

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**KİMYA ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ ELEKTROKOAGÜLASYON
PROSESİ İLE ARITIMI VE GERİ KAZANIMI**

Rümeysa ÖNEN

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

HAZİRAN 2023

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**KİMYA ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ ELEKTROKOAGÜLASYON
PROSESİ İLE ARITIMI VE GERİ KAZANIMI**

Rümeysa ÖNEN

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZİRAN 2023

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KİMYA ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ ELEKTROKOAGÜLASYON
PROSESİ İLE ARITIMI VE GERİ KAZANIMI**

**Rümeysa ÖNEN
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Bu tez, TÜBİTAK tarafından 2210/D Yurt İçi Sanayiye Yönelik Yüksek Lisans
Burs Programı kapsamında desteklenmiştir.**

HAZİRAN 2023

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KİMYA ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ ELEKTROKOAGÜLASYON
PROSESİ İLE ARITIMI VE GERİ KAZANIMI**

Rümeysa ÖNEN
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 13/07/2023 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Gökhan CİVELEKOĞLU
Prof. Dr. Bilgehan İlker HARMAN
Doç.Dr. Çiğdem MORAL

ÖZET

KİMYA ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ ELEKTROKOAGÜLASYON PROSESİ İLE ARITIMI VE GERİ KAZANIMI

Rümeysa ÖNEN

Yüksek Lisans Tezi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Gökhan CİVELEKOĞLU

İkinci Danışman: Doç.Dr. İbrahim Ethem KARADİREK

Haziran 2023; 68 sayfa

Kimya endüstrisi atıksuları, özelliklerine göre çeşitli arıtım işlemlerine tabi tutulur. Uygulanacak arıtma teknolojisi atığın karakteri, konsantrasyonu, akış hızı, su miktarı, deşarj limitleri ve suyun tekrar kullanılabilme özelliği gibi her üniteye göre değişebilen özelliklere bağlıdır. Kimyasal koagülasyon prosesine göre sağladığı avantajlar nedeniyle elektrokoagülasyon (EC) prosesi, ekonomik olarak ve çevresel uyum açısından önemli bir potansiyele sahiptir.

Literatürde pilot ya da tam ölçekte ve gerçek atıksularda yapılan çalışmalar; mevcut arıtma tesislerinde ise tam ölçekli tesis deneyimi oldukça sınırlıdır. Sentetik atıksular ile gerçekleştirilen laboratuvar ölçekli EC reaktörleri, prosesin tasarım kriterlerinin belirlenmesi için yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle endüstriyel atıksularda EC prosesinin ön arıtma ya da ana arıtma prosesi olarak kullanılmasına yönelik olarak, sahada gerçek atıksu ile pilot ölçekte çalışmaların yapılmasına ihtiyaç bulunmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, kimyevi gübre ve zirai ilaç üreten bir firmanın üretim aşamaları sonucunda ortaya çıkan atıksuyun EC prosesi ile arıtımı değerlendirilmiştir. Pilot ölçekte EC prosesi ile endüstriyel atıksu arıtımı uygulamaları analiz edildikten sonra EC prosesi işletme parametrelerinin optimizasyonu ve giderim verimlerini iyileştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Zirai ilaç ve gübre alanında faaliyet gösteren firmanın üretim aşamaları sonucunda ortaya çıkan atıksu numunelerinde ölçümlerin yapılması ile atıksuyun arıtım potansiyeli hipotetik olarak belirlenmiştir. EC sistemi için belirlenen optimum şartlarda, tam ölçekli mühendislik sistemlerinin projelendirilmesi ve işletilmesi için uygulanabilir veriler elde edilmiştir. 100 lt/saat kapasiteli pilot ölçekli EC reaktörü ön arıtma teknolojisi olarak kullanılmış ve sahada kurulan sistem kum ve karbon filtre kullanımı ile desteklenmiştir. Pilot ölçekli EC reaktöründe 1 cm aralıklarla yerleştirilmiş 16 adet alüminyum elektrot kullanılmıştır. 20 dakika hidrolik alıkonma süresinde, 11,16 A/m² akım yoğunluğunda işletilen EC reaktöründe, kimyevi gübre ve zirai ilaç endüstrisi atıksuyu için %37 iletkenlik, %84 bulanıklık, %86 kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), %28 askıda katı madde (AKM), %68 yağ-gres ve %71 toplam fosfor giderimi elde edilmiştir. Optimum işletme şartları altında, kum ve karbon filtre kullanımı ile %56 iletkenlik giderimi gerçekleşirken; bulanıklık, KOİ, AKM, yağ-gres, toplam azot ve toplam fosfor parametreleri için %95 üzerinde giderim verimlerine ulaşılmıştır.

Sahada işletilen sistemin ilk yatırım maliyeti 11.115 Euro ve toplam sarf malzeme işletme maliyeti 29,31 Euro/gün olarak hesaplanmıştır. Enerji ve sarf malzemeler için toplam işletme maliyeti 41,70 Euro/gün'dür. 1 m³ su için işletme maliyeti 6,95 Euro/m³gün olarak belirlenmiştir.

Gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda, EC prosesinin kimya endüstrisi atıksularının arıtımında etkili bir arıtma teknolojisi olarak kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Projelendirilen sistemin uzun vadede, yüksek kirlilik yüklerine sahip endüstriyel atıksuların arıtım ve geri kazanımında yaygın olarak kullanılan arıtma teknikleri içerisinde yer alması beklenmektedir.

ANAHTAR KELİMELER: Atıksu arıtımı, elektrokoagülasyon, geri kazanım, kimya endüstrisi

JÜRİ: Prof. Dr. Gökhan CİVELEKOĞLU

Prof. Dr. Bilgehan İlker HARMAN

Doç.Dr. Çiğdem MORAL

ABSTRACT

TREATMENT AND RECOVERY OF CHEMICAL INDUSTRY WASTEWATER BY ELECTROCOAGULATION PROCESS

Rümeysa ÖNEN

MSc Thesis in Environmental Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Gökhan CİVELEKOĞLU

Co-Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İbrahim Ethem KARADİREK

June 2023; 68 pages

Chemical industry wastewaters are applied to various treatment processes according to their characteristics. The treatment technology to be applied depends on the characteristics of the wastewater, concentration, flow rate and discharge limits, as well as the amount of water and its potential for reuse, etc. Due to its advantages in comparison to chemical coagulation, the electrocoagulation (EC) process has significant potential both economically and in terms of environmental compliance.

The studies conducted in the literature on pilot or full-scale and real wastewaters, as well as the full-scale plant experience in existing treatment plants, are quite limited. Laboratory-scale EC reactors with synthetic wastewater are insufficient to determine the design criteria for the process. Therefore, there is a need to conduct pilot scale studies with real wastewater in the field for the use of EC process as a pre-treatment or main treatment process in industrial wastewater.

In this study, the treatment of wastewater from a company producing chemical fertilizers and pesticides by EC process was evaluated. Following pilot scale analyses of industrial wastewater treatment applications with the EC process, optimization of EC process operating parameters was performed to improve removal efficiencies.

The treatment/recovery potential of the wastewater was determined hypothetically by measuring the wastewater samples produced as a result of the production stages of the company. At the optimum conditions determined for the EC system, feasible data were obtained for the design and operation of full-scale engineering systems. A pilot-scale EC reactor with a capacity of 100 l/h was used as pre-treatment technology and the on-site system was enhanced with sand and carbon filters. In the pilot-scale EC reactor, 16 aluminum electrodes were used, placed at intervals of 1 cm. The EC reactor was operated at a current density of 11.16 A/m² with a hydraulic retention time of 20 minutes and was able to remove 37% conductivity, 84% turbidity, 86% chemical oxygen demand (COD), 28% total suspended solids (TSS), 68% oil-grease and 71% total phosphorus for industrial wastewater from the chemical fertilizer and pesticide industry. Under optimum operating conditions, the use of sand and carbon filters resulted in a conductivity removal efficiency of 56%, while efficiencies above 95% were achieved for turbidity, oil-grease, TSS, COD, total nitrogen, and total phosphorus parameters.

The initial investment cost of the system operated in the field was calculated as

11,115 Euro and the total consumable cost was calculated as 29.31 Euro/day.

Total operating cost for energy and consumables is 41.70 Euro/day. The operational cost was calculated as 6.95 Euro/m³day.

As a result of the studies, it was concluded that the EC process can be used as an effective treatment technology for the treatment of chemical industry wastewater. In the long term, the projected system is expected to be one of the widely used treatment techniques for the treatment and recovery of industrial wastewater with high pollution loads.

KEYWORDS: Chemical industry, electrocoagulation, recovery, wastewater treatment

COMMITTEE: Prof. Dr. Gökhan CİVELEKOĞLU

Prof. Dr. Bilgehan İlker HARMAN

Assoc. Prof. Dr. Çiğdem MORAL

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, TÜBİTAK 2210-D Yurt İçi Sanayiye Yönelik Yüksek Lisans Burs Programı kapsamında zirai ilaç ve gübre üretimi alanında faaliyet gösteren bir firmanın üretim süreçleri sonucunda oluşan atıksuyun elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımı araştırılmıştır. 2210-D Yurt İçi Sanayiye Yönelik Yüksek Lisans Burs Programı kapsamında tez çalışmasının yürütülmesine destek sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Çalışmanın ortaya çıkması sırasında hoşgörüsü, anlayışı ve desteği ile her zaman yanımda olan, bilgisi ile bana yol gösteren ve teşvik eden, çalışmanın yürütülmesinde en büyük paya sahip değerli danışman hocalarım Prof. Dr. Gökhan CİVELEKOĞLU ve İbrahim Ethem KARADİREK'e tüm içtenliğim ile teşekkür ederim.

Saha çalışmalarının yürütülmesi için her türlü imkanı sunan, numunelerin temini sırasında yardımlarını esirgemeyen ve her türlü desteği sağlayan Platin Kimya yönetimine ve tüm çalışanlarına teşekkürü bir borç bilirim.

Pilot uygulamanın gerçekleştirilmesine destek veren ve tasarım, kalite kontrol, test, deneysel ölçüm/analiz, tamirat, bakım ve onarım vb. faaliyetlerini gerçekleştiren ESLİ Endüstriyel Ürünler Paz. San. ve Tic. Ltd. Şti. yönetimine ve çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Elde ettiğim başarılarda büyük paya sahip olan, hayatım boyunca beni destekleyen, hayata karşı güçlü duruşuyla örnek aldığım en büyük destekçim annem Tansel ÖNEN'e ve her daim yanımda olan, desteğini her zaman hissettiren babam Ayhan ÖNEN'e sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
AKADEMİK BEYAN	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	4
2.1. Kimya Endüstrisi.....	4
2.2. Elektrokoagülasyon Prosesi	5
2.2.1. Elektrokoagülasyon proses değişkenleri	7
2.2.1.1. Akım yoğunluğu	8
2.2.1.2. İletkenlik	8
2.2.1.3. Reaksiyon pH değeri.....	9
2.2.1.4. İşletme süresi.....	9
2.2.1.5. Elektrot malzemesi.....	9
2.2.1.6. Elektrotlar arası mesafe.....	10
2.2.1.7. Elektrotların yerleşimi ve bağlantı türü.....	10
2.3. Elektrokoagülasyon Prosesinin Uygulama Alanları.....	12
2.4. Elektrokoagülasyon Prosesinin Avantaj ve Dezavantajları	12
2.5. Literatürde Elektrokoagülasyon ile Yapılan Arıtılabilirlik Çalışmaları.....	13
2.6. Kimya Endüstrisinde Elektrokoagülasyon ile Yapılan Arıtılabilirlik Çalışmaları.....	20
3. MATERYAL VE METOT	26
3.1. Elektrokoagülasyon Reaktörü	27
3.2. Analizler/Ölçümler.....	29
3.3. Ön Testler.....	30
3.4. Gübre ve Zirai İlaç Endüstrisi Atıksuyu	30
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	36
4.1. Ön Test Sonuçları.....	36
4.1.1. Yumuşatma filtresi atıksuyu	36

4.1.2.	Şebeke suyu.....	37
4.1.3.	Ters osmoz (RO) konsatre akımı	38
4.2.	Gübre ve Zirai İlaç Endüstrisi Atıksuyu İçin Çalışma Sonuçları.....	40
4.2.1.	Saha ölçüm sonuçları	40
4.2.1.1.	İletkenlik giderim verimleri	41
4.2.1.2.	Bulanıklık giderim verimleri.....	42
4.2.2.	Laboratuvar ölçüm sonuçları.....	43
4.2.2.1.	Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) giderim verimleri	45
4.2.2.2.	Askıda katı madde (AKM) giderim verimleri.....	46
4.2.2.3.	Yağ-gres giderim verimleri	46
4.2.2.4.	Toplam fosfor giderim verimleri.....	47
4.2.2.5.	Toplam azot giderim verimleri.....	47
4.2.2.6.	Kümülatif giderim verimleri	49
4.3.	İşletme ve İlk Yatırım Maliyeti.....	51
5.	SONUÇLAR	56
6.	KAYNAKLAR	59
7.	EKLER.....	65
ÖZGEÇMİŞ		

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Kimya Endüstrisi Atıksularının Elektrokoagülasyon Prosesi ile Arıtımı ve Geri Kazanımı” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

13/07/2023

Rümeysa ÖNEN

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A : Akım yoğunluğu (Amper)

cm : Santimetre

dk : Dakika

gpm : Galon/dakika

hp : Beygir gücü

kg : Kilogram

kW : Kilowatt

L : Litre

lpm : Litre/dakika

mL : Mililitre

mm : Milimetre

m³ : Metreküp

PN : Basınç sınıfı

Pt-Co : Platin-kobalt renk endeksi

R² : Determinasyon katsayısı

rpm : Dönüş/devir sayısı

t : Zaman

V : Volt (Potansiyel)

μS/cm : Mikrosiemens/santimetre

°C : Santigrat derece

€ : Euro

\$: Dolar

% : Yüzde

Kısaltmalar

AKM	: Askıda katı madde
Al	: Alüminyum
BOİ	: Biyokimyasal oksijen ihtiyacı
Cd	: Kadmiyum
EC	: Elektrokogülasyon
EF	: Elektroflotasyon
EO	: Elektrooksidasyon
Fe	: Demir
FTIR	: Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
HNO ₃	: Nitrik asit
HPLC	: Yüksek Performanslı Sıvı Kromatografisi
H ₂ SO ₄	: Sülfürik asit
H ₃ PO ₄	: Fosforik asit
K	: Potasyum
KOİ	: Kimyasal oksijen ihtiyacı
MLD	: Minimum sıvı deşarjı
NA	: Kontak açık
NC	: Kontak kapalı
Ni	: Nikel
NSF	: Ulusal Sanitasyon/Hijyen Vakfı
N	: Azot
P	: Fosfor
PA	: Poliamid
Pb	: Kurşun
PE	: Polietilen

PVC : Polivinil klorür
RO : Ters osmoz (reverse osmosis)
TN : Toplam azot
TOK : Toplam organik karbon
TP : Toplam fosfor
TSS : Toplam askıda katı madde
Zn : Çinko



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. EC prosesi kirlетici giderim mekanizmaları	5
Şekil 2.2. EC prosesi bileşenleri ve kirlетici giderim mekanizmaları.....	6
Şekil 2.3. EC prosesini etkileyen faktörler	8
Şekil 2.4. pH'ın Al ve Fe bileşikleri oluşumuna etkisi	9
Şekil 2.5. a) Seri bağlı monopolar elektrokoagülasyon reaktörü; b) paralel bağlı monopolar elektrokoagülasyon reaktörü.....	11
Şekil 2.6. Paralel bağlı bipolar elektrokoagülasyon reaktörü	11
Şekil 3.1. Pilot ölçek EC reaktörüne ait 3D CAD modeli çizimleri	26
Şekil 3.2. Pilot ölçek EC reaktörüne ait montaj çizimi.....	27
Şekil 3.3. Pilot ölçek EC reaktörü.....	28
Şekil 3.4. a) EC akım regülatörü; b) EC reaktörü kontrol panosu	28
Şekil 3.5. a) Hach Lange DR/890 portatif multimetre; b) Hach Lange DR3900 spektrofotometre	29
Şekil 3.6. EC reaktörü şase montajı	32
Şekil 3.7. Kum filtre, karbon filtre ve paralel bağlı housing filtreler	33
Şekil 3.8. Filtrasyon besleme pompası ve manometre.....	33
Şekil 3.9. İşletmede ham su beslemesi yapılan zemin altı tankı.....	34
Şekil 3.10. Arıtma sisteminin devreye alınması	34
Şekil 3.11. EC reaktörü ile gübre ve zirai ilaç endüstrisi atıksuyu arıtım çalışmaları.....	35
Şekil 3.12. Arıtma ünitelerinden alınan numuneler; a) Ham atıksu; b) EC reaktör çıkışı; c) kum filtre çıkışı; d) karbon filtre çıkışı	35
Şekil 4.1. a) Tuz tankı, EC besleme pompası ve EC reaktörü; b) yumuşatma filtresi atıksuyu için EC çalışması	37
Şekil 4.2. Valfli yumuşatma filtresi ve RO sistemi	39
Şekil 4.3. RO konsantre akımının EC reaktörü ile arıtımı	39
Şekil 4.4. Çalışma sahasından alınan su numunelerinin ünite bazlı pH değişimleri	41
Şekil 4.5. Çalışma sahasından alınan su numunelerinin ünite bazlı sıcaklık değişimleri.....	41
Şekil 4.6. Ünite bazlı iletkenlik ölçüm sonuçları ve giderim verimleri	42
Şekil 4.7. Ünite bazlı bulanıklık ölçüm sonuçları ve giderim verimleri.....	43
Şekil 4.8. Ünite bazlı KOİ ölçüm sonuçları ve giderim verimleri	45
Şekil 4.9. Ünite bazlı AKM ölçüm sonuçları ve giderim verimleri.....	46
Şekil 4.10. Ünite bazlı yağ-gres ölçüm sonuçları ve giderim verimleri	46
Şekil 4.11. Ünite bazlı toplam fosfor ölçüm sonuçları ve giderim verimleri	47
Şekil 4.12. Ünite bazlı toplam azot ölçüm sonuçları ve giderim verimleri	49
Şekil 4.13. KOİ, AKM, yağ-gres, toplam azot ve toplam fosfor için ünite bazlı ve kümülatif giderim verimleri	50
Şekil 4.14. EC reaktörü, EC + kum filtre ve EC + kum filtre + karbon filtre için kümülatif giderim verimleri	50

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Kimyasal koagülasyon ve elektrokoagülasyonun prosesi karşılaştırması	1
Çizelge 2.1. Elektrokimyasal yükseltgenme ve indirgenme tepkimeleri.....	6
Çizelge 2.2. Literatürde EC prosesi kullanılarak yapılan çalışmaların özeti	14
Çizelge 3.1. Pilot ölçek EC reaktörü özellikleri	28
Çizelge 3.2. Pilot ölçek EC reaktörü için pano malzeme listesi	29
Çizelge 3.3. Fotometrik testler için kullanılan ölçüm kitleri	30
Çizelge 3.4. Gübre ve zirai ilaç endüstrisi atıksuyu ortalama analiz sonuçları	31
Çizelge 3.5. Arıtma sistemi malzeme listesi.....	31
Çizelge 4.1. Yumuşatma filtresi atıksu değerleri.....	36
Çizelge 4.2. Yumuşatma sistemi yıkama suyu için fiziksel parametreler	37
Çizelge 4.3. Şebeke suyu için fiziksel parametreler (Fe^{+2} elektrot)	38
Çizelge 4.4. Şebeke suyu için çalışma sonuçları (Fe^{+2} elektrot).....	38
Çizelge 4.5. Şebeke suyu için fiziksel parametreler (alüminyum elektrot)	38
Çizelge 4.6. Şebeke suyu için çalışma sonuçları (alüminyum elektrot)	38
Çizelge 4.7. Ters osmoz konsantre akımı için çalışma sonuçları	39
Çizelge 4.8. Ham atıksu ve ünite bazlı ürün suyu için detaylı analiz sonuçları	43
Çizelge 4.9. Ham atıksu ve ünite bazlı detaylı analiz sonuçlarının özeti	45
Çizelge 4.10. Kimya-gübre endüstrisi atıksuyu arıtma sistemi dizaynı için kabul edilen ham su analizi.....	51
Çizelge 4.11. Projelendirilen sisteminde kullanılacak olan arıtma üniteleri ve özellikleri.....	52
Çizelge 4.12. Kimyevi gübre ve zirai ilaç üretimi atıksuyu işletme maliyeti.....	55

1. GİRİŞ

Modern endüstrinin gelişimine bağlı olarak farklı karakterlerde ve daha yüksek debilerde atıksu oluşmaktadır. Oluşan atıksuların kanala ve/veya alıcı ortama deşarj edilmesi, su geri kazanımı ve ekonomik değeri bulunan materyallerin geri kazanım ihtimalini ortadan kaldırmakta, atıksu arıtma tesislerinin yükünü artırmakta ve çevre kirliliğine neden olmaktadır. Bu nedenle hem maliyet hem de giderim verimi açısından ihtiyaçları karşılayabilecek arıtım yöntemleri için arayışlar devam etmektedir. Bu arayışlar sırasında prosesin uygulanabilirliğinin kolay olması, maliyetin alternatiflerine göre daha düşük, verimin ise daha yüksek olması gibi unsurlar ön plana çıkmaktadır.

