'e yakın seviyelere ulaşmıştır. Alıcı ortam deşarj standartları açısından değerlendirildiğinde çinko konsantrasyonu 5 mg/L değerinin altına ancak hibrit proses etkisi ile düşmektedir. pH 9 ve pH 11 değerlerinde 60 dakika proses süresinde %100'e yakın giderim verimi sağladığı grlmştir.

Hibrit sistemde pH 5 ve 7 aralığında giderim mekanizması; EK prosesi sonucunda oluşan demir hidroksit ve alüminyum hidroksit iyonlarının atıksu içerisinde bulunan çinko ve diğer kirleticileri bünyelerine almaları ile UF membranından geçemeyecek boyutta floklar oluşması esasına dayanmaktadır. Demir hidroksitler için pH aralığı daha geniştir (pH 4-12). Alkali şartlarda giderim mekanizması hem demir hidroksit iyonlarının atıksu içerisinde bulunan çinko ve diğer kirleticileri bünyelerine almaları hemde oluşan OH⁻ iyonu etkisiyle çinko metalinin çinko hidroksit formunda kelebilmesine bağlıdır. Bu duruma bağlı olarak deneysel çalışmada asidik şartlarda daha düşük, alkali şartlarda daha yüksek giderim verimleri elde edilmiştir (Mollah vd, 2001).

Çizelge 4.20. Atıksu için 1 amper akım ve pH 3 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen hibrit sistem deney sonuçları

Zaman	Proses	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	Sıcaklık	Son pH	Son İletkenlik	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi	Elektrot tüketimi	Enerji tüketimi	Faraday	kWh/Kg Çinko
dakika		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		µS/cm	%	%	%	%	mg/m ³	kWh/m ³	F/m ³	
0	-	494,1	212,73	14,3	44,2	23,9	3	1684	0	0	0	0	0	0	0	0
5	EK	482,4	198,5	3,2	9,5	-	-	-	2,37	6,69	77,62	78,51	3 x10 ⁻⁰⁶	0,42	3,1 x10 ⁻⁰⁶	35,61
15	EK	465	182,5	0,3	2,3	-	-	-	5,89	14,21	97,90	94,80	-	1,25	9,3 x10 ⁻⁰⁶	42,96
30	EK	387,3	164,2	0,004	1,5	-	-	-	21,62	22,81	99,97	96,61	-	2,5	1,9 x10 ⁻⁰⁶	23,41
60	EK	322,1	152,2	0	0,4	-	-	-	34,81	28,45	100	99,10	0,0003	5	3,7 x10 ⁻⁰⁶	29,07
5	EK-UF	470,1	195,2	1,2	0	-	-	-	4,86	8,24	91,61	100	-	-	-	-
15	EK-UF	451,2	156,3	0,5	0	-	-	-	8,68	26,53	96,50	100	-	-	-	-
30	EK-UF	351,4	144	0	0	-	-	-	28,88	32,31	100	100	-	-	-	-
60	EK-UF	312,2	138,2	0	0	23,9	3,5	1848	36,81	35,04	100	100	-	-	-	-

Çizelge 4.21. Atıksu için 1 amper akım ve pH 5 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen hibrit sistem deney sonuçları

Zaman	Proses	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	Sıcaklık	Son pH	Son İletkenlik	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi	Elektrot tüketimi	Enerji tüketimi	Faraday	kWh/Kg Çinko
dakika		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		µS/cm	%	%	%	%	mg/m ³	kWh/m ³	F/m ³	
0	-	494,1	212,73	14,3	44,2	23,9	5	1684	0	0	0	0	0	0	0	0
5	EK	445,2	186	3,4	7,1	-	-	-	9,90	12,57	76,24	83,94	8 x10 ⁻⁰⁵	0,42	3,1 x10 ⁻⁰⁶	8,52
15	EK	405,5	165,3	0,4	1,6	-	-	-	17,93	22,30	97,20	96,38	-	1,25	9,3 x10 ⁻⁰⁶	14,11
30	EK	373,8	156,1	0	0,5	-	-	-	24,35	26,62	100	98,87	-	2,5	1,9 x10 ⁻⁰⁵	20,78
60	EK	321	135,4	0	0,8	-	-	-	35,03	36,35	100	98,19	0,0003	5	3,7 x10 ⁻⁰⁵	28,89
5	EK-UF	397,8	154	0,5	0	-	-	-	19,49	27,61	96,50	100	-	-	-	-
15	EK-UF	356	141,5	0	0	-	-	-	27,95	33,48	100	100	-	-	-	-
30	EK-UF	312,5	121	0	0	-	-	-	36,75	43,12	100	100	-	-	-	-
60	EK-UF	298	100,2	0	0	23,9	5,5	1865	39,69	52,90	100	100	-	-	-	-

Çizelge 4.22. Atıksu için 1 amper akım ve pH 7 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen hibrit sistem deney sonuçları

Zaman	Proses	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	Sıcaklık	Son pH	Son İletkenlik	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi	Elektrot tüketimi	Enerji tüketimi	Faraday	kWh/Kg Çinko
dakika		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		µS/cm	%	%	%	%	mg/m ³	kWh/m ³	F/m ³	
0	-	494,1	212,73	14,3	44,2	23,9	7	1684	0	0	0	0	0	0	0	0
5	EK	404	175	3,2	7,5	-	-	-	18,26	17,74	77,62	83,03	0,0007	0,42	3,1 x10 ⁻⁰⁶	4,62
15	EK	315	167,5	0,3	1,5	-	-	-	36,27	21,26	97,90	96,61	-	1,25	9,3 x10 ⁻⁰⁶	6,98
30	EK	297,8	148	0	1,1	-	-	-	39,75	30,43	100	97,51	-	2,5	1,9 x10 ⁻⁰⁵	12,74
60	EK	285,5	135	0	0	-	-	-	42,24	36,54	100	100	0,0034	5	3,7 x10 ⁻⁰⁵	23,97
5	EK-UF	300,5	152,5	1,4	0	-	-	-	39,20	28,31	90,21	100	-	-	-	-
15	EK-UF	280,2	140,4	0,5	0	-	-	-	43,31	34	96,50	100	-	-	-	-
30	EK-UF	256,4	135,5	0	0	-	-	-	48,13	36,30	100	100	-	-	-	-
60	EK-UF	232	128,8	0	0	23,9	7,2	1878	53,07	39,45	100	100	-	-	-	-

Çizelge 4.23. Atıksu için 1 amper akım ve pH 8 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen hibrit sistem deney sonuçları

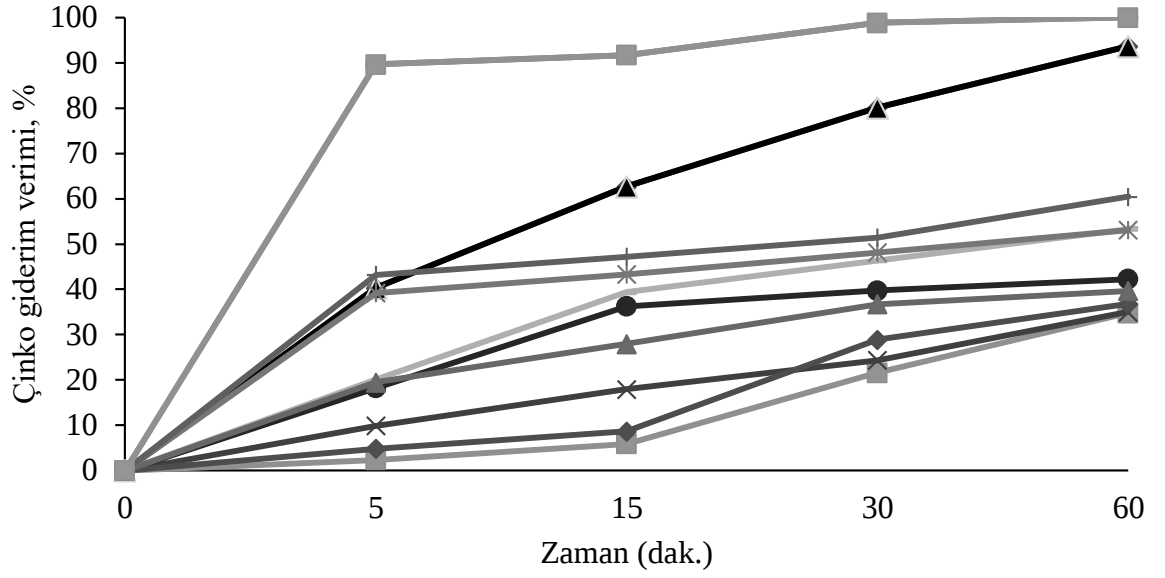
Zaman	Proses	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	Sıcaklık	Son pH	Son İletkenlik	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi	Elektrot tüketimi	Enerji tüketimi	Faraday	kWh/Kg Çinko
dakika		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		µS/cm	%	%	%	%	mg/m ³	kWh/m ³	F/m ³	
0	-	494,1	212,73	14,3	44,2	23,9	8	1684	0	0	0	0	0	0	0	0
5	EK	395	172	2,5	6,5	-	-	-	20,06	19,15	82,52	85,29	0,0007	0,42	3,1 x10 ⁻⁰⁶	4,20
15	EK	299,5	142,1	0,1	1,3	-	-	-	39,38	33,20	99,30	97,06	-	1,25	9,3 x10 ⁻⁰⁶	6,42
30	EK	265	136	0,005	0,5	-	-	-	46,37	36,07	99,97	98,87	-	2,5	1,9 x10 ⁻⁰⁵	10,91
60	EK	230,5	115	0	0	-	-	-	53,35	45,94	100	100	0,0041	5	3,7 x10 ⁻⁰⁵	18,97
5	EK-UF	280,5	155,5	0,4	0	-	-	-	43,23	26,90	97,20	100	-	-	-	-
15	EK-UF	260,8	142	0	0	-	-	-	47,22	33,25	100	100	-	-	-	-
30	EK-UF	240	112,5	0	0	-	-	-	51,43	47,12	100	100	-	-	-	-
60	EK-UF	195,5	98,6	0	0	23,9	8,3	1893	60,43	53,65	100	100	-	-	-	-

Çizelge 4.24. Atıksu için 1 amper akım ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen hibrit sistem deney sonuçları

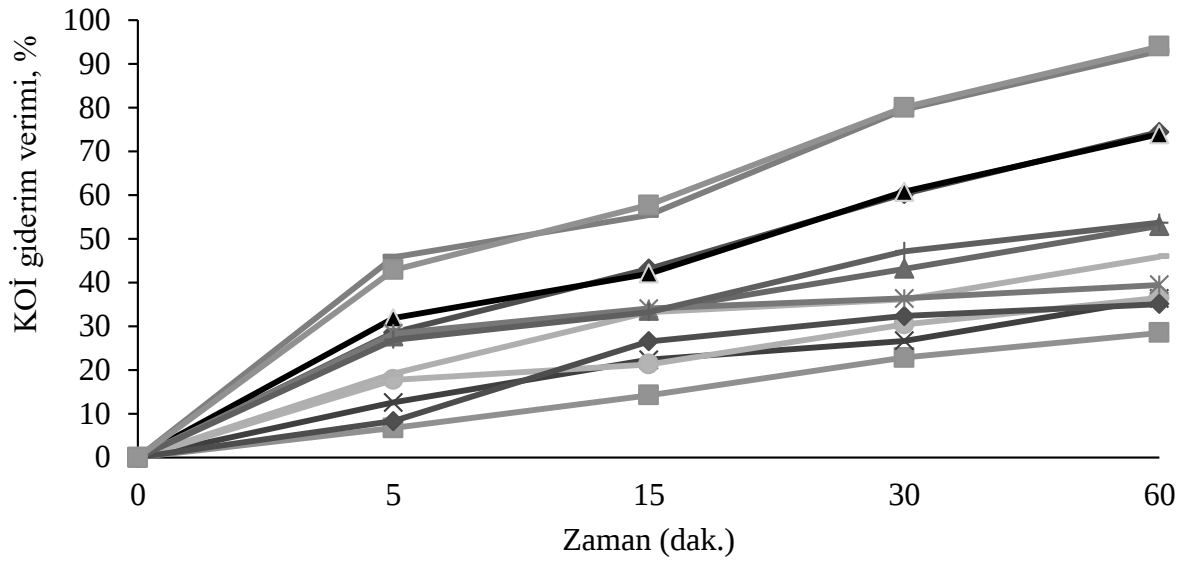
Zaman	Proses	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	Sıcaklık	Son pH	Son İletkenlik	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi	Elektrot tüketimi	Enerji tüketimi	Faraday	kWh/Kg Çinko
dakika		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		µS/cm	%	%	%	%	mg/m ³	kWh/m ³	F/m ³	
0	-	494,1	212,73	14,3	44,2	23,9	9	1684	0	0	0	0	0	0	0	0
5	EK	285	145	2,8	9,5	-	-	-	42,32	28,55	78,32	75,11	0,002	0,42	3,1 x10 ⁻⁰⁶	1,99
15	EK	185,8	123,4	0,2	3,1	-	-	-	62,39	43,12	99,30	94,80		1,25	9,3 x10 ⁻⁰⁶	4,05
30	EK	88	83,5	0,002	0,5	-	-	-	82,19	60,28	100	97,74		2,5	1,9 x10 ⁻⁰⁵	6,16
60	EK	35	55,5	0	0	-	-	-	92,92	74,38	100	100	0,18	5	3,7 x10 ⁻⁰⁵	10,89
5	EK-UF	62,5	121,5	0	0	-	-	-	87,35	45,80	96,50	100	-	-	-	-
15	EK-UF	40,5	90	0	0	-	-	-	91,80	55,34	100	100	-	-	-	-
30	EK-UF	6,2	42,5	0	0	-	-	-	98,75	79,60	100	100	-	-	-	-
60	EK-UF	0	12,8	0	0	23,9	9,3	1968	100	92,95	100	100	-	-	-	-

Çizelge 4.25. Atıksu için 1 amper akım ve pH 11 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen hibrit sistem deney sonuçları

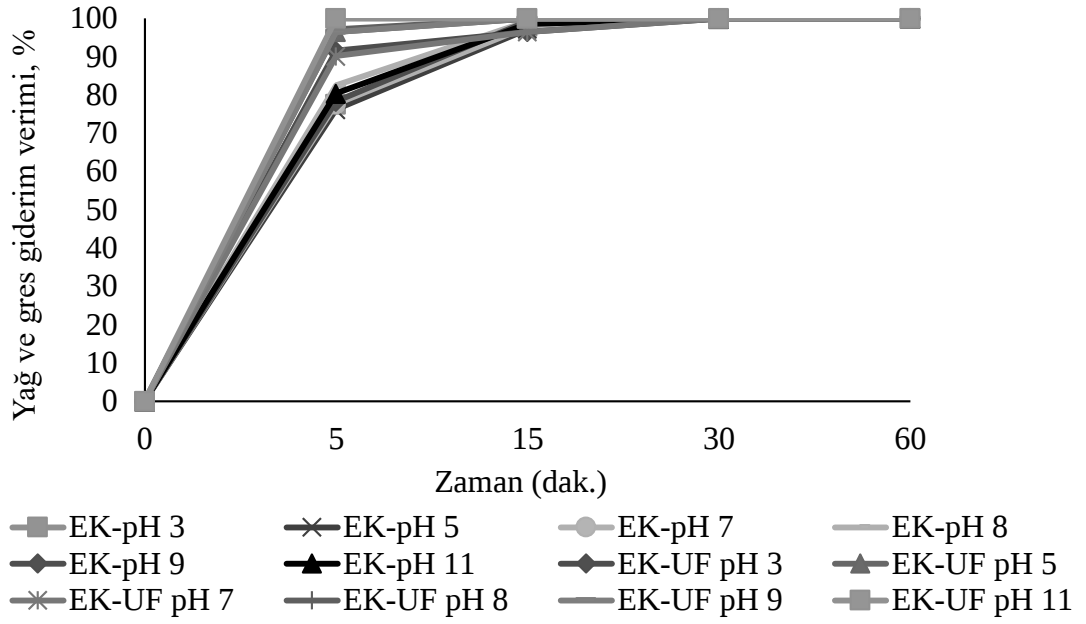
Zaman	Proses	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	Sıcaklık	Son pH	Son İletkenlik	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi	Elektrot tüketimi	Enerji tüketimi	Faraday	kWh/Kg Çinko
dakika		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		µS/cm	%	%	%	%	mg/m ³	kWh/m ³	F/m ³	
0	-	494,1	212,73	14,3	44,2	23,9	9	1684	0	0	0	0	0	0	0	0
5	EK	285	145	2,8	9,5	-	-	-	42,32	31,84	80,42	78,51	0,002	0,42	3,1 x10 ⁻⁰⁶	1,99
15	EK	185,8	123,4	0,2	3,1	-	-	-	62,40	41,99	98,60	92,99		1,25	9,3 x10 ⁻⁰⁶	4,05
30	EK	88	83,5	0,002	0,5	-	-	-	82,19	60,75	99,99	98,87		2,5	1,9 x10 ⁻⁰⁵	6,16
60	EK	35	55,5	0	0	-	-	-	92,92	73,91	100	100	0,18	5	3,7 x10 ⁻⁰⁵	10,89
5	EK-UF	62,5	121,5	0	0	-	-	-	87,35	42,89	100	100	-	-	-	-
15	EK-UF	40,5	90	0	0	-	-	-	91,80	57,69	100	100	-	-	-	-
30	EK-UF	6,2	42,5	0	0	-	-	-	98,75	80,02	100	100	-	-	-	-
60	EK-UF	0	12,8	0	0	23,9	9,3	1968	100	93,98	100	100	-	-	-	-



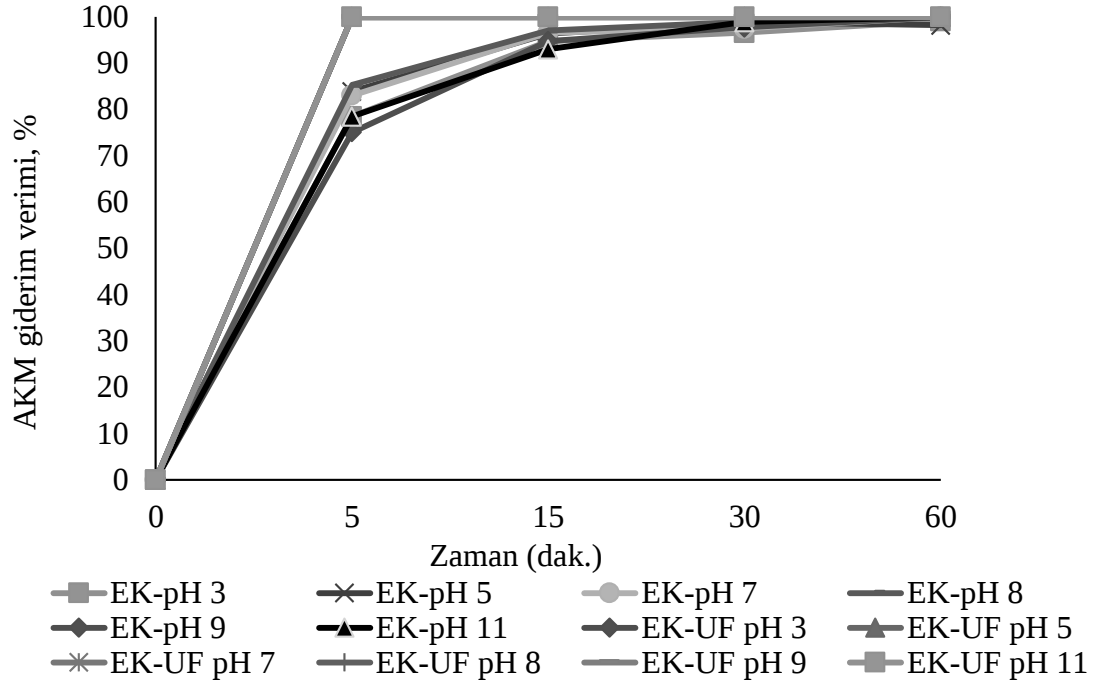
Şekil 4.24. Atıksudan çinko giderimi (EK-UF), (1 A, 4,8 mA/cm²)



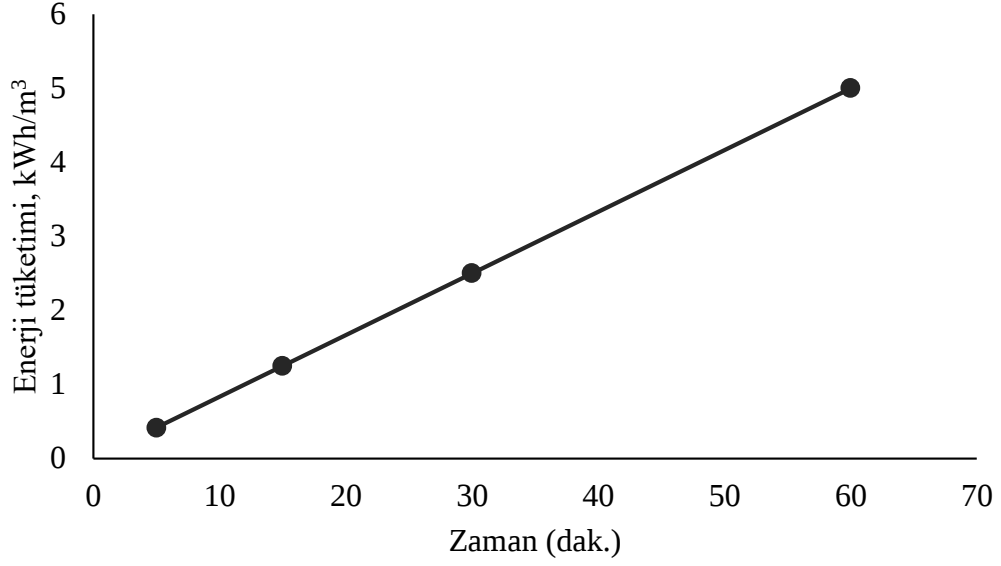
Şekil 4.25. Atıksudan KOİ giderimi (EK-UF), (1 A, 4,8 mA/cm²)



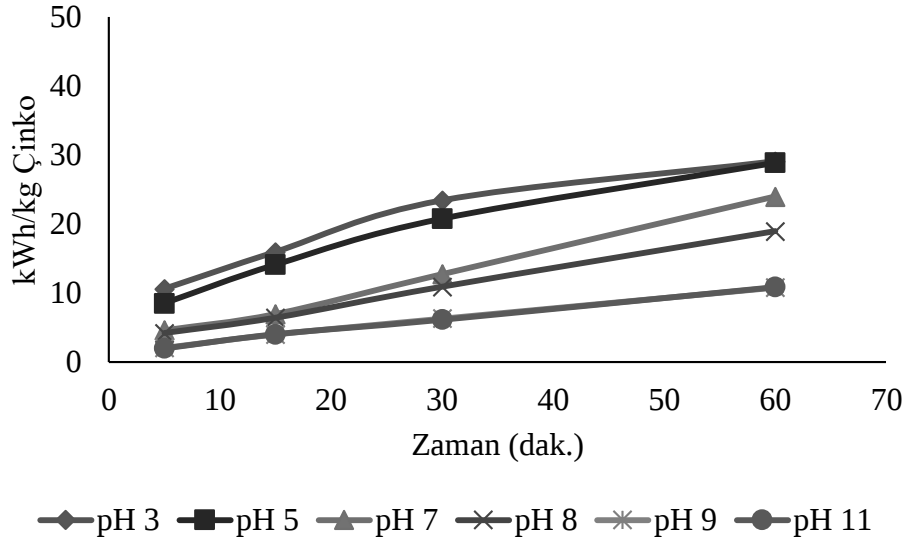
Şekil 4.26. Atıksudan yağ ve gres giderimi (EK-UF), (1 A, 4,8 mA/cm²)



Şekil 4.27. Atıksudan AKM giderimi (EK-UF), (1 A, 4,8 mA/cm²)



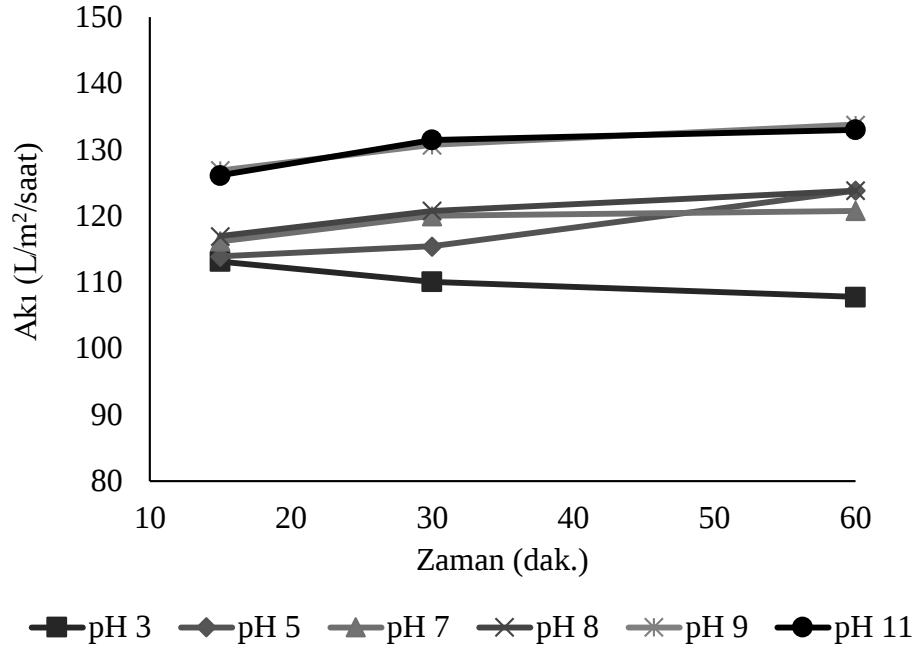
Şekil 4.28. Çinko gideriminde zamana bağlı enerji tüketimi, (EK-UF), (pH 3-9, 1 A, 4,8 mA/cm²)



Şekil 4.29. Hibrit proseste atıksudan çinko gideriminde zamana ve pH'ya bağlı enerji tüketimi, (1 A, 4,8 mA/cm²)

Çizelge 4.26. Atıksu için pH ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilen hibrit sistem akı deney sonuçları

pH 3			pH 5		pH 7	
Zaman (dakika)	Akış oranı (mL/dakika)	Akı (L/m ² .saat) UF	Akış oranı (mL/dakika)	Akı (L/m ² .saat) UF	Akış oranı (mL/dakika)	Akı (L/m ² .saat) UF
5	14,8	113,121	14,9	113,89	15,2	116,18
15	14,4	110,06	15,1	115,41	15,7	120
30	14,1	107,77	16,2	123,82	15,8	120,76
60	14,2	108,54	16,7	127,64	16,1	123,06
pH 8			pH 9		pH 11	
Zaman (dakika)	Akış oranı (mL/dakika)	Akı (L/m ² .saat) UF	Akış oranı (mL/dakika)	Akı (L/m ² .saat) UF	Akış oranı (mL/dakika)	Akı (L/m ² .saat) UF
5	15,3	116,94	16,6	126,88	16,5	126,11
15	15,8	120,76	17,1	130,70	17,2	131,46
30	16,2	123,82	17,5	133,76	17,4	132,99
60	16,8	128,41	18,3	139,87	18,5	141,40



Şekil 4.30. Akı deney sonuçları (EK-UF)

4.4.2. Hibrit sistemde akımın etkisi

Bu bölümde hibrit proseslerde akım yoğunluğunun arıtma verimi üzerine etkisi araştırılmıştır. Çelik anot – çelik katot elektrot çifti ile yapılan deneyler sırasında pH ve zaman sabit tutularak 0,5-3 amper akım ve 2,4-14,4 mA/cm² aralığında çeşitli akım yoğunlukları uygulanmıştır. Deney şartları ve sonuçları Çizelge 4.27-4.30'da ve Şekil 4.31-4.34'de gösterilmiştir. Sonuçlardan da görüleceği gibi akım yoğunluğu arttıkça giderim verimleri artmıştır. Hibrit sistemde 5 dk elektroliz süresinde 0,5 Amper akımda (2,4 mA/cm² akım yoğunluğu) % 75 çinko giderim verimi gözlenirken 3 Amper akımda (14,4 mA/cm² akım yoğunluğu) bu değer % 100'e çıkmıştır. Akım yoğunluğu artırıldıkça elektrotlar arası potansiyel farkı arttığından dolayı 14,4 mA/cm²'de enerji tüketimi 5 dakika proses süresinden 60 dakika proses süresinde kadar 0,42 Wh'den 5 Wh'e çıkmıştır. Elektrolit iletkenliğinin sabit tutulduğu, değişen akım yoğunluklarında gerçekleştirilen deneylerde, akım yoğunluğundaki artışla elektrotlar arası potansiyel farkı artmıştır. Dolayısıyla akım yoğunluğu arttıkça her bir deney için enerji tüketimi de artmıştır (Şekil 4.35). Hibrit sistemde KOİ giderim verimi 60 dk deney süresi sonunda 0,5 A akım değerinde %38 iken 3 A akım değerinde değerlerinde %100'e yakın seviyelere ulaşmıştır. Yağ ve

Gres ile AKM parametreleri incelendiğinde ise giderim verim 60 dakika proses süresi sonunda bütün pH değerlerinde %100'e yakın olmuştur.