Kimya endüstrisi atıksularının arıtımı, kompleks kimyasal madde içeriğinden dolayı oldukça zordur. Atıksular yüksek konsantrasyonlarda kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ), toksik madde, askıda katı madde (AKM) ve renk içermektedir. Atıksuların toksik içeriği, biyolojik olarak arıtılabilirliği olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle atıksuların arıtılmasında konvansiyonel arıtma proseslerine (anaerobik, aerobik) ek olarak ön arıtma ve/veya ileri arıtma yöntemlerine başvurulmaktadır. Kimya endüstrisi atıksuları, özelliklerine göre çeşitli arıtım işlemlerine tabi tutulur. Uygulanacak arıtma teknolojisi atığın karakteri, konsantrasyonu, akış hızı, deşarj limitleri, atıksu miktarı ve suyun tekrar kullanılabilme özelliği gibi her üniteye göre değişebilen özelliklere bağlıdır.

Kimyasal koagülasyon prosesine göre sağladığı avantajlar nedeniyle Elektrokoagülasyon (EC) prosesi, hem ekonomiklik hem de çevresel uyum açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Elektrokoagülasyon prosesi, kimyasal koagülasyondan farklı olarak, uygun anot malzemesinin elektrolitik oksidasyonu sonucunda koagülantın olduğu bir yöntemdir. Çözültideki elektrokimyasal proses mekanizması oldukça komplekstir. Elektrokoagülasyon prosesi sırasında oluşan floklar daha büyük ve stabildir. Çizelge 1.1’de kimyasal koagülasyon ile elektrokoagülasyon prosesinin karşılaştırmasına yer verilmiştir.

Çizelge 1.1. Kimyasal koagülasyon ve elektrokoagülasyonun prosesi karşılaştırması

Kimyasal Koagülasyon	Elektrokoagülasyon
Koagülant olarak ilave kimyasal madde (alum, demir sülfat vb.) ihtiyacı vardır.	Uygun anot materyalinin elektrolitik oksidasyonu sonucunda koagülant oluşmaktadır.
Proses, kimyasal madde ilavesi ile gerçekleştirilir.	Proses, su/atıksu akımına elektrik akımı verilmesi ile gerçekleşir.
Yoğun, kimyasal içerikli çamur oluşumu gerçekleşir.	Daha stabil, kolay filtre edilebilir nitelikte, az miktarda çamur oluşumu gerçekleşir.
Kimyasal madde kullanımına bağlı olarak ikincil kirlenme meydana gelmektedir.	İkincil kirlenme problemi yoktur.
Arıtma verimi, elektrokoagülasyon prosesine göre daha düşüktür.	Arıtma verimi, kimyasal koagülasyona göre daha yüksektir.

EC birden fazla arıtım prosesinin eş zamanlı olarak gerçekleştiği işlemler bütünüdür (Khandegar vd. 2013). EC prosesinde, elektrotlar aracılığıyla uygulanan ve

elektrik akımıyla tetiklenen anot materyallerinin elektrolitik oksidasyonu ile yerinde koagülant türleri üretilmektedir. Akımın uygulanmasıyla, polivalent katyonlar anottan serbest bırakılırken, katotta hidrojen gazı ve hidroksit iyonları üretilmektedir. Katyonlar oluşan hidroksit iyonları ile pH'ya bağlı olarak reaksiyona girmekte ve farklı metal hidroksit koagülantlar oluşmaktadır. Oluşan metal hidroksitler kirleticilerin pıhtılaşmasını sağlayarak, hidrojen gaz kabarcıkları ile yüzeye doğru taşınmasına ve/veya çökebilir formda askıda kalmasına imkan sağlamaktadır. Alüminyum (Al) ve demir (Fe), çeşitli avantajları (kolay ulaşılabilirlik, düşük maliyet vb.) nedeniyle en sık kullanılan elektrot malzemeleridir. Oluşan Fe ve Al hidroksitler nispeten toksik değildir ve kirletici maddenin verimli bir şekilde uzaklaştırılmasına imkan tanımaktadır (Hakizimana vd. 2017). Ayrıca, eş zamanlı katodik reaksiyon sonucunda kirleticiler katot elektrot üzerine biriktirme ya da katotta hidrojenin oluşumu sonucu yüzdürme yoluyla uzaklaştırılmaktadır.

Kimyasal madde ilavesi söz konusu olmadığı için ikincil kirlilik sorunu yaşanmaması, daha az iş gücü gerektirmesi, basit ekipman ihtiyacı ve daha küçük alanlarda uygulanabilmesi prosesin mevcut endüstriyel arıtma tekniklerine kıyasla avantajlı olmasının temel sebepleri arasında yer almaktadır (Huda vd. 2017). Sağladığı avantajların yanında EC; anodun çözünmesi, metal iyonlarının hidrolizi, hidroksil komplekslerinin oluşumu, kirleticilerin amorf metal hidroksit çöktürmeleri üzerindeki adsorpsiyonu gibi reaksiyonlar nedeniyle karmaşık bir prosestir. Aynı zamanda sürecin çeşitli faktörlere bağlı olması prosesin optimum performansta işletilmesini zorlaştırmaktadır (Tchamango vd. 2010). EC gibi birçok kompleks prosesi içinde barındıran ve işletme maliyeti atıksu karakteristiğine göre büyük ölçüde değişiklik gösteren sistemlerin optimum çalışabilecek şekilde tasarlanması gerekmektedir (Tak vd. 2015). Tüm bu teknik hususlar, tez çalışması kapsamında belirlenen hedeflere ulaşmak için dikkate alınmıştır. Çalışma kapsamında elde edilecek çıktılar doğrultusunda atıksu arıtma teknolojileri tasarım ve üretim motivasyonu ile Ar-Ge proje kültürünün gelişimine yönelik kazanımlar sağlanması hedeflenmiştir.

Son yıllarda, çevresel önemi ve ekonomik verimi nedeniyle endüstriyel atıksuların elektrokoagülasyon (EC), elektroflotasyon (EF) ve elektrooksidasyon (EO) gibi elektrokimyasal arıtma metotlarına yönelik bilimsel çalışmalar hız kazanmıştır. Tekstil (Chafi vd. 2011; Bener vd. 2019), gıda (Ogando vd. 2019), kağıt (Al-Shannag vd. 2012; Azadi vd. 2016) ve petrol rafinerisi (Hansen vd. 2019) endüstrilerinde yapılan EC arıtılabilirlik çalışmalarına ilaveten; ağır metal (Azimi vd. 2017; Oden ve Sarı-Erkan 2018), tuz/iletkenlik (Subramani vd. 2012; Aljaberi vd. 2020), sertlik (Pooja ve Salkar, 2017) ve kuvvetli/kalıcı organik bileşikler (Gong vd. 2017; Esfandiyari 2019) içeren atıksular da bu konuda yapılan araştırmalara konu olmuştur.

Yapılan araştırmaların büyük oranda laboratuvar ölçek reaktörler ve sentetik model çözümlerde gerçekleştirildiği görülmektedir. Pilot ya da tam ölçekte ve gerçek atıksularda yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Sentetik atıksular ile gerçekleştirilen laboratuvar ölçekli EC reaktörleri, prosesin temel çalışma mekanizmasının aydınlatılması ve tasarım kriterlerinin belirlenmesi için yetersiz kalmaktadır (Oller vd. 2011). Bu durum, düşük hacimli elektrokimyasal reaktörlerde ulaşılan yüksek giderim verimlerinin, pilot ya da endüstriyel ölçekte tekrar edilebilirliğini engellemekte ve hatalı projeksiyonların yapılmasına yol açmaktadır. Model çözümlerde, spesifik kirletici bazlı çalışmaların da benzer sonuçlara neden olacağı açıktır.

Kimya endüstrisine ait alt kategorilerde faaliyet gösteren işletmelerde, yüzlerce farklı üretim reçetesi ve buna bağlı olarak çok farklı konsantrasyona sahip, geniş spektrumlu sentetik kimyasal madde kullanımı mevcuttur. Bu durum üretimden kaynaklanan atıksuyun sabit bir karaktere sahip olmadığını ve spesifik olarak bir kirleticinin giderim veriminin gerçek durumu yansıtamayacağını ortaya koymaktadır. Dolayısıyla bu tür endüstriyel atıksularda EC prosesinin ön arıtma ya da ana arıtma prosesi olarak kullanılmasına yönelik olarak, sahada gerçek atıksu ile pilot ölçekte çalışmaların yapılmasına ihtiyaç bulunmaktadır.

EC bilinen bir teknoloji olmasına rağmen, global ölçekte tam ölçekli tesis deneyiminin eksik olması nedeni ile sistemin kriter bazlı tasarım aralıkları, işletme dinamikleri ve performansının değerlendirilmesi gibi konularda belirsizlikler ve değişkenlikler bulunmaktadır. Çalışma kapsamında, kimya endüstrisinde yer alan zirai ilaç ve kimyevi gübre üretim tesisi atıksuyunun, EC prosesi ile arıtımı ve geri kazanımı araştırılmıştır. Atıksu arıtımında kanal ya da alıcı ortam standartları esas alınmıştır. Çalışma kapsamında gerçek atıksu ve pilot ölçek EC reaktörü kullanılarak, tam ölçeğe yakın proje ve işletme şartlarının tespit edilmesi hedeflenmiştir. Yüksek arıtma/geri kazanım performansı elde etmek için tasarım detayları (plaka türü, boyutu, elektrotlar arası mesafe vb.), işletme parametreleri ve sistemin fayda/maliyeti araştırılmıştır.

Tez kapsamında seçilen sektörde oluşan kuvvetli kirlilik yüklerine sahip gerçek endüstriyel atıksuların, pilot ölçekli EC reaktörü ile arıtım potansiyelinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Elektrokimyasal proseslerin en büyük dezavantajı olan enerji (elektrik) tüketiminin azaltılmasına yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla ters osmoz ve yumuşatma ünitelerinde oluşan yüksek iletkenliğe sahip konsantrasyonlu akımları ve yumuşatma filtresi atıksularının kanalizasyona deşarj edilmeden, belirli oranlarda EC prosesinde tekrar kullanımı test edilmiştir. Endüstrilerde döngüsel ekonomi ve minimum sıvı deşarj (MLD) hedefine yönelik olarak yapılan bu testler, tez çalışmasının özgünlüğüne katkıda bulunmaktadır. Yapılan çalışmalar, aşağıda belirtilen başlıklar dahilinde yürütülmüştür:

- Pilot ölçek EC prosesi ile endüstriyel atıksu arıtımı uygulamaların analiz edilerek, değerlendirilmesi

- Pilot ölçek EC sisteminde kimya endüstrisi atıksuyunun arıtılabilirlik testlerinin yapılması

- EC prosesi işletme parametrelerinin optimizasyonu ve giderim verimlerini iyileştirme çalışmalarının gerçekleştirilmesi

- İşletilen pilot ölçek EC prosesinde test şartlarına ve gerçek duruma göre üretim/işletme maliyetlerinin analiz edilmesi

2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Kimya Endüstrisi

Kimya endüstrisi; soda, klor-alkali, boya-mürekkep, zırnık, gübre, tıbbi ve zirai ilaç, plastik ve petrokimya ürünlerine bağlı faaliyet gösteren birçok farklı alt kategoriden oluşmaktadır. Sektörde, üretim sürecinde oluşan atıksular çok farklı karaktere sahip olup insan ve çevre sağlığına olumsuz etki yapan konvansiyonel ve toksik mikrokirleticilerden oluşmaktadır (Saleh vd. 2020). Bu kapsamda, kimya endüstrileri çevreye zarar veren en önemli sanayi dallarından birisi olmakla birlikte fiziksel ve organik kirleticiler açısından, önlemler alınması gereken sektörlerin başında yer almaktadır.

Bitki koruma (zirai ilaç-pestisit) ve bitki besleme (kimyevi gübre) merkezli üretim yapan işletmelerde oluşan atıksular, üretim reçetelerinin çok farklı olmasından dolayı karakterize edilmesi ve arıtımı en zor olan kuvvetli atıksu kategorisinde yer almaktadır. Gübre sanayinde temel besin olarak; azot (N), fosfor (P) ve potasyum (K) önemli bir yer teşkil eder. Gübre, içeriğinde bulunan besin maddelerine bağlı olarak tek besinli ya da kompoze gübre olarak sınıflandırılabilir. Gübre üretim tesisleri genellikle azot ya da potasyum bazlı gübre üretimi üzerine odaklanmıştır. Fosfat gübrelerinin yaklaşık %70'i fosforik asitten, azot gübrelerinin ise %97'si amonyaktan oluşmaktadır. Amonyak (NH_3), fosforik asit (H_3PO_4), sülfürik asit (H_2SO_4) ve nitrik asit (HNO_3) önemli endüstriyel kimyasallar olup kimya endüstrisinin yanı sıra gübre üretiminde de sıklıkla kullanılmaktadır (Göktürk 2007).

Bitki besleme ve koruma üretimi yapan endüstrilere ait atıksular yüksek konsantrasyonlarda pestisit kalıntısı, azot, fosfor, sülfür, doğal organik maddeler ile toksik, aromatik/toksik ve kalıcı organik bileşenlerden oluşmaktadır. Literatürde bu tür atıksularda yapılan elektrokoagülasyon (EC), elektroflotasyon (EF) ve elektrooksidasyon (EO) arıtılabilirlik çalışmalarında pestisit türevlerinin %20-%99, doğal organik maddelerin %51-98, aromatik/toksik organik maddelerin %10-98, azot ve fosfor fraksiyonlarının ise %14-99 arasında giderildiği rapor edilmiştir. EO çalışmalarında çoğunlukla hidrojen peroksit ilavesi ile fenton benzeri ileri oksidasyon proseslerinin test edildiği gözlenmiştir. Ancak bu proseste ilave kimyasal tüketimi, yüzey modifikasyonlu elektrot kullanımı ve aşırı çamur oluşumu, yatırım/işletme maliyetlerini artıran unsurlardır. Ayrıca EO prosesleri ile zor ayrışan organik maddelerin daha kompleks toksik yan ürünlere dönüşme riski mevcuttur (Garcia-Segura vd. 2017).

Gübre üretimi yapan endüstriyel kuruluşlarda, kullanılan gübre türüne bağlı olarak farklı karakterizasyona sahip atıksular açığa çıkmaktadır. Azot bazlı gübre üretimi sürecinde, önemli miktarda amonyaklı çıkış suyu üretilmektedir. Oluşan çıkış suyu, alıcı ortama verilmeden önce, amonyaklı azot içeriğini azaltmak için arıtılmalıdır. Pestisit gibi mikrokirleticilerin gideriminde ise konvansiyonel yöntemler yetersiz kalmakta ve klasik aerobik biyolojik atıksu arıtma sistemlerin veriminin azalmasına sebep olabilmektedir. Pestisitler, biyolojik sistemlerde inhibitör etkisi yarattığından dolayı, biyolojik (aerobik ve anaerobik) arıtmaya uygun değildir (Göktürk 2007). Bu nedenlerle, pestisitlerin uzaklaştırılması için ileri arıtma yöntemlerine başvurulmaktadır.

Bitki koruma ve bitki besleme atıksularının arıtımı için uygulanan farklı arıtma teknikleri (ileri oksidasyon, adsorpsiyon ve membran prosesleri, hibrit teknolojiler vb.)

bulunmakla birlikte, EC prosesinin test edildiği çalışmalar (Brillas vd. 2003; Khatibikamal vd. 2010; Mariam vd. 2012; Saleh vd. 2020; Igwegbe vd. 2021) sınırlı olup, ağırlıklıla içme suyunda ya da sentetik model atıksuda, spesifik bir kirletici için yapılan laboratuvar ölçekli giderim çalışmalarından oluşmaktadır.

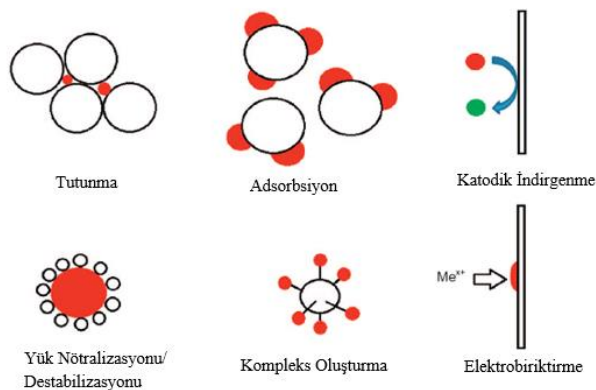
2.2. Elektrokoagülasyon Prosesi

Elektrokoagülasyon, anotun elektroliz sonucu çözünmesi ile su veya atıksu içerisinde metal hidroksit floklarının oluşturulmasına dayanan bir prosestir. Elektrolit içerisine yerleştirilen metal elektrotlar ve bu elektrotlara uygulanan elektrik akımı ile çalışan elektrokimyasal bir reaktörden oluşmaktadır. Proseste genellikle alüminyum (Al^{+3}) ve demir (Fe^{+3} veya Fe^{+2}) elektrotlar kullanılmaktadır. Bu elektrotlar, kanıtlanmış uygulanabilirlikleriyle birlikte ekonomik ve kolay temin edilebilir olmaları nedeniyle tercih edilmektedir (Özyonar ve Karagözoğlu 2012).

EC prosesi, su veya atıksu içerisinde arıtılması hedeflenen suyun veya atıksuyun içerisindeki metal hidroksit floklarının, anodun çözünmesi ve katotta oluşan hidroksil iyonlarıyla eş zamanlı olarak oluşturulduğu bir işleme dayanır. Bu mekanizmaların her biri kendi içinde birçok araştırmanın konusunu oluşturmaktadır. Elektrokoagülasyon prosesinin güvenilir bir arıtma teknolojisi olarak kabul edilmesinde, çalışmaların hedef kirleticilere odaklanması büyük önem taşımaktadır (Holt vd. 2005). EC prosesi sırasında üç temel işlem gerçekleşir:

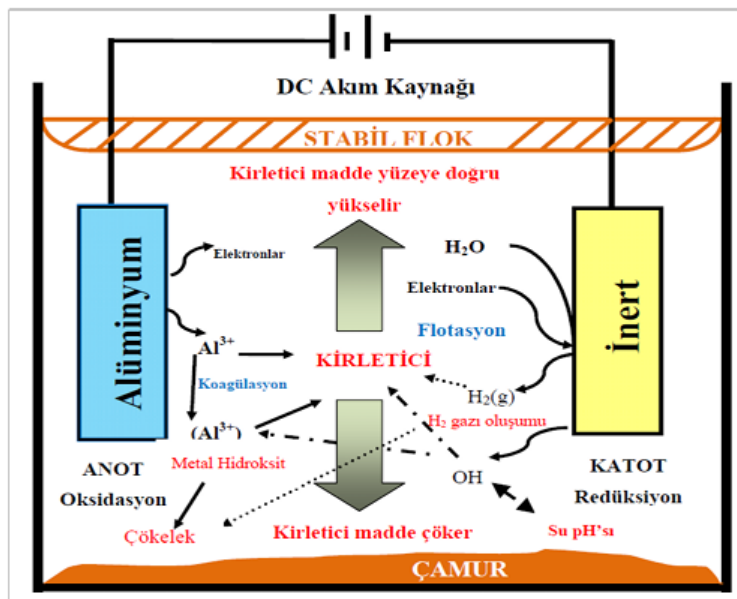
- 1) Elektrot yüzeyinde gerçekleşen elektrolitik reaksiyonlar
- 2) Metalik iyonların oluşumu
- 3) Kolloidal özellikteki kirleticilerin adsorpsiyon, koagülasyon, sedimentasyon veya flotasyon mekanizmaları ile giderilmesi

EC prosesi, su ve atıksu arıtımında koagülasyon, flotasyon, adsorpsiyon, oksidasyon ve çöktürme gibi proseslerin elektrokimya prensipleri ve avantajlarıyla birleştirildiği bir yöntemdir (Tian vd. 2016). Elektrokoagülasyon yönteminde kirletici gideriminde rol oynayan temel mekanizmalar Şekil 2.1.'de sunulmuştur (Garcia-Segura vd. 2017).



Şekil 2.1. EC prosesi kirletici giderim mekanizmaları (Garcia Segura vd. 2017)

Proseste, elektrotlar aracılığıyla uygulanan ve elektrik akımıyla tetiklenen anot materyallerinin elektrolitik oksidasyonu ile yerinde koagülant türleri üretilmektedir. Akımın uygulanmasıyla, polivalent katyonlar anottan serbest bırakılırken, katotta hidrojen gazı ve hidroksit iyonları üretilir. Katyonlar oluşan hidroksit iyonları ile pH'a bağlı olarak reaksiyona girmekte ve farklı metal hidroksit koagülantlar oluşmaktadır. Oluşan metal hidroksitler, kirleticilerin pıhtılaşmasını sağlayarak hidrojen gazı kabarcıkları ile yüzeye doğru taşınmasına ve/veya çökebilir formda askıda kalmasına imkan sağlar. Ayrıca, eş zamanlı katodik reaksiyon sonucunda kirleticiler katot elektrot üzerinde birikme ya da katotta hidrojenin oluşumu sonucu yüzdürme yoluyla uzaklaştırılmaktadır. EC, kesikli veya sürekli bir proses olarak işletilebilmekte olup Şekil 2.2'de prosesin temel bileşenleri ve kirletici giderim mekanizmaları verilmiştir. Çizelge 2.1'de ise elektroliz hücresinde, anot ve katotta gerçekleşen elektrokimyasal yükseltgenme ve indirgenme reaksiyonları gösterilmektedir (Güney 2013).



Şekil 2.2. EC prosesi bileşenleri ve kirletici giderim mekanizmaları (Holt vd. 2001)

Çizelge 2.1. Elektrokimyasal yükseltgenme ve indirgenme tepkimeleri (Delipınar 2007)

Anot Reaksiyonları	Katot Reaksiyonları
- Anot elektron verir. - Anotta yükseltgenme - Anodik çözünme: ($\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{e}^-$) - Anyonlar, anotta toplanır. - Anolit bölge oluşur. - Anot oksijen: ($2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow \text{O}_2 \uparrow + 4\text{H}^+$) - Klor var ise: ($2\text{Cl}^- + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cl}_2 \uparrow$)	- Katot elektrot alır. - Katotta indirgenme - Katodik birikme: ($\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$) - Katyonlar katotta toplanır. - Katolit bölge oluşur. - Katotta hidrojen: ($2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 \uparrow + 2\text{OH}^-$) - Gazın indirgenmesi: ($\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$)

EC prosesinde, iyonların çözeltiye geçişi (Fe veya Al anot elektrotların çözünmesi ile) Faraday Yasası ile ifade edilir (Mollah vd. 2004). Elektrokimyasal arıtma proseslerinde, sıklıkla Faraday'ın Elektroliz Yasası ve bu yasadaki eşitliklerden faydalanılmaktadır. Bir elektrolitik hücrede elektrotlarda oluşan madde miktarı, hücreden geçen elektrik yükü miktarı ile doğru orantılıdır (Faraday'ın 1. Yasası). Seri bağlı farklı elektrolitler içeren elektroliz hücrelerinden geçen, belirli miktarda elektrik yükü için her bir maddenin kimyasal eşdeğerlikleri ile doğru orantılı miktarda madde oluşur (Faraday'ın 2. Yasası) (Topal 2015).

Bir elektrokimyasal hücreden geçen akım miktarı, Denklem 2.1'de verilen eşitlik ile ifade edilebilir.

$$q = \int (d.I.t) \quad (2.1)$$

q: Akım miktarı

t: Akım süresi

I: Akım şiddeti

2.1 eşitliğinin Faraday Yasası ile ifade edilmesi durumunda, çözünen madde miktarının gram olarak karşılığı, Denklem 2.2'de verilen eşitlik şeklinde yazılabilir.

$$m = \frac{q}{nxF} = \frac{Ixt}{nxF} \quad (2.2)$$

m: Çözünen madde miktarı (gram)

n: Çözünen metelin tesir değeri

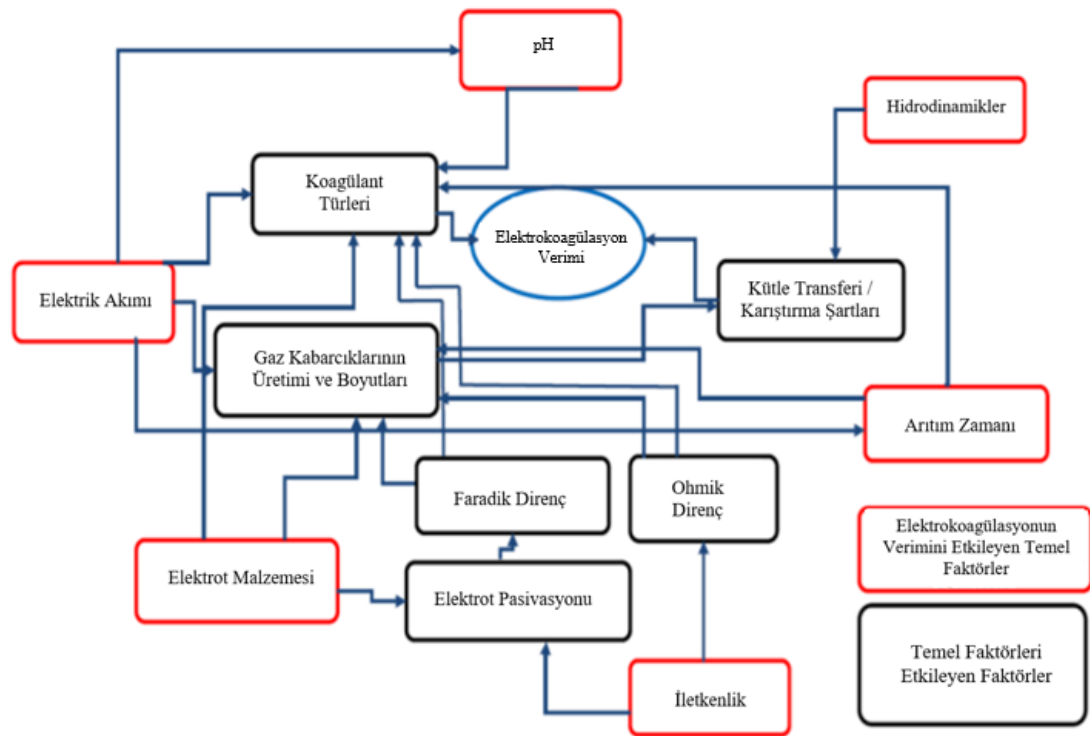
F: Faraday sabiti (96485 C/mol)

t: Akım süresi

I: Akım şiddeti

2.2.1. Elektrokoagülasyon proses değişkenleri

EC prosesinin verimini etkileyen işletme parametreleri; akım yoğunluğu, elektriksel iletkenlik, işletme süresi, pH, kullanılan elektrot özellikleri ve elektrotlar arası mesafedir. Bu parametrelerin yanı sıra elektrokoagülasyon yönteminin etkinliğini atıksuyun bileşimi, kirletici partiküllerin boyutu ve etkin elektrot yüzey alanı gibi faktörler de etkilemektedir. Belirtilen faktörlerin ve optimum çalışma koşullarının araştırılması, yöntemin gelişimi ve uygulanabilirliği açısından büyük öneme sahiptir (Solak 2007). Elektrokoagülasyon sürecini etkileyen faktörler Şekil 2.3'te gösterilmektedir.



Şekil 2.3. EC prosesini etkileyen faktörler (Hakizimana vd. 2017)

2.2.1.1. Akım yoğunluğu

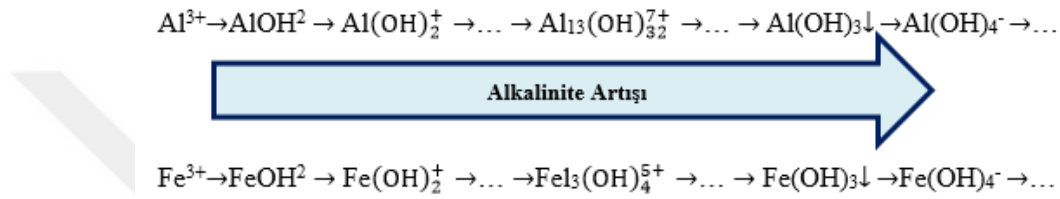
Elektrokimyasal arıtım yöntemleri için akım yoğunluğunun optimize edilmesi büyük önem taşımaktadır. Sistemde uygulanan akım miktarı, elektrotlardan çözünen Al^{3+} veya Fe^{2+} iyonlarının miktarını belirlemektedir. Gereğinden fazla uygulanan yüksek akım değerleri EC verimini olumsuz etkilemekle birlikte arıtma maliyetinin de artması yol açmaktadır. Arıtım çalışmalarında, akım yoğunluğu ile arıtım süresi yakından ilişkilidir. Yüksek akım uygulandığında arıtım için gereken süre kısalmaktadır (İlhan vd. 2007). Akım yoğunluğu; koagülant miktarı ve gaz kabarcığı yoğunluğu, flokülasyon/flotasyonu ve dolayısıyla proses verimini etkileyen belirleyici faktörler arasındadır. Uzun periyotlarda çalıştırılan elektrokoagülasyon sistemlerinin 20-25 A/m² akım yoğunluğunda çalıştırılması önerilmektedir (Chen 2004).

2.2.1.2. İletkenlik

İletkenlik, enerji tüketimi açısından elektrokoagülasyon prosesinde büyük önem taşımaktadır. Ohm Kanunu'na göre, düşük iletkenliğe sahip su ve atıksularda çözeltinin direnci yüksek olduğundan, sabit bir akım altında elektrotlar arası gerilim ve enerji tüketimi artar. Yüksek iletkenliğe sahip su ve atıksularda ise elektrotlar arası gerilimin azalmasıyla birlikte enerji tüketiminin azalması beklenir. Elektrokoagülasyon prosesinin işletildiği akım yoğunluğuna bağlı olarak, iletkenliğin de belirli seviyelerde olması istenir. Arıtılacak olan su veya atıksuyun elektriksel iletkenliğinin artması ile birlikte düşük enerji tüketimi ve işletme maliyeti ile kısa reaksiyon süresi sağlanarak arıtım gerçekleştirilebilmektedir (Durmaz 2018).

2.2.1.3. Reaksiyon pH değeri

pH, elektrolitik reaksiyonların doğrudan etkilendiği ortamlarda önemli bir rol oynar ve bu nedenle büyük öneme sahiptir. Proses sırasında meydana gelen reaksiyonlar sonucunda, hem elektrooksidasyon prosesindeki hidroksil radikallerinin hem de elektrokoagülasyon prosesindeki metal hidroksitlerin meydana gelmesinde önemli bir role sahiptir. Çok asidik ve bazik pH değerlerinde metal hidroksit çözünürlüklerinde belirgin artışlar meydana geleceğinden flok oluşumunda ciddi azalmalar beklenir (Chen 2004). Bu nedenle, proses veriminde belirgin düşüşler meydana gelebilmektedir. Şekil 2.4'te pH'a bağlı olarak ortamda ağırlık kazanan alüminyum ve demir bileşikleri gösterilmektedir. Alüminyum elektrotların giderim verimlerinin asidik veya alkali koşullarda, nötr koşullara göre daha yüksek olduğu bilinmektedir.



Şekil 2.4. pH'ın Al ve Fe bileşikleri oluşumuna etkisi (Sillanpaa ve Shestakova 2017)

2.2.1.4. İşletme süresi

Arıtım süresi, tüm arıtma proseslerinde olduğu gibi elektrokimyasal arıtım uygulamalarında da büyük önem taşımaktadır. Bu sebeple, çalışmaların yapılması gereken en uygun arıtım süresini belirlemesi gerekmektedir. Faraday Yasası, bir anottan salınan metal iyonlarının miktarının elektroliz süresi ve akım yoğunluğu ile orantılı olduğunu belirtir. Elektroliz süresinin artmasına bağlı olarak metal iyonlarının salınımı da arttığından organik kirletici giderim performansı artar. Bununla birlikte, elektroliz işlemi uzun bir süre boyunca gerçekleştiğinde elektrot pasivasyonu oluşur ve elektroliz süresinin belirli bir noktasında, giderim hızı yavaşlar.

Elektrokoagülasyon işleminde, reaksiyon süresinin gerektiğinden kısa olması, yeterli miktarda koagülant oluşumunu sağlayamadığı için verim düşüklüğüne yol açar. Aynı şekilde, reaksiyon süresinin uzun olması da işletme maliyetlerinin artmasına ve arıtma veriminde düşüşe neden olur (Sabuncu 2014). Elektrokoagülasyon prosesi genellikle kısa reaksiyon sürelerine sahiptir ve birçok uygulamada reaksiyonlar dakikalar içerisinde tamamlanmaktadır.

2.2.1.5. Elektrot malzemesi

Elektrot materyalinin seçimi, elektrokoagülasyon prosesinde sonucu etkileyen en önemli parametrelerin başında yer almaktadır. Elektrot seçimi, elektrokimyasal arıtımın türünü belirleyerek kirleticinin giderim verimini doğrudan etkiler. Elektrokoagülasyon yönteminde alüminyum ve demir elektrotlar, alternatiflerine göre kolay ulaşılabilir ve düşük maliyette oldukları için yaygın olarak kullanılmaktadır (Chen 2004).

Demir, alüminyuma kıyasla daha ucuz bir malzemedir. Alüminyum plakalar atıksu arıtımında, Al^{3+} iyonunun yüksek koagülasyon veriminden dolayı tek başına veya demir plakalarla kombinasyon halinde uygulanabilmektedir. Suda önemli miktarda sertlik iyonu (Ca^{2+} veya Mg^{2+}) bulunması durumunda katot malzemesi olarak paslanmaz çelik kullanılması önerilmektedir (Güney 2013).