Akıdaki değişime ilişkin sonuçlar ise Çizelge 4.31'da sunulmuştur. Çizelge 4.31 ve Şekil 4.36'da görüldüğü üzere 0,5 A değerinde 5.dakikadan 60.dakikaya akı artışı %4 seviyelerinde olmuştur. 3 A değerinde ise akı artışı 5.dakikadan 60.dakikaya %12 artmıştır. EK prosesi ve akım yoğunluğunun artması hibrit sistemde UF'da akıyı olumlu yönde etkilemiştir. Kayacan, 2010 pamuklu tekstil endüstrisi atıksularının membran proseslerle geri kazanımının araştırılması konulu çalışmasında ve Erol, 2011 zeytin karasularının membran proseslerle nihai arıtımının incelenmesi konulu çalışmasında elde ettikleri sonuçlara göre, UF membranların ön arıtma olarak uygulanmasının akıyı olumlu yönde etkilediği ve NF için iyi bir ön arıtma olabileceğini bulmuştur.

Hibrit sistemin performansı değerlendirildiğinde ise 3 A akım değerinde EK prosesinde çinko giderimi 5 dakika proses süresinde %60 seviyelerindeyken UF prosesi ile bu verim 5.dakikada bile %94 seviyelerine ulaşmıştır. 60. Dakika sonunda 1 A, 2 A ve 3 A değerlerinde hibrit sistem ile %100'e yakın giderim verime ulaşılmıştır. Yalnız EK prosesi ile bütün akım değerlerinde 60. dakika sonunda %95 arıtım verimine ulaşılmıştır ve hibrit prosesin 60.dakikada verime etkisi %5 seviyelerindedir. Ancak atıksu geri kazanımında %100'e yakın metal ve kirletici giderim verimine ulaşmak için maksimum alınan 3 A akım değerinde EK prosesi yeterli gelmemektedir. Diğer kirleticilerde elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde KOİ, Yağ ve Gres ve AKM için 3 A ve 60.dakikada %100'e yakın giderim verimi sağladığı görülmüştür.

Çizelge 4.27. Atıksu için 0,5 amper akım ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen hibrit sistem deney sonuçları

Zaman	Proses	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	Sıcaklık	Son pH	Son İletkenlik	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi	Elektrot tüketimi	Enerji tüketimi	Faraday	kWh/Kg Çinko
dakika		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		µS/cm	%	%	%	%	mg/m ³	kWh/m ³	F/m ³	
0	-	494,1	212,7 3	14,3	44,2	23,9	9	1684	0	0	0	0	0	0	0	0
5	EK	393,7	162,5	4,7	15	-	-	-	20,32	23,61	67,13	66,06	0,0008	0,42	3,1 x10 ⁻⁰⁶	4,15
15	EK	254,5	132,2	0,5	3,5	-	-	-	48,49	37,86	96,50	92,08	-	1,25	9,3 x10 ⁻⁰⁶	5,22
30	EK	128,5	94,2	0	2,1	-	-	-	73,99	55,72	100	95,25	-	2,5	1,9 x10 ⁻⁰⁵	6,84
60	EK	31,5	57,5	0	1,1	-	-	-	93,62	72,97	100	97,51	0,07	5	3,7 x10 ⁻⁰⁵	10,81
5	EK-UF	121,5	135,3	1,5	0	-	-	-	75,41	36,40	89,51	100	-	-	-	-
15	EK-UF	85,1	105	0	0	-	-	-	82,78	50,64	100	100	-	-	-	-
30	EK-UF	35,2	65,4	0	0	-	-	-	92,88	69,26	100	100	-	-	-	-
60	EK-UF	15,8	25,8	0	0	23,9	9,3	1968	96,80	87,87	100	100	-	-	-	-

Çizelge 4.28. Atıksu için 1 amper akım ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen hibrit sistem deney sonuçları

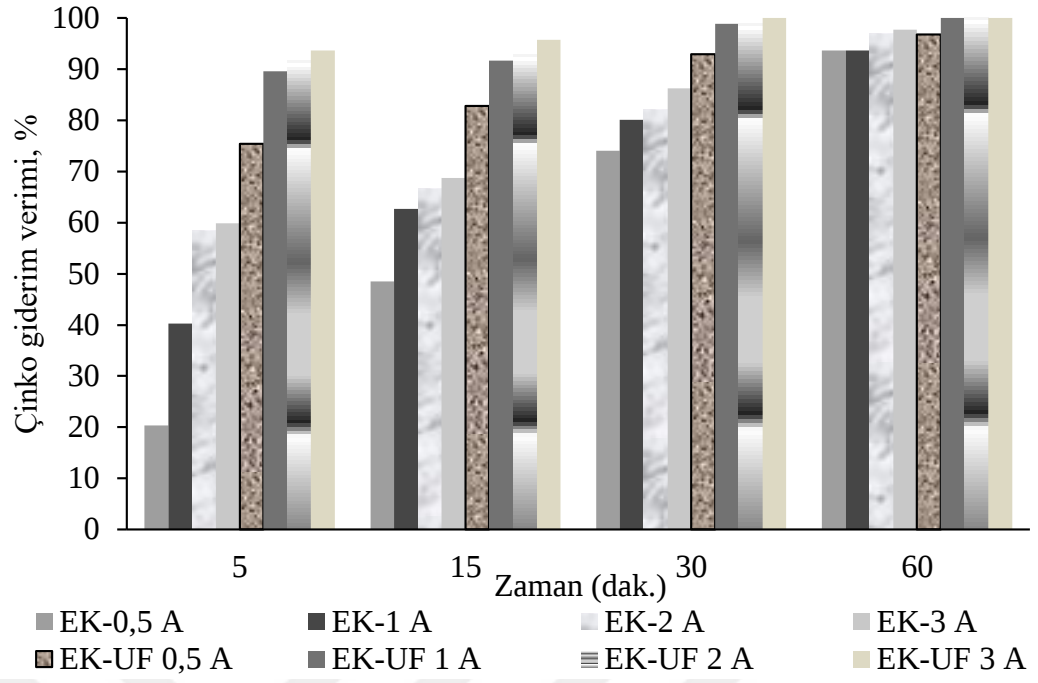
Zaman	Proses	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	Sıcaklık	Son pH	Son İletkenlik	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi	Elektrot tüketimi	Enerji tüketimi	Faraday	kWh/Kg Çinko
dakika		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		µS/cm	%	%	%	%	mg/m ³	kWh/m ³	F/m ³	
0	-	494,1	212,73	14,3	44,2	23,9	9	1684	0	0	0	0	0	0	0	0
5	EK	285	145	2,8	9,5	-	-	-	42,32	31,84	80,42	78,51	0,002	0,42	3,1 x10 ⁻⁰⁶	1,99
15	EK	185,8	123,4	0,2	3,1	-	-	-	62,39	41,99	98,60	92,99		1,25	9,3 x10 ⁻⁰⁶	4,05
30	EK	88	83,5	0,002	0,5	-	-	-	82,19	60,74	99,99	98,87		2,5	1,9 x10 ⁻⁰⁵	6,16
60	EK	35	55,5	0	0	-	-	-	92,92	73,91	100	100	0,18	5	3,7 x10 ⁻⁰⁵	10,89
5	EK-UF	62,5	121,5	0	0	-	-	-	87,35	42,89	100	100	-	-	-	-
15	EK-UF	40,5	90	0	0	-	-	-	91,80	57,69	100	100	-	-	-	-
30	EK-UF	6,2	42,5	0	0	-	-	-	98,75	80,02	100	100	-	-	-	-
60	EK-UF	0	12,8	0	0	23,9	9,3	1968	100	93,98	100	100	-	-	-	-

Çizelge 4.29. Atıksu için 2 amper akım ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen hibrit sistem deney sonuçları

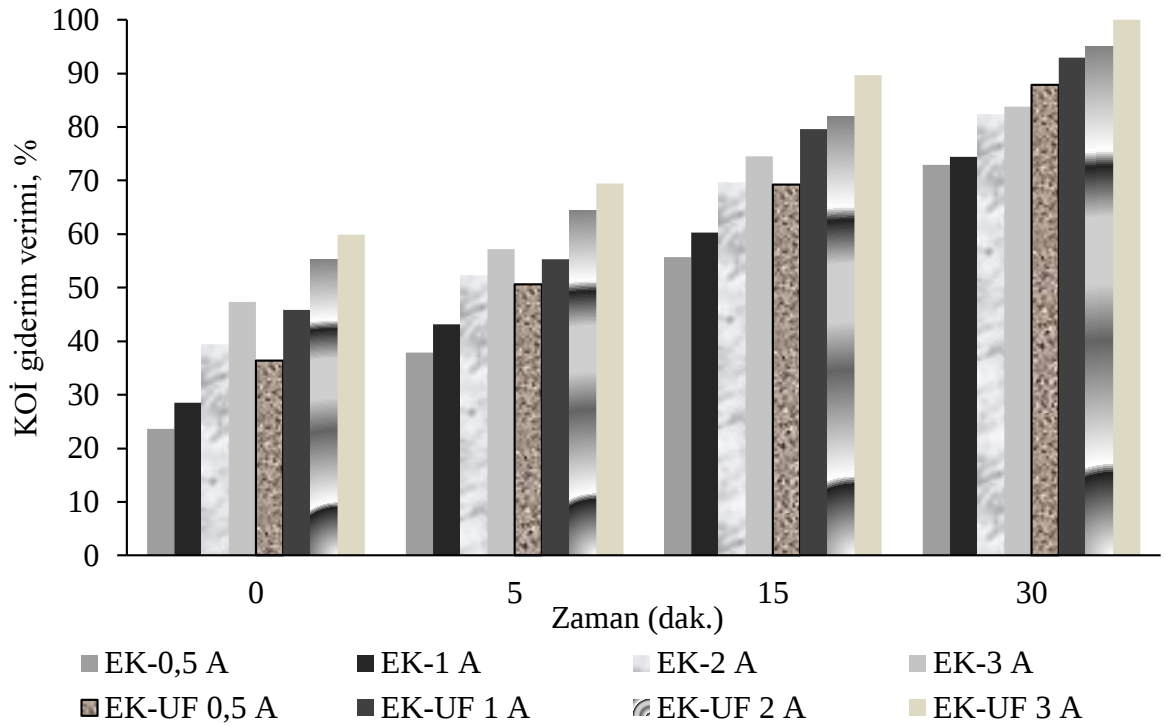
Zaman	Proses	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	Sıcaklık	Son pH	Son İletkenlik	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi	Elektrot tüketimi	Enerji tüketimi	Faraday	kWh/Kg Çinko
dakika		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		µS/cm	%	%	%	%	mg/m ³	kWh/m ³	F/m ³	
0	-	494,1	212,7 3	14,3	44,2	23,9	9	1684	0	0	0	0	0	0	0	0
5	EK	205,5	128,8	2,1	7,5	-	-	-	58,41	39,45	85,31	83,03	0,003	0,42	3,1 x10 ⁻⁰⁶	1,44
15	EK	164,5	101,5	0,8	0,5	-	-	-	66,71	52,29	94,41	98,87	0	1,25	9,3 x10 ⁻⁰⁶	3,79
30	EK	88,5	64,8	0	0,3	-	-	-	82,09	69,54	100	99,32	0	2,5	1,9 x10 ⁻⁰⁵	6,16
60	EK	15,5	37,7	0	0	-	-	-	96,86	82,28	100	100	0,42	5	3,7 x10 ⁻⁰⁵	10,45
5	EK-UF	41,1	95,2	0	0	-	-	-	91,68	55,25	100	100	-	-	-	-
15	EK-UF	35,5	75,5	0	0	-	-	-	92,82	64,51	100	100	-	-	-	-
30	EK-UF	5,8	38,5	0	0	-	-	-	98,83	81,90	100	100	-	-	-	-
60	EK-UF	0	10,5	0	0	23,9	9,3	1968	100	95,06	100	100	-	-	-	-

Çizelge 4.30. Atıksu için 3 amper akım ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen hibrit sistem deney sonuçları

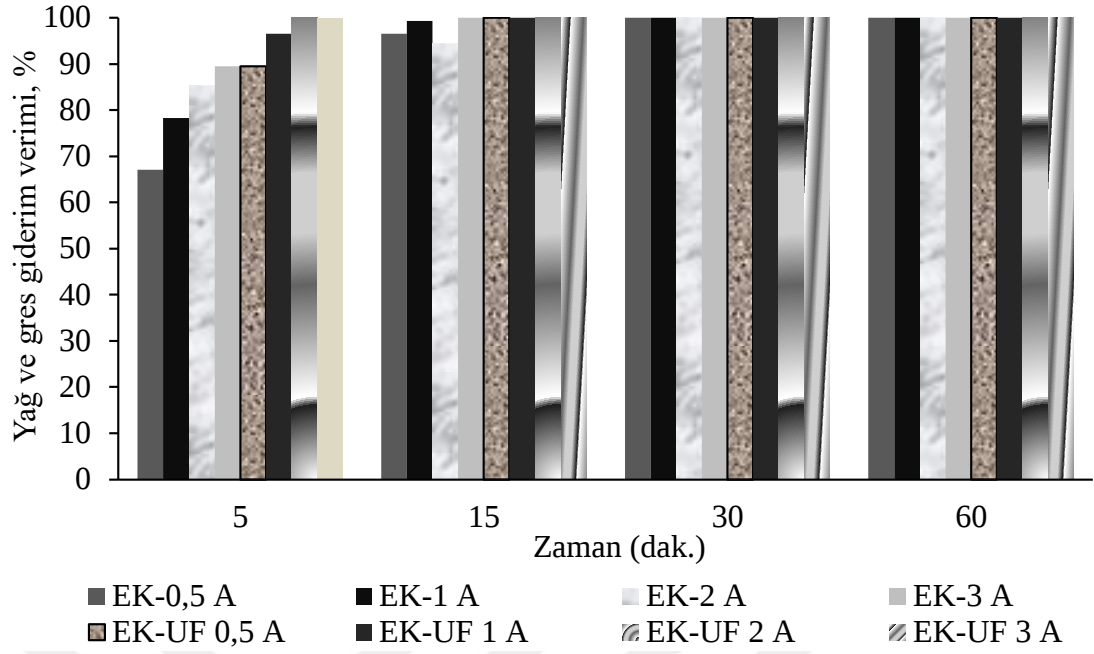
Zaman	Proses	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	Sıcaklık	Son pH	Son İletkenlik	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi	Elektrot tüketimi	Enerji tüketimi	Faraday	kWh/Kg Çinko
dakika		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		µS/cm	%	%	%	%	mg/m ³	kWh/m ³	F/m ³	
0	-	494,1	212,73	14,3	44,2	23,9	9	1684	0	0	0	0	0	0	0	0
5	EK	198,5	112	1,5	5	-	-	-	59,83	47,35	89,51	88,69	0,005	0,42	$3,1 \times 10^{-06}$	1,41
15	EK	154,4	91	0	0,6	-	-	-	68,75	57,22	100	98,64	0	1,25	$9,3 \times 10^{-06}$	3,68
30	EK	68,2	54,2	0	0,1	-	-	-	86,20	74,52	100	99,77	0	2,5	$1,9 \times 10^{-05}$	5,87
60	EK	11,5	34,5	0	0	-	-	-	97,67	83,78	100	100	0,78	5	$3,7 \times 10^{-05}$	10,36
5	EK-UF	31,5	85,3	0	0	-	-	-	93,62	59,90	100	100	-	-	-	-
15	EK-UF	21	65	0	0	-	-	-	95,75	69,44	100	100	-	-	-	-
30	EK-UF	0	22	0	0	-	-	-	100	89,66	100	100	-	-	-	-
60	EK-UF	0	0	0	0	23,9	9,3	1968	100	100	100	100	-	-	-	-



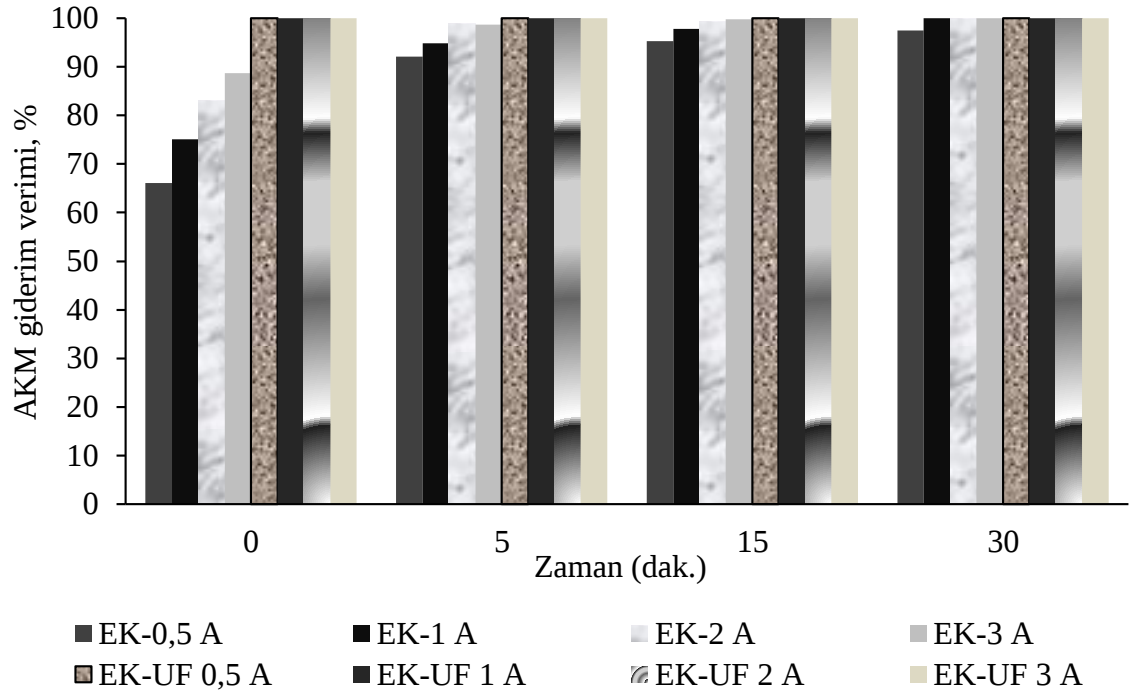
Şekil 4.31. Atıksudan akıma bağlı çinko giderimi (EK-UF), (pH 9)



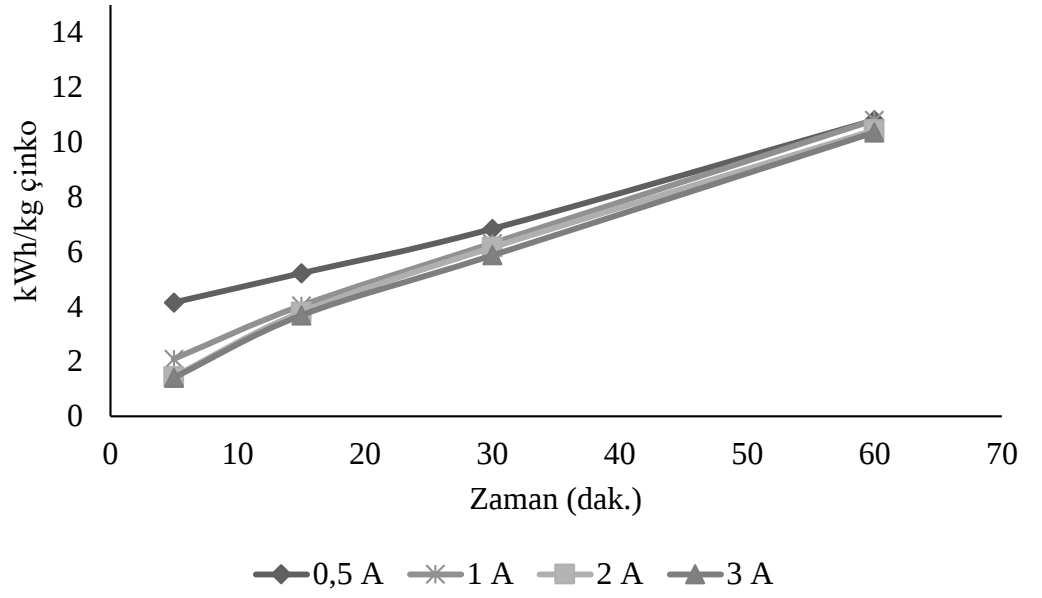
Şekil 4.32. Atıksudan akıma bağlı KOİ giderimi (EK-UF), (pH 9)



Şekil 4.33. Atıksudan akıma bağlı yağ ve gres giderimi (EK-UF), (pH 9)



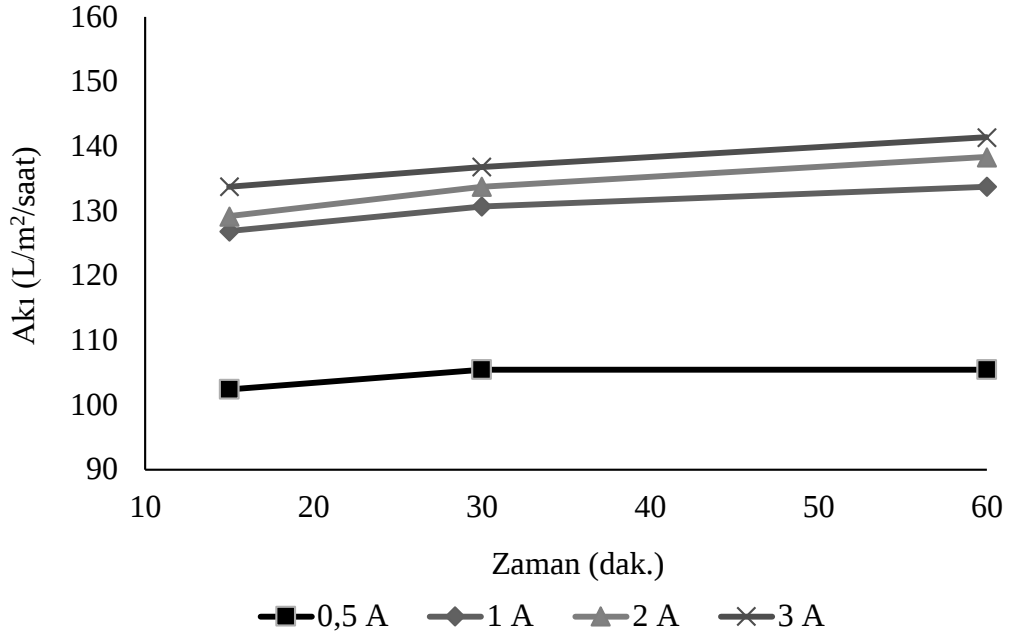
Şekil 4.34. Atıksudan akıma bağlı AKM giderimi (EK-UF), (pH 9)



Şekil 4.35. Çinko gideriminde enerji tüketimi (EK-UF), (pH 9)

Çizelge 4.31. Atıksu için akım ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilen hibrit sistem akı deney sonuçları

		0,5 A		1,0 A	
Zaman (dakika)	Akış oranı (mL/dakika)	Akış (L/m ² ,saat) UF	Akış (L/m ² ,saat) UF	Akış oranı (mL/dakika)	Akış (L/m ² ,saat) UF
5	13,4	102,42	102,42	16,6	126,88
15	13,8	105,48	105,48	17,1	130,70
30	13,8	105,48	105,48	17,5	133,76
60	14,1	107,77	107,77	18,3	139,87
		2,0 A		3,0 A	
Zaman (dakika)	Akış oranı (mL/dakika)	Akış (L/m ² ,saat) UF	Akış (L/m ² ,saat) UF	Akış oranı (mL/dakika)	Akış (L/m ² ,saat) UF
5	16,9	129,17	129,17	17,5	133,76
15	17,5	133,76	133,76	17,9	136,82
30	18,1	138,34	138,34	18,5	141,40
60	18,4	140,64	140,64	20,1	153,63



Şekil 4.36. EK-UF akı deney sonuçları

4.5. Polimer Destekli Ultrafiltrasyon Prosesi ile Yürütülen Çalışmalar

Bu bölümde PDUF çalışmaları yapılmıştır. Deneylerde iki farklı polimer (PVP ve poliakrilik asit sodyum tuzu) kullanılmıştır. PVP destekli UF prosesinde öncelikle; atıksuyun çinko konsantrasyonuna göre belirlenen polimer konsantrasyonunda PVP:Zn (1:1000) ve 0-60 dakika proses süresinde (5, 15, 30 ve 60) pH 3, 5, 7, 8, 9 ve 11 değerlerinde denemeler yapılmıştır. Uygun pH değeri belirlendikten sonra PVP destekli UF deneylerinde polimer konsantrasyonunun etkisi incelenmiştir. pH 9 değerinde ve 0-60 dakika proses süresinde, 1:100-1:10000 PVP:Zn aralığında deneyler yürütülmüştür. Her bir deney setinde UF sistemi akış oranı tespit edilerek akı değerleri hesaplanmıştır. PVP ve EK destekli UF hibrit sisteminde de sadece optimum koşullarda pH 9, PVP:Zn (1:1000) ve 0-60 dakika proses süresinde (5, 15, 30 ve 60)) deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Poliakrilik asit sodyum tuzu destekli UF prosesinde de; pH 9 değerinde ve 0-60 dakika proses süresinde, 1:100-1:10000 PAA:Zn aralığında deneyler yürütülmüştür. Her bir deney setinde UF sistemi akış oranı tespit edilerek akı değerleri hesaplanmıştır. PAA ve EK destekli UF hibrit sisteminde de optimum koşullarda pH 9, 1:1000 PAA:Zn ve 0-60 dakika proses süresinde (5, 15, 30 ve 60)) deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Aşağıda elde edilen sonuçlar sunulur ve irdelenmiştir.