2.2.1.6. Elektrotlar arası mesafe

Elektrot yerleşimi, elektrot malzemesi seçimi kadar önemli bir faktördür ve arıtma verimini doğrudan etkilemektedir. Reaktörler genellikle bir anot ve katot içerirken, elektrotların farklı şekilde yerleştirilmesi, farklı giderim verimleri elde etmeyi mümkün kılar. Elektrotların farklı konumlandırılması, elektrokimyasal reaksiyonların etkinliğini ve arıtma performansını değiştirebilir. Atıksudaki kirleticilerin uzaklaştırılmasında elektrot mesafesinin etkisi üzerinde çok sayıda araştırma yapılmıştır (Özmez 2020). EC reaktöründe, elektrotlar arasındaki mesafenin ne çok az ne de çok fazla olması istenmektedir. Elektrotlar arasındaki mesafenin artması, potansiyel farkın artmasına ve buna bağlı olarak elektrik tüketiminin yükselmesine neden olmaktadır. Elektrotların birbirine çok yakın olması durumunda ise flokların oluşum hızı ve adsorplama özelliği azalmaktadır. Ek olarak elektrotların birbirine çok yakın yerleştirilmesi, elektrotlar arasında birikmelere neden olarak arıtma veriminin düşmesine neden olmaktadır (Özmez 2020). Elektrotların, reaktöre optimum mesafede yerleştirilmesi ile prosesinin optimum performansta çalışması sağlanmaktadır.

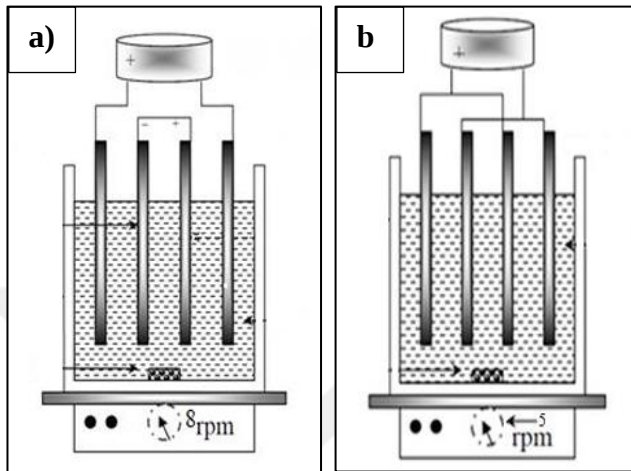
Elektrokoagülasyon reaktöründe kullanılacak elektrotlar arasındaki mesafe; işlem koşullarına, uygulama amacına ve kullanılan elektrot malzemesine bağlı olarak değişebilir. Bu nedenle, önerilen elektrot mesafesi farklı olabilir. Ancak yapılan çalışmalarda genel olarak, elektrotlar arasındaki mesafenin 1 ile 5 cm arasında olduğu görülmektedir. Bu aralık, elektrolit içindeki iyonların hareketliliğini sağlayacak yeterli boşluğu bırakırken, elektrotlar arasındaki elektrik alanının etkinliğini de sağlar (Crini ve Lichtfouse 2018; Koby ve Demirbaş 2009; Khataee vd. 2014).

Elektrokoagülasyon reaktörü tasarımı ve işletmesi karmaşık bir süreçtir ve elektrot mesafesi, işletme koşullarına göre optimize edilmelidir. Bu nedenle, önerilen elektrot mesafesi belirlenirken reaktör tasarımı, uygulama amacı ve diğer faktörler dikkate alınmalıdır.

2.2.1.7. Elektrotların yerleşimi ve bağlantı türü

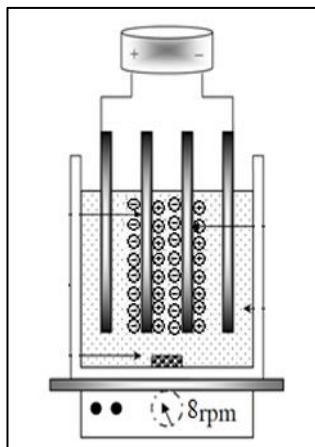
Elektrotların yerleşimi ve bağlantı türleri, enerji tüketimini büyük ölçüde etkileyen önemli bir tasarım unsurudur. Elektrotların doğru şekilde yerleştirilmesi ve uygun bağlantıların sağlanması, elektrokimyasal reaksiyonların verimli bir şekilde gerçekleşmesini ve enerji maliyetlerinin minimize edilmesini sağlar. Elektrokoagülasyon reaktörünün tasarımı sırasında, anot ve katot kutupları arasında farklı bağlantı türleri uygulanabilir. Bu bağlantı türleri, elektrokimyasal reaksiyonun etkinliği ve arıtma verimi üzerinde önemli bir rol oynar. Tasarımda kullanılan bağlantı türleri, elektrotlar arasındaki akım dağılımını ve reaksiyon hızını etkileyerek arıtma sisteminin performansını belirler. Yaygın olarak monopolar (tek kutuplu) ve bipolar (çift kutuplu) bağlantı türleri tercih edilmektedir (Durmaz 2018).

Monopolar elektrotlar, seri ya da paralel olarak bağlanabilmektedir. Monopolar, seri bağlı EC reaktörlerinde anot elektrot çiftleri birbirine bağlanırken monopolar anot ve katot elektrotlar bir güç kaynağına bağlıdır (Şekil 2.5.a). Seri bağlı EC reaktörlerinde direnç daha yüksek olduğu için yüksek bir potansiyel fark uygulanması gerekmektedir (Bağcı 2019). Reaktör içerisinde, her noktada akım sabittir. Monopolar paralel bağlı EC reaktörlerinde ise iki adet paralel iletken metal plaka bir güç kaynağına bağlanmaktadır (Şekil 2.5.b).



Şekil 2.5. a) Seri bağlı monopolar elektrokoagülasyon reaktörü; b) paralel bağlı monopolar elektrokoagülasyon reaktörü (Bağcı 2019)

Paralel bağlı bipolar elektrokoagülasyon reaktörlerinde, elektrotlar çift kutuplu olarak bağlanmaktadır (Şekil 2.6). Çözünen anot elektrotlar, güç kaynağına bağlanan anot ve katot elektrotlar arasında birbiri ile bağlantısı olmayacak şekilde yerleştirilir. Bu reaktör şekli, prosesin işletim kolaylığı açısından avantaj sağlamaktadır. Reaktör içerisindeki sıvı çözeltiye elektrik akımı uygulandığında, bağımsız anot elektrotların bir yüzü anot, diğer yüzü ise katot gibi davranır. Bu elektrik akımı sayesinde, anot yüzeyinde oksidasyon reaksiyonları gerçekleşirken katot yüzeyinde ise indirgenme reaksiyonları meydana gelir. Bu şekilde, elektrokimyasal reaksiyonlar sıvı çözelti içindeki kirleticilerin giderilmesine katkı sağlar (Delipınar 2007).



Şekil 2.6. Paralel bağlı bipolar elektrokoagülasyon reaktörü (Delipınar 2007)

2.3. Elektrokoagülasyon Prosesinin Uygulama Alanları

Elektrokoagülasyon prosesinin geniş bir kullanım alanı vardır. Uygulanan elektrokimyasal proses ile başta adsorpsiyon, oksidasyon-redüksiyon, koagülasyon, flotasyon olmak üzere çeşitli mekanizmalarla yüksek miktarda, askıda, kolloidal ve çözünmüş yapıda organik madde, bakteri-virüs, yağ-gres, ağır metal, azot ve fosfor, giderimi mümkün olmaktadır (Yılmaz ve Karagözoğlu 2019). Proses aynı zamanda ters osmoz gibi membran konsantrasyonlarının arıtımı için de uygulanabilmektedir. Prosesin günümüzde başlıca uygulama alanları aşağıda sıralanmıştır:

- Endüstriyel atıksular (tekstil, deri, gıda, içecek, süt endüstrisi, boya, kozmetik ve deterjan, paketlenme, cam, otomotiv, maden, çimento, gübre, tıbbi ve zirai ilaç, plastik petrokimya, petrol, kömür, makine, otomotiv sanayi, metal son işleme, zeytinyağı işleme tesisleri, vb.)
- Evsel nitelikli atıksular (biyolojik arıtma için gerekli büyük alanlardan tasarruf ve dağınık yerleşimlerde modüler olarak kurulabilme imkanı sağlar).
- Düzenli depolama alanlarından gelen sızıntı suları (düzenli katı atık depolama alanlarında ve katı atık geri kazanım tesislerinde toplanan atıklardan kaynaklanan ve içerisinde pek çok kirleticiyi yoğun olarak barındıran sızıntı sularının ön arıtımı mümkün olmaktadır).

2.4. Elektrokoagülasyon Prosesinin Avantaj ve Dezavantajları

Elektrokimyasal bir süreç olan EC, eş zamanlı olarak birden fazla arıtım prosesinin gerçekleştiği işlemler bütünüdür (AlJaberi 2020). Kimyasal koagülasyona göre sağladığı avantajlar nedeniyle günümüzde dikkat çeken bir proses haline gelen elektrokoagülasyon, hem ekonomiklik hem de çevresel faydalar açısından önemli bir potansiyele sahiptir (Hakizimana vd. 2017). Elektrokoagülasyon sistemi, alışılmış koagülasyon-flokülasyon uygulamalarına benzer bir proses olmakla birlikte bu sistemler ile karşılaştırıldığında birçok avantaja sahiptir (Güney 2013).

Prosesin sağladığı avantajlar aşağıdaki gibidir:

- Elektrokoagülasyon prosesi, küçük kolloidal partiküllerin kararlı hale getirilerek sistemden uzaklaştırılmasında konvansiyonel koagülasyona göre daha etkilidir.
- Proses sonunda az miktarda, kolay stabilize edilen çamur oluşmaktadır.
- Basit ekipmanlar ve işletme koşulları gerektirmektedir.
- İyi dizayn edilmiş sistemlerde, kısa temas sürelerinde %90 civarında yüksek verim elde edilebilir.
- Kimyasal madde ilavesine gerek yoktur. Bu nedenle işletme ve bakımı daha kolaydır.
- İlk yatırım maliyeti, alternatif teknolojilerine göre oldukça belirgin şekilde düşüktür.
- Birçok kirletici tek bir proses ile giderilebilir.

EC prosesinin dezavantajları aşağıdaki gibidir:

- Çözünen elektrotların düzenli olarak yenilenmesi gerekmektedir.
- Arıtılan sudaki demir ve alüminyum iyonlarının konsantrasyonları nispeten yüksektir.

- Atıksu çözeltilerinin yüksek iletkenliğe sahip olması gerekmektedir (Delipınar 2007).
- EC reaktör dizaynı/işletimi ve elektrot güvenilirliği konusunda know-how unsurlarının eksikliği mevcuttur (özellikle kullanma ömrü dolan elektrotların pasivasyonu) (Holt vd. 2005).

2.5. Literatürde Elektrokoagülasyon ile Yapılan Arıtılabilirlik Çalışmaları

Çevrenin korunmasına yönelik yasal düzenlemeler ve işletmelerdeki su ihtiyacının artması, mevcut yöntemlerin ve teknolojilerin geliştirilmesini, daha yüksek giderim verimi sağlanmasını, daha düşük maliyetle işletilebilen alternatif yenilikçi çözümlerin ve atıksu geri kazanımının öncelikli hale gelmesini sağlamaktadır (Eyvaz vd. 2016). Endüstriyel atıksu arıtımı ve geri kazanımı için uygun teknolojinin seçiminde maliyet, çevresel etkiler, yasal izinler ve yönetmelikler, alan gereksinimleri, enerji kullanımı ve uygulanabilirlik gibi birçok faktör dikkate alınmalıdır. Bu faktörler, doğru teknolojinin belirlenmesi için önemli kriterlerdir.

Elektrokoagülasyon gelecek için umut vaat eden, basit ekipmanlardan oluşan ve kolay işletilebilen, sürdürülebilir su yönetimi için uygun maliyetli bir arıtma teknolojisidir. Literatürde kirleticiler giderim mekanizmaları, kinetik modelleme ve reaktör tasarımı hakkında yapılan çalışmalar her geçen gün önem kazanmaktadır. Yapılan çalışmalara göre EC prosesinin birbirinden farklı karakteristik özellik gösteren su ve atıksularda verimli olarak çalıştırılması mümkündür. Literatürde uygun işletim koşullarında farklı kirleticilerin (ağır metal, organik yük, yağ-gres, sülfat, boyar madde veya KOİ gibi) gideriminde, EC prosesinin başarılı olduğu çalışmalar mevcuttur. Çizelge 2.2' de literatürde, farklı endüstrilerde elektrokoagülasyon prosesi kullanılarak yapılan bazı arıtılabilirlik çalışmalarının özetine yer verilmiştir.

Çizelge 2.2. Literatürde EC prosesi kullanılarak yapılan çalışmaların özeti

No.	Endüstri	Çalışma Koşulları	EC Sistemi	Girdi Değişkenleri	Çıktı Değişkenleri	Çalışma Sonuçları	Kaynak
1	Şeker İşleme Endüstrisi	- Akım yoğunluğu: 89,28 A/m² - Elektrotlar arası mesafe: 1,5 cm - pH₀: 7 - Elektrolit (NaCl) miktarı: 1,5 g/L	- Bakır elektrot - Kesikli EC reaktörü	- Akım yoğunluğu - Elektrotlar arası mesafe - Elektrolit miktarı	- KOİ giderim verimi	- > %73 KOİ giderimi - İşletme maliyeti: 11,2 \$/m³	Patel vd. (2022)
2		- pH₀: 7 - Elektrotlar arası mesafe: 20 mm - Akım yoğunluğu: 178 A/m²	- Alüminyum anot ve katot elektrot - Paralel bağlı mono-polar EC reaktörü	- pH - Akım yoğunluğu - Elektrotlar arası mesafe - Elektroliz süresi	- KOİ giderim verimi - Renk giderim verimi	- % 79 KOİ giderimi - %78 renk giderimi	Sahu vd. (2015)
3	Maden Endüstrisi	- Akım yoğunluğu: 4,45 mA/cm² - Başlangıç yağ konsantrasyonu: 3 g/L - Elektrotlar arası mesafe: 10 mm - pH: 8,7	- Alüminyum elektrot - Monopolar olarak çalıştırılan lab ölçekli EC reaktörü	- pH - Akım yoğunluğu - Elektrolit konsantrasyonu - Yağ konsantrasyonu - Elektrotlar arası mesafe	- Yağ giderim verimi	- > %90 yağ giderimi	Merma vd. (2020)

(Devamı Arkada)

Çizelge 2.2.'nin devamı

No.	Endüstri	Çalışma Koşulları	EC Sistemi	Girdi Değişkenleri	Çıktı Değişkenleri	Çalışma Sonuçları	Kaynak
4		- Akım yoğunluğu: 18,75 mA/cm² - pH₀: 4	- Monopolar olarak çalıştırılan lab ölçekli EC reaktörü - Elektrotlar arası mesafe: 10 mm				
5	Gıda Endüstrisi	- pH₀: 7 - İletkenlik: 3,5 mS/cm - Akım yoğunluğu: 1,83 mA/cm² - Hidrolik alıkonma süresi: 30 dk	- Alüminyum elektrot - Kesikli EC reaktörü	- Akım yoğunluğu - Reaksiyon süresi - Başlangıç pH'ı	- KOİ giderim verimi	- > %95 KOİ giderimi - İşletme maliyeti: 0,98 TL/m³	Özbay vd. (2018)
6		- Çalışma voltajı: 30 V - Çalışma süresi: 60 dakika - pH₀=7	- Elektrot malzemesi: alüminyum - Elektrot yüzey alanı: 150 cm²	- Çalışma voltajı - Reaksiyon süresi - Başlangıç pH'ı	- KOİ ve AKM giderim verimi	- %89,7 KOİ giderimi - %95,6 AKM giderimi	Elvan vd. (2017)

(Devamı Arkada)

Çizelge 2.2.'nin devamı

No.	Endüstri	Çalışma Koşulları	EC Sistemi	Girdi Değişkenleri	Çıktı Değişkenleri	Çalışma Sonuçları	Kaynak
			- Elektrotlar arası mesafe: 2 cm - Çalışma voltajı: 20-40 V			- %39,2 Nitrat, %74,5 nitrit giderimi - %89,8 Fosfat giderimi	
7	Hayvancılık Endüstrisi (Kesimhane Atıksuyu)	- pH₀: 8 - Akım yoğunluğu: 30 mA/cm² - Elektroliz süresi: 30 dakika - NaCl konsantrasyonu: 1 g/L	- 4 adet paralel monopolar, alüminyum elektrot - Kesikli olarak çalıştırılan lab ölçekli EC reaktörü	- Akım yoğunluğu - Başlangıç pH'ı - Elektroliz süresi	- Renk ve KOİ giderimi	- %95,3 KOİ giderimi - %93 renk giderimi	Tak vd. (2015)
8	Tekstil Endüstrisi	- pH₀: 7 - Sabit endosülfan konsantrasyonu: 50 mg/L - Çözelti iletkenliği: 2,62 mS/cm	- 4 adet alüminyum elektrot - Elektrotlar arası mesafe: 3 cm	- Akım yoğunluğu - Reaksiyon süresi - Başlangıç boya konsantrasyonu - Boya tipi - Başlangıç pH'ı	- Boya giderim verimi	- %96,79 asit oranj 7, - %98,12 asit kahverengi 14, %76,47 asit kırmızı 18 giderimi	Taheri vd. (2015)

(Devamı Arkada)

Çizelge 2.2.'nin devamı

No.	Endüstri	Çalışma Koşulları	EC Sistemi	Girdi Değişkenleri	Çıktı Değişkenleri	Çalışma Sonuçları	Kaynak
9	Tekstil Endüstrisi	- Elektroliz süresi: 7 dakika - pH₀: 5-8 - İletkenlik: 10 mS/cm - Başlangıç boya konsantrasyonu: 50 mg/L	- Demir elektrot - EEA: 25 cm²	- Akım yoğunluğu - Elektroliz süresi - Başlangıç pH'ı - Başlangıç boya konsantrasyonu - İletkenlik - Elektrot mesafesi	- Renk giderim verimi	- $\cong$ %100 renk giderimi	Daneshvar vd. (2006)
10		- Temas süresi: 1 saat - Sabit akım yoğunluğu: 10,4 mA/cm² - pH: 7,03-7,8 - Başlangıç iletkenliği: 2.1 mS/cm	- Alüminyum elektrot (60×60×3 mm) - Monopolar olarak çalıştırılan lab ölçekli EC reaktörü - EEA= 240 cm²	- pH - Akım yoğunluğu - Temas süresi	- KOİ - Renk - Bulanıklık giderimi	- %91,4 bulanıklık giderimi - %88,1 renk giderimi - %75,9 KOİ giderimi	Demirci vd. (2015)

(Devamı Arkada)

Çizelge 2.2.'nin devamı

No.	Endüstri	Çalışma Koşulları	EC Sistemi	Girdi Değişkenleri	Çıktı Değişkenleri	Çalışma Sonuçları	Kaynak
11	Elektrokaplama	- Temas süresi: 30 dakika Akım yoğunluğu: 50 A/m ²	Elektrotlar arası mesafe: 15 mm	- Akım yoğunluğu - Elektroliz süresi - Başlangıç Cr(VI) konsantrasyonu - Başlangıç elektrolit konsantrasyonu	- Cr(VI) giderim verimi	- %97 krom, - %98 nikel, - %86 KOİ giderimi	Aber vd. (2009)
12	Süt Endüstrisi	- Akım yoğunluğu: 55,4 A/m ² - pH: 5 - Elektrotlar arası mesafe: 6 mm - Elektroliz süresi: 10–50 dk	- Alüminyum elektrot - Elektrotlar arası mesafe: 6 mm	- Akım yoğunluğu - Elektroliz süresi - Başlangıç Cr(VI) konsantrasyonu ve elektrolit konsantrasyonu	- KOİ giderim verimi	- > %80 KOİ giderimi	Valente vd. (2015)
13	Gri Su	- Akım yoğunluğu: 12,5 mA /cm ² - Elektroliz süresi: 30 dk - Elektrotlar arası mesafe: 0,5 cm	- 2 adet alüminyum elektrot	- Akım yoğunluğu - Elektroliz süresi, - Elektrotlar arası mesafe	- Bulanıklık giderimi	- %93,9 bulanıklık giderimi	Nasr vd. (2015)

(Devamı Arkada)

Çizelge 2.2.'nin devamı

No.	Endüstri	Çalışma Koşulları	EC Sistemi	Girdi Değişkenleri	Çıktı Değişkenleri	Çalışma Sonuçları	Kaynak
14	Endüstriyel AAT Lagünleri	- Akım yoğunluğu: 12,5 mA /cm² - Elektroliz süresi: 30 dk -Elektrotlar arası mesafe: 0,5 cm	- Alüminyum /paslanmaz çelik elektrot - Monopolar, lab ölçekli EC reaktörü	- Akım yoğunluğu - Sıcaklık - Elektroliz süresi - Elektrot tipi - Başlangıç TSS/Klorofil-a, KOİ değeri	- Çıkış TSS/Klorofil-a, KOİ değerleri (mg/L)	- % 97 TSS giderimi - %94 KOİ giderimi - % 99,5 klorofil-a giderimi	Curteanu vd. (2011)
15	Kağıt Endüstrisi	- pH₀: 7 -Elektroliz süresi: 50 dk - Akım yoğunluğu: 14 mA/cm² - Elektrotlar arası mesafe: 5 mm. - Karıştırma hızı: 200 rpm	- Paralel bağlı alüminyum elektrot - Lab ölçekli EC reaktörü	- Elektroliz süresi - Akım yoğunluğu - Elektrot malzemesi - Başlangıç pH değeri	- KOİ, polifenol ve renk giderim verimi	- %98 KOİ giderimi - %92 polifenol giderimi - %99 renk giderimi	Zaied vd. (2009)

2.6. Kimya Endüstrisinde Elektrokoagülasyon ile Yapılan Arıtılabilirlik Çalışmaları

Yaqub vd. (2023), elektrokoagülasyon prosesi ile Reaktif Mavi-2 (RB-2) içeren sentetik atıksudan renk giderimini incelemişlerdir. RB-2 giderimi için deneyler, laboratuvar ortamında, DC güç kaynağına bağlı alüminyum ve çelik elektrotlar ile gerçekleştirilmiştir. RB-2 çözeltisinin renk giderimi, çift ışınlı UV spektrofotometre ile belirlenmiştir. Giderim verimleri iki yönlü ANOVA uygulanarak belirlenmiştir. Çalışmada, başlangıç pH'ı, elektroliz süresi ve akım yoğunluğu ile boya konsantrasyonu olmak üzere dört deneysel değişkenin RB-2 boyasının renk giderim verimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. RB-2 boyası için optimum deneysel koşullar; elektroliz süresi 6 dakika, başlangıç pH'ı 3, akım yoğunluğu 16,6 mA/cm² ve boya konsantrasyonu 5 ppm'de çelik elektrotlar kullanılarak elde edilmiştir. Optimum koşullar altında %95 renk giderimi gerçekleşmiştir.

Hu vd. (2023), elektrokoagülasyon ile poliamid (PA) partikülleri içeren atıksuyun giderim verimini etkileyen faktörleri ve atıksu arıtım mekanizmasını incelemişlerdir. Elektrot malzemelerinin, uygulanan voltajın, başlangıç elektrolit pH'ının ve konsantrasyonun poliamid giderimi üzerindeki etkileri sistematik olarak araştırılmıştır. Sonuçlar, demir anot ve alüminyum katot kombinasyonunun (Fe-Al) en iyi giderim etkisini sağladığını göstermiştir. Mikroplastiklerin giderim veriminin, uygulanan voltaj ve elektrolit konsantrasyonunun artmasıyla birlikte doğru orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir. Enerji tüketimi ve maliyet göz önünde bulundurulduğunda, poliamid partiküllerinin giderim verimi, 2,5 cm plaka aralığı, 10 V voltaj, 7 başlangıç pH'ı ve 0,02 mol/L elektrolit konsantrasyonu ile Fe-Al elektrot kombinasyonu altında 120 dakikalık elektrolizden sonra %97 olarak hesaplanmıştır. Yapılan çalışma, elektrokoagülasyonun mikroplastikleri atıksudan uzaklaştırma potansiyelini ortaya koymakta ve çalışma parametrelerinin optimizasyonu konusunda mühendislik perspektifleri sağlamaktadır.

Akkaya (2022), elektrokoagülasyon prosesi ile petrol atıksuyundan kimyasal oksijen ihtiyacı ve fenol giderimine odaklanmıştır. Çalışmada, literatürde bildirilenlerden farklı olarak, farklı endüstriler tarafından atılan hurda silindirik delikli demir (PS) ve metal plakalar EC için geri kazanım yoluyla elektrot olarak kullanılmıştır. Anot olarak PS, katot olarak ise iki farklı malzemeden (Al ve Fe) yapılmış elektrot kullanılmıştır. Elektrotlar, EC reaktörünün ve PS'nin merkezine yerleştirilmiştir. Başlangıç pH'ı (4-10), başlangıç alıkonma süresi (5-45 dk) ve akım yoğunluğu (2-28 mA/cm²) gibi ana parametrelerin EC süreci üzerindeki etkileri yanıt yüzey metodolojisi (RSM) kullanılarak değerlendirilmiş ve optimize edilmiştir. ANOVA sonuçları KOİ giderimi ve fenol giderimi için determinasyon katsayılarının (R^2) sırasıyla 91,18 ve 91,46 olduğunu ortaya koymuştur. Maksimum giderim verimi; pH=6.30, akım yoğunluğu= 22 mA/cm², alıkonma süresi= 39 dakika ve Fe katot optimum koşulları altında KOİ ve fenol giderim verimleri sırasıyla %96 ve %94 olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar; başlangıç akım yoğunluğunun ve alıkonma süresinin, petrol atıksuyundan KOİ ve fenol giderimi üzerinde önemli ölçüde etkili olduğunu göstermiştir. Toplam maliyet 3,1 USD/m³ olarak hesaplanmıştır. Çalışmada geri kazanılan metallerin kullanılması nedeniyle elektrot maliyeti oluşmamıştır. Sonuçlar, EC prosesi için geri kazanılan metallerin elektrot olarak kullanılmasının etkili bir arıtma yöntemi olduğunu göstermiştir.

Shen vd. (2022), EC ile atıksu arıtımında mikroplastiklerin giderim

performansını, mekanizmasını ve etkileyen faktörleri araştırmışlardır. Çalışmada başlangıç pH'ı, elektrolit konsantrasyonu, uygulanan voltaj yoğunluğu, anot malzemeleri, mikroplastik türü ve mikroplastik konsantrasyonları dahil olmak üzere atıksu karakteristiğinin EC ile mikroplastiklerin giderim verimi üzerindeki etkileri sistematik olarak incelenmiştir. Bulgular, alüminyum anotun mikroplastiklerin gideriminde demir anottan daha iyi olduğunu ve tüm deneylerde giderim oranının %80'in üzerinde olduğunu göstermiştir. Çalışma sonuçları, alüminyum anot kullanılan EC prosesinin atıksudaki mikroplastikleri gidermek için etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir. Dört farklı mikroplastığın EC ile giderim oranı, pH 3-10 aralığında %82'nin üzerine çıkabilmektedir ve en iyi giderim oranı pH 7,2'de PE için %93,2, PMMA için %91,7, CA için %98,2 ve PP için %98,4 olmuştur. Fiber mikroplastiklerin EC ile giderim veriminin granül mikroplastiklerden daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Mikroplastik giderim verimi, elektrolit konsantrasyonunun ve uygulanan voltaj yoğunluğunun artmasıyla birlikte doğru orantılı olarak artmıştır. Ayrıca, mikroplastikler EC sırasında aynı anda flokülasyona ve yük nötralizasyonuna uğramaktadır. Reaktör işletme maliyetinin ekonomik değerlendirmesi ile optimum EC reaksiyon koşulları; 0,05 M elektrolit konsantrasyonu, pH 7,2, 10 V uygulanan voltaj yoğunluğu ve Al anot olarak belirlenmiştir.

Fakhri vd. (2021) yaptıkları çalışmada, petrokimya endüstrisi atıksularının arıtımı için elektrokoagülasyon yöntemini kullanmışlardır. Çalışmada, çeşitli parametrelerin (pH, işletme süresi, akım yoğunluğu, tuz konsantrasyonu) etkisi incelenerek en yüksek verimin hangi koşullarda elde edildiği belirlenmeye çalışılmıştır. Kullanılan elektrokoagülasyon hücresi, 12 Volt DC güç kaynağına bağlanmış bir alüminyum katot ve bir paslanmaz çelik anottan oluşmaktadır. Elektrotlar arasındaki mesafe 1 cm olarak sabit tutulmuştur. Çalışmanın başlangıcında, petrokimya endüstrisi atıksularının KOİ ve fenol konsantrasyonu ölçülmüştür. Sonuçlar, en yüksek verimin pH 7,5, 45 dakika işletme süresi, 20 mA/cm² akım yoğunluğu ve 3 g/L NaCl konsantrasyonu ile elde edildiğini göstermiştir. Optimum koşullarda %97,2 KOİ giderimi ve %99,7 fenol giderimi gerçekleştiği hesaplanmıştır. Çalışmada, atıksu numunesindeki ağır metallerin giderimi de incelenmiş ve Pb, Ni, Cd, Cr ve Zn gibi metallerin çoğunun elektrokoagülasyon işlemi sonrasında giderildiği tespit edilmiştir (% 99,6 Pb, % 99,5 Ni, %99,6 Cr ve %99,5 Zn giderimi gerçekleşmiştir).

Gündüz ve Atabey (2019), farklı parametreler kullanarak RR195 boyarmaddesinin elektrokoagülasyon prosesi ile giderimini araştırmışlardır. Çalışma süresince demir, alüminyum ve çinko elektrotlar kullanarak; farklı akım yoğunluklarında (10-20 ve 40 mA/cm²), asidik ve bazik pH değerlerinde (pH=4 ve pH=8) renk giderim verimi incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, demir elektrot kullanılarak RR195 boyarmaddesinin giderimi için, 5 dakikalık süre boyunca 10 mA/cm² akım yoğunluğunda asidik koşullarda %98 ve bazik koşullarda %96 renk giderim verimine ulaşılmıştır.

Ramya vd. (2019), pamukta sorun olan yeşilkurt, dikenlikurt ve pamuk yaprak kurdu (Prodenya) zararlılarına karşı kullanılan, üstün özellikleri olan bir insektisit olan Coragen® 20 SC içeren atıksuyun elektrokoagülasyon ile giderimini incelemişlerdir. Çalışmada başlangıç pH'ı, akım yoğunluğu, numunenin elektroliz süresi ve elektrot malzemeleri gibi proses değişkenlerinin Coragen'in bozunmasına etkileri değerlendirilmiştir. Elektrolizin çeşitli aşamalarında KOİ, klorür ve bromür iyonu konsantrasyonları gibi parametreler incelenmiştir. Demir elektrotlar kullanılarak 2,5

mg/L elektrolit (NaCl) konsantrasyonu ve 150 dakikalık elektroliz ile 7,5 mA/cm² akım yoğunluğunda ve pH 7'de kimyasal oksijen ihtiyacı için maksimum giderim verimi %79 olarak hesaplanmıştır. Nötr pH'ın alkali ve asidik pH çözeltilerine göre KOİ gideriminde daha verimli olduğu gözlemlenmiştir. Akım yoğunluğu ve proses süresindeki artış KOİ gideriminin artmasına yol açmıştır. Ek olarak demir elektrotlar ile maksimum KOİ (%79), klorür (%78) ve bromür (%77) giderimi elde edilmiştir. Coragen'in bozunması FTIR ve GC-MS kullanılarak doğrulanmıştır. Deneysel sonuçlar, elektrokoagülasyon prosesinin Coragen içeren atıksudan KOİ'yi etkili bir şekilde uzaklaştırabildiğini göstermiştir.

Song vd. (2019), Fe-C mikroeletrotlar kullanarak kimya endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtımını incelemişlerdir. Çalışmada, etkili bir arıtım için işletme süresi, pH, akım yoğunluğu ve FeCl₃ konsantrasyonu gibi faktörlerin optimize edilmesi amaçlanmıştır. Farklı işletme şartları altında, Fe-C mikroeletrotlar kullanılarak elektrokoagülasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. En yüksek verim; pH 7, 40 dakika işletme süresi, 10 mA/cm² akım yoğunluğu ve 0,1 g/L FeCl₃ konsantrasyonu ile elde edilmiştir. Bu şartlar altında %88 KOİ giderimi, %76 toplam organik karbon (TOK) giderimi, %85 sülfat giderimi ve %64 klorür giderimi gerçekleşmiştir. Çalışma, enerji tüketimi ve elektrot aşınması gibi ekonomik faktörlerin de değerlendirildiği bir analiz içermektedir. Optimum işletme koşullarında, enerji tüketimi 3,6 kWh/m³ olarak hesaplanmıştır. Elektrotların aşınma durumu görsel olarak incelenmiş ve aşınmanın çok az olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, Fe-C mikroeletrotlar kullanılarak elektrokoagülasyon yönteminin kimya endüstrisi atıksularının arıtımı için etkili bir yöntem olduğu ve ekonomik olarak uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Perren vd. (2018), elektrokoagülasyonun atıksu akımlarında mikroplastik giderimi bağlamında etkinliğini araştırmayı amaçlamıştır. Çalışmada, farklı konsantrasyonlarda polietilen mikroplastik içeren sentetik atıksu kullanılmıştır. Atıksu, 1 L hacme sahip kesikli reaktörde test edilmiştir. Atıksu özelliklerinin (başlangıç pH'ı, NaCl konsantrasyonu ve akım yoğunluğu) giderim verimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Tüm deneylerde %90'ın üzerinde mikroplastik giderim verimi elde edilmiştir. Çalışmada, elektrokoagülasyonun, 3-10 arasında değişen pH değerlerinde %90 üzerinde giderim verimiyle etkili bir yöntem olduğu tespit edilmiştir. Optimum giderim verimine %99 ile 7,5 pH değerinde ulaşılmıştır. Çalışmada ek olarak reaktör işletme maliyetlerinin ekonomik bir değerlendirmesi yapılmış ve reaktördeki optimum NaCl konsantrasyonunun, yüksek su iletkenliğine bağlı olarak azalan enerji gereksinimleri nedeniyle 0 ila 2 g/L arasında olduğunu belirlenmiştir. Spesifik kütle giderim oranının (kg/kWh) test edilen en düşük akım yoğunluğu olan 11 A/m² için en yüksek olduğu ve buna bağlı olarak düşük akım yoğunluğunun mikroplastik giderimi için daha verimli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Kalethil ve John (2017), sentetik gübre endüstrisi atıksuyunda çelik elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyon prosesini değerlendirmişlerdir. Çalışmada; pH, alıkonma süresi, elektrot aralığı ve akım yoğunluğu gibi proses değişkenleri incelenmiştir. Fosfat giderimi için değişkenler Minitab yazılımı (16. sürüm) kullanılarak Taguchi yöntemi ile optimize edilmiştir. Optimize edilmiş çalışma için maksimum fosfat giderimi, çelik elektrotlar için %79 olmuştur.

Ensano vd. (2016), elektrokoagülasyon prosesi kullanarak yüksek oranda tüketilen ilaçların temsilcisi olarak seçilen Diklofenak (DCF), karbamazepin (CBZ) ve

Amoksisilin'in (AMX) arıtılmasını araştırmışlardır. Hem tekil hem de kombine ilaçların giderim verimleri farklı deneysel koşullar altında incelenmiştir. Çalışma koşulları; hidrolik alıkonma süresi (HRT) 6, 19 ve 38 saat, başlangıç konsantrasyonu 0,01, 4 ve 10 mg/L ve akım yoğunluğu (5 dakika açık/20 dakika kapalı) 0,5, 1,15 ve 1,8 mA/cm² olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, bu parametrelerin farmasötik bozunma üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermiştir. Maksimum giderim (DCF = %90, CBZ = %70 ve AMX = %77) 0,5 mA/cm² akım yoğunluğunda, 10 mg/L başlangıç konsantrasyonunda ve 38 saat hidrolik alıkonma süresinde elde edilmiştir.

Taheri vd. (2015) yaptıkları çalışmada sentetik sudan asit oranj 7, CN asit kahverengi 14 ve asit kırmızı 18 boyalarının elektrokoagülasyon ile uzaklaştırılmasında yapay sinir ağı ve genetik algoritma kullanarak Taguchi tasarım optimizasyonunun geliştirilmesi incelemiştir. Bu amaçla, Taguchi'nin ortogonal dizisi kullanılarak akım yoğunluğu, reaksiyon süresi, başlangıç boya konsantrasyonu, boya tipi ve başlangıç pH'ı dahil olmak üzere beş parametre için 27 test yapılmıştır. Çalışmada 2,5 L etkin hacme sahip, 3 cm aralıklarla yerleştirilen dört alüminyum elektrot içeren EC ünitesi kullanılmıştır. Boya giderim verimi yapay sinir ağı (ANN) ile modellenmiştir. Çalışmada ek olarak ANN, Taguchi tasarımına göre seçilen boyalar için en iyi koşulları belirlemek için GA kullanılmıştır. Geliştirilen ANN için gizli katmanda 10 nöron kullanımı uygun görülmüştür. Akım yoğunluğu, reaksiyon süresi, başlangıç boya konsantrasyonu, boya tipi ve başlangıç pH'ı girdi olarak; boya giderim verimi ise çıktı olarak tanımlanmıştır. Gizli katman ve çıkış katmanı için sırasıyla tansig ve purelin transfer fonksiyonları kullanılmıştır. Toplam 241 veri eğitim, doğrulama ve test setleri arasında rastgele dağıtılmıştır. ANN modeli ve GA tasarımı için MATLAB matematiksel yazılımı kullanılmıştır. ANN modeli için R²=98 ve Taguchi modeli için ve R²=97 regresyon değerleri elde edilerek modellerin doğruluğu kanıtlanmıştır. Belirlenen optimum koşullarda %97 asit oranj 7, %98 asit kahverengi 14 ve %76 asit kırmızı 18 giderimi sağlanmıştır. Taguchi yöntemine göre, boya giderim verimi ve işletme maliyeti için en önemli parametreler sırasıyla boya tipi (%61) ve reaksiyon süresi (%57) olarak belirlenmiştir.