4.5.1 Polivinilpirolidon Destekli Ultrafiltrasyon Prosesinde pH'nın Etkisi

Bu bölümde PVP destekli UF prosesinde atıksu pH'sının kirletici giderim verimi üzerine olan etkisine bakılmıştır. Deney şartları ve sonuçlar bütün parametreler için sırasıyla Çizelge 4.32-4.37 ve Şekil 4.37-4.40'da gösterilmiştir. PVP konsantrasyonu, atıksuyun başlangıç çinko konsantrasyonu baz alınarak 1:1000 PVP:Zn olarak belirlenmiştir. Şekil 4.37'den de görüldüğü üzere asidik ve nötr pH değerlerinde çinko giderimi düşük seviyelerdedir (<%25). Polimer ve UF etkisiyle pH 8 değerinde 60. dk'da %73, pH 9'da ve pH 11'de %100'e yakın çinko giderimi olmuştur. pH 9 değerinde yalnız polimer etkisiyle 60.dakikada çinko giderimi %73 seviyelerindeyken UF prosesi ile birlikte bu verim %100'e yakın bulunmuştur. Polimer ve UF etkisiyle KOİ giderimi ise pH 3 değerinde 5 dakika proses süresinde %18 seviyelerindeyken 60 dakika proses süresinde %34'e ulaşmıştır. pH 9 olduğunda ise 5. ve 60. dakikalarda sırasıyla %70 ve %95 giderim gerçekleşmiştir (Şekil 4.38). Yağ ve gres ile AKM giderim verimi bütün pH değerlerinde %90 giderim veriminin üzerinde olup, pH 9 değerinde %100'e yakın bulunmuştur (Şekil 4.39-4.40). Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde çinko, yağ ve gres ve AKM giderim verimleri pH 9 ve pH 11'de %100'e yakın olmuştur. Proseste atıksuyun geri kazanımı düşünüldüğünde üç kirletici parametresi için uygundur ancak KOİ'de maksimum giderim verimi %95 seviyelerinde kalmıştır. Bu değer ile alıcı ortam deşarj standartlarını sağlanmaktadır ancak atıksuyun geri kazanımı için daha yüksek polimer konsantrasyonunda çalışılması daha uygun olacaktır. Bir sonraki bölümde polimer konsantrasyonuna ilişkin sonuçlar sunularak değerlendirilmiştir. Akı değişimi ise pH 3'den pH 11 değerine ve 5.dakikadan 60.dakikaya arttıkça iyileşmiştir. Sonuçlar Çizelge 4.38 ve Şekil 4.41'de sunulmuştur. Çinko metalinin alkali şartlarda (pH>8,5) sudaki çözünürlüğünün düşmesine bağlı olarak alkali şartlarda sadece polimer etkisiyle çinko giderimi pH 7'de 60 dakika proses süresi sonunda %24 iken pH 8 değerinde %72 olmuştur. Yalnız EK prosesi ile kıyaslandığında pH 5 ve 7 aralığında giderim mekanizması; EK prosesi sonucunda oluşan demir hidroksit ve alüminyum hidroksit iyonlarının atıksu içerisinde bulunan çinko ve diğer kirleticileri bünyelerine almaları ile UF membranından geçemeyecek boyutta floklar oluşması esasına dayanmaktadır. Demir hidroksitler için pH aralığı daha geniştir (pH 4-12). Alkali şartlarda giderim mekanizması hem demir hidroksit iyonlarının atıksu içerisinde bulunan çinko ve diğer kirleticileri bünyelerine almaları

hemde oluşan OH^- iyonu etkisiyle çinko metalinin çinko hidroksit formunda çökelebilmesine bağlıdır. Bu duruma bağlı olarak deneysel çalışmada asidik şartlarda daha düşük, alkali şartlarda daha yüksek giderim verimleri elde edilmiştir (Mollah vd, 2001).



Çizelge 4.32. Atıksu için PVP:Zn (1:1000) ve pH 3 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PDUF sonuçları

Zaman	Proses	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	Sıcaklık	Son pH	Son İletkenlik	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi
dakika		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		µS/cm	%	%	%	%
0	-	494,1	212,73	14,3	44,2	23,9	3	1684	0	0	0	0
5	PVP	480,2	204	4,4	15	-	-	-	2,81	4,10	69,23	66,06
15	PVP	472,48	165	3	8	-	-	-	4,38	22,44	79,02	81,90
30	PVP	468,6	154	0	3,5	-	-	-	5,16	27,61	100	92,08
60	PVP	465,7	141	0	2	-	-	-	5,75	33,72	100	95,48
5	PVP-UF	469,57	175	1,2	0	-	-	-	4,96	17,74	91,61	100
15	PVP-UF	464,73	151	0	0	-	-	-	5,94	29,02	100	100
30	PVP-UF	462,31	148	0	0	-	-	-	6,43	30,43	100	100
60	PVP-UF	459,41	141	0	0	23,9	3,53	1844	7,34	33,72	100	100

Çizelge 4.33. Atıksu için PVP:Zn (1:1000) ve pH 5 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PDUF sonuçları

Zaman	Proses	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	Sıcaklık	Son pH	Son İletkenlik	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi
dakika		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		µS/cm	%	%	%	%
0	-	494,1	212,73	14,3	44,2	23,9	5	1684	0	0	0	0
5	PVP	480,7	203	3,4	8,4	-	-	-	2,71	4,57	76,22	81
15	PVP	471,99	163	1,8	3,1	-	-	-	4,47	23,38	87,41	92,99
30	PVP	469,09	148	0	1,2	-	-	-	5,06	30,43	100	97,29
60	PVP	466,67	138	0	0	-	-	-	5,55	35,13	100	100
5	PVP-UF	469,1	165	1,5	0	-	-	-	5,06	22,44	89,51	100
15	PVP-UF	462,31	147	0	0	-	-	-	6,43	30,90	100	100
30	PVP-UF	460,86	135	0	0	-	-	-	6,73	36,54	100	100
60	PVP-UF	458,92	120	0	0	23,9	5,25	1968	7,12	43,59	100	100

Çizelge 4.34. Atıksu için PVP:Zn (1:1000) ve pH 7 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PDUF sonuçları

Zaman	Proses	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	Sıcaklık	Son pH	Son İletkenlik	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi
dakika		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		µS/cm	%	%	%	%
0	-	494,1	212,73	14,3	44,2	23,9	7	1684	0	0	0	0
5	PVP	479,25	201	3,1	6,5	-	-	-	3,01	5,51	78,32	54,55
15	PVP	474,9	167	1,5	2,5	-	-	-	3,89	21,50	89,51	82,52
30	PVP	473,83	151	0	1	-	-	-	4,10	29,02	100	93,01
60	PVP	426	130	0	0	-	-	-	13,78	38,89	100	100
5	PVP-UF	472,62	173	1,2	0	-	-	-	4,35	18,68	91,61	100
15	PVP-UF	467,15	126	0	0	-	-	-	5,45	40,77	100	100
30	PVP-UF	445,37	113	0	0	-	-	-	9,86	46,88	100	100
60	PVP-UF	372,88	101	0	0	23,9	7,22	1965	24,53	52,52	100	100

Çizelge 4.35. Atıksu için PVP:Zn (1:1000) ve pH 8 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PDUF sonuçları

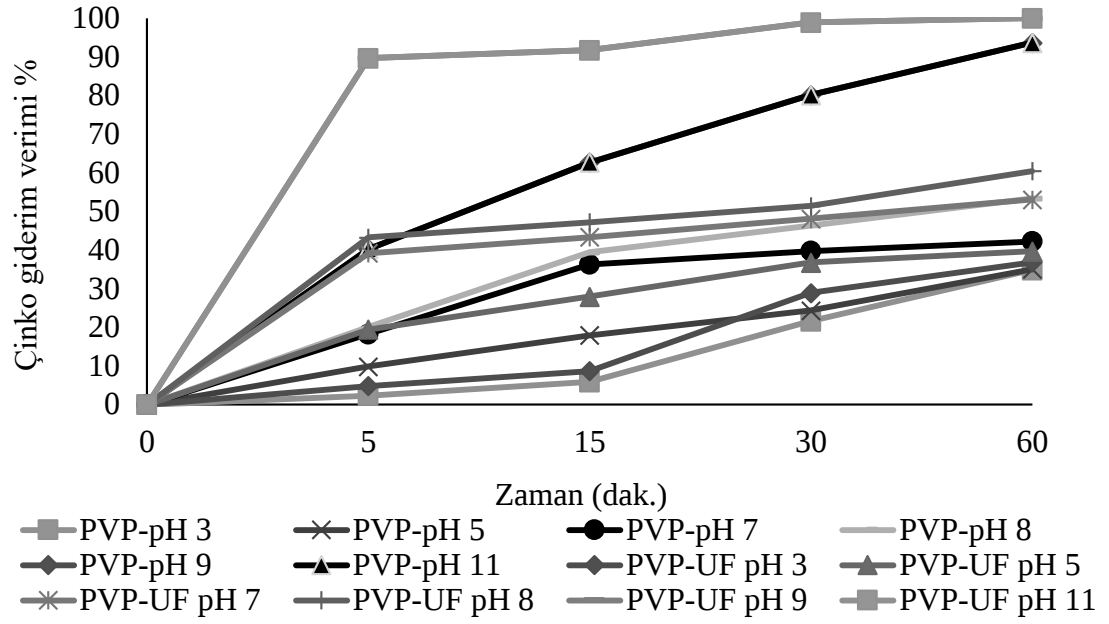
Zaman	Proses	Çinko	KOI	Yağ ve Gres	AKM	Sıcaklık	Son pH	Son İletkenlik	Çinko giderim verimi	KOI giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi
dakika		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		µS/cm	%	%	%	%
0	-	494,1	212,73	14,3	44,2	23,9	8	1684	0	0	0	0
5	PVP	435,69	195	3,5	7,2	-	-	-	11,82	8,33	75,52	83,71
15	PVP	396,96	145	1,8	2,8	-	-	-	19,66	31,84	87,41	93,67
30	PVP	334,03	112	0	0,8	-	-	-	32,40	47,35	100	98,19
60	PVP	227,53	87	0	0	-	-	-	53,95	59,10	100	100
5	PVP-UF	314,66	88	1,3	0	-	-	-	36,32	58,63	90,91	100
15	PVP-UF	208,163	65	0	0	-	-	-	57,87	69,44	100	100
30	PVP-UF	154,91	58	0	0	-	-	-	68,65	72,74	100	100
60	PVP-UF	135,55	51	0	0	23,9	8,24	1990	72,57	76,03	100	100

Çizelge 4.36. Atıksu için PVP:Zn (1:1000) ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PDUF sonuçları

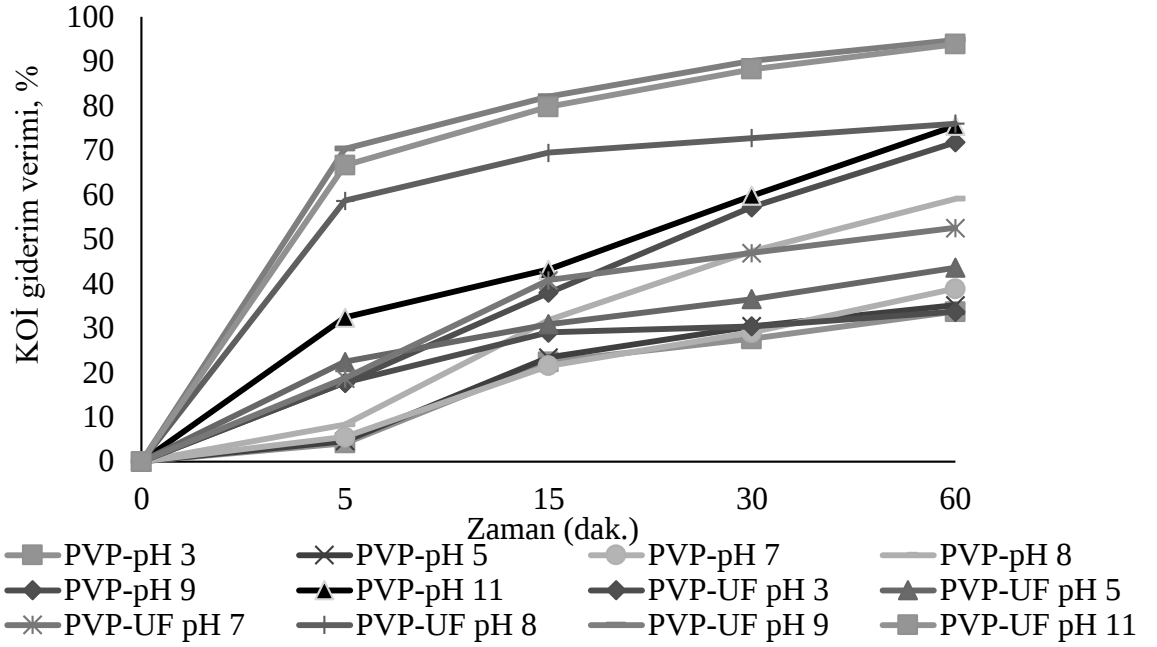
Zaman	Proses	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	Sıcaklık	Son pH	Son İletkenlik	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi
dakika		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		µS/cm	%	%	%	%
0	-	494,1	212,73	14,3	44,2	23,9	9	1684	0	0	0	0
5	PVP	377,59	175	3,3	7,6	-	-	-	23,58	17,74	76,92	82,81
15	PVP	314,66	132	2	3	-	-	-	36,32	37,95	86,01	93,21
30	PVP	213	91	1	0,5	-	-	-	56,89	57,22	93,01	98,87
60	PVP	135,55	60	0	0	-	-	-	72,57	71,80	100	100
5	PVP-UF	183,96	63	1,2	0	-	-	-	62,77	70,38	91,61	100
15	PVP-UF	121	38	0	0	-	-	-	75,51	82,14	100	100
30	PVP-UF	24,2	21	0	0	-	-	-	95,10	90,13	100	100
60	PVP-UF	0	11	0	0	23,9	9,18	1969	100	94,83	100	100

Çizelge 4.37. Atıksu için PVP:Zn (1:1000) ve pH 11 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PDUF sonuçları

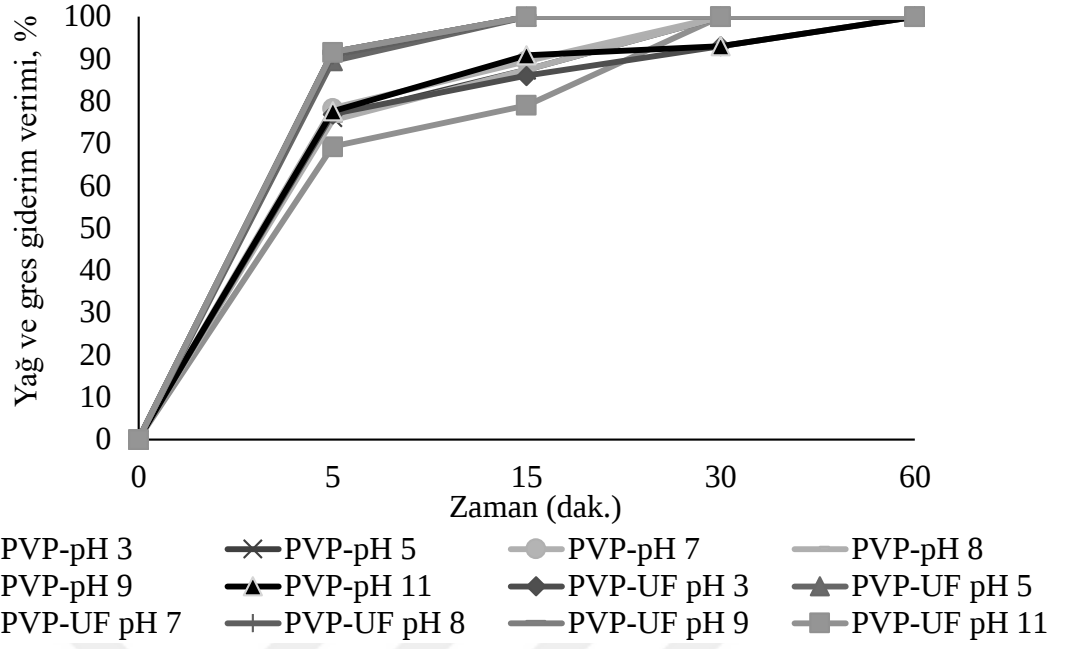
Zaman	Proses	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	Sıcaklık	Son pH	Son İletkenlik	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi
dakika		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		µS/cm	%	%	%	%
0	-	494,10	212,73	14,30	44,20	23,90	11	1684	0	0	0	0
5	PVP	334,03	182	3,20	7,50	-	-	-	32,40	14,45	77,62	83,03
15	PVP	280,70	128	1,30	2	-	-	-	43,19	39,83	90,91	95,48
30	PVP	198,48	88	1	1	-	-	-	59,83	58,63	93,01	98,42
60	PVP	121,02	57	0	0	-	-	-	75,51	73,21	100	100
5	PVP-UF	169,40	71	1,20	0	-	-	-	65,72	66,62	91,61	100
15	PVP-UF	101,66	43	0	0	-	-	-	79,43	79,79	100	100
30	PVP-UF	0	25	0	0	-	-	-	100	88,25	100	100
60	PVP-UF	0	13,00	0	0	23,90	11,27	1968	100	93,89	100	100



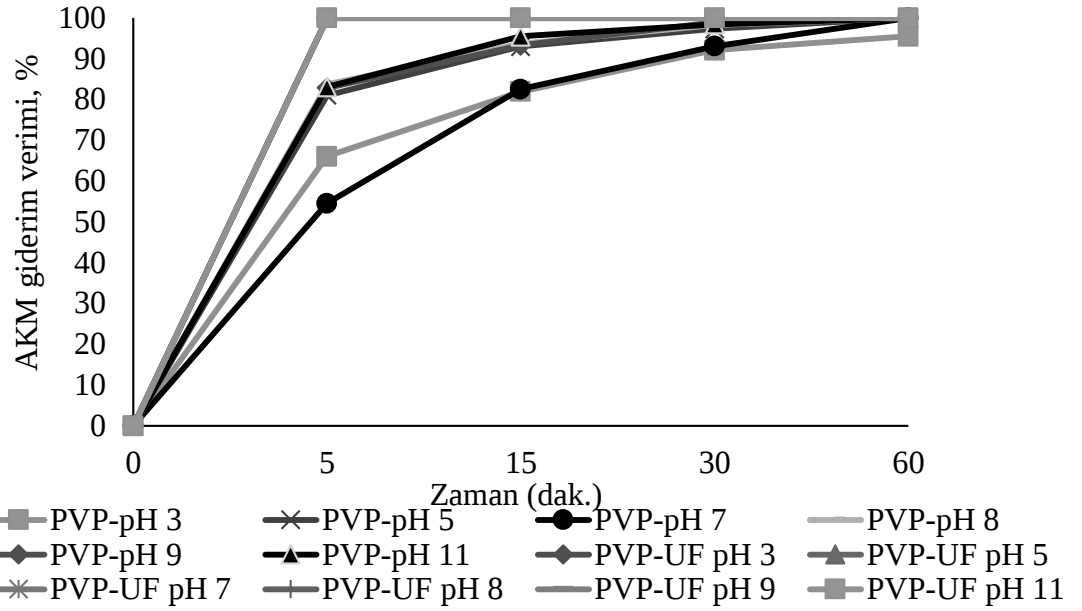
Şekil 4.37. PVP destekli UF prosesinde zamana ve pH'ya bağlı çinko giderimi, PVP:Zn (1:1000)



Şekil 4.38. PVP destekli UF prosesinde zamana ve pH'ya bağlı KOİ giderimi, PVP:Zn (1:1000)



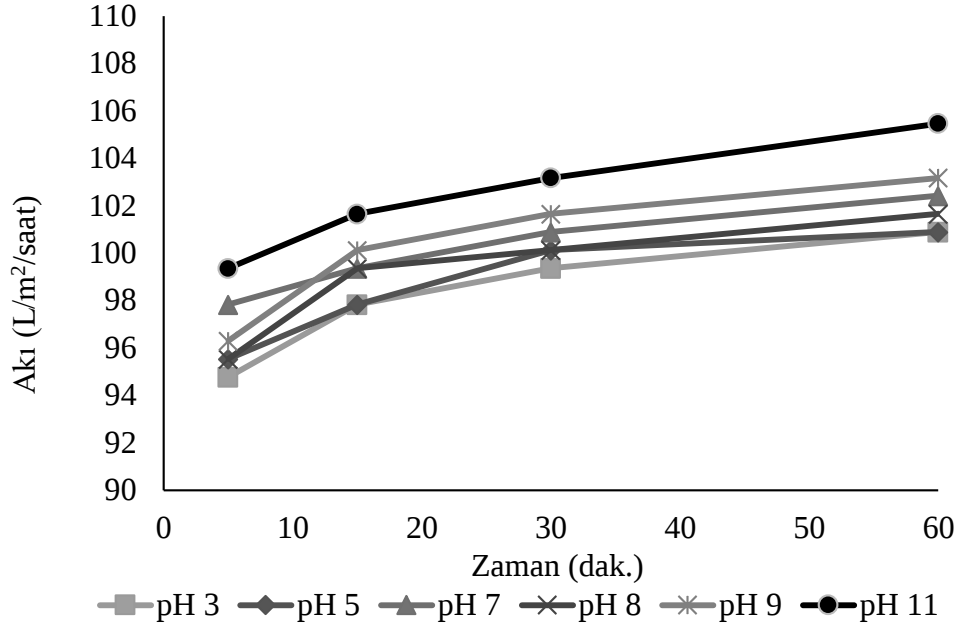
Şekil 4.39. PVP destekli UF prosesinde zamana ve pH'ya bağlı yağ ve gres giderimi, PVP:Zn (1:1000)



Şekil 4.40. PVP destekli UF prosesinde zamana ve pH'ya bağlı AKM giderimi, PVP:Zn (1:1000)

Çizelge 4.38. Atıksu için pH ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PVP destekli UF akı deney sonuçları

Zaman (dakika)	pH 3		pH 5		pH 7	
	Akış oranı (mL/dakika)	Akı	Akış oranı (mL/dakika)	Akı	Akış oranı (mL/dakika)	Akı
		(L/m ² .saat)		(L/m ² .saat)		(L/m ² .saat)
		UF		UF		UF
5	12,40	94,78	12,50	95,54	12,80	97,83
15	12,80	97,83	12,80	97,83	13,00	99,36
30	13,00	99,36	13,10	100,13	13,20	100,89
60	13,20	100,89	13,20	100,89	13,40	102,42
Zaman (dakika)	pH 8		pH 9		pH 11	
	Akış oranı (mL/dakika)	Akı	Akış oranı (mL/dakika)	Akı	Akış oranı (mL/dakika)	Akı
		(L/m ² .saat)		(L/m ² .saat)		(L/m ² .saat)
		UF		UF		UF
5	12,50	95,54	12,60	96,31	13,00	99,36
15	13,00	99,36	13,10	100,13	13,30	101,66
30	13,10	100,13	13,30	101,66	13,50	103,18
60	13,30	101,66	13,50	103,18	13,80	105,48



Şekil 4.41. PVP destekli UF akı deney sonuçları

4.5.2 Polivinilpirolidon Destekli Ultrafiltrasyon Prosesinde Polimer Konsantrasyonunun Etkisi

Bu bölümde PVP destekli UF prosesinde PVP konsantrasyonunun kirletici giderim verimi üzerine olan etkisi incelenmiştir. Deney şartları ve sonuçlar bütün parametreler için sırasıyla Çizelge 4.39-4.41 ve Şekil 4.42-4.45’de gösterilmiştir. Polimer konsantrasyon çalışmaları pH 9 değerinde yürütülmüştür. Şekil 4.42’den de görüldüğü üzere polimer konsantrasyonu arttıkça çinko, KOİ, yağ ve gres ve AKM parametrelerinde giderim verimi artmıştır. 60. dakika sonunda 1:100 ve 1:1000 PVP:Zn değerinde UF etkisiyle %100’e yakın verime ulaşılmıştır. PVP:Zn (1:10000) polimer değerinde ise 60.dakikada UF etkisiyle maksimum %77 çinko giderim verimine ulaşılmıştır. PVP:Zn (1:1000) polimer değerinde 5 dakika proses süresinde yalnız polimer etkisiyle %59 ve polimer-UF etkisiyle %83 çinko giderim verimi elde edilmiştir. UF etkisiyle KOİ giderimi ise PVP:Zn (1:10000) polimer değerinde 5 dakika proses süresinde %20 seviyelerindeyken 60 dakika proses süresinde %51’e ulaşmıştır. PVP:Zn (1:100) polimer değerinde ise polimer-UF etkisiyle 5 ve 60 dakika proses süresinde sırasıyla %89 ve %100’e yakın giderim gerçekleşmiştir (Şekil 4.43). Yağ ve gres ile AKM giderim verimi bütün polimer konsantrasyon değerlerinde %90 giderim veriminin üzerinde olup, 1:100 ve 1:1000 PVP:Zn polimer değerinde %100’e yakın bulunmuştur (Şekil 4.44-4.45). Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde çinko, polimer-UF etkisiyle KOİ, yağ ve gres ve AKM

giderim verimleri PVP:Zn (1:1000) polimer değerinde 60.dakikada %100'e yakın bulunmuştur. Atıksuyun proseste geri kazanımı düşünöldüğünde dört kirletici parametresi için uygundur. Akı ise bütün polimer konsantrasyon değerlerinde zamanla birlikte artmıştır. Polimer konsantrasyonu arttıkça akı artmakta olup PVP:Zn (1:100) polimer değerinde bu artış daha belirgindir. Sonuçlar Çizelge 4.42 ve Şekil 4.46'da sunulmuştur. Sonuç olarak PVP konsantrasyonu 1:100 PVP:Zn'den ve 1:1000 PVP:Zn'e arttıkça çinko, KOİ, yağ ve gres, AKM giderim verimlerinin arttığı görölmektedir. Yavuz, 2009 polimer destekli ultrafiltrasyon metodu ile sudan bor giderimi üzerine yaptığı çalışmada borun giderilmesinde reçine miktarı, reçine tanecik boyutu, uygulanan basınç ve reçine-çözelti temas süresi gibi parametrelerin etkilerini incelemiştir. Çalışmada 5000, 10000 ve 50000 milipor UF membranı kullanılmıştır. 10000 milipor UF membranında reçine miktarı 0,1 gr'dan 0,2 gr'a arttıkça akının (mL/cm².s) %26 arttığını bulmuştur. Kullanılan UF membran milipor boyutu arttıkça yine akının arttığını bulmuştur.