Ghalwa ve Ferhad (2015), elektrokoagülasyon prosesi kullanarak pestisit imidacloprid ve kimyasal oksijen ihtiyacının (KOİ) sulu çözeltilerden giderim verimini araştırmışlardır. Başlangıç pH'ı, başlangıç imidacloprid konsantrasyonu, akım yoğunluğu, elektrolit tipi, tuz konsantrasyonu ve sıcaklık gibi çeşitli parametrelerin pestisit ve KOİ giderim verimi üzerindeki etkisi EC performansı üzerinde araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, imidacloprid ve KOİ gideriminin Fe elektrotlar kullanılarak 60 dakikada %95 ve %89,5 olduğunu ve Al elektrotlar kullanılarak 90 dakika sonrasında %80,8 ve %73,1 olduğunu göstermiştir. Fe ve Al elektrotların kullanılması durumunda, pestisit giderim verimi için deneylerde sırasıyla yalancı ikinci ve birinci derece kinetik model uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, Fe elektrot ile elektrokoagülasyon prosesinin atıksudan imidacloprid ve KOİ giderimi için çok verimli ve çevreci bir proses olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Akyol vd. (2014) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, humik asit içeren sıvı organik gübre üretim atıksularının arıtımı, elektrokoagülasyon yöntemi kullanılarak kesikli bir reaktörde incelenmiştir. Çalışmada başlangıç atıksu pH değeri 5,8 olarak tespit edilmiş, akım yoğunluğu 100 A/m² ve işletme süresi ise 45 dakika olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda %75 bulanıklık (26 NTU), %91 KOİ (91 mg/L), %87 TOC

(57mg/L), %82 TP (88mg/L) ve %6 TN (64 mg/L) giderim verimi elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre renk ve TOC gideriminde EC prosesinin etkili olduğu, fakat TN giderim veriminin düşük olduğu görülmüştür.

Abdel-Gawad vd. (2012) bazı pestisitlerin (malathion, imidacloprid ve chlorpyrifos) giderimi için elektrokoagülasyon yönteminin kullanımını incelemişlerdir. Çalışmada, çeşitli operasyonel parametrelerin giderim verimine etkisi araştırılmış ve sistem optimize edilmiştir. Pestisit çözeltileri, deiyonize su kullanılarak hazırlanmıştır. Kullanılan elektrokoagülasyon hücresi; paralel bağlı, bipolar elektrotlar ve DC güç kaynağından (0-15V ve 0-3A) oluşmaktadır. Her biri 10 x 5 x 0,2 cm boyutlarında olan ve bipolar modda bağlanan dört elektrot arasındaki mesafe 2 cm olarak ayarlanmıştır. Elektrokoagülasyon deneyleri 25 °C ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Demir elektrotlar kullanılan sistemde pestisit giderimi; başlangıç pH'ı, akım yoğunluğu, NaCl miktarı ve başlangıç pestisit konsantrasyonundan etkilenmiştir. Başlangıç pH'ı 6-7, akım yoğunluğu 1mA/cm², elektroliz süresi 10 dk, başlangıç pestisit konsantrasyonu %0,5 ve NaCl konsantrasyonu 1g/L olan çalışma koşulları altında ~%98-99 pestisit giderimi gerçekleştirilmiştir.

Daneshvar vd. (2006) BY-28 boya çözeltisi içeren sentetik tekstil atıksuyundan elektrokoagülasyon yöntemi ile renk giderimini incelemişlerdir. Genellikle akrilik elyaf boyama için kullanılan BY-28, suda çözünür ve katyonik bazik boya grubuna aittir. Araştırmada; akım yoğunluğu, başlangıç pH değeri, elektroliz süresi, elektrotlar arasındaki mesafe, temas süresi, boya konsantrasyonu ve çözelti iletkenliği gibi operasyonel parametrelerin renk giderim verimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Anot ve katot olarak 50 mm×50 mm×3 mm boyutlarında, demir (ST 37-2) plakalar kullanılmıştır. Her çalışmada, 250 ml boya çözeltisi EC hücresine boşaltılmıştır. Akım yoğunluğunun 80 A/m²'ye yükseltilmesi renk giderim verimini artırmıştır. 7 dakika elektroliz süresi ve 5-8 pH aralığında çalışılmıştır. Yüksek oranda renk giderimi elde etmek için, çözelti iletkenliğinin 10 mS/cm ve başlangıç boya konsantrasyonunun 50 mg/L olması gerektiği tespit edilmiştir. Optimum koşullarda, işletme maliyeti bir kg boya için 0.07 ABD doları olarak belirlenmiştir. Laboratuvar ölçekli ve kesikli olarak çalıştırılan reaktörde elde edilen deneysel verilere dayanarak EC prosesi ile renk giderim veriminin performansını tahmin etmek için bir yapay sinir ağı (ANN) modeli geliştirilmiştir. İleri beslemeli sinir ağı için giriş değişkenleri akım yoğunluğu, elektroliz süresi, başlangıç pH'ı, başlangıç boya konsantrasyonu, iletkenlik, çamur tutma süresi ve elektrotlar arasındaki mesafe; çıktı değişkeni ise renk giderim yüzdesi olarak seçilmiştir. Gizli katmanlar ve çıkış katmanı için sigmoidal transfer fonksiyonu kullanılmıştır. Modeli geliştirmek için 49 veri seti ile çalışılmıştır. Gizli katmandaki uygun nöron sayısı 10 olarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, geliştirilen ANN modelinin 0,974 korelasyon katsayısına sahip olduğu ve öngörülen sonuçları ile deneysel veriler arasında iyi bir korelasyon olduğu, modelin farklı koşullar altında renk giderim yüzdesini tanımlayabileceği sonuçlarına ulaşılmıştır.

Dimoglo vd. (2004) elektroflotasyon (EF) ve elektrokoagülasyon (EC) prosesleri kullanılarak petrokimya atıksuyundan (PCWW) kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), bulanıklık, fenol, hidrokarbon ve yağ-gres giderimini incelemişlerdir. EF ünitesinde grafit anot ve katot olarak paslanmaz çelik tel kullanılmıştır. EC ünitesinde ise demir ve alüminyum plakalar eş zamanlı olarak kullanılmıştır. Reaktör voltajı 12V olarak belirlenmiştir. EF için 2-20 dakika ve EC için 1-10 dakika içerisinde, akım yoğunluğunun

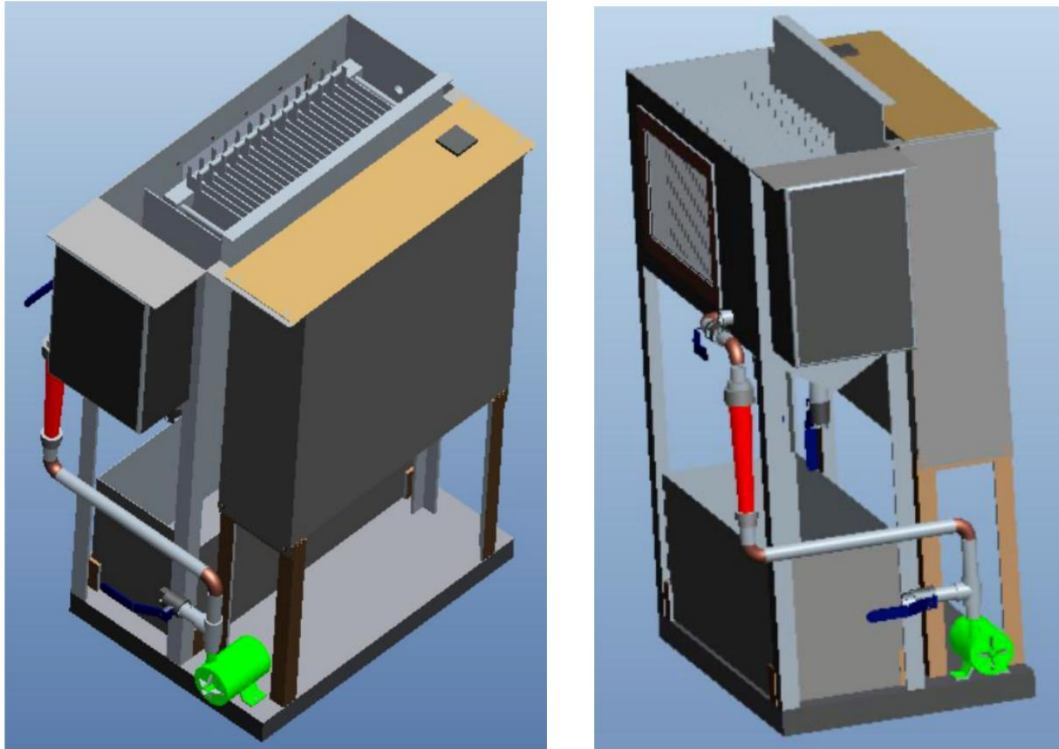
(CD) 5-15 mA/cm² arasında değiştiği gözlemlenmiştir. PCWW'nin arıtılması işleminde bulanıklık giderimi EF için % 83, EC için % 88 olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, petrokimya atıksuyundan kirleticilerin giderilmesinde EC'nin EF'dan daha etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir.

Akbulut vd. (2003), elektrokimyasal yöntemlerle petrol içeren atıksuların arıtılmasını incelemişlerdir. Çalışmada Tüpraş – İzmit Rafinerisi Atıksu Arıtma Tesisinin DAF ünitesi ile karıştırma ünitesi çıkış sularından alınan atıksu numuneleri kullanılmıştır. Elektroflotasyon yönteminde paslanmaz çelik elektrotlar kullanılarak, elektrokoagülasyon yönteminde ise demir ve alüminyum elektrotlar kullanılarak, sabit sıcaklıkta, sabit gerilimde, farklı akım yoğunluklarında ve farklı sürelerde bulanıklık, KOİ, yağ ve gres, fenol ile hidrokarbon giderimi incelenmiştir. DAF ünitesi çıkış suyunda, 10 mA/cm² akım yoğunluğunda demir anot kullanıldığında KOİ giderim veriminin 1, 2, 3 ve 5. dakikalarda sırasıyla %12, 20, 36 ve 41 olduğu belirlenmiştir. Aynı şekilde, alüminyum anot kullanıldığında ise 1, 2, 3 ve 5. dakikalarda sırasıyla %12, 28, 47 ve 56 KOİ giderim verimi elde edildiği görölmüştür. Yüksek akım yoğunluğunda, alüminyum elektrot kullanıldığında giderim veriminin arttığı belirlenmiştir. Hidrokarbon gideriminde, Fe anotlar ile daha yüksek giderim verimi elde edilmiştir.

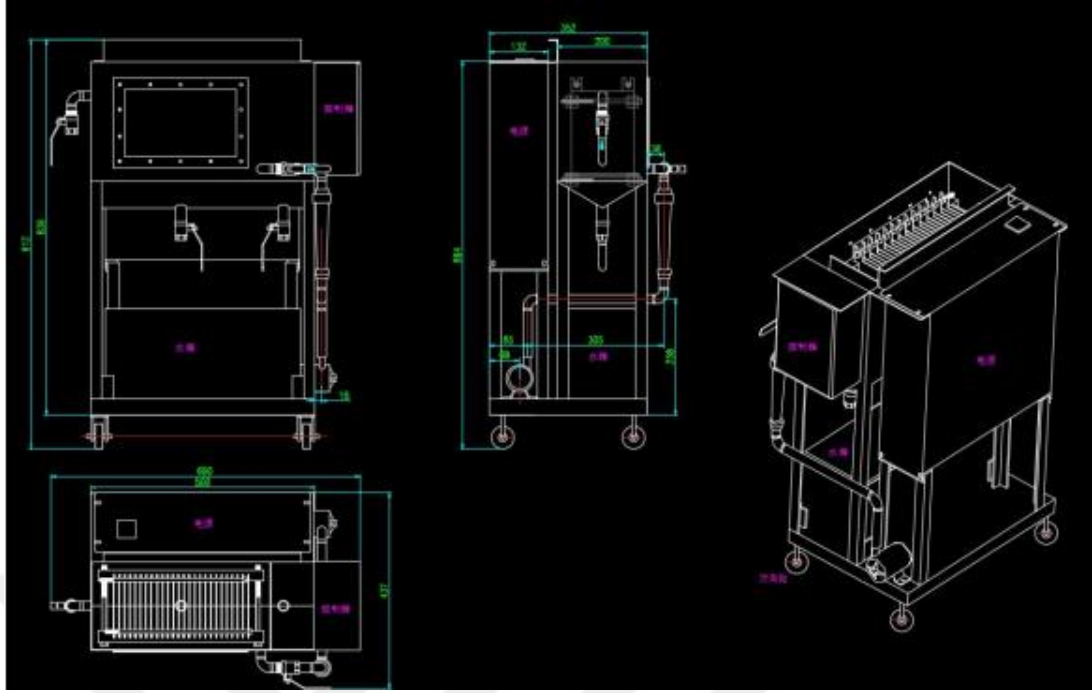
3. MATERYAL VE METOT

Teze konu olan çalışmalar, Antalya Organize Sanayi Bölgesinde faaliyet gösteren kimyevi gübre ve zirai ilaç üreten bir firmada gerçekleştirilmiştir. EC prosesinin ön arıtma ya da temel arıtma teknolojisi olarak kullanılacağına karar vermek amacıyla endüstriyel atıksu arıtımı/geri kazanımı alanındaki pilot ölçek akademik/mühendislik uygulamaları, EC proses dinamikleri ve değişkenleri, EC prosesi öncesi ve sonrası uygulanacak teknolojiler ile sistem fizibilitesi, bilimsel literatür ve gerçek mühendislik uygulamaları bazında değerlendirilmiştir.

Çalışmalar sırasında Şekil 3.1’de CAD çizimine yer verilen; Chengdu Filtrascale Co. Ltd’den temin edilen 100 L/saat kapasiteli ECT-010 model, pilot ölçek EC reaktörü kullanılmıştır. EC reaktörüne ait montaj çizimi Şekil 3.2’de verilmiştir. EC reaktörü, sahada kurulacak sistemde ortaya çıkan ihtiyaçlar (EC pilot ünitenin sabitleneceği metal konstrüksiyon şase, 380 V uyumlu elektrik tesisat altyapısı, atıksu dengeleme tankı, mekanik karıştırıcı ve EC sistemine besleme pompası, arıtılmış atıksu (ürün suyu) biriktirme tankı ve resirkülasyon pompası, çamur biriktirme tankı ve çamur pompası, atıksu - ürün suyu ve çamur iletimi için gerekli boru, vana, debimetre vb. su tesisat ekipmanları) üniversite-sanayi işbirliği kapsamında, Antalya Organize Sanayi Bölgesinde faaliyet gösteren endüstriyel ölçekli bir arıtma firmasından temin edilmiştir.



Şekil 3.1. Pilot ölçek EC reaktörüne ait 3D CAD modeli çizimleri



Şekil 3.2. Pilot ölçek EC reaktörüne ait montaj çizimi

3.1. Elektrokoagülasyon Reaktörü

Pilot ölçek EC reaktörü ile gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen hipotetik/kavramsal sistem dinamikleri, saha uygulama süreci için değerlendirilmiştir. Tüm ön testler temiz su/çeşme suyunda, belirlenmiş olan işletme sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Bu kısımda, özellikle satın alınan reaktöre ait mekanik ve elektrik tesisatı ile ekipmanların kararlı bir şekilde çalıştığı doğrulanmıştır. Amaca yönelik olarak üretici servis ve bakım kılavuzunda yer alan statik ve dinamik testler esas alınmıştır. Farklı pH, elektriksel akım yoğunluğu, elektrotlar arası mesafe, hidrolik alıkonma süresi ve elektriksel iletkenlik değerlerinde test edilmiş ve Denklem 3.1 eşitliği ile EC prosesinin ham atıksu arıtma verimi hesaplanmıştır.

Yüzde giderim verimi hesaplama yöntemi:

$$\% \text{ Giderim Verimi} = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100 \quad (3.1)$$

C_0 : Numune başlangıç konsantrasyonu (mg/L)

C : Proses sonucu giderilen konsantrasyonu (mg/L)

Ar-Ge, tasarım faaliyetleri sırasında kullanılan EC reaktörü Şekil 3.3'te ve reaktör özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir. Çalışmalar sırasında, sistemin işlevselliğinin artırılması ve optimum işletme şartlarının belirlenebilmesi için alüminyum ve demir elektrotlar kullanılmıştır.

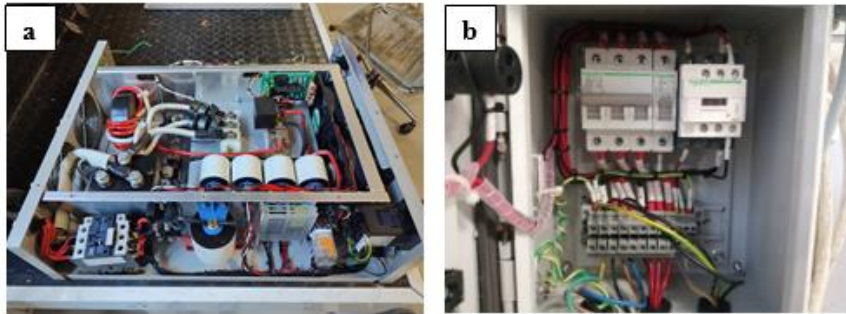


Şekil 3.3. Pilot ölçek EC reaktörü

Çizelge 3.1. Pilot ölçek EC reaktörü özellikleri

Ekipman Teknik Özellikleri	
Marka/Model	Chengdu Filtrascaple/ECT-010
Menşei	Çin
Güç	6 kW
Bağlantı Çapı	1"
Kapasite	100 litre/saat
Hacim	16 Litre
Plaka Yerleşimi	Bipolar (bir sıra anot, bir sıra katot)
Reaktör Boyutları	20 cm x 20 cm x 40 cm (16 L)
Plaka sayısı	16 adet
Plakalar arası mesafe	1 cm
Plaka Boyutları	Uzunluk:20 cm Genişlik: 14 cm 20 cm x 14 cm x 1 cm (0,028 m ² x 16 adet = 0,448 m ²)

Prosesin temel çalışma mekanizmasını aydınlatmak, tasarım kriterlerini ve know-how unsurlarını belirlemek amacıyla akım regülatörü (Şekil 3.4.a) ve kontrol panosu (Şekil 3.4.b) incelenerek pano malzeme listesi çıkarılmıştır. Kontrol panosu malzeme listesine Çizelge 3.2’de yer verilmiştir.