Çizelge 4.39. Atıksu için PVP:Zn (1:100) PVP ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PDUF sonuçları

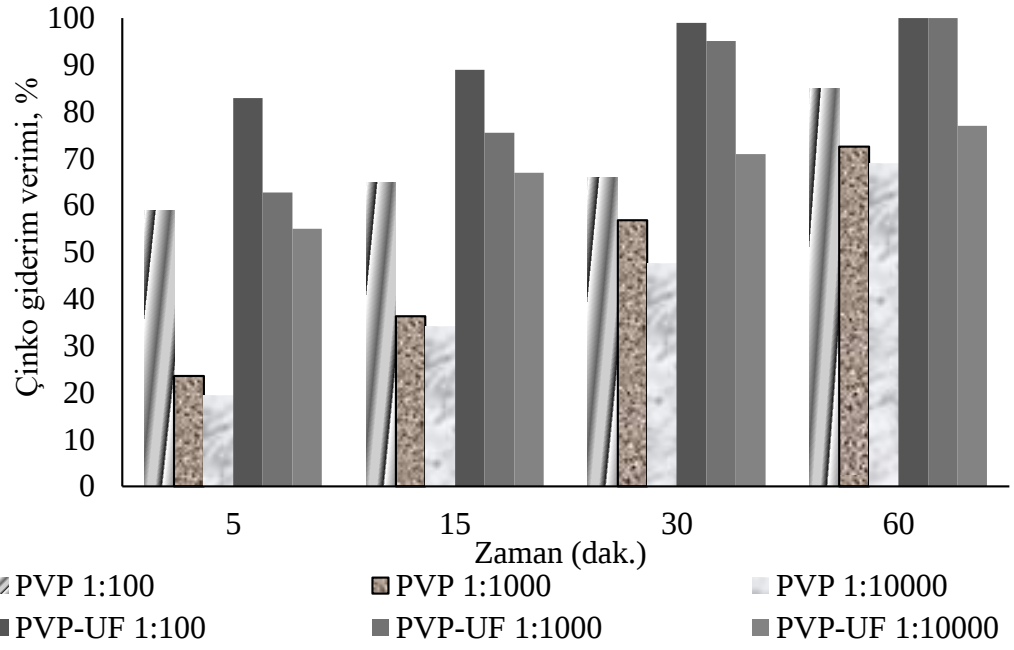
Zaman	Proses	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	Sıcaklık	Son pH	Son İletkenlik	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi
dakika		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		µS/cm	%	%	%	%
0	-	494,1	212,73	14,3	44,2	23,9	9	1684	0	0	0	0
5	PVP	202,58	115	1,3	9,6	-	-	-	59,00	45,94	90,91	78,28
15	PVP	172,9	92	1	5	-	-	-	65,01	56,75	93,01	88,69
30	PVP	167,9	0	0	1,5	-	-	-	66,02	100	100	96,61
60	PVP	74,1	0	0	0	-	-	-	85,00	100	100	100
5	PVP-UF	83,99	23	0,2	0	-	-	-	83,00	89,19	98,60	100
15	PVP-UF	54,35	11	0	0	-	-	-	89,00	94,83	100	100
30	PVP-UF	4,93	4	0	0	-	-	-	99,00	88,72	100	100
60	PVP-UF	0	0	0	0	23,9	9,86	2204	100	100	100	100

Çizelge 4.40. Atıksu için PVP:Zn (1:1000) ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PDUF sonuçları

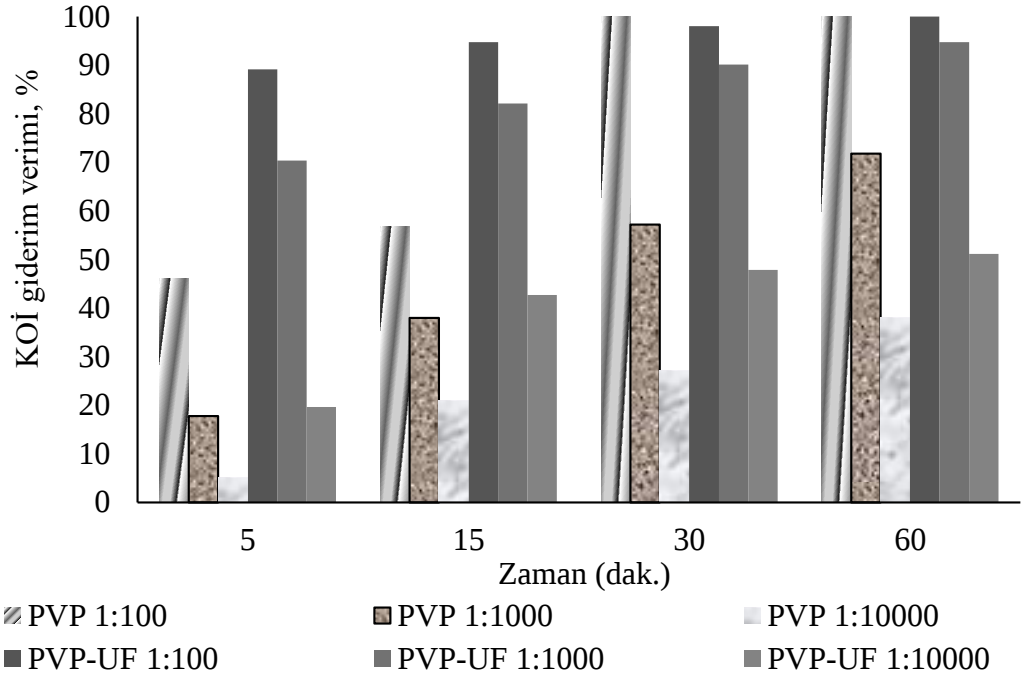
Zaman	Proses	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	Sıcaklık	Son pH	Son İletkenlik	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi
dakika		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		µS/cm	%	%	%	%
0	-	494,1	212,73	14,3	44,2	23,9	9	1684	0	0	0	0
5	PVP	377,59	175	3,3	7,6	-	-	-	23,58	17,74	76,92	82,81
15	PVP	314,66	132	2	3	-	-	-	36,32	37,95	86,01	93,21
30	PVP	213	91	1	0,5	-	-	-	56,89	57,22	93,01	98,87
60	PVP	135,55	60	0	0	-	-	-	72,57	71,80	100	100
5	PVP-UF	183,96	63	1,2	0	-	-	-	62,77	70,38	91,61	100
15	PVP-UF	121	38	0	0	-	-	-	75,51	82,14	100	100
30	PVP-UF	24,2	21	0	0	-	-	-	95,10	90,13	100	100
60	PVP-UF	0	11	0	0	23,9	9,32	1948	100	94,83	100	100

Çizelge 4.41. Atıksu için PVP:Zn (1:10000) ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PDUF sonuçları

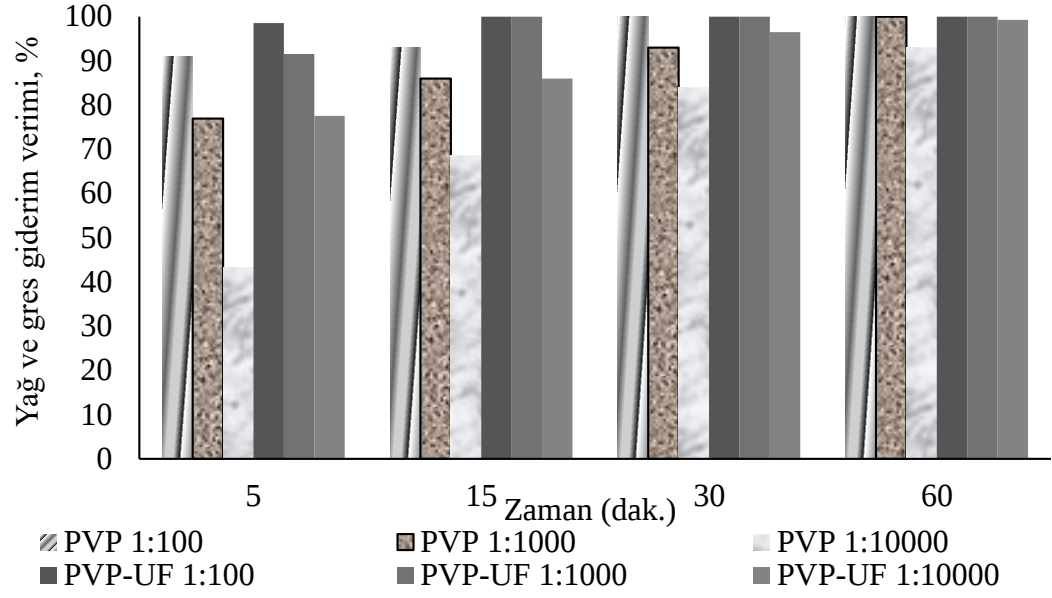
Zaman	Proses	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	Sıcaklık	Son pH	Son İletkenlik	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi
dakika		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		µS/cm	%	%	%	%
0	-	494,1	212,73	14,3	44,2	23,9	9	1684	0	0	0	0
5	PVP	398,1	202	8,1	12,5	-	-	-	19,43	5,04	43,36	71,72
15	PVP	325,3	168	4,5	5,5	-	-	-	34,16	21,03	68,53	87,56
30	PVP	258,82	155	2,3	4,1	-	-	-	47,62	27,14	83,92	90,72
60	PVP	153,3	132	1	2	-	-	-	68,97	37,95	93,01	95,48
5	PVP-UF	222,34	171	3,2	0	-	-	-	55,00	19,62	77,62	100
15	PVP-UF	163,05	122	2	0	-	-	-	67,00	42,65	86,01	100
30	PVP-UF	143,29	111	0,5	0	-	-	-	71,00	47,82	96,50	100
60	PVP-UF	113,64	104	0,1	0	23,9	9,14	1865	77,00	51,11	99,30	100



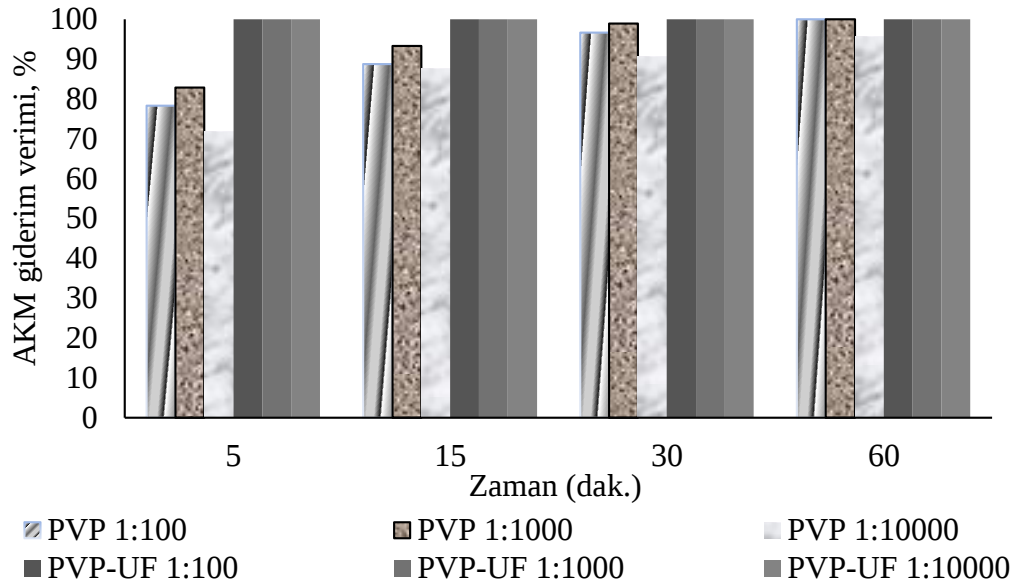
Şekil 4.42. Atıksu için PVP:Zn değerine ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PVP destekli UF çinko giderimi deney sonuçları, pH 9



Şekil 4.43. Atıksu için PVP:Zn değerine ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PVP destekli UF KOİ giderimi deney sonuçları, pH 9



Şekil 4.44. Atıksu için PVP:Zn değerine ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PVP destekli UF yağ ve gres giderimi deney sonuçları, pH 9

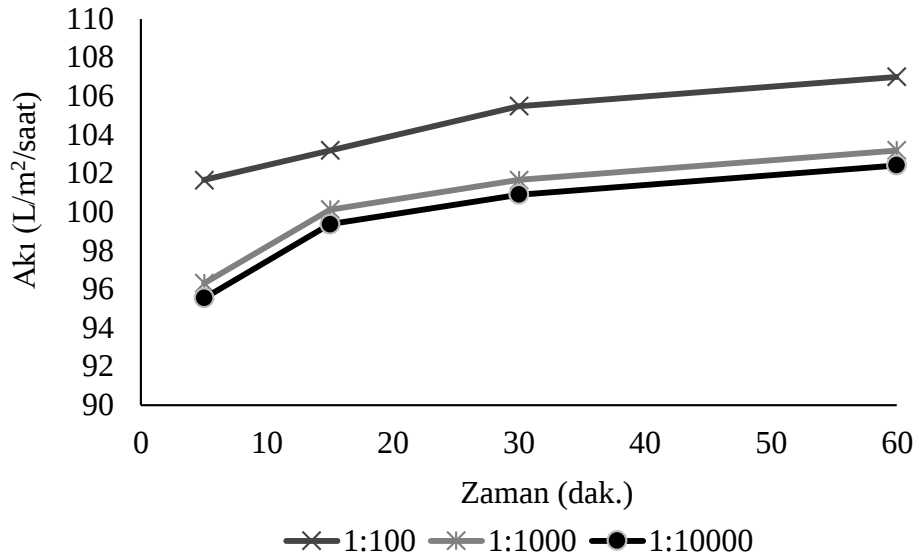


Şekil 4.45. Atıksu için PVP:Zn değerine ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PVP destekli UF AKM giderimi deney sonuçları, pH 9

Çizelge 4.42. Atıksu için polimer konsantrasyonuna ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PVP destekli UF akı deney sonuçları

Zaman (dakika)	0,01 A		0,001 A	
	Akış oranı (mL/dakika)	Akı	Akış oranı (mL/dakika)	Akı
		(L/m ² .saat) UF		(L/m ² .saat) UF
5	13,3	101,66	12,6	96,31
15	13,5	103,18	13,1	100,13
30	13,8	105,48	13,3	101,66
60	14	107,01	13,5	103,18

Zaman (dakika)	0,0001 A	
	Akış oranı (mL/dakika)	Akı
		(L/m ² .saat) UF
5	12,5	95,54
15	13	99,36
30	13,2	100,89
60	13,4	102,42



Şekil 4.46. PVP destekli UF akı deney sonuçları

4.5.3 Polivinilpirolidon Destekli Elektrokoagülasyon-Ultrafiltrasyon Prosesi

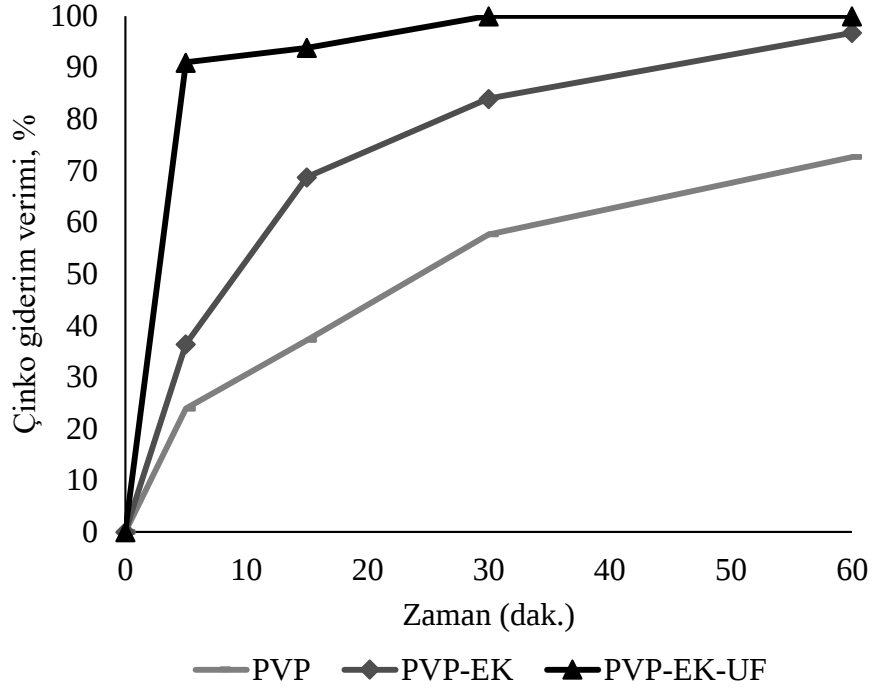
PVP destekli UF prosesinden sonra EK prosesinin de giderim verimine olan etkisini görmek amacıyla pH 9 değerinde ve PVP:Zn (1:1000) değerinde, EK ve UF sistem birlikte çalıştırılmıştır. Oluşturulan hibrit prosese ilişkin sonuçlar Çizelge 4.43’de ve Şekil 4.47-4.50’de sunulmuştur. Şekil 4.47’den de görüldüğü üzere çinko giderim verimi 5.dakikada yalnız polimer etkisiyle %36 seviyelerinde iken EK’un etkisiyle %91’e ulaşmıştır. 60 dakika proses süresinde ise verim %100’e yakın bulunmuştur. Yine KOİ parametresinde de EK’un etkisiyle 5 dakika proses süresinde bile %73 verim elde edilmiştir (Şekil 4.48). Yağ ve gres ve AKM parametrelerinde bütün proseslerde 5.dakikada verim %70 üzerindedir. EK’un etkisiyle ise 5 dakika proses süresinde her iki parametre için %90 üzerinde verime ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar proste atıksuyun geri kazanımı açısından değerlendirildiğinde EK’un etkisiyle bütün kirletici parametreleri için 60. dakika sonunda %100’e yakın giderim verimine ulaşılmış olup uygundur. Akıdaki değişime ilişkin sonuçlar ise Çizelge 4.44 ve Şekil 5.51’de sunulmuş olup akı zamanla olumlu yönde %5 artmıştır. Deney sonucunda PVP-EK prosesinde oluşan çamurda ağır metal analizi yapılmıştır. Çamurda 7,14 mg/g çinko, 0,42 mg/g demir, 0,07 mg/g kalay, 0,02 mg/g alüminyum, 0,014 mg/g bakır, 0,007 mg/g kurşun, 0,007 mg/g molibden ve 0,006 mg/g nikel metali tespit edilmiştir (%92,8 çinko, %5,49 demir, %0,96 kalay, %0,3 alüminyum, %0,18 bakır, %0,099 kurşun, %0,099 molibden ve %0,092 nikel) (Şekil 4.52). Deneylerde metal iyonu konsantrasyonunu tayin etmek için Perkinelmer Optima 2100 DV ICP-OES- USA (Eşzamanlı İndüktif Eşleşmiş Plazma-Optik Emisyon Spektrometresi) kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlardan çinko giderim mekanizmasında birer kolloid olan PVP moleküllerinin çinko iyonlarıyla kompleksleşmesi sağlanmıştır. EK prosesi etkisi ile . pH 5 ve 7 aralığında elektrottan çözünerek suya geçen demir ve alüminyum gibi metal iyonlarının çinko ve diğer kirleticileri bünyelerine almaları ile UF membranından geçemeyecek boyutta floklar oluşmaktadır. pH 5 ve 7 aralığında giderim mekanizması; EK prosesi sonucunda oluşan demir hidroksit ve alüminyum hidroksit iyonlarının atıksu içerisinde bulunan çinko ve diğer kirleticileri bünyelerine almaları ile UF membranından geçemeyecek boyutta floklar oluşması esasına dayanmaktadır. Demir hidroksitler için pH aralığı daha geniştir (pH 4-12). Alkali şartlarda giderim mekanizması hem demir hidroksit iyonlarının atıksu içerisinde bulunan çinko ve diğer kirleticileri bünyelerine almaları

hemde oluşan OH⁻ iyonu etkisiyle çinko metalinin çinko hidroksit formunda ökelebilmesine bağlıdır. Bu duruma bağlı olarak yalnız polimer prosesine kıyasla PVP destekli EK-UF prosesi ile daha yüksek giderim verimleri elde edilmiştir (Mollah vd, 2001).

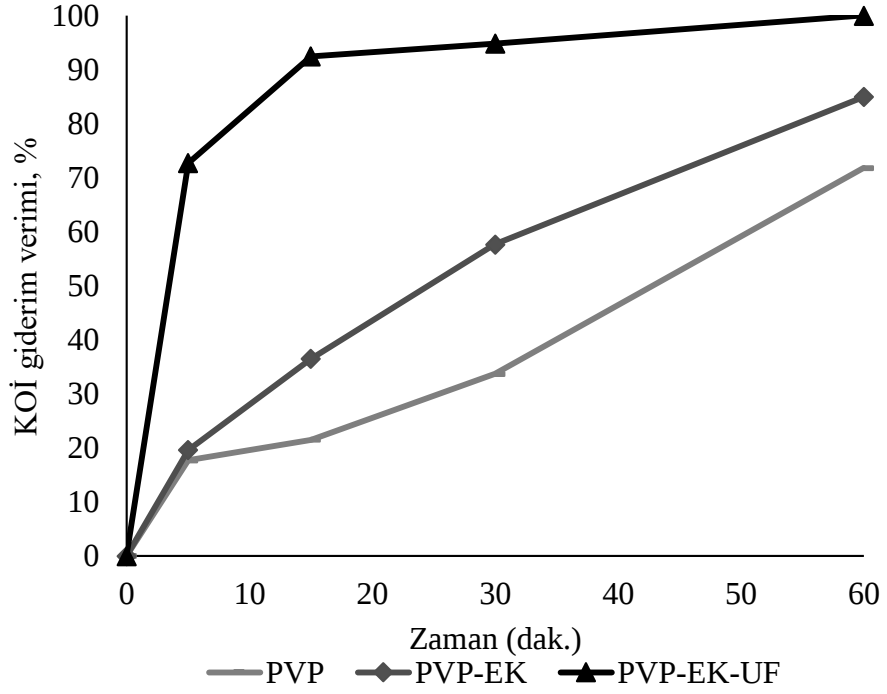


Çizelge 4.43. Atıksu için PVP:Zn (1:1000) ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen polimer destekli EK-UF sonuçları

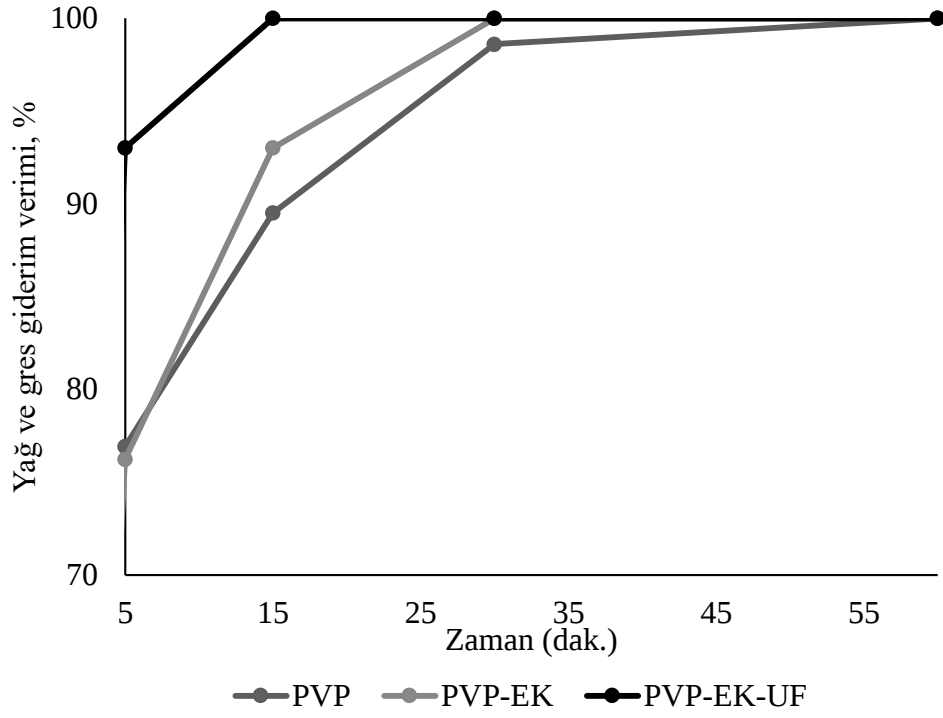
Zaman	Proses	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	Sıcaklık	Son pH	Son İletkenlik	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi
dakika		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		µS/cm	%	%	%	%
0	-	494,1	212,73	14,3	44,2	23,9	9	1684	0	0	0	0
5	PVP	375,7	175	3,3	7,5	-	-	-	23,96	17,74	76,92	83,03
15	PVP	310,1	167	1,5	3	-	-	-	37,24	21,50	89,51	93,21
30	PVP	209	141	0,2	0,5	-	-	-	57,70	33,72	98,60	98,87
60	PVP	135	60	0	0	-	-	-	72,68	71,80	100	100
5	PVP-EK	314	171	3,4	7	-	-	-	36,45	19,62	76,22	84,16
15	PVP-EK	154,1	135	1	3	-	-	-	68,81	36,54	93,01	93,21
30	PVP-EK	79	90	0	1	-	-	-	84,01	57,69	100	97,74
60	PVP-EK	16	32	0	0,1	-	-	-	96,76	84,96	100	99,77
5	PVP-EK-UF	143,12	58	1	0	-	-	-	91,03	72,74	93,01	100
15	PVP-EK-UF	45,1	16	0	0	-	-	-	93,87	92,48	100	100
30	PVP-EK-UF	14,2	11	0	0	-	-	-	100	94,83	100	100
60	PVP-EK-UF	0	2	0	0	23,9	9,47	2204	100	100	100	100