Şekil 3.4. a) EC akım regülatörü; **b)** EC reaktörü kontrol panosu

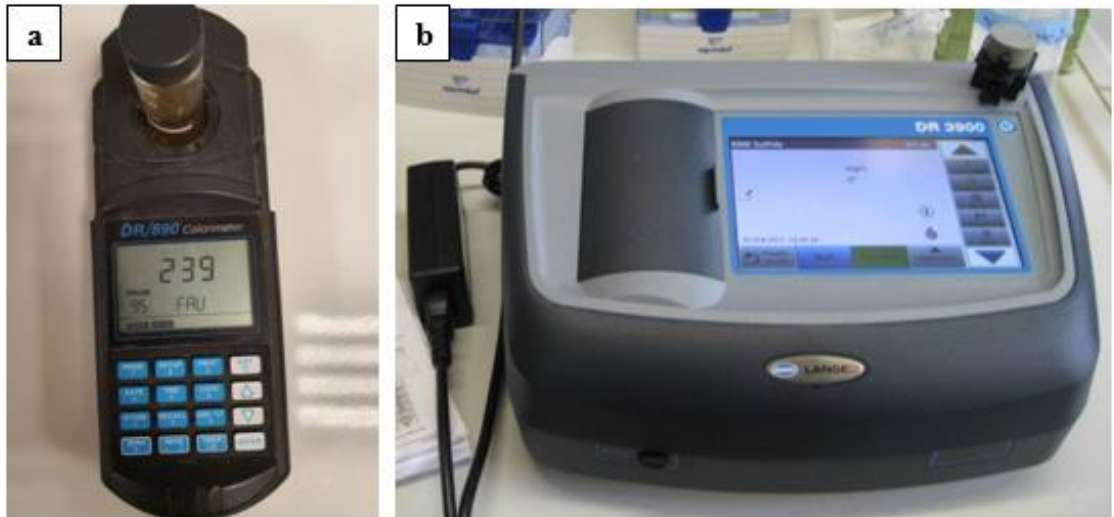
Çizelge 3.2. Pilot ölçek EC reaktörü için pano malzeme listesi

No.	Kontrol Panosu Malzemeleri
1	MS116-4 motor koruma şalteri 2.5-4A
2	MS165-42 motor koruma şalteri 30-42A
3	5,5 kW kontaktör
4	2,5 mm gri klemens
5	220V beyaz led
6	Taban saclı-opak kapaklı pano (30x40x17 cm)
7	1-0-2 anahtar 1NA+1NC

3.2. Analizler/Ölçümler

Yerinde ölçüm imkanı olan pH, sıcaklık, elektriksel iletkenlik ve bulanıklık parametreleri çalışmalar sırasında, Hach Lange DR/890 portatif multimetre (Şekil 3.5.a) ile anlık olarak analiz edilmiştir.

KOİ, AKM, Yağ-Gres, Toplam Fosfor ve Toplam Azot ölçümleri ise Hach Lange DR3900 spektrofotometre (Şekil 3.5.b) ile gerçekleştirilmiştir. Fotometrik testler için kullanılan ölçüm kitleri, Çizelge 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.5. a) Hach Lange DR/890 portatif multimetre; **b)** Hach Lange DR3900 spektrofotometre

Ön testler için farklı işletme koşullarında sıcaklık, pH, iletkenlik parametreleri değerlendirilirken EC reaktörü giriş ve çıkışından alınan atıksu numuneleri için AKM, pH, Bulanıklık, KOİ, TN, TP iletkenlik parametreleri analiz edilmiştir.

Çizelge 3.3. Fotometrik testler için kullanılan ölçüm kitleri

No.	Test Kiti	Ölçüm Aralığı
1	LCK138 Toplam Azot küvet testi	1-16 mg/L TN
2	LCK338 Toplam Azot küvet testi	20-100 mg/L TN
3	LCK350 Fosfat, orto/toplam küvet testi	6- 60 mg/L PO ₄ 20 mg/L PO ₄ -P 4,5- 45,0 mg/L P ₂ O ₅
4	LCK514 KOİ küvet testi	100-2.000 mg/L
5	LCK014 KOİ küvet testi	1.000-10.000 mg/L
6	LCK365 Organik Asitler (Yağ Asitleri /Butanoik Asit)	50- 2.500 mg/L asetik asit 75- 3.600 mg/L butanoik asit

3.3. Ön Testler

Sistemin hidrolik, mekanik ve elektrik aksamının kararlı bir şekilde çalışmasını sağlamak için pilot ölçekli EC reaktörü ile kurulan sistemde, ilk olarak temiz su ön testleri gerçekleştirilmiştir. Bu kısımda yaşanması muhtemel teknik sorunlar (sızıdırma, taşma, elektrik kaçağı, pompa arızaları vb.) tespit edilerek sistem, gerçek atıksu denemelerine hazır hale getirilmiştir. Pilot ölçek EC reaktöründe gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen hipotetik/kavramsal sistem dinamikleri; saha uygulama süreci için değerlendirilmiştir. Tüm ön testler temiz su/çeşme suyunda, belirlenecek işletme süresinde yapılmıştır. Bu kısımda özellikle satın alınan reaktöre ait mekanik ve elektrik tesisatı ile ekipmanların kararlı bir şekilde çalıştığı doğrulanmıştır. Ön testler yumuşatma filtresi atıksuyu (yumuşatma ünitesi ters yıkama + rejenerasyon + hızlı-yavaş durulama karışık atık akımı), şebeke suyu, ters osmoz konsantre akımı ile gerçekleştirilmiştir.

Saha çalışmalarına başlamadan önce, sistemin atıksudaki performansını incelemek amacıyla bulanıklık ve renk değerleri yüksek olan kağıt endüstrisi atıksuyunda fizibilite çalışması yapılmıştır. Tez çalışmaları kapsamında, kimya endüstrisi atıksuyu arıtımına odaklanıldığı için deneme amaçlı yapılan çalışmalara EK-1’de yer verilmiştir.

3.4. Gübre ve Zirai İlaç Endüstrisi Atıksuyu

Gübre ve zirai ilaç endüstrisi atıksuyu için optimum işletme parametrelerini belirleyebilmek amacı ile maksimum giderim hedefli proses iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Tüm çalışma ve faaliyetler (EC reaktör işletimi ve optimizasyonu, çamur yönetimi, ilave arıtma ünitelerinin tesisi vb.) maksimum giderim ve optimum işletme koşullarına ulaşma motivasyonu ile tasarlanmış ve işletilmiştir. Gübre ve zirai ilaç endüstrisi atıksuyu için üretim faaliyetleri sonucu oluşan ve farklı zamanlarda alınan numuneler, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı onaylı bir laboratuvarında detaylı olarak analiz edilmiş ve ortalama sonuçlar, Çizelge 3.4’te verilmiştir. İşletmede yaklaşık 650 farklı üretim reçetesi bulunmaktadır. Buna bağlı olarak farklı konsantrasyonlara sahip, geniş spektrumlu sentetik kimyasal madde kullanımı mevcuttur. Bu nedenle atıksuyun sabit bir karaktere sahip olmadığını tespit edilmiştir.

Çizelge 3.4. Gübre ve zirai ilaç endüstrisi atıksuyu ortalama analiz sonuçları

Analizler	Yöntem	Limit Değeri	Ölçüm Belirsizliği	Sonuç
Ham atıksu analiz sonuçları				
pH	SM 4500 H+B:2017	6,5-10	± %0,5	7,38
Toplam Fosfor (mg/L)	SM 4500-P B, E:2017	-	± %8,3	15,34
AKM (mg/L)	SM 2540 D:2017	500	± %6,1	1.173
Yağ-Gres (mg/L)	SM 5520 B D:2017	250	± %6,2	336
KOİ (mg/L)	SM 5220 C:2017	4000	± %7,5	39.603
Toplam Azot (mg/L)	SM 4500-N C:2017	-	-	1.381,6

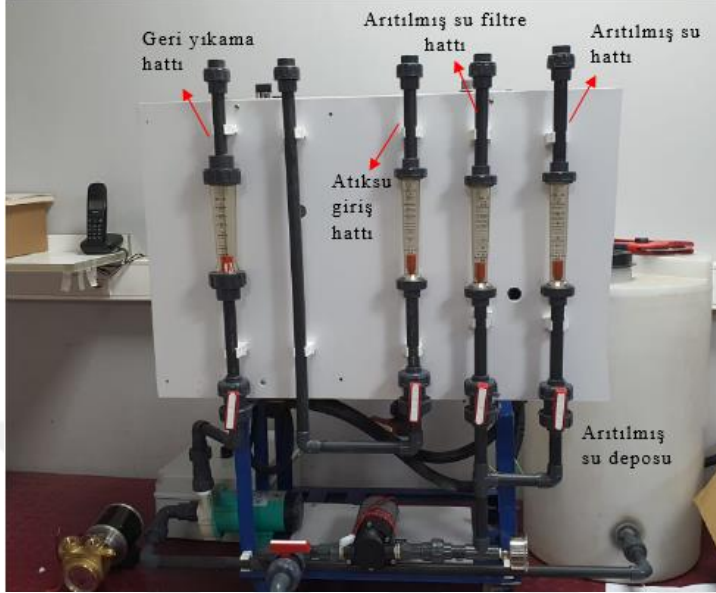
*Sınır değerler, Antalya Organize Sanayi Bölgesi Atıksu Bağlantısı ve Tarife Yönetmeliği Tablo 5.2'ye göre verilmiştir.

Atıksu, üretim reçetelerine bağlı olarak sabit bir karaktere sahip olmadığı için EC reaktörüne, ilave arıtma üniteleri eklenmiştir. EC reaktörü ön arıtma sistemi olarak düşünülmüş ve arkasına kum filtre, karbon filtre ile iki adet paralel bağlı housing filtre eklenmiştir. Prosesin P&ID diyagramına Ek-2'de yer verilmiştir. Proseste kullanılan malzeme ve ekipmanlara ise Çizelge 3.5'te yer verilmiştir.

Çizelge 3.5. Arıtma sistemi malzeme listesi

Malzeme ve Ekipmanlar	Spesifikasyonlar	Marka	Miktar
Mineral	Coconut base aktif karbon 8x30	Aqualine	9 kg
Mineral	Antrasit	Aqualine	7 lt
Mineral	3-5 mm quartz kum	Aqualine	14 kg
Kartuş	Kartuş 20" BB Carbon cto	Aqualine	2 adet
Şeffaf housing	20" şeffaf housing	Aqualine	2 adet
Yarı otomatik valf	1" yarı otomatik manuel valf (NSF'li)	Aqualine	2 adet
WCY tank	8"X35" WCY tank- 2.5" üst açıklık	WCY	2 adet
Küresel vana (numune musluğu)	20DN15, PVC, PN10	Pimtaş	4 adet
Manometre	Logosuz manometre 0-10 bar merkez bağlantılı	Lefoo	1 adet
Tezgahaltı pompa	HK30L 75 GPM tezgahaltı pompa	-	1 adet
Debimetre	1/2" inline tip debimetre 25-250 lt/saat	LZS	2 adet
Küresel Vana	20DN15, PVC, PN10	Pimtaş	11 adet
Manometre	Logosuz manometre 0-10 bar yan bağlantılı	Aqualine	1 adet
Dalgıç Pompa	Ranger 8/35M dalgıç pompa (0,85 hp)	City Pump	1 adet

Şase, EC pilot ünitesine sabitlendikten sonra, atıksu- ürün suyu ve çamur iletimi için gerekli PVC boru, vana, 1/2" inline tip 25-250 lt/saat kapasiteli debimetre ve PE arıtılmış atıksu (ürün suyu) biriktirme tankı montajı yapılmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. EC reaktörü şase montajı

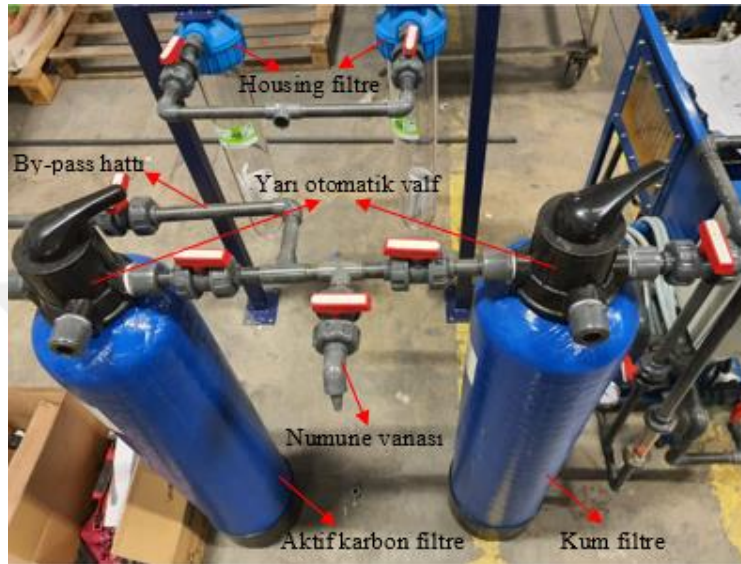
8"x35" boyutlarında ve giriş-çıkış bağlantı çapı 1" olan yarı otomatik, manuel valfli kum ve karbon filtrenin, DN15 PVC borular ile EC reaktörüne bağlantısı yapılmıştır. Tankların filtrasyon alanı 0,03 m²'dir. Her bir filtrenin çıkışına DN15, PVC, PN10 numune muslukları takılmıştır. Ek olarak 2 adet 20" paralel bağlı BB Carbon CTO blok housing filtre kullanılmıştır.

Kum filtre; su içerisinde bulunan askıda katı maddeleri, bulanıklığı ve diğer partikülleri uzaklaştırabilmek için kullanılmıştır. Kum filtrenin diğer bir kullanım amacı ise kendisinden sonra konumlandırılmış olan karbon filtrenin korunması ve çok sık ters yıkamaya girmesini engellemektir. Kum filtresinin çalışma prensibi, partiküllerin ve kirleticilerin antrasit ve quartz kum tabakasında tutulmasına (mekanik filtrasyon) ve adsorpsiyona dayanır. İletkenlik gideriminde tam anlamıyla etkili bir yöntem olmasa da, suyun içerisindeki belirli miktarda çözünmüş tuz ve mineralin giderimine katkı sağlamaktadır. Bazı partiküllerin filtre medyası üzerinde tutulması, çözünmüş tuzlar ve minerallerin kum yüzeyine adsorplanması ile iletkenlik giderimine katkı sağlayabilmektedir (Singh, Amatya 2021).

Aktif karbon filtre renk, tat, koku, KOİ ve özellikle solvent bazlı aromatik hidrokarbonların arıtımı için kullanılmıştır. Aktif karbon filtrelerin etkin bir şekilde kullanılması, kimyasal oksijen ihtiyacı konsantrasyonunun azalmasına katkı sağlamaktadır (Yeh vd. 2002; Babu vd. 2000). Aktif karbon, yüksek yüzey alanı ve gözenek yapısı sayesinde çeşitli gazların ve kirleticilerin adsorpsiyonunu gerçekleştiren özel bir karbon türüdür. Aktif karbonun yüksek yüzey alanı ve gözenekli yapısı, organik maddelerin ve diğer kirleticilerin adsorbe edilmesini sağlar. Bu sayede, atıksu içerisinde

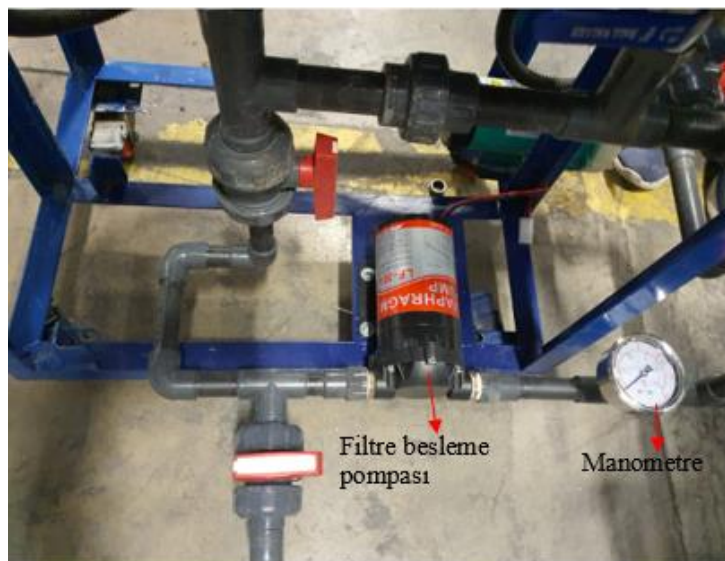
bulunan organik maddelerin ve kirleticilerin suyun içerisinde yüzerek veya serbest hareket ederek parçalanması engellenmiş olur.

Kum filtreye 7 kg antrasit, 7 kg 3-5 mm quartz kum; karbon filtreye ise 9 kg geniş yüzey alanına sahip coconut bazlı aktif karbon, 7 kg 3-5 mm quartz kum dolumu yapılmıştır. Karbon filtre hattına, gerektiğinde housing filtreye direkt olarak geçişin sağlanabilmesi için by-pass hattı eklenmiştir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Kum filtre, karbon filtre ve paralel bağlı housing filtreler

EC ürün suyu hattında bulunan filtre besleme pompası ile kum filtre, aktif karbon filtre ve housing filtrele besleme yapılmıştır. Kum filtre besleme pompası basma hattına 0-10 bar manometre eklenmiştir (Şekil 3.8). Ham su beslemesi çalışmaların yapıldığı firmada bulunan zemin altı tankından dalgıç pompa ile yapılmıştır (Şekil 3.9).



Şekil 3.8. Filtrasyon besleme pompası ve manometre



Şekil 3.9. İşletmede ham su beslemesi yapılan zemin altı tankı

Sahada, 380 V uyumlu elektrik tesisatı yapıldıktan sonra sistem devreye alınmıştır (Şekil 3.10). EC reaktörü 20 Amper, 5 V- 6 V'ta ($11,16 \text{ A/m}^2$ - $13,39 \text{ A/m}^2$) çalıştırılmıştır (Şekil 3.11). EC reaktör çıkışı, kum filtre çıkışı ve karbon filtre çıkışındaki giderim verimleri ayrı ayrı incelenmiştir. pH, sıcaklık, iletkenlik ve bulanıklık değerlerinin takibi sahada yapılmıştır. KOİ, AKM, yağ-gres, toplam fosfor ve toplam azot parametreleri ise laboratuvarında analiz edilmiştir.