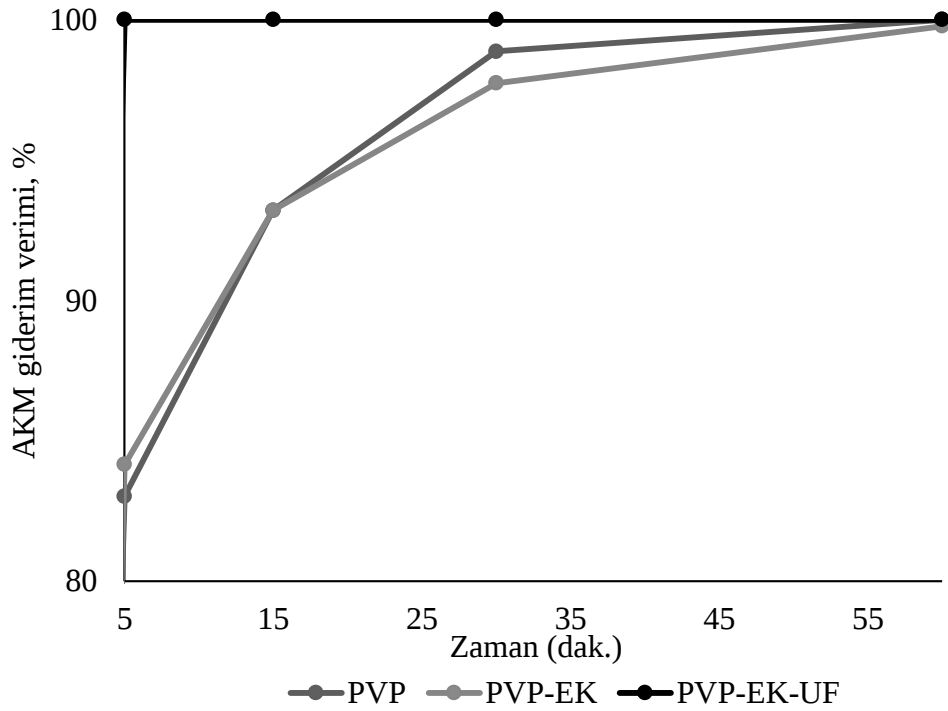
Şekil 4.47. Atıksu için zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PVP destekli EK-UF çinko giderimi deney sonuçları, pH 9; PVP:Zn (1:1000)



Şekil 4.48. Atıksu için zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PVP destekli EK-UF KOİ giderimi deney sonuçları, pH 9; PVP:Zn (1:1000)



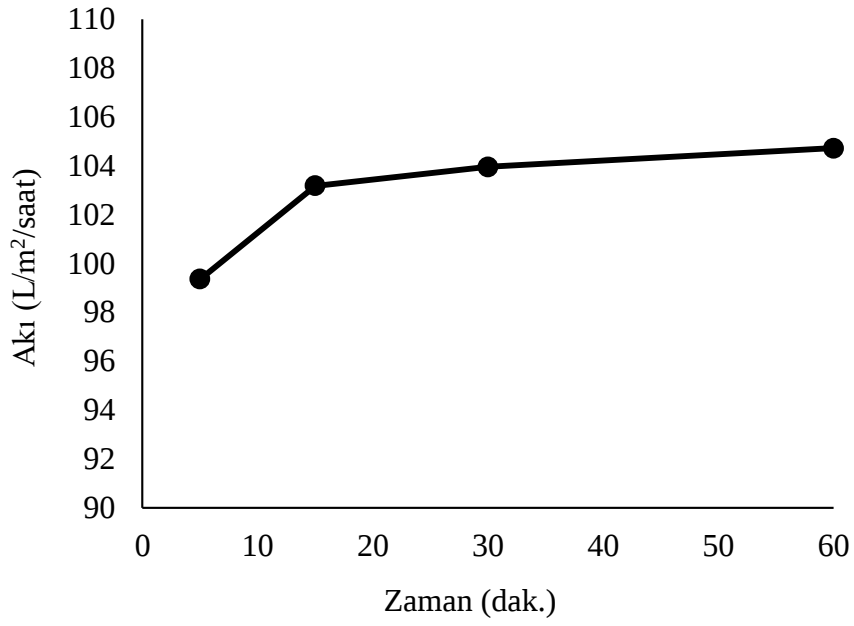
Şekil 4.49. Atıksu için zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PVP destekli EK-UF yağ ve gres giderimi deney sonuçları, pH 9; PVP:Zn (1:1000)



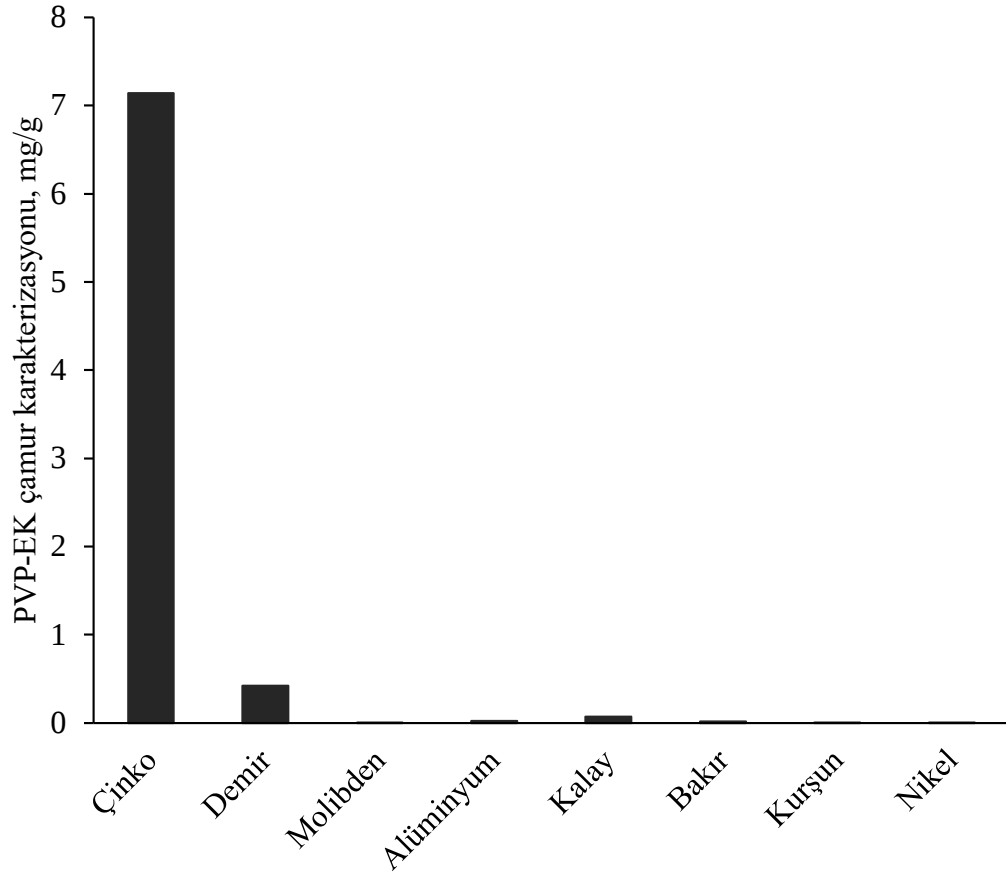
Şekil 4.50. Atıksu için zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PVP destekli EK-UF AKM giderimi deney sonuçları, pH 9; PVP:Zn (1:1000)

Çizelge 4.44. Atıksu için zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PVP destekli EK-UF akı deney sonuçları

Zaman (dakika)	Akış oranı (mL/dakika)	Akı (L/m ² .saat) UF
5	13	99,36
15	13.5	103,18
30	13.6	103,95
60	13.7	104,71



Şekil 4.51. PVP destekli EK- UF akı deney sonuçları, (pH 9, PVP:Zn (1:1000))



Şekil 4.52. PVP-EK çamur karakterizasyonu

4.5.4 Poliakrilikasit Destekli Ultrafiltrasyon Prosesinde Polimer Konsantrasyonunun Etkisi

Bu bölümde PAA destekli UF prosesinde PAA konsantrasyonunun kirlenici giderim verimi üzerine olan etkisine bakılmıştır. Deney şartları ve sonuçlar bütün parametreler için sırasıyla Çizelge 4.45-4.47 ve Şekil 4.53-4.56'de gösterilmiştir. Polimer konsantrasyon çalışmaları pH 9 değerinde yürütülmüştür. Şekil 4.53'den de görüldüğü üzere polimer konsantrasyonu arttıkça çinko, KOİ, yağ ve gres ve AKM parametrelerinde giderim verimi artmıştır. 60. dakika sonunda PAA:Zn (1:1000) değerinde UF etkisiyle %100'e yakın verime ulaşılmıştır. 1:1000 ve 1:10000 P:Zn değerinde ise 60.dakikada UF etkisiyle sırasıyla maksimum %100'e yakın ve %82 çinko giderim verimine ulaşılmıştır. PVP:Zn (1:100) değerinde 5 dakika proses süresinde yalnız polimer etkisiyle %62 ve polimer-UF etkisiyle %87 verim elde edilmiştir. UF etkisiyle KOİ giderimi ise PVP:Zn (1:10000) değerinde 5 dakika proses süresinde %25 seviyelerindeyken 60 dakika proses süresinde %38'e ulaşmıştır. PAA:Zn (1:100) değerinde ise polimer-UF etkisiyle 5. ve 60.

dakikalarda sırasıyla %93 ve %100'e yakın giderim gerçekleşmiştir (Şekil 4.54). Yağ ve gres ile AKM giderim verimi bütün polimer konsantrasyonlarında 60 dakika proses süresinde %100'e yakın bulunmuştur (Şekil 4.55-4.56). Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde çinko, polimer-UF etkisiyle KOİ, yağ ve gres ve AKM giderim verimleri PAA:Zn (1:100) değerlerinde 60.dakikada %100'e yakın olmuştur. Proseste atıksuyun geri kazanımı düşünüldüğünde dört kirletici parametresi için uygundur. Akı ise bütün polimer konsantrasyon değerlerinde zamanla birlikte artmıştır. Polimer P:Zn değeri arttıkça akı artmakta olup PAA:Zn (1:100000)değerinde bu artış %3 seviyelerindeyken PAA:Zn (1:100) değerlerinde %6 olmuştur. Sonuçlar Çizelge 4.48 ve Şekil 4.57'de sunulmuştur.). PAA konsantrasyonu 1:100 PAA:Zn'den ve 1:1000 PAA:Zn'e arttıkça çinko, KOİ, yağ ve gres, AKM giderim verimlerinin arttığı görülmektedir. Ennigrou ve arkadaşları PAA destekli UF prosesi ile sulu çözeltilerden bakır ve çinko giderimi üzerinde bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında 100,000 Da PAA ve 10 KDa boyutunda UF membranı kullanılmıştır. PAA konsantrasyonu 10^{-6} - 2.5×10^{-3} mol/L aralığında seçilmiştir. 1 bar basınçta 0,001 mol/L PAA konsantrasyonunda pH 5 değerinde %25 çinko giderimi elde etmişlerdir. pH 9 değerinde %75 verime ulaşmışlardır. Çinkoda pH 6'dan sonra giderim veriminin artmaya başladığını saptamışlardır (Ennigrou vd, 2014). PAA konsantrasyonu 1:100 PAA:Zn'den ve 1:1000 PAA:Zn'e arttıkça çinko, KOİ, yağ ve gres, AKM giderim verimlerinin arttığı görülmektedir.

Çizelge 4.45. Atıksu için PAA:Zn (1:100) ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PDUF sonuçları

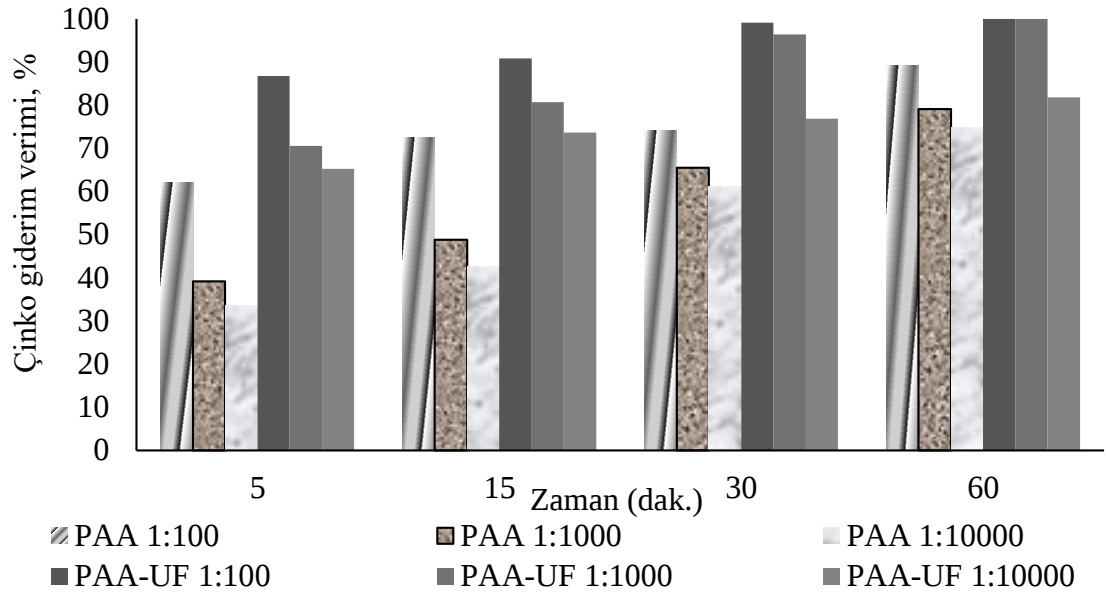
Zaman	Proses	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	Sıcaklık	Son pH	Son İletkenlik	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi
dakika		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		µS/cm	%	%	%	%
0	-	494,1	212,73	14,3	44,2	23,9	9	1684	0	0	0	0
5	PAA	187,8	95	1	7,8	-	-	-	61,99	55,34	93,01	82,35
15	PAA	135,5	71	0,3	3,6	-	-	-	72,58	66,62	97,90	91,86
30	PAA	128,12	0	0	1,1	-	-	-	74,07	100	100	97,51
60	PAA	53	0	0	0	-	-	-	89,27	100	100	100
5	PAA-UF	65,3	15,4	0,1	0	-	-	-	86,78	92,76	99,30	100
15	PAA-UF	45,45	8,1	0	0	-	-	-	90,80	96,19	100	100
30	PAA-UF	4	17,5	0	0	-	-	-	99,19	91,77	100	100
60	PAA-UF	0	0	0	0	23,9	9,75	2103	100	100	100	100

Çizelge 4.46. Atıksu için PAA:Zn (1:1000) ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PDUF sonuçları

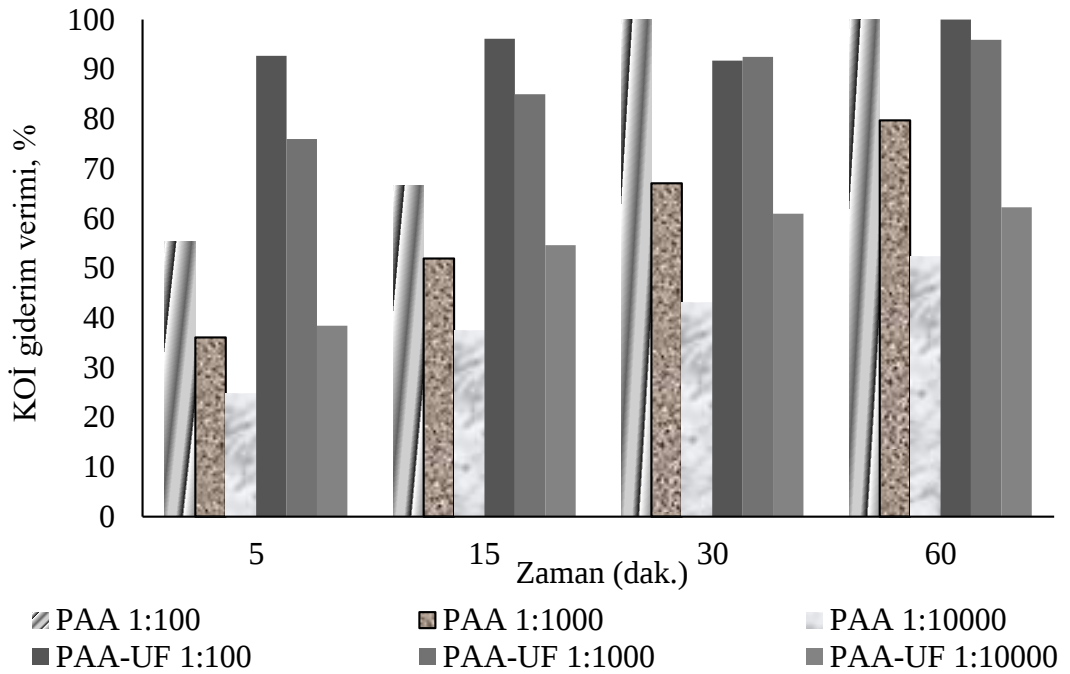
Zaman	Proses	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	Sıcaklık	Son pH	Son İletkenlik	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi
dakika		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		µS/cm	%	%	%	%
0	-	494,1	212,73	14,3	44,2	23,9	9	1684	0	0	0	0
5	PAA	300,7	136	2,5	6	-	-	-	39,14	36,07	82,52	86,43
15	PAA	252,7	102,3	1,3	2,1	-	-	-	48,86	51,91	90,91	95,25
30	PAA	170,2	70	0,5	0,2	-	-	-	65,55	67,09	96,50	99,55
60	PAA	103,5	43	0	0	-	-	-	79,05	79,79	100	100
5	PAA-UF	145,2	51	0,8	0	-	-	-	70,61	76,03	94,41	100
15	PAA-UF	95,1	32	0	0	-	-	-	80,75	84,96	100	100
30	PAA-UF	17,4	15,8	0	0	-	-	-	96,48	92,57	100	100
60	PAA-UF	0	8,5	0	0	23,9	9,27	1926	100	96	100	100

Çizelge 4.47. Atıksu için PAA:Zn (1:10000) ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PDUF sonuçları

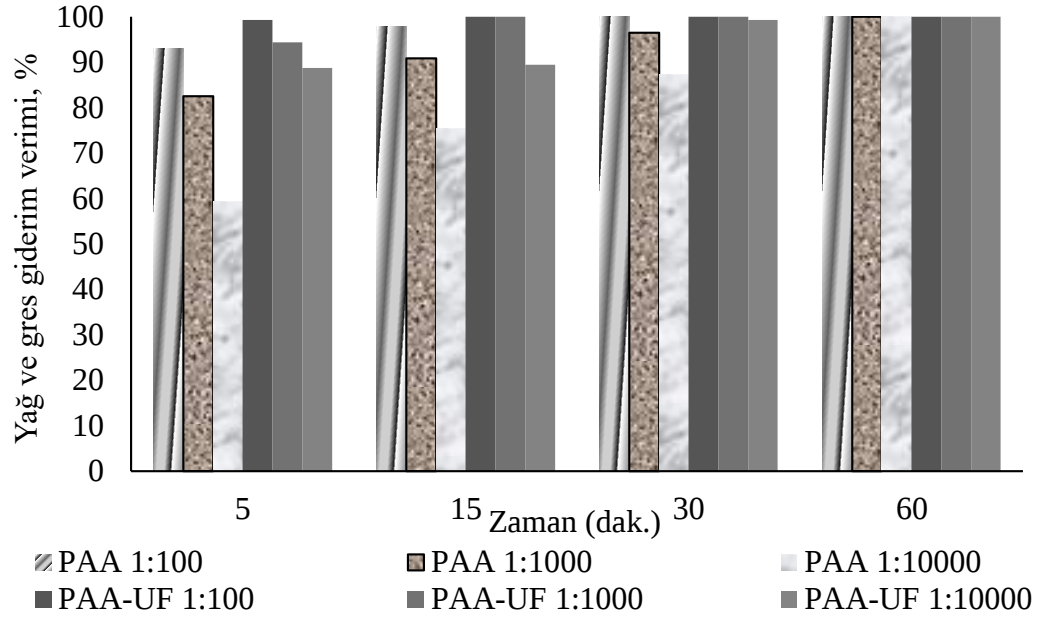
Zaman	Proses	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	Sıcaklık	Son pH	Son İletkenlik	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi
dakika		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		µS/cm	%	%	%	%
0	-	494,1	212,73	14,3	44,2	23,9	9	1684	0	0	0	0
5	PAA	328,2	160	5,8	7	-	-	-	33,58	24,79	59,44	84,16
15	PAA	284	133,1	3,5	3,4	-	-	-	42,52	37,43	75,52	92,31
30	PAA	192,3	121,2	1,8	2	-	-	-	61,08	43,03	87,41	95,48
60	PAA	124,3	101,2	0	1	-	-	-	74,84	52,43	100	97,74
5	PAA-UF	171,6	131	1,6	0	-	-	-	65,27	38,42	88,81	100
15	PAA-UF	130	96,5	1,5	0	-	-	-	73,69	54,64	89,51	100
30	PAA-UF	114,3	83,1	0,1	0	-	-	-	76,87	60,94	99,30	100
60	PAA-UF	90	80,2	0	0	23,9	9,11	1823	81,79	62,30	100	100



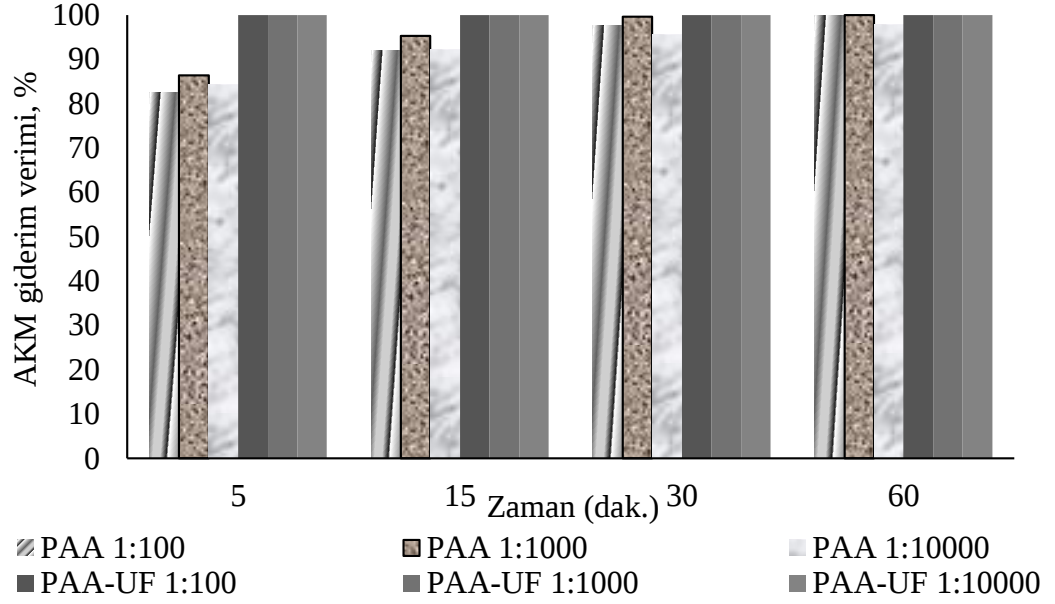
Şekil 4.53. Atıksu için PAA:Zn değerine ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PAA destekli UF çinko giderimi deney sonuçları, pH 9



Şekil 4.54. Atıksu için PAA:Zn değerine ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PAA destekli UF KOİ giderimi deney sonuçları, pH 9



Şekil 4.55. Atıksu için PAA:Zn değerine ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PAA destekli UF yağ ve gres giderimi deney sonuçları, pH 9

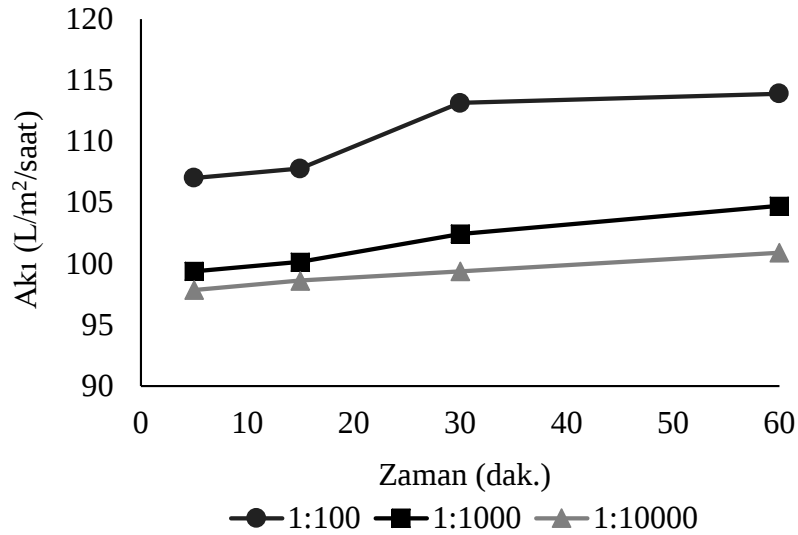


Şekil 4.56. Atıksu için PAA:Zn değerine ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PAA destekli UF AKM giderimi deney sonuçları, pH 9

Çizelge 4.48. Atıksu için PAA:Zn değerine ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PAA destekli UF akı deney sonuçları

0,01 A			0,001 A	
Zaman (dakika)	Akış oranı (mL/dakika)	Ak1 (L/m ² .saat) UF	Akış oranı (mL/dakika)	Ak1 (L/m ² .saat) UF
5	14	107,01	13	99,36
15	14,1	107,77	13,1	100,13
30	14,8	113,12	13,4	102,42
60	14,9	113,89	13,7	104,71

0,0001 A		
Zaman (dakika)	Akış oranı (mL/dakika)	Ak1 (L/m ² .saat) UF
5	12,8	97,83
15	12,9	98,60
30	13	99,36
60	13,2	100,89



Şekil 4.57. PAA destekli UF akı deney sonuçları

4.5.5. Poliakrilikasit Destekli Elektrokoagülasyon-Ultrafiltrasyon Prosesi

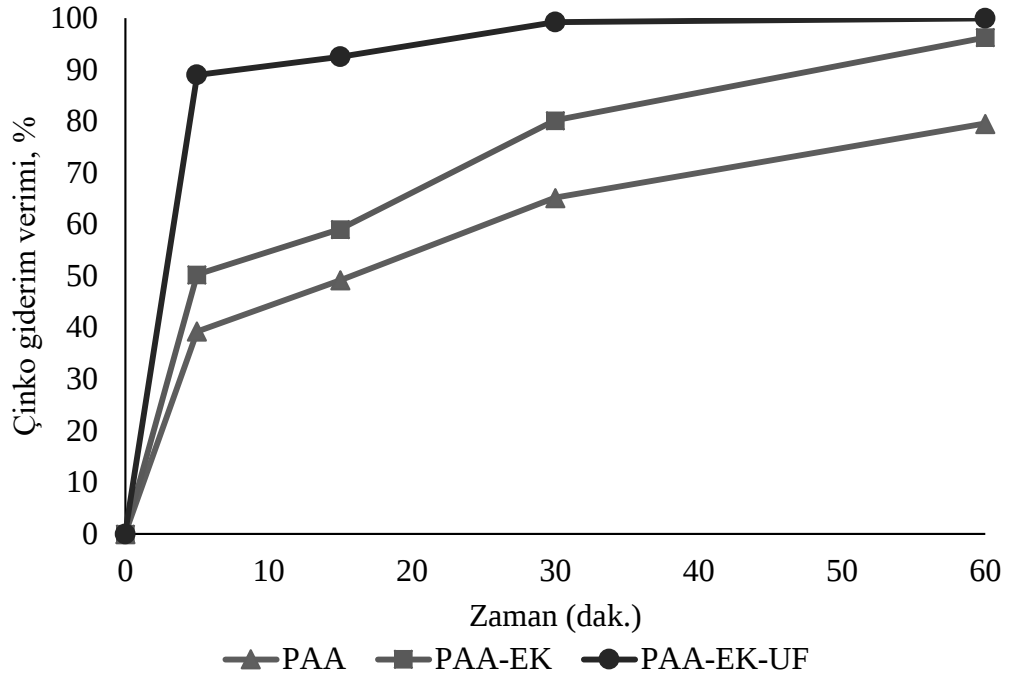
PAA destekli UF prosesinden sonra EK prosesinin de giderim verimine olan etkisini görmek amacıyla pH 9 değerinde ve PAA:Zn (1:1000) değerinde polimer, EK ve UF sistem birlikte çalıştırılmıştır. Oluşturulan hibrit prosese ilişkin sonuçlar Çizelge 4.49'da ve Şekil 4.58-4.61'da sunulmuştur. Şekil 4.58'den de görüldüğü üzere çinko giderim verimi 5.dakikada yalnız polimer etkisiyle %39 seviyelerinde iken EK'un etkisiyle %89'a ulaşmıştır. 60 dakika proses süresinde ise verim %100'e yakın olmuştur. Yine KOİ parametresinde de EK'un etkisiyle 5 dakika proses süresinde bile %76 verim elde edilmiştir (Şekil 4.59). Yağ ve gres ve AKM parametrelerinde bütün proseslerde 5.dakikada verim %80 üzerindedir. EK'un etkisiyle ise 5 dakika proses süresinde her iki parametre için %95 üzerinde verime ulaşılmıştır Atıksuyun proste geri kazanımı düşünüldüğünde üç kirletici parametresi için 60 dakika proses süresinde EK'un etkisiyle %100'e yakın giderim verimine ulaşıldığından uygundur ancak KOİ'de maksimum giderim verimi %96 seviyelerinde kalmıştır. Bu değer ile alıcı ortam deşarj standartlarını sağlanmaktadır. Akıdaki değişime ilişkin sonuçlar ise Çizelge 4.50 ve Şekil 5.62'de sunulmuş olup akı zamanla olumlu yönde %3 artmıştır. Deney sonucunda PAA-EK prosesinde oluşan çamurda ağır metal analizi yapılmıştır. Çamurda 6,8 mg/g çinko, 0,45 mg/g demir, 0,07 mg/g kalay, 0,012 mg/g alüminyum, 0,013 mg/g bakır, 0,007 mg/g kurşun, 0,0049 mg/g molibden ve 0,0071 mg/g nikel metali tespit edilmiştir (%92,4 çinko, %6 demir, %0,96 kalay, %0,17 alüminyum, %0,17 bakır, %0,094 kurşun, %0,067 molibden ve %0,096 nikel) (Şekil 4.63). Deneylerde metal iyonu konsantrasyonunu tayin etmek için Perkinelmer Optima 2100 DV ICP-OES- USA (Eşzamanlı İndüktif Eşleşmiş Plazma-Optik Emisyon Spektrometresi) kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlardan çinko giderim mekanizmasında birer kolloid olan PAA moleküllerinin çinko iyonlarıyla kompleksleşmesi sağlanmıştır. EK prosesi etkisi ile . pH 5 ve 7 aralığında elektrottan çözünerek suya geçen demir ve alüminyum gibi metal iyonlarının çinko ve diğer kirleticileri bünyelerine almaları ile UF membranından geçemeyecek boyutta floklar oluşmaktadır. pH 5 ve 7 aralığında giderim mekanizması; EK prosesi sonucunda oluşan demir hidroksit ve alüminyum hidroksit iyonlarının atıksu içerisinde bulunan çinko ve diğer kirleticileri bünyelerine almaları ile UF membranından geçemeyecek boyutta floklar oluşması esasına dayanmaktadır. Demir hidroksitler için pH aralığı daha geniştir (pH 4-12). Alkali şartlarda giderim mekanizması hem demir hidroksit

iyonlarının atıksu içerisinde bulunan çinko ve diğer kirleticileri bünyelerine almaları hemde oluşan OH^- iyonu etkisiyle çinko metalinin çinko hidroksit formunda çökebilmesine bağlıdır. Bu duruma bağlı olarak yalnız polimer prosesine kıyasla PAA destekli EK-UF prosesi ile daha yüksek giderim verimleri elde edilmiştir (Mollah vd, 2001).

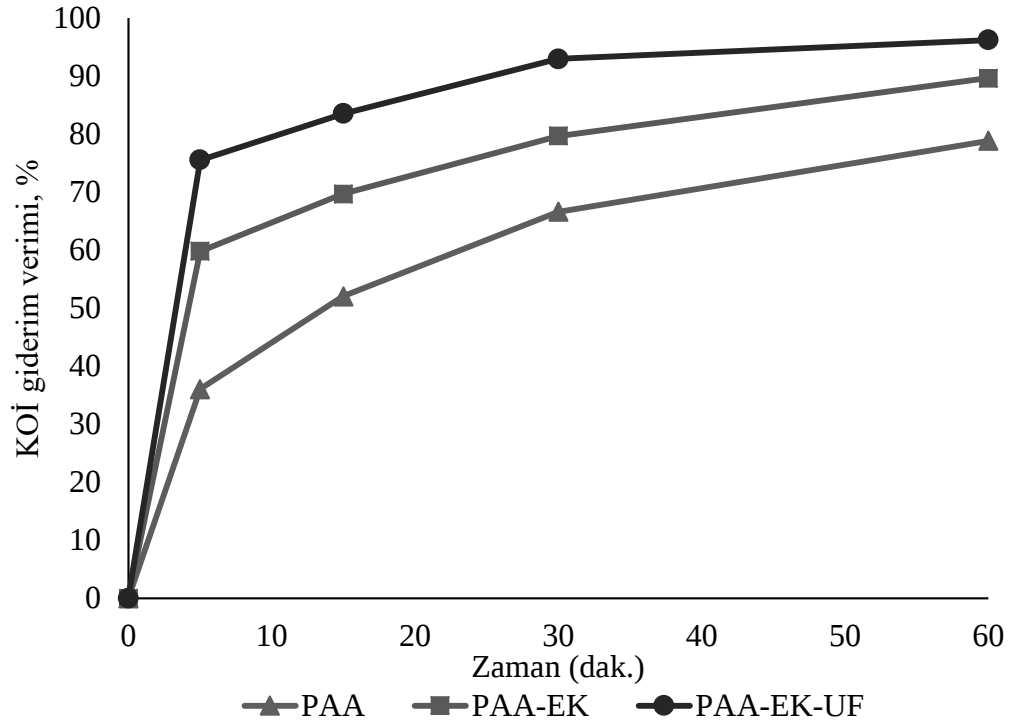


Çizelge 4.49. Atıksu için 1:1000 PAA:Zn ve pH 9 değerinde zamana bağlı olarak gerçekleştirilen polimer destekli EK-UF sonuçları

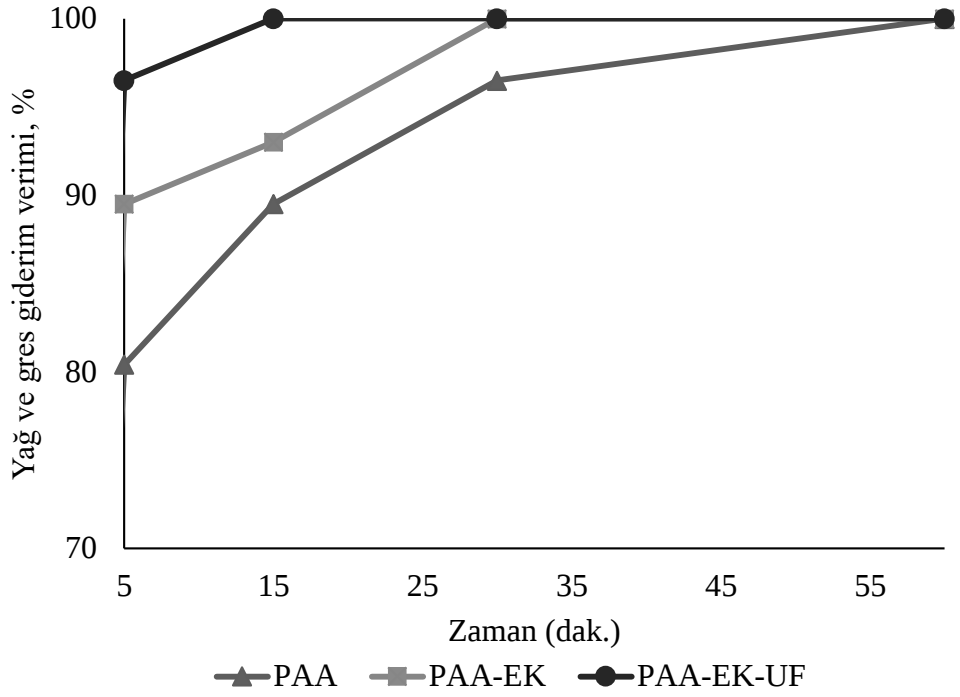
Zaman	Proses	Çinko	KOİ	Yağ ve Gres	AKM	Sıcaklık	Son pH	Son İletkenlik	Çinko giderim verimi	KOİ giderim verimi	Yağ ve gres giderim verimi	AKM Giderim verimi
dakika		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C		µS/cm	%	%	%	%
0	-	494,1	212,73	14,3	44,2	23,9	9	1684	0	0	0	0
5	PAA	300	136	2,8	5	-	-	-	39,28	36,07	80,42	88,69
15	PAA	251	102	1,5	2	-	-	-	49,20	52,05	89,51	95,48
30	PAA	172	71	0,5	0,1	-	-	-	65,19	66,62	96,50	99,77
60	PAA	101	45	0	0	-	-	-	79,56	78,85	100	100
5	PAA-EK	245,5	85,5	1,5	3,2	-	-	-	50,31	59,81	89,51	92,76
15	PAA-EK	202,1	64,4	1	2,1	-	-	-	59,10	69,73	93,01	95,25
30	PAA-EK	97,9	43,2	0	1	-	-	-	80,19	79,69	100	97,74
60	PAA-EK	18,5	22	0	0	-	-	-	96,26	89,66	100	100
5	PAA-EK-UF	143	52	0,5	0	-	-	-	89,06	75,56	96,50	100
15	PAA-EK-UF	96	35	0	0	-	-	-	92,57	83,55	100	100
30	PAA-EK-UF	18,4	15	0	0	-	-	-	99,28	92,95	100	100
60	PAA-EK-UF	0	8	0	0	23,9	9,39	2002	100	96,24	100	100



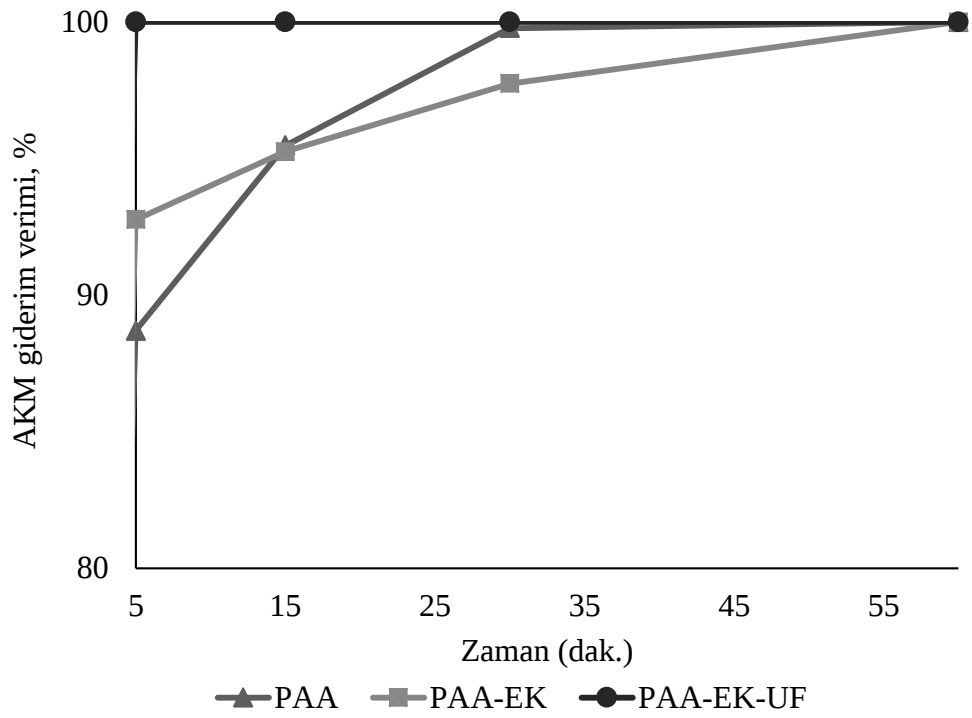
Şekil 4.58. Atıksu için zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PAA destekli UF-EK çinko giderimi deney sonuçları, pH 9; PAA:Zn (1:1000)



Şekil 4.59. Atıksu için zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PAA destekli UF-EK KOİ giderimi deney sonuçları, pH 9; PAA:Zn (1:1000)



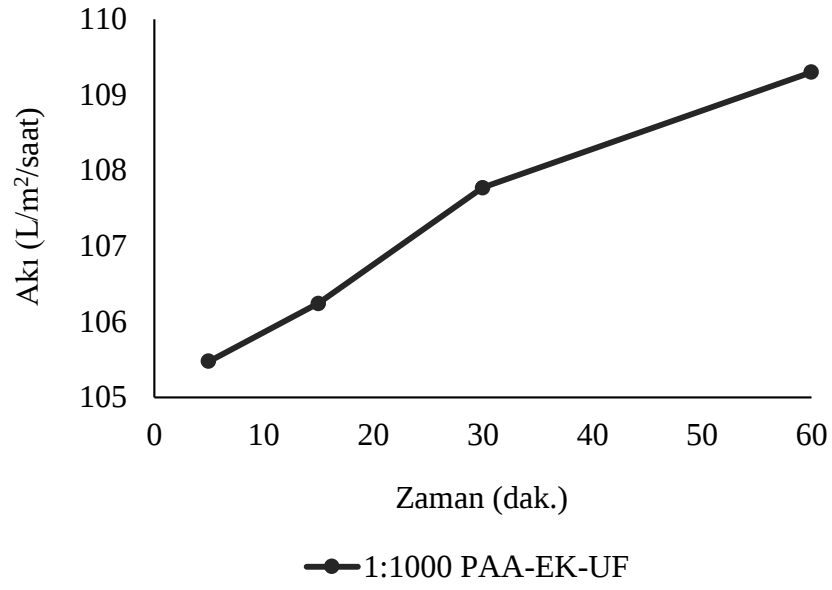
Şekil 4.60. Atıksu için zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PAA destekli UF-EK yağ ve gres giderimi deney sonuçları, pH 9; PAA:Zn (1:1000)



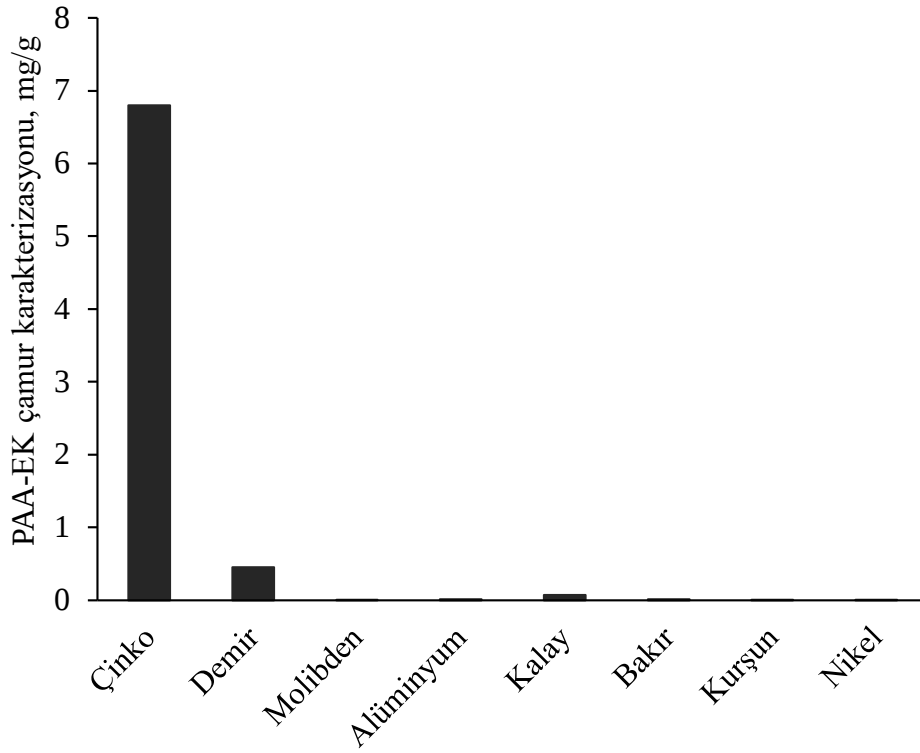
Şekil 4.61. Atıksu için zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PAA destekli UF-EK AKM giderimi deney sonuçları, pH 9; PAA:Zn (1:1000)

Çizelge 4.50. Atıksu için polimer konsantrasyonuna ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilen PAA destekli EK-UF akı deney sonuçları

Zaman (dakika)	Akış oranı (mL/dakika)	Akı ($L/m^2 \cdot \text{saat}$) UF
5	13,8	105,48
15	13,9	106,24
30	14,1	107,77
60	14,3	109,30



Şekil 4.62. PAA destekli EK-UF akı deney sonuçları



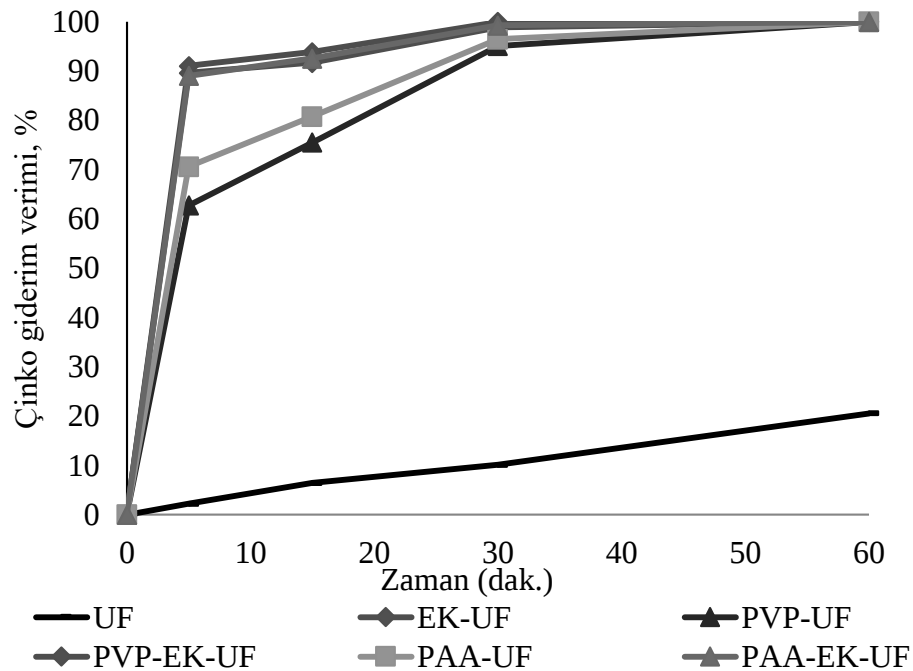
Şekil 4.63. PAA-EK çamur karakterizasyonu

4.6. Hibrit Proseslerin Karşılaştırılması

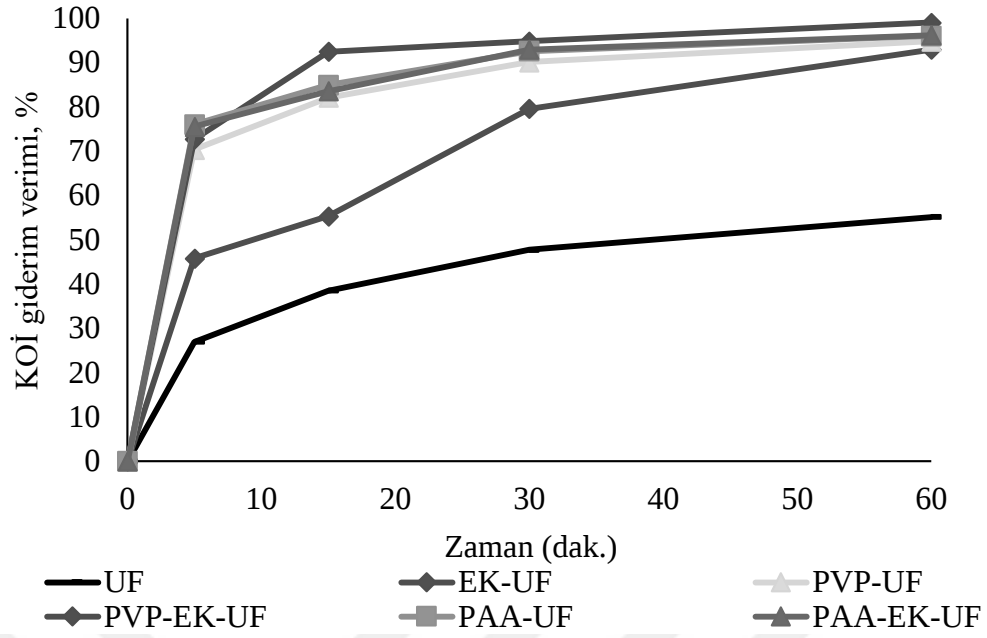
Bu bölümde; EK-UF, PVP-UF, PVP-EK-UF, PAA-UF ve PAA-EK-UF hibrit proseslerinin atıksu geri kazanımı kapsamında karşılaştırılması yapılmıştır. Karşılaştırma yapılırken pH 9, 1 A akım, PVP:Zn (1:1000) ve PAA:Zn (1:1000) koşullarına ait sonuçlar kullanılmıştır. Çinko giderim verimi açısından bakıldığında proseslerdeki durum küçükten büyüğe; PVP-UF<PAA-UF<EK-UF<PAA-EK-UF<PVP-EK-UF şeklindedir (Şekil 4.64). KOİ giderim verimi açısından bakıldığında; EK-UF<PVP-UF<PAA-EK-UF<PAA-UF<PVP-EK-UF şeklindedir (Şekil 4.65). Yağ ve gres gideriminde 10 dakika proses süresinden sonra bütün hibrit proseslerde %100'e yakın verim elde edilmiş olup, 5 dakika proses süresinde en iyi verim PVP-EK-UF prosesinde olmuştur (Şekil 4.66). AKM parametresinde ise 5 dakika proses süresinden sonra bütün hibrit proseslerde %100'e yakın verim elde edilmiştir (Şekil 4.67). Atıksuyun geri kazanımı açısından değerlendirildiğinde 60 dakika proses süresinde PVP destekli EK-UF prosesinde bütün kirletici parametrelerinde %100'e yakın giderim verimine ulaşılmıştır. Çamur metal tutma kapasitelerine bakıldığında

PVP destekli EK-UF prosesinde çinko metali tutma kapasitesi PAA destekli EK-UF prosesi ile çok yakın olmakla birlikte yapılan analizler sonucu PVP destekli EK-UF prosesinde %5 daha fazla bulunmuştur. Kullanılan PVP polimeri ortalama mol ağırlığı 40000 ve PAA polimeri mol ağırlığı 5100 şeklindedir. Çinko metali tutma kapasitesi PAA destekli EK-UF prosesi ile çok yakın olmakla birlikte PVP destekli EK-UF prosesinde %5 daha fazla olması durumu mol ağırlığı farkından kaynaklı olabilir.

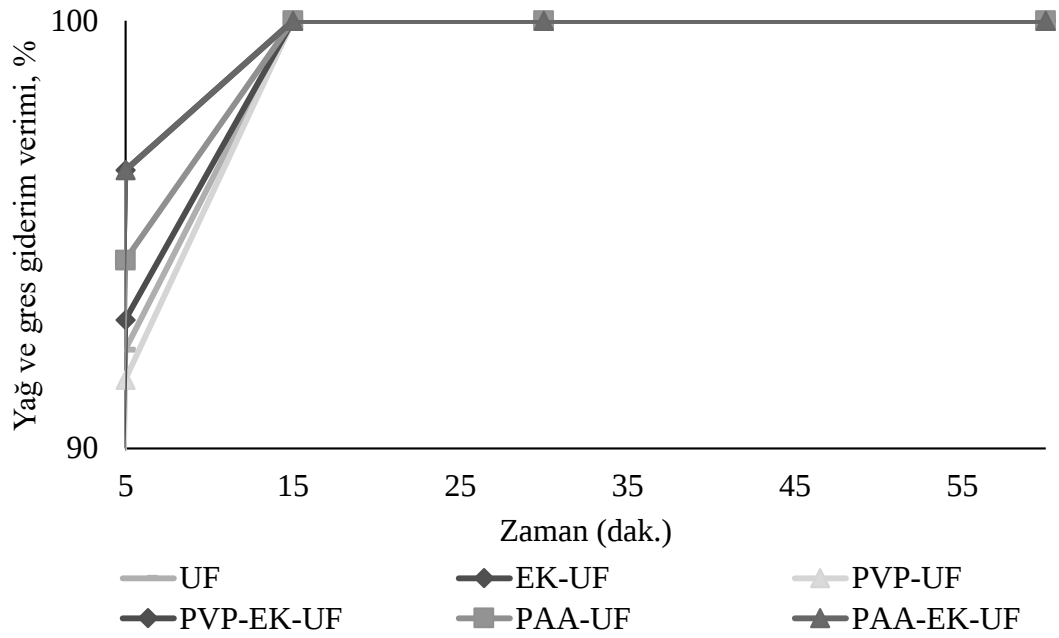
UF sistemi ile iyonların giderimi mümkün olmamaktadır. Bu yüzden proseslerde iletkenlik değerlerinde bir değişim gözlenmemiştir. Elektriksel iletkenlik artışı ortamda tuz iyonlarının artışı anlamına gelmektedir. Polimer destekli UF ve EK-UF proseslerinde de polimerlerin yapısında bulunan tuzların etkisiyle iletkenlikte bir miktar artış olduğu söylenebilir. Arslan, 2010 tekstil endüstrisinde farklı proses atıksularının arıtımında membran uygulamaları konulu çalışmasında; tekstil endüstrisinin farklı proseslerine ait ham atıksular, NF membranları ve TO membranları kullanmıştır. Ön arıtma işlemlerinde UF membranları kullanmıştır. Tüm membranları incelendiğinde 3 bar basınç altında iletkenlik değerinin önce sabit kaldığı daha sonra ise yükselmeye başladığı görülmüşlerdir.



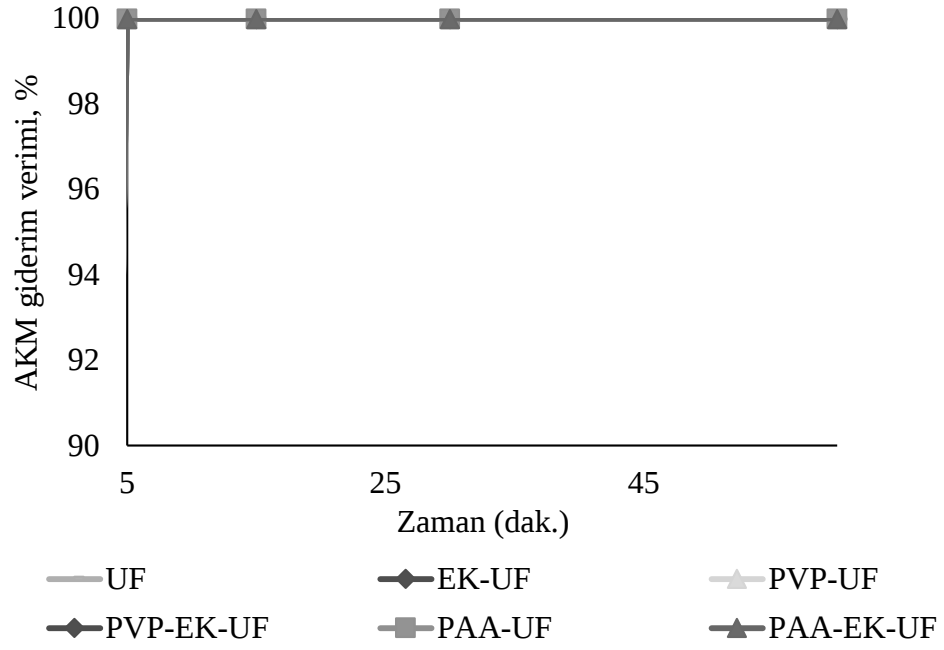
Şekil 4.64. UF, EK-UF, PVP (PVP) destekli UF, PVP destekli EK-UF, PAA destekli UF ve PAA destekli UF-EK çinko giderimi deney sonuçları, (pH 9; 1 A; PVP:Zn (1:1000))



Şekil 4.65. UF, EK-UF, PVP (PVP) destekli UF, PVP destekli EK-UF, PAA destekli UF ve PAA destekli UF-EK KOİ giderimi deney sonuçları, (pH 9; 1 A; PVP:Zn (1:1000))



Şekil 4.66. UF, EK-UF, PVP (PVP) destekli UF, PVP destekli EK-UF, PAA destekli UF ve PAA destekli UF-EK yağ ve gres giderimi deney sonuçları, (pH 9; 1 A; PVP:Zn (1:1000))



Şekil 4.67. UF, EK-UF, PVP (PVP) destekli UF, PVP destekli EK-UF, PAA destekli UF ve PAA destekli UF-EK AKM giderimi deney sonuçları, (pH 9; 1 A; PVP:Zn (1:1000))

EK-UF, PVP-UF, PVP-EK-UF, PAA-UF ve PAA-EK-UF hibrit proseslerde pH 9, 1 A akım, PVP:Zn (1:1000) ve PAA:Zn (1:1000) koşullarında metal konsantrasyonunu tayin etmek için Perkinelmer Optima 2100 DV ICP-OES- USA (Eşzamanlı İndüktif Eşleşmiş Plazma-Optik Emisyon Spektrometresi) kullanılarak analizler yapılmıştır. Yine proses suyunda da metal iyonlarının analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.51’de sunulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre pH 9, 1 A akım, PVP:Zn (1:1000) ve PAA:Zn (1:1000) koşulları için atıksuyun geri kazanımı açısından bakıldığında çinko gideriminde PVP-EK-UF ve PAA-EK-UF hibrit proseslerinde proses suyu konsantrasyon değerinin altında çinko konsantrasyonuna ulaşılmıştır. Alüminyum, molibden, bakır ve kurşun konsantrasyonları da göz önünde bulundurulduğunda PAA-EK-UF hibrit prosesinde proses suyu konsantrasyon değerleri sağlanmıştır.

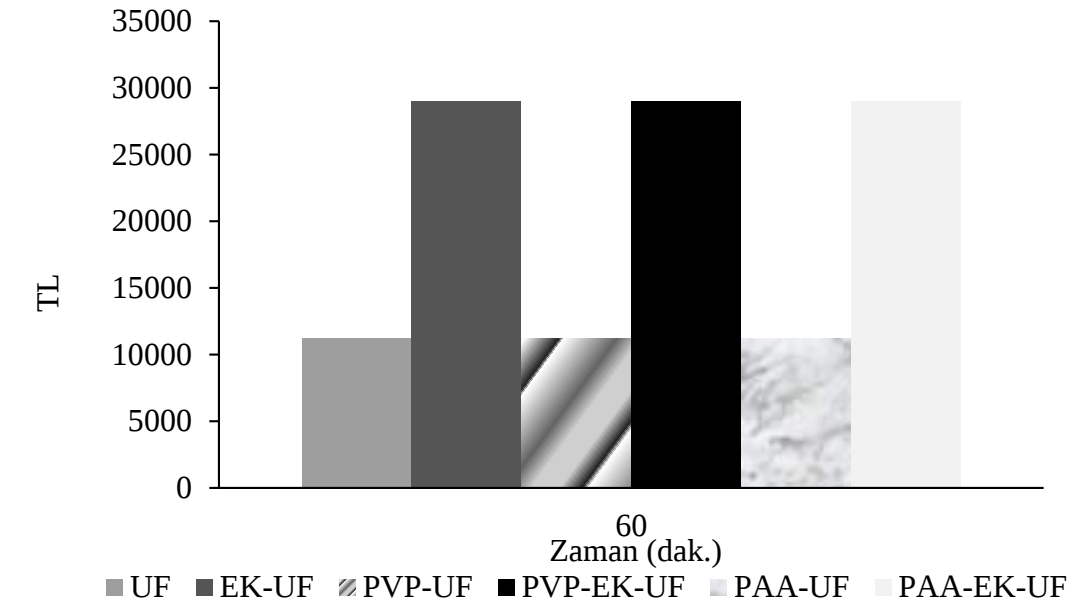
Çizelge 4.51. Proses suyu ve EK, EK-UF, PVP-UF, PAA-UF, PVP-EK-UF, PAA-EK-UF prosesleri optimum koşullar için metal iyonu analiz sonuçları

Parametre	Birim	Proses suyu	EK	EK-UF	PVP	PAA	PVP-UF	PAA-UF	PVP-EK-UF	PAA-EK-UF
Çinko	mg/L	0,06	55,8	3	78,8	75,6	0,14	0,25	0,05	0,06
Alüminyum	mg/L	0,02	2,3	0,54	1,4	3,6	0,045	0,076	0,045	0,02
Molibden	mg/L	0,03	1,9	0,285	0,18	0,18	0,019	0,019	0,019	0,019
Bakır	mg/L	0,02	-*	0,54	-*	-*	-*	-*	0,031	0,023
Kurşun	mg/L	0,006	-*	0,195	-*	-*	-*	0,016	-*	0,007
Kadmiyum	mg/L	-*	-*	-*	-*	-*	-*	-*	-*	-*
Kobalt	mg/L	-*	-*	-*	-*	-*	-*	-*	-*	-*
Krom	mg/L	-*	-*	-*	-*	-*	-*	-*	-*	-*
Demir	mg/L	-*	0,03	-*	-*	-*	-*	-*	-*	-*
Mangan	mg/L	-*	-*	-*	-*	-*	-*	-*	-*	-*
Nikel	mg/L	-*	-*	-*	-*	-*	-*	-*	-*	-*
Kalay	mg/L	-*	-*	-*	-*	-*	-*	-*	-*	-*

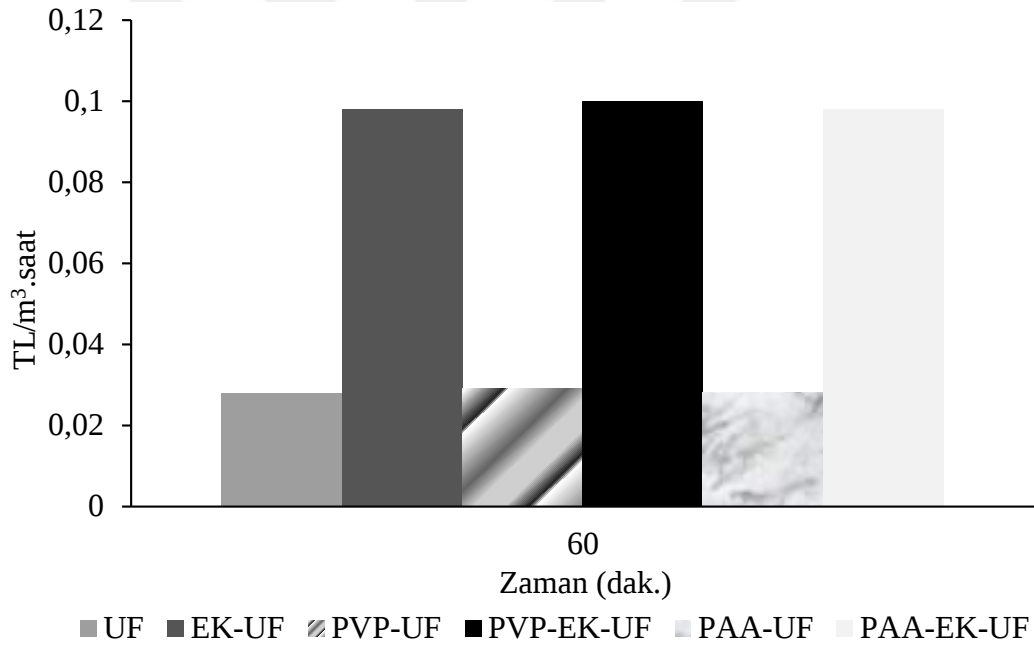
*Cihaz tayin sınırının altında.

4.7. Hibrit Proseslerde Maliyet Açısından Karşılaştırma

Bu bölümde; EK-UF, PVP-UF, PVP-EK-UF, PAA-UF ve PAA-EK-UF hibrit proseslerinin laboratuvar ölçeğinde ilk yatırım ve işletme maliyetleri açısından karşılaştırılması yapılmıştır. Karşılaştırma yapılırken pH 9, 1 A akım, PVP:Zn (1:100) ve PAA:Zn (1:1000) koşullarına ilişkin hesaplamalar yapılmıştır. İşletme maliyeti hesaplamalarında kullanılan birim enerji maliyeti 2018 EPDK tarifelerinde sanayiler için belirlenen verilere göre 0,37 TL/kWh olarak belirlenmiştir. Şekil 4.68’de görüldüğü üzere EK-UF, PVP-EK-UF, PAA-EK-UF proseslerinin ilk yatırım maliyetinin UF, PVP-UF ve PAA-UF proseslerine göre 3 kat daha fazla olarak belirlenmiştir. Kirlletici giderim verimi ve ilk yatırım maliyeti birlikte değerlendirildiğinde PDUF proseslerinin uygulanabilir olduğu söylenebilir. İşletme maliyeti olarak Şekil 4.69’da görüldüğü üzere EK-UF, PVP-EK-UF, PAA-EK-UF hibrit proseslerinin işletme maliyeti kWh/m³.saat olarak UF, PVP destekli UF ve PAA destekli UF proseslerine göre 3 kat daha fazla olarak belirlenmiştir. Deşarj standartları göz önünde bulundurulduğunda PDUF prosesleri hem ilk yatırım hemde işletme maliyetlerinin diğer proseslere göre daha düşük olması bakımından avantajlı ve uygulanabilir. Ancak atıksuyun geri kazanımı açısından bakıldığında 60 dakika proses süresinde PVP destekli EK-UF prosesinde bütün kirlletici parametrelerinde %100’e yakın giderim verimine ulaşılmıştır.



Şekil 4.68. Hibrit proseslerde ilk yatırım maliyeti karşılaştırması



Şekil 4.69. Hibrit proseslerde işletme maliyeti karşılaştırması

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada bir UF membran prosesi ve bir elektrokimyasal arıtım prosesinin entegre edildiği sürekli akış kontrollü elektro-UF sistemi geliştirilerek sistemin çinko kaplama endüstrisi atıksuyunun geri kazanımı için etkinliği ve verimliliği araştırılmıştır.

Öncelikle yalnız EK prosesi ile deneysel çalışmalar yürütülmüştür. EK çalışmasında öncelikle belirlenen sabit akım değerinde (1 A), atıksuyun kendi iletkenlik değerinde (1600 $\mu\text{S}/\text{cm}$) ve 0-30 dakika zaman aralığında (5, 10, 15 ve 30) pH denemeleri yapılmıştır. Deneyler pH 3, 5, 7, 8, 9 ve 11 değerlerinde yürütülmüştür. pH etkisinden sonra EK deneylerinde akımın/akım yoğunluğunun etkisi incelenmiştir. Deneyler pH 9 değerinde ve 0-30 dakika zaman aralığında, 0,5, 1, 2 ve 3 Amperde yürütülmüştür. Son olarak 0-60 dakika proses süresinde (5, 10, 15, 30, 45 ve 60) zaman denemeleri yapılmıştır. İkinci olarak sistem yalnız UF prosesi ile çalıştırılmıştır. UF çalışmasında öncelikle 0-60 dakika proses süresinde (5, 15, 30 ve 60) pH 3, 5, 7, 8, 9 ve 11 aralığında pH denemeleri yapılmıştır. Her bir deney setinde UF sistemi akış oranı tespit edilerek akı değerleri hesaplanmıştır.

EK ve UF deneyleri ayrı ayrı olarak denendikten sonra hibrit sistem oluşturularak EK-UF deneyleri yürütülmüştür. Hibrit sistemde öncelikle belirlenen sabit akım değerinde (1 A), atıksuyun kendi iletkenlik değerinde (1600 $\mu\text{S}/\text{cm}$) ve 0-60 dakika proses süresinde (5, 15, 30 ve 60) pH denemeleri yapılmıştır. Deneyler pH 3, 5, 7, 8, 9 ve 11 değerlerinde yürütülmüştür. pH etkisinden sonra EK-UF deneylerinde akımın/akım yoğunluğunun etkisi incelenmiştir. Deneyler pH 9 değerinde ve 0-60 dakika proses süresinde, 0,5, 1, 2 ve 3 Amperde yürütülmüştür. Her bir deney setinde UF sistemi akış oranı tespit edilerek akı değerleri hesaplanmıştır.

Son olarak PDUF çalışmaları yapılmıştır. Deneylerde İki farklı polimer (PVP ve poliakrilik asit sodyum tuzu) kullanılmıştır. PVP destekli UF prosesinde öncelikle; atıksuyun çinko konsantrasyonuna göre belirlenen oranda PVP:Zn (1:1000) ve 0-60 dakika proses süresinde (5, 15, 30 ve 60) pH 3, 5, 7, 8, 9 ve 11 değerlerinde denemeler yapılmıştır. pH etkisinden sonra PVP destekli UF deneylerinde polimer konsantrasyonunun etkisi incelenmiştir. Deneyler pH 9 değerinde ve 0-60 dakika proses süresinde, PVP:Zn (1:100-1:10000) aralığında

deneyler yürütülmüştür. Her bir deney setinde UF sistemi akış oranı tespit edilerek akı değerleri hesaplanmıştır. PVP ve EK destekli UF hibrit sisteminde de sadece optimum koşullarda (pH 9, PVP:Zn (1:1000) ve 0-60 dakika proses süresinde (5, 15, 30 ve 60)) deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Poliakrilik asit sodyum tuzu destekli UF prosesinde de; pH 9 değerinde ve 0-60 dakika proses süresinde, PAA:Zn (1:100-1:10000) değerine aralığında deneyler yürütülmüştür. Her bir deney setinde UF sistemi akış oranı tespit edilerek akı değerleri hesaplanmıştır. PAA ve EK destekli UF hibrit sisteminde de optimum koşullarda (pH 9, PAA:Zn (1:1000) ve 0-60 dakika proses süresinde (5, 15, 30 ve 60)) deneysel çalışmalar yürütülmüştür.

Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir;

1. İlk olarak yapılan EK çalışmasında belirlenen sabit akım değerinde (1 A), atıksuyun kendi iletkenlik değerinde (1600 μ S/cm) ve 0-30 dakika zaman aralığında (5, 10, 15 ve 30) yapılan pH denemeleri sonucunda çinko gideriminin asidik pH değerlerinde düşük olduğu belirlenmiştir. pH değeri arttıkça giderim verimliliğinin arttığı görülmüştür. En iyi verim pH 9 ve 11 değerlerinde elde edilmiştir. pH 9 ve 11’de 30 dakikalık deney sonunda ise sırasıyla %80 ve %82 çinko giderim verimine ulaşılmıştır. KOİ giderim verimi ise 30 dk deney süresi sonunda pH 3 değerinde %23 iken pH 9 ve pH 11 değerlerinde %60 seviyelerine ulaşmıştır. Yağ ve Gres ile AKM parametreleri incelendiğinde ise giderim verim 30 dakika sonunda bütün pH değerlerinde %95 üzerinde bulunmuştur. pH 9, 10 ve 11 seviyelerinde çinko hidroksit çözünürlüğünün düşük olması elde edilen deneysel sonuçları desteklemiştir. pH 9 ve pH 11 değerlerinde yüksek giderim verimlerine ulaşılmıştır. Daha sonra pH 9 değerinde ve 0-30 dakika zaman aralığında, 0,5, 1, 2 ve 3 Amperde deneyler yürütülmüştür. Akım yoğunluğu arttıkça giderim veriminin arttığı belirlenmiştir. 0,5 A değerinde özellikle çinko ve KOİ parametresinde giderim verimleri %40 seviyelerinde kalmıştır. pH 9 değerinde ve 1 A, 2 A ve 3 A akım değerlerinde giderim verimleri bütün kirletici parametrelerde birbirine yakın bulunmuştur. Bu bağlamda 1 A akım uygun olarak belirlenmiştir.
2. Hibrit proses çalışmalarından önce çalışmada kullanılan diğer prosesler arasında karşılaştırma yaparak hibrit sistemin etkisini ortaya koymak amacıyla yalnız UF deneyleri yapılmıştır. Çinko parametresi için verim

pH 9 ve 11 değerlerinde de düşük seviyede olup %30 değerinin üzerine çıkmadığı belirlenmiştir. KOİ parametresinde giderim verimi yine maksimum %50 seviyelerinde kalmıştır. Yağ ve gres ile AKM giderim verimi UF'un etkisiyle %100'e yakın bulunmuştur. Yalnız UF deneyinde akının zamanla azaldığı belirlenmiştir.

3. EK-UF hibrit sistem deneylerinde yine ilk olarak pH denemeleri yapılmış ve çinko gideriminin asidik pH değerlerinde düşük, pH 9 ve 11 değerlerinde ise yüksek olduğu belirlenmiştir. pH 9 değerinde 60.dakikada %100'e yakın çinko giderim verimine ulaşılmıştır. Hibrit sistemde KOİ giderim verimi ise 60 dk deney süresi sonunda pH 3 değerinde %35, pH 9 değerlerinde %93 olarak bulunmuştur. Yağ ve Gres ile AKM parametreleri incelendiğinde ise giderim veriminin 60 dakika proses süresi sonunda bütün pH değerlerinde %100'e yakın olduğu belirlenmiştir. EK prosesi hibrit sistemde UF'da akıyı olumlu yönde etkilemiştir. Alıcı ortam deşarj standartları açısından değerlendirildiğinde çinko konsantrasyonu 5 mg/L değerinin altına ancak hibrit proses etkisi ile düşmektedir. pH 9 ve pH 11 değerlerinde 60 dakika proses süresinde %100'e yakın giderim verimine ulaşılmıştır. Hibrit sistemde akının etkisi değerlendirildiğinde ise 3 A akım değerinde EK prosesinde çinko giderimi 5 dakika proses süresinde %60 seviyelerindeyken UF prosesi ile bu verim 5.dakikada %94 seviyelerine ulaşmıştır. 60. Dakika sonunda 1 A, 2 A ve 3 A değerlerinde hibrit sistem ile %100'e yakın verime ulaşılmıştır. Atıksu geri kazanımında %100'e yakın giderim verimine ulaşmak için maksimum alınan 3 A akım değerinde EK prosesi yeterli gelmemektedir. Diğer kirleticilerde elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde KOİ, Yağ ve Gres ve AKM için 3 A ve 60.dakikada %100'e yakın verime ulaşılmıştır.

4. PVP destekli UF prosesinde atıksu pH'sının kirletici giderim verimi üzerine olan etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde çinko, yağ ve gres ve AKM giderim verimlerinin pH 9 ve pH 11'de %100'e yakın olduğu belirlenmiştir. Proseste atıksuyun geri kazanımı düşünüldüğünde üç kirletici parametre için uygundur ancak KOİ'de maksimum giderim verimi %95 seviyelerinde kalmıştır. Bu değer

ile alıcı ortam deşarj standartlarının sağlandığı ancak atıksuyun geri kazanımı için daha yüksek polimer konsantrasyonunda çalışılmasının daha uygun olacağı belirlenmiştir. PVP:Zn (1:100, 1:1000 ve 1:10000) değerlerinde konsantrasyon çalışmaları yapılmıştır. Polimer-UF etkisiyle çinko, KOİ, yağ ve gres ve AKM giderim verimleri PVP:Zn (1:100) polimer değerinde 60 dakika proses süresinde %100'e yakın olmuştur. Proseste atıksuyun geri kazanımı düşünüldüğünde dört kirlenici parametre için uygun olduğu belirlenmiştir.

5. PVP destekli EK-UF deneylerinde elde edilen sonuçlar proseste atıksuyun geri kazanımı açısından değerlendirildiğinde EK'un da etkisiyle bütün kirlenici parametreleri için 60. dakika sonunda %100'e yakın giderim verimine ulaşılmış olduğu belirlenmiştir. Akının zamanla olumlu yönde %5 değerinde arttığı görülmüştür.
6. PAA destekli UF prosesinde çinko, KOİ, yağ ve gres ve AKM parametrelerinde giderim veriminin 60. dakika sonunda PAA:Zn (1:1000) değerinde UF etkisiyle %100'e yakın olduğu belirlenmiştir. Proseste atıksuyun geri kazanımı düşünüldüğünde dört kirlenici parametre için de uygun olduğu belirlenmiştir. Akı ise bütün polimer konsantrasyonlarında zamanla birlikte artmıştır. PAA:Zn değeri arttıkça akı artmakta olup PAA:Zn (1:10000) değerinde bu artış %3 seviyelerindeyken PAA:Zn (1:1000) değerlerinde %6 olarak bulunmuştur.
7. PAA destekli UF prosesinden sonra EK prosesinin de giderim verimine olan etkisini görmek amacıyla pH 9 değerinde ve PAA:Zn (1:1000) değerinde polimer, EK ve UF sistem birlikte çalıştırılmıştır. Çinko giderim verimi 5.dakikada yalnız polimer etkisiyle %39 seviyelerinde iken EK'un etkisiyle %89'a ulaşmıştır. 60 dakika proses süresinde ise verim %100'e yakın olmuştur. Yağ ve gres ve AKM parametrelerinde bütün proseslerde 5.dakikada verim %80 üzerinde bulunmuştur. EK'un etkisiyle ise 5 dakika proses süresinde her iki parametre için %95 üzerinde verime ulaşılmıştır. Proseste atıksuyun geri kazanımı düşünüldüğünde üç kirlenici parametre için 60 dakika proses süresinde

EK'un etkisiyle %100'e yakın giderim verimine ulaşıldığından uygundur ancak KOİ'de maksimum giderim verimi %96 seviyelerinde kalmıştır. Bu değer ile alıcı ortam deşarj standartlarının sağlandığı belirlenmiştir.

Bu çalışmada; EK destekli UF, PVP destekli UF, PVP destekli EK - UF, PAA destekli UF ve PAA destekli EK - UF hibrit proseslerinin atıksu geri kazanımı kapsamında karşılaştırılması yapılmıştır. Çinko giderim verimi açısından bakıldığında proseslerdeki durum küçükten büyüğe; PVP-UF<PAA-UF<EK-UF<PAA-EK-UF<PVP-EK-UF şeklinde bulunmuştur. KOİ giderim verimi açısından bakıldığında; EK-UF<PVP-UF<PAA-EK-UF<PAA-UF<PVP-EK-UF şeklinde bulunmuştur. Yağ ve gres gideriminde 10 dakika proses süresinden sonra bütün hibrit proseslerde %100'e yakın verim elde edilmiş olup, 5 dakika proses süresinde en iyi verim PVP-EK-UF prosesinde olmuştur. AKM parametresinde ise 5 dakika proses süresinden sonra bütün hibrit proseslerde %100'e yakın verim elde edilmiştir. Atıksuyun geri kazanımı açısından değerlendirildiğinde 60 dakika proses süresinde PVP destekli EK-UF prosesinde bütün kirletici parametrelerinde %100'e yakın giderim verimine ulaşılmıştır. Çalışma ile hibrit arıtma proseslerinin yaygınlaşması ve ülkemiz koşullarında ekonomik olarak uygulanabilir atıksu geri kazanım yöntemlerinin gelişmesine katkı sağlanması amaçlanmıştır.

Çalışmanın devamında EK destekli hibrit sistem deneylerinde EK prosesinden kaynaklı oluşan çamur miktarı ve çamur karakterizasyonu tespit edilerek çamur içeriğindeki metallerin geri kazanımına yönelik çalışmaların yapılması gereklidir. İletkenlik parametresinin giderilebilmesi hedeflendiği takdirde, UF sisteminden sonra ikinci kademe olarak TO sistemi kullanılması önerilebilir. Laboratuvar ölçekli olarak yapılan bu çalışmanın, uygulamaya tam olarak aktarılabilmesi için endüstride pilot ölçekli çalışmalar yapılmasına ve kullanılan UF membranının daha uzun süreli olarak çalıştırılması durumundaki davranışları izlenmesine ihtiyaç vardır.

KAYNAKLAR

- Ahmaruzzaman, M. 2011. Industrial wastes as low-cost potential adsorbents for the treatment of wastewater laden with heavy metals. *Advances in Colloid and Interface Science*, 166, 36–59.
- Arabian, M.A. 2011. New trends in removing heavy metals from industrial wastewater. *Journal of Chemistry*, 4, 361–377.
- Aran, A. Temel M.A. 2004a. *Paslanmaz Çelik Yassı Mamuller Üretimi Kullanımı Standartları* (İkinci baskı), Sarıtaş Teknik Yayınları, No:1.
- Aran, A. Temel M.A. 2004b. *Paslanmaz Çeliklerin İç Yapıları ve Temel Türleri* (İkinci baskı), Sarıtaş Teknik Yayınları, No:1.
- Aslan, M. 2016. *Membran teknolojileri* (Birinci baskı)., Türkiye Çevre Koruma Vakfı Yayını, 275, Ankara, Türkiye.
- Arslan, H. (2010). Tekstil Endüstrisinde Farklı Proses Atıksularının Arıtımında Membran Uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı. 354, İstanbul, Türkiye.
- Asano, T. Burton, F.L. Leverenz, H. Tsuchihashi, R. Tchobanoglous, G. 2007. *Water Reuse*. Copyright by Metcalf & Eddy, 1504, New York Chicago San Francisco Lisbon London Madrid Mexico City Milan New Delhi San Juan Seoul Singapore Sydney Toronto.
- Aslan, V. (2007). Türkiye’de Su Potansiyeli ve Atıksuların Geri Kullanımı. TMMOB 2. Su Politikaları Kongresi, 20-22 Mart, Bildiri Özetleri Kitabı, 273-277, Ankara, Türkiye.
- Ateşok, M.G. Eygi, M.S. Özer, M. 2008. *Kaolenin, Polimer Kullanımıyla Uygun Fiziksel Özellikte Seramik Hammaddesi Haline Getirilebilirliğinin Araştırılması*, Tübitak Proje No: 106M178.
- Ay, B. (2007). Organik polimerler ve kullanım alanları, Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 69. Denizli, Türkiye.
- Baker, W.R. 2012. *Membrane Technology and Applications*, A John Wiley & Sons, Ltd., Publication, 583. California.
- Barakat, M.A. 2011. New trends in removing heavy metals from industrial wastewater. *Arabian Journal of Chemistry*. 4, 361-377. doi.org/10.1016/j.arabjc.2010.07.019
- Can, T. (2002). Alüminyum Elektrotlar Kullanılarak Tekstil Atıksu ve Boyalarının Elektrokoagülasyon ile Arıtımı. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknolojisi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, Türkiye.

- Carolina, C.F., Kumara, P.S., Saravanana, A., Joshibaa, G.J., Naushadb, M. 2017. Efficient techniques for the removal of toxic heavy metals from aquatic environment: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5, 2782–2799.
- Carolyn, C.F. Kumar, P.S. Saravanan, A. Joshiba, G.J. Naushad, M. 2017. Efficient techniques for the removal of toxic heavy metals from aquatic environment: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 5, 2782-2799. doi.org/10.1016/j.jece.2017.05.029
- Charles, E. Carraher, J. (2003). *Polymer chemistry*. Copyright by Marcel Dekker. 902. New York.
- Casani, S. Knøchel, S. 2002. Application of HACCP to water reuse in the food industry. *Food Control*. 13, 315–327.
- Changmai, M. Pasawan, M. Purkait, M.K. 2019. Treatment of oily wastewater from drilling site using electrocoagulation followed by microfiltration. *Separation and Purification Technology*. 210, 463-472. doi.org/10.1016/j.seppur.2018.08.007
- Channarong, B. Lee, S.H. Bade, R. Oleg, V. 2010. Simultaneous removal of nickel and zinc from aqueous solution by micellar-enhanced ultrafiltration and activated carbon fiber hybrid process. *Desalination*. 262, 221–227. doi:10.1016/j.desal.2010.06.016
- Chen.G. 2004. Electrochemical Technologies in Wastewater Treatment. *Separation and Purification Technology*, 11-41.
- Chen, X., Chen, G. H., Yue, P. L. 2000. Separation of Pollutants From Restaurant Wastewater by Electrocoagulation. *Separation and Purification Technology*, 19, 65-76.
- Chen, X. Ren, P. Li, T. Tremblay, J.P. Liu, X. 2018. Zinc removal from model wastewater by electrocoagulation: Processing, kinetics and mechanism. *Chemical Engineering Journal*. 349, 358–367. doi.org/10.1016/j.cej.2018.05.099
- Crini, G. Crini, N.M. Rouge, F.N. Deon, S. Fievet, P. 2017. Metal removal from aqueous media by polymer-assisted ultrafiltration with chitosan. *Arabian Journal of Chemistry*. 10, S3826–S3839. doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.05.020
- Çağlarırnak, N. Hepçimen, A.Z. 2010. Ağır Metal Toprak Kirliliğinin Gıda Zinciri ve İnsan Sağlığına Etkisi. *Akademik Gıda*. 8 (2), 31-35.
- Desai, K.R. Murthy, Z.V.P. 2012. Removal of silver from aqueous solutions by complexation–ultrafiltration using anionic polyacrylamide. *Chemical Engineering Journal*. 185–186, 187–192. doi:10.1016/j.cej.2012.01.072

- Du, X. Qu, F. Liang, H. Li, K. Yu, H. Bai, L. Li, G. 2014. Removal of antimony (III) from polluted surface water using a hybrid coagulation–flocculation–ultrafiltration (CF–UF) process. *Chemical Engineering Journal*. 254, 293–301. doi.org/10.1016/j.cej.2014.05.126
- Ennigrou, D.J., Ali, M.B.S., Dhahbi, M. 2014. Copper and Zinc removal from aqueous solutions by polyacrylic acid assisted-ultrafiltration, *Desalination*, 343, 82–87.
- Ennigrou, D.J., Gzara, L., Romdhane, M.R.B., Dhahbi, M. 2009. Cadmium removal from aqueous solutions by polyelectrolyte enhanced ultrafiltration, *Desalination*, 246, 363–369.
- Erol, F. (2011). Zeytin Karasularının Membran Proseslerle Nihai Arıtımının İncelenmesi. Yüksek lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı. 153. İstanbul, Türkiye.
- Esquerrea, K.P.O. Kiperstok, A. Mattos, M.C. Cohimb, E. Kalida, R. Sales, E.A. Pires, V.M. 2011. Taking advantage of storm and waste water retention basins as part of water use minimization in industrial sites. *Resources, Conservation and Recycling*. 55, 316–324. doi:10.1016/j.resconrec.2010.10.004
- Fu, F., Wang, Q. 2011. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management*. 92, 407–418.
- Gupta, V.K., Nayak, A. 2012. Cadmium removal and recovery from aqueous solutions by novel adsorbents prepared from orange peel and Fe₂O₃ nanoparticles. *Chemical Engineering Journal*. 180, 81–90.
- Han, N. Huang, G. An, C. Zhao, S. Yao, Y. Fu, H. Li, W. 2015. Removal of Sulfonated Humic Acid through a Hybrid Electrocoagulation–Ultrafiltration Process. *American Chemical Society*. 54 (21), 5793–5801. doi: 10.1021/acs.iecr.5b00949
- Heakal, F.E.T. Ellatif, W.R.A. Tantawy, N.S. Taha, A.A. 2018. Impact of pH and temperature on the electrochemical and semiconducting properties of zinc in alkaline buffer media. *RSC Advances*. 8, 3816 doi.org/10.1039/c7ra12723e
- Huang, J. Yuan, F. Zeng, G. Li c, X. Gu, Y. Shi, L. Liu, W. Shi, Y. 2017. Influence of pH on heavy metal speciation and removal from wastewater using micellar-enhanced ultrafiltration. *Chemosphere*. 173, 199–206. doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.137
- Innocenzi, V. Prisciandaro, M. Tortora, F. Mazziotti di Celso, G. Vegliò, F. 2018. Treatment of WEEE industrial wastewaters: Removal of yttrium and zinc by means of micellar enhanced ultra filtration. *Waste Management*. 74, 393–403. doi.org/10.1016/j.wasman.2017.12.018

- İlhan, F. Kurt, U. Apaydın, Ö. Arslankaya, E. Gönüllü, T.M. (2007). Elektrokimyasal arıtım ve uygulamaları: katı atık sızıntı suyu çalışması. Türkiye. AB Sürecinde Türkiye’de Katı Atık Sızıntı Suyu Çalışması. 2 Mayıs. İstanbul, Türkiye.
- Ismail, Z.Z. Enas, A. Hashmi, A. 2011. Assessing the recycling potential of industrial wastewater to replace fresh water in concrete mixes: application of polyvinyl acetate resin wastewater. *Journal of Cleaner Production*. 19, 197-203.
doi:10.1016/j.jclepro.2010.09.011
- Jiao, A.Y. Li, Z.S. Bao, L.C. 2013. Poly(acrylic acid-co-maleic acid) for the enhanced treatment of Cu (II)-loaded aqueous solution and its reuse by ultrafiltration–electrolytic process. *Desalination*. 322, 29–36.
doi.org/10.1016/j.desal.2013.04.028
- Kalaiselvi, G., Maheswari, P., Balasubramanian, S., Mohan, D. 2013. Synthesis, characterization of polyelectrolyte and performance evaluation of polyelectrolyte incorporated polysulfone ultra filtration membrane for metal ion removal, *Desalination*. 325, 65–75.
- Kayacan, B.B. (2010). Pamuklu Tekstil Endüstrisi Atıksularının Membran Proseslerle Geri Kazanımının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı. 69. İstanbul, Türkiye.
- Kim, S. Chua, K.H. Al-Hamadania, A.J.Y. Parkb, C.M. Jangc, M. Kimd, D.H. Yue, M. Heof, J. Yoona, Y. 2017. Removal of contaminants of emerging concern by membranes in water and wastewater: A review. *Chemical Engineering Journal*. 335, 896-914.
doi.org/10.1016/j.cej.2017.11.044
- Kitis, M., Köseoğlu, H., Gül, N., Ekinci, F.Y. (2003). Atıksu arıtımı ve geri kazanımında membran bioreaktörleri, V. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi, 1-4 Ekim, Ankara, Türkiye.
- Koç, M. (2016). Polietilenoksit (PEO) ve Polivinilpirolidon (PVP)’un Kimyasal İlgili Profilleri ve Karışılabilirlikleri. Yüksek lisans tezi. Hacettepe Üniversitesi. Kimya anabilim Dalı. 89s. Ankara, Türkiye.
- Korus, I., Loska, K. 2009. Removal of Cr(III) and Cr(VI) ions from aqueous solutions by means of polyelectrolyte-enhanced ultrafiltration, *Desalination*, 247, 390–395.
- Kobya, M., Demirbas, E., Ozyonar, F., Sirtbas, G. and Gengeç, E. 2017. Treatments of alkaline non-cyanide, alkaline cyanide and acidic zinc electroplating wastewaters by electrocoagulation. *Process Safety and Environmental Protection*, 105, 373–385.
doi: 10.1016/j.psep.2016.11.020

- Kobya, M. Demirbas, E. Ozyonar, F. Sirtbas, G. Gengec, E. 2017. Treatments of alkaline non-cyanide, alkaline cyanide and acidic zinc electroplating wastewaters by electrocoagulation. *Process Safety and Environmental Protection*. 105, 373–385.
dx.doi.org/10.1016/j.psep.2016.11.020
- Koyuncu, İ. (2018). *Su/Atıksu Arıtılması ve Geri Kazanılmasında Membran Teknolojileri ve Uygulamaları* (Birinci Baskı). Türkiye Çevre Koruma Vakfı Yayınları, 1421, Ankara, Türkiye.
- Koyuncu, A. (2010). Hibrit Membran Prosesleri Kullanılarak İçme Suyundan Arseniğin Giderimi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Konya, Türkiye.
- Kumarasinghe, D. Pettigrew, L. Nghiem, L.D. 2009. Removal of heavy metals from mining impacted water by an electrocoagulation-ultrafiltration hybrid process. *Journal Desalination and Water Treatment*. 11, 66-72.
doi.org/10.5004/dwt.2009.844
- Magnenet, C., Jurin, F.E., Lakard, S., Buron, C.C., Lakard, B. 2013. Polyelectrolyte modification of ultrafiltration membrane for removal of copper ions. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 435, 170–177.
- Mollah, M.Y. Schennach, R. Parga, J.R. Cocke, D.L. 2001. Electrocoagulation (EC)-Science And Applications. *Journal of Hazardous Materials*. B84 P:29-41.
- Mollah, M.Y., Morkovsky, P., Gomes, J.A.G., Kesmez, M., Parga, J., Cocke, D.L. 2004. Fundamentals Present and Future Perspectives of Electrocoagulation, *Journal of Hazardous Materials*, 114, 199-210.
- Munir, A. (2006). Dead End Membrane Filtration. ENE 806 Laboratory Feasibility Studies in Environmental Engineering, (PID: A37589962), 33.
- Munoz, M.J.G., Rodriguez, M.A., Luque, S., Alvarez, J.R. 2006. Recovery of heavy metals from metal industry waste waters by chemical precipitation and nanofiltration. *Desalination*, 200, 742–744.
- Nayak, B. 2018. A Review of Electrocoagulation Process for Wastewater Treatment. *International Journal of ChemTech Research*. 11, 289-302.
doi.org/10.20902/IJCTR.2018.110333
- Ng, L.Y. Ng, C.Y. Mahmoudi, E. Ong, C.B. Mohammad, A.W. 2018. A review of the management of inflow water, wastewater and water reuse by membrane technology for a sustainable production in shrimp farming. *Journal of Water Process Engineering*. 23, 27-44.
doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.02.020
- Odabaş, C. (2007). *Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı, Askaynak Kaynak Tekniği Sanayi ve Ticaret* (İkinci baskı), Veritaş basım merkezi.

- Oden, M.K. Sari-Erkan, H. 2018. Treatment of metal plating wastewater using iron electrode by electrocoagulation process: Optimization and process performance. *Process Safety and Environmental Protection*. 119, 207–217. doi.org/10.1016/j.psep.2018.08.001
- Osifo, P.O. Neomagus, H.W.J.P. Merwe, H. Branken, D.J. 2017. Transport properties of chitosan membranes for zinc (II) removal from aqueous systems. *Separation and Purification Technology*. 179, 428–437. doi.org/10.1016/j.seppur.2017.02.030
- Özbay, İ., Kavaklı M. 2008. Türkiye’de ve diğer ülkelerde arıtılmış atıksuların geri kazanım uygulamalarının incelenmesi. Çevre Sorunları Sempozyumu, 14-17 Mayıs, Kocaeli Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye.
- Qiu, Y.R. Mao, L.J. 2013. Removal of heavy metal ions from aqueous solution by ultrafiltration assisted with copolymer of maleic acid and acrylic acid . *Desalination*. 329, 78–85. doi.org/10.1016/j.desal.2013.09.012
- Qui, Y.R., Mao, L.J. 2013. Removal of heavy metal ions from aqueous solution by ultrafiltration assisted with copolymer of maleic acid and acrylic acid, *Desalination*, 329, 78–85.
- Sardari, K. Askegaard, J. Chiao, Y.H. Darvishmanesh, S. Kamaz, M. Wickramasinghe, S.R. 2018. Electrocoagulation followed by ultrafiltration for treating poultry processing Wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 6, 4937–4944. doi.org/10.1016/j.jece.2018.07.022
- Sasson, M.B. Lin, Y.M. Adin, A. 2011. Electrocoagulation-membrane filtration hybrid system for colloidal fouling mitigation of secondary-effluent. *Separation and Purification Technology*. 82, 63-70. doi: 10.1016/j.seppur.2011.08.020
- Segura, S.G. Maesi, M. Eiband, S.G. Vieira de Melo, J. Alberto, C. Huitle, M. 2017. Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other Technologies. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 801, 267-299. dx.doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.07.047
- Schulmeyer, M.K. Ginebreda, A. Postigo, C. Serna, R.L. Pérez, S. Brix, R. Llorca, M. Alda, M.L. Petrovic, M. Munné, A. Tirapu, L. Barceló, D. 2011. Wastewater reuse in Mediterranean semi-arid areas: The impact of discharges of tertiary treated sewage on the load of polar micro pollutants in the Llobregat river (NE Spain). *Chemosphere*. 82, 670–678. doi:10.1016/j.chemosphere.2010.11.005
- Suk, D.E. Matsuura, T. 2007. Membrane-Based Hybrid Processes: A Review. *Journal. Separation Science and Technology*. 41, 595-626.

- Anonim (2017). Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater, 2017. <https://www.standardmethods.org/> (Erişim tarihi: 20.11.2018).
- Taş, D. (2006). Misel destekli ultrafiltrasyon yönteminin Cu(II) ve Cd(II) iyonlarının seçimli olarak ayrılması, Doktora tezi, Gazi üniversitesi, Fen bilimleri enstitüsü, 150. Ankara, Türkiye.
- Tsai, T.W. Chou, Y.H. 2004. Government policies for encouraging industrial waste reuse and pollution prevention in Taiwan. *Journal of Cleaner Production*. 12, 725–736.
doi:10.1016/S0959-6526(03)00053-2
- Un, U.T. Aytac, E. 2013. Electrocoagulation in a packed bed reactor-complete treatment of color and cod from real textile wastewater. *Journal of Environmental Management*. 123, 113-119.
doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.03.016
- Wong, H.M., Shang, C., Cheung, Y.K., Chen, G. (2002). Chloride Assisted Electrochemical Disinfection, Proceedings of the 8th Mainland Taiwan Environmental Protection Conference, October, Taiwan.
- Xu, L. Cao, G. Xu, X. Liu, S. Duan, Z. He, C. Wang, Y. Huang, Q. 2017. Simultaneous removal of cadmium, zinc and manganese using electrocoagulation: Influence of operating parameters and electrolyte nature. *Journal of Environmental Management*. 204, 394-403.
doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.020
- Verbych, S. Bryk, M. Zaichenko, M. 2005. Water treatment by enhanced ultrafiltration. *Desalination*. 198, 295–302.
doi:10.1016/j.desal.2005.12.029
- Yavuz, S. (2009). Boron Removal From Water by Polymer-Assisted Ultrafiltration Method. Yüksek lisans tezi. Ege Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. Kimya Bölümü. 222. İzmir, Türkiye.
- Zeftawy, M.A.M.E. Mulligan, C.N. 2011. Use of rhamnolipid to remove heavy metals from wastewater by micellar-enhanced ultrafiltration (MEUF). *Separation and Purification Technology*. 77, 120–127.
doi:10.1016/j.seppur.2010.11.030

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Merve DÖNMEZ ÖZTEL
Doğum Yeri : OF
Doğum Tarihi : 1985
Yabancı dili : İNGİLİZCE

Eğitim Durumu

Lise : Mustafa Kaya Anadolu Lisesi - 2003

Lisans : Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre
Mühendisliği Bölümü-2007

Yüksek Lisans : Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre
Mühendisliği Bölümü-2011

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Ondokuz Mayıs Üniversitesi (2009-2013)

Samsun Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü (2013-Devam ediyor)

Yayınlar

Dönmez Öztel, Merve; Camcı, Selva; Akbal, Feryal; Yağan, Mehtap. Adsorption of copper from aqueous solution onto natural sepiolite: equilibrium. kinetics, thermodynamics. and regeneration studies. 2016, Desalination and Water Treatment

Dönmez Öztel, Merve; Akbal, Feryal; Altaş, Levent. Arsenite removal by adsorption onto iron oxide-coated pumice and sepiolite, 2015, Environmental Earth Sciences

Dönmez Öztel, Merve; Akbal, Feryal Traditional and alternative technologies for arsenic removal from drinking waters. Journal of Engineering and Natural sciences Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi. 31, 386-408. 2013.

Dönmez, Merve; Akbal, Feryal; Öztürk, Bahtiyar. Termik Santrallerin Çevresel Etkilerinin Değerlendirilmesi. EKOLOJİ 2010, Aksaray, 5-7 Mayıs 2010.

Dönmez, Merve; Akbal, Feryal. The removal of As(V) from drinking waters by coagulation process using iron salts, International Conferance on Environmental Engineering and Technology, ICEET 2011, Amsterdam.

Dönmez, Merve; Kuleyin, Ayşe; Akbal, Feryal. Adsorption Of Zinc Onto Sepiolite. 7 Th Aegean Analytical Chemistry Days Lesvos Greece, AACD 29 September - 03 October 2010, Midilli.

Dönmez, Merve; Akbal, Feryal. “Arsenic Contamination in Groundwater and in-Situ Removal of Arsenic From Groundwaters” USAYS 2010, Uluslararası Sürdürülebilir Su ve Atıksu Yönetimi Sempozyumu, 26-27-28 Ekim 2010, Konya.

Dönmez, Merve; Akbal, Feryal. “İçme Sularında Arsenik Kirliliği ve Etkileri”, 9.Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi, 05-08 Ekim 2011, Samsun.

Dönmez, Merve; Akbal, Feryal. International Soil Science Congress on “Land degradation and Challenges in Sustainable Soil Management”, May 15-17 2012, Çeşme-İZMİR.

Dönmez, Merve; Akbal, Feryal. Arsenic Removal From Drinking Water By Coagulation Process, BALWOIS, 28 May, 2 June 2012 Ohrid, Republic of Macedonia.

Akbal, Feryal; Bahadır, Tolga; Cüce, Hüseyin; Şentürk, İlknur; Dönmez, Merve; Bakan, Gülfem; Büyükgüngör, Hanife. Marine Water Quality Assessment at the Mid-Black Sea Coast of Turkey, 28 May, 2 June 2012, Ohrid, Republic of Macedonia.

Cüce, Hüseyin; Bahadır, Tolga; Asan, Can; Küçük, Kübra; Dönmez, Merve; Güler, İlknur; Akbal, Feryal; Bakan, Gülfem; Büyükgüngör, Hanife. Orta-Karadeniz Kıyı Şeridi (Sinop-Samsun-Ordu) Deniz Suyu Ağır Metal Kirlilik Seviyelerinin İzlenmesi. Türkiye'nin kıyı ve deniz alanları IX. Ulusal kongresi , 14-17 Kasım 2012, Antakya.

Dönmez, Merve; Akbal, Feryal. Elektrokimyasal Yöntemle Cr(VI) Gideriminde İşletme Koşullarının Enerji Tüketimine Etkisi. CevkosVII, 22-23 Kasım, 2012. Gebze.

Dönmez Öztel, Merve; Akbal, Feryal. In-Situ Removal Technologies For Arsenic Contaminated Groundwaters” Digital Proceeding Of The ICOEST’2013, June 18 – 21, 2013, Cappadocia, Nevsehir, Turkey.

Dönmez Öztel, Merve; Akbal, Feryal. “Removal of Arsenate from Aqueous Solution by Electrocoagulation using Al-Fe Electrode System. Digital Proceeding Of The ICOEST’2013, June 18 – 21, 2013, Cappadocia, Nevsehir, Turkey.

Dönmez, Merve; Akbal, Feryal. Arsenic removal by iron oxide mineral: Limonite. EAERE, Prague, 2012.

Dönmez Öztel, Merve; Akbal, Feryal. Removal of Nickel from Industrial Wastewater by Electrocoagulation-Ultrafiltration Process 1ST International black sea congress on environmental sciences (IBCESS), August 31 - September 03, 2016, Giresun, TURKEY.

Dönmez Öztel, Merve; Akbal, Feryal. Kuleyin, Ayşe. Removal of zinc from industrial wastewater by electrocoagulation assisted ultrafiltration process. International Congress on Water, Waste and Energy Management , 2016, Roma , İtalya.

Dönmez Öztel, Merve; Akbal, Feryal. Removal of zinc from industrial wastewaters by the polyelectrolyte supported ultrafiltration process. UKSAY, 25-27 October, 2018, Denizli.