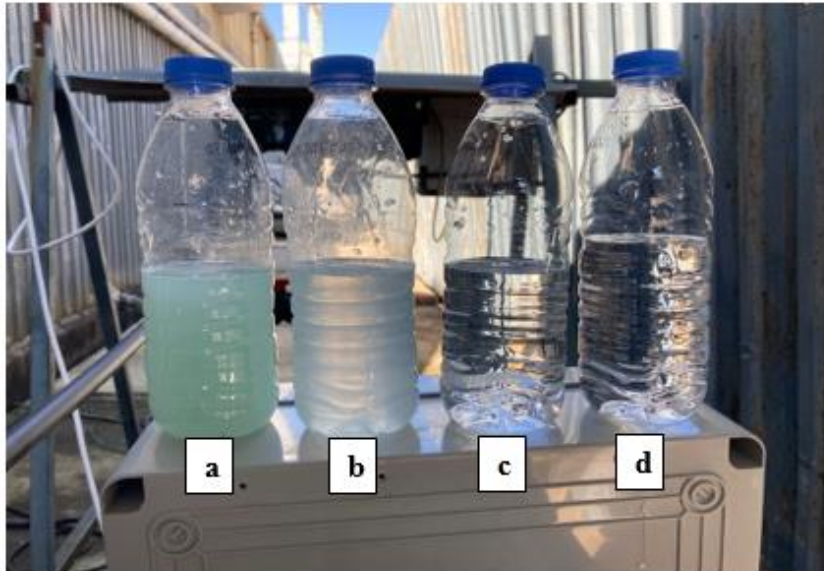


Şekil 3.10. Arıtma sisteminin devreye alınması



Şekil 3.11. EC reaktörü ile gübre ve zirai ilaç endüstrisi atıksuyu arıtım çalışmaları

Sahada kurulan EC reaktörü, maksimum arıtılabilirlik şartlarında işletilmiştir. Ürün suyu için pH, sıcaklık, iletkenlik ve bulanıklık parametreleri sahada portatif multimetre ile takip edilmiştir. Sahadan alınan numunelerin (Şekil 3.12) KOİ, AKM, yağ-gres, toplam fosfor ve toplam azot için elde edilen maksimum giderim verimleri ise laboratuvarında ölçüm kitleri ve spektrofotometre ile analiz edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda reaktörün tam ölçekli olarak üretilmesi durumunda ortaya çıkacak mekanik, elektrik/elektronik, su tesisatı ekipmanları, sarf malzemeler, işçilik vb. maliyet oluşturan unsurlar belirlenmiştir.



Şekil 3.12. Arıtma ünitelerinden alınan numuneler; **a)** Ham atıksu; **b)** EC reaktör çıkışı; **c)** kum filtre çıkışı; **d)** karbon filtre çıkışı

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Kimyevi gübre ve zirai ilaç endüstrisi atıksuları, farklı üretim reçeteleri ve farklı konsantrasyonlarda sentetik kimyasal madde içermekte olup sabit bir karaktere sahip olmayan nitelikte bir atıksu özelliğindedir. Yapılan bu çalışmada, kimyevi gübre ve zirai ilaç endüstrisi atıksularının alüminyum elektrotlar varlığında elektrokoagülasyon prosesiyle arıtılabilirliği çalışılmıştır.

4.1. Ön Test Sonuçları

Ön testler; yumuşatma filtresi atıksuyu, şebeke suyu ve ters osmoz konsantre akımı ile gerçekleştirilmiştir. EC reaktörünün çıkışından alınan numuneler ile giderim verimleri incelenmiştir. Yapılan ön çalışmalar, EC reaktörünün sorunsuz bir şekilde çalıştığını göstermiştir. Elde edilen sonuçlar, sahada çalıştırılan sistemin işletim koşullarının belirlenmesinde yol gösterici olmuştur.

4.1.1. Yumuşatma filtresi atıksuyu

Ön testlerin ilk aşaması; endüstriyel arıtma firmasında bulunan yumuşatma sisteminden, yıkama sırasında doyuma ulaştığı anda alınan tuzlu su numunesi ile gerçekleştirilmiştir. Yumuşatma filtresi belirli sürelerde çalıştırılarak ters yıkama, tuz emiş ve hızlı durulama aşamalarından alınan numuneler için iletkenlik değerleri analiz edilmiştir (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1. Yumuşatma filtresi atıksu değerleri

Yumuşatma Filtresi Adımları	Süre (dk)	Debi (L/dk lpm)	Toplam (L)	Atık Tankı Toplam İletkenlik Değeri ($\mu\text{s/cm}$)			
				1. Analiz	2. Analiz	3. Analiz	4. Analiz
Ters Yıkama	10	8	80	860	860	900	1.000
Tuz Emiş ve Hızlı Durulama	80	4	400	17.100	20.300	53.000	52.000
Hızlı Durulama	10	8	480	16.000	18.700	48.000	45.200
	15	8	520	-	-	44.050	43.000
	20	8	560	-	-	42.300	41.100

1000 litrelik tuz tankında biriktirilen yumuşatma filtresi atıksuyu (yumuşatma ünitesi ters yıkama + rejenerasyon + hızlı-yavaş durulama karışık atık akımı) için arıtılabilirlik çalışmasından önce, fiziksel parametreler için yapılan analiz sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir. Arıtılabilirlik çalışmaları için yumuşatma filtresi atıksuyu, tuz tankından pompa ile EC reaktörüne iletilmiştir. Çalışmaların gerçekleştirildiği pilot ölçekli sistem Şekil 4.1’de sunulmuştur.

Çizelge 4.2. Yumuşatma sistemi yıkama suyu için fiziksel parametreler

Parametreler	Ölçüm Sonuçları
pH	7,03
Sıcaklık (°C)	31,08
İletkenlik (µs/cm)	39.600

**Şekil 4.1. a)** Tuz tankı, EC besleme pompası ve EC reaktörü; **b)** yumuşatma filtresi atıksuyu için EC çalışması

EC reaktörü çalışma koşulları, literatürdeki benzer çalışmalar baz alınarak belirlenmiştir. Akım yoğunluğu 50 Amper ve voltaj 1 V olarak sabitlenmiştir. Çalışmada, alüminyum elektrotlar kullanılmıştır ve plakalar arası mesafe 1 cm'dir. 5, 10 ve 15. dakikalardan sonra iletkenlik ölçümleri yapılarak meydana gelen iletkenlik değişimi takip edilmiştir. Çalışma sonucunda; çok yüksek iletkenlikte, elektrokoagülasyon reaktörü ile giderim gerçekleşmediği fakat iletkenlik arttıkça harcanan gücün azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

4.1.2. Şebeke suyu

Antalya Organize Sanayi Bölgesi şebeke suyu için yapılan çalışmalarda, EC reaktöründe hem alüminyum hem de demir elektrotlar kullanılmıştır. Demir elektrot kullanıldığı durumda çalışma koşulları; akım yoğunluğu $6,7 \text{ A/m}^2$ (3 V), hidrolik alıkonma süresi 10 dk olarak belirlenmiştir. İletkenlik, pH ve sıcaklık ölçümleri anlık olarak takip edilmiştir. Şebeke suyu için başlangıç fiziksel parametreleri, Çizelge 4.3'te verilmiştir. 10 dakika işletim süresi sonrasında pH, sıcaklık ve iletkenlik değişimi Çizelge 4.4'te verilmiştir. Demir elektrot ile düşük iletkenlikteki şebeke suyu için iletkenlik giderimi %6 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.3. Şebeke suyu için fiziksel parametreler (Fe^{+2} elektrot)

Parametreler	Ölçüm Sonuçları
pH	7,14
Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	35,8
İletkenlik ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	883

Çizelge 4.4. Şebeke suyu için çalışma sonuçları (Fe^{+2} elektrot)

Parametreler	T ₀	T ₁₀	İletkenlik Giderim Verimi	Çalışma Koşulları
pH	7,14	6,98	6%	6,7 A/m ² Demir elektrot (Her 5 dakikada bir anot-katot değişimi)
Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	35,8	36,9		
İletkenlik ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	883	834		

Literatürde düşük iletkenliğe sahip su/atıksu arıtımında iletkenlik giderimi için alüminyum elektrotların, demir elektrotlara göre daha verimli olduğunu gösteren çalışmalar mevcuttur. Alüminyum elektrot ile şebeke suyu arıtılabilirlik çalışmaları sırasında iletkenlik giderim verimini artırabilmek için akım yoğunluğu 20 Amper'e, voltaj değeri ise 6 V'a yükseltilmiştir (13,4 A/m²). Hidrolik alıkonma süresi (10 dk) değiştirilmemiştir. Şebeke suyu için başlangıç fiziksel parametreleri Çizelge 4.5'te, 10 dakika işletim süresi sonrasında bu parametrelerdeki değişim ise Çizelge 4.6'da verilmiştir. Düşük iletkenliğe sahip şebeke suyu ile yapılan fizibilite çalışmaları sonucunda %19 iletkenlik giderimi gerçekleştiği sonucuna ulaşılmıştır.

Çizelge 4.5. Şebeke suyu için fiziksel parametreler (alüminyum elektrot)

Parametreler	Ölçüm Sonuçları
pH	6,07
Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	31,08
İletkenlik ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	875

Çizelge 4.6. Şebeke suyu için çalışma sonuçları (alüminyum elektrot)

Parametreler	T ₀	T ₁₀	İletkenlik Giderim Verimi	Çalışma Koşulları
pH	6,07	6,66	19%	13,4 A/m ² Alüminyum elektrot (Her 5 dakikada bir anot-katot değişimi)
Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	31,08	32,3		
İletkenlik ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	875	707		

4.1.3. Ters osmoz (RO) konsatrat akımı

Ham su kaynağı olarak Antalya Organize Sanayi Bölgesi şebeke suyu kullanılmıştır. Polietilen (PE) depoda toplanan ham su beslemesi, pompa ile yapılmıştır. Valfli single yumuşatma sistemi ile Ca^{+2} ve Mg^{+2} iyonlarının katyonik reçineler üzerinde

tutulması ile yumuşak su elde edilmiştir. Yumuşak su, RO sistemine iletilmiştir. Şebeke suyu arıtımı için kullanılan sistemler, Şekil 4.2’de gösterilmiştir. RO membranlarından geçiş yapamayan konsantre akımı, elektrokoagülasyon reaktörüne aktarılmış ve iletkenlik giderimi incelenmiştir (Şekil 4.3). Konsantre akımı analizleri, portatif multimetre ile gerçekleştirilmiş ve pH değeri 7,56, iletkenlik ise 2.476 $\mu\text{s}/\text{cm}$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.2. Valfli yumuşatma filtresi ve RO sistemi



Şekil 4.3. RO konsantre akımının EC reaktörü ile arıtımı

EC reaktöründe alüminyum elektrotlar kullanılmıştır. Reaktör, 6,7 A/m^2 akım yoğunluğunda 10 dakika işletilmiştir. Arıtılabilirlik çalışmaları sonucunda elde edilen iletkenlik ve pH değişimi, Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Ters osmoz konsantre akımı için için çalışma sonuçları

Parametreler	T ₀	T ₁₀	İletkenlik Giderim Verimi	Çalışma Koşulları
pH	7,56	7,58	%22	6,7 A/m^2 Alüminyum elektrot (Her 2 dakikada bir anot-katot değişimi)
İletkenlik ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	2.476	1.940		

4.2.Gübre ve Zirai İlaç Endüstrisi Atıksuyu İçin Çalışma Sonuçları

EC arıtılabilirlik testlerinden elde edilen veriler doğrultusunda, gübre ve zirai ilaç endüstrisi atıksuyu için optimum işletme parametreleri belirlenerek, maksimum giderim hedefli proses iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Tüm çalışma ve faaliyetler (EC reaktör işletimi ve optimizasyonu, çamur yönetimi, ilave arıtma ünitelerinin tesisi vb.) maksimum giderim ve optimum işletme koşullarına ulaşma motivasyonu ile tasarlanmış ve işletilmiştir.

Ön çalışmalardan elde edilen sonuçlar doğrultusunda, EC reaktörü işletme şartları 20 Amper/5 V (11,16 A/m²) olarak belirlenmiştir. pH, sıcaklık, iletkenlik, bulanıklık, KOİ, AKM, yağ-gres, toplam fosfor ve toplam azot parametrelerinin her biri için kum filtre çıkışı, karbon filtre çıkışı ve EC reaktörü çıkışında giderim verimleri hesaplanmış ve kümülatif giderim verimleri değerlendirilmiştir.

Sistem besleme debisi 50 L/saat olarak ayarlanmıştır. İşletme sırasında elektrokoagülasyon reaktöründe oluşan çamurun çökelme eğiliminin olmadığı, yüzen çamur ağırlıklı olduğu ve çamur hacminin yaklaşık 1/5 oranında olduğu gözlemlenmiştir. İşletilen pilot ölçekli sistemde oluşan çamurun yönetimi/bertarafı için ek bir proses uygulanmamıştır. Kum filtre çıkışında basınç, manometreden 5-6 bar olarak okunmuştur. Sistem besleme debisi 50 L/saat olarak ayarlanmıştır. Kum filtre ve karbon filtre için için filtrasyon hızı eşitlik 4.1 ile 1,67 m/saat olarak hesaplanmıştır.

Nominal Debi: 50 L/saat

Kum ve karbon filtre tank boyutları: 8" x 35"

Filtrasyon alanı: 0,03 m²

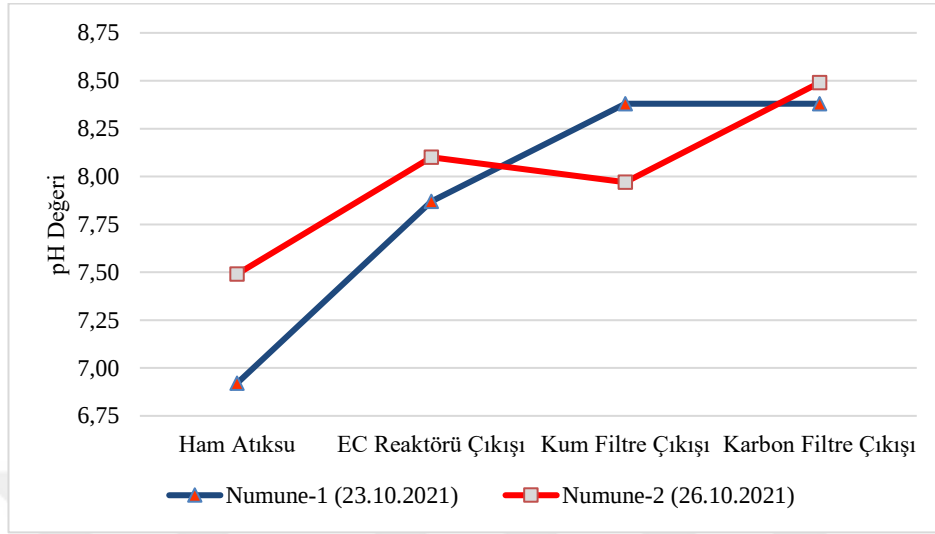
$$\text{Filtrasyon kesit hızı} = \frac{50 \text{ L}}{\text{saat}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{10^3 \text{ L}} \times \frac{1}{0,03 \text{ m}^2} = 1,67 \text{ m/saat} \quad (4.1)$$

4.2.1. Saha ölçüm sonuçları

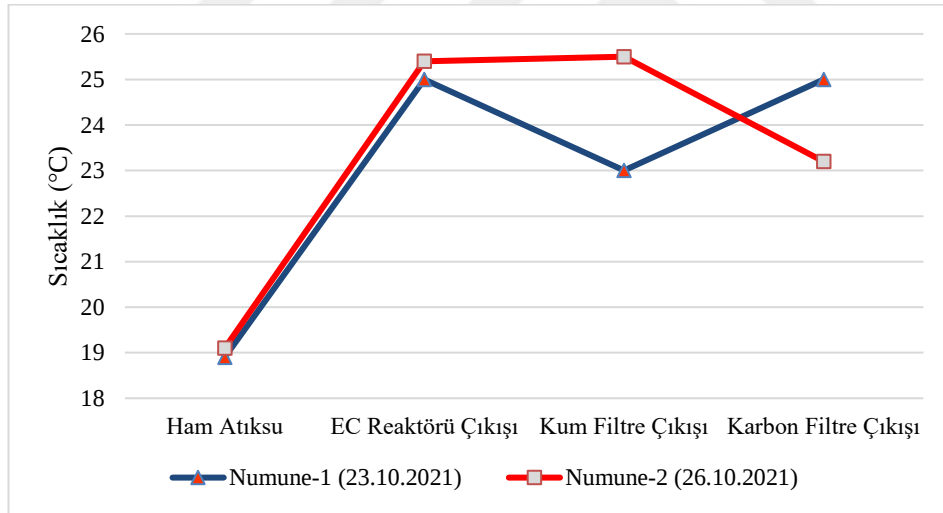
EC reaktörü 20 dakika boyunca, 11,16 A/m² sabit akım yoğunluğunda çalıştırılmıştır. Reaktörde alüminyum elektrotlar kullanılmıştır. Elektrotlar arası mesafe 1 cm'dir. Ham su ve ürün suyu pH, sıcaklık, iletkenlik, bulanıklık parametreleri Hach Lange DR/890 ile analiz edilmiştir. Her bir parametre için elektrokoagülasyon reaktörü, kum filtre ve karbon filtre çıkışından ürün suyu numuneleri alınarak gerçekleşen değişimler analiz edilmiştir.

Ham atıksuya herhangi bir kimyasal ilavesi yapılmamıştır. 3 gün ara ile alınan her iki atıksu numunesi için pH değerleri, farklı üretim reçelerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Çalışma sahasından alınan su numunelerinin pH değişimleri Şekil 4.4'te, sıcaklık değişimleri ise Şekil 4.5'te sunulmuştur. Elektrokoagülasyon prosesinde alüminyum elektrotlar kullanıldığında, anot ve katotta gerçekleşen yükseltgenme ve indirgenme reaksiyonları ile pH dengesi kontrol edilmektedir. Bu reaksiyonlar, alüminyum elektrotların etkisiyle pH değerinin değişimini sağlar. İncelenen her iki numune için elektrokoagülasyon reaktörü çıkışında, anot ve katotta meydana gelen reaksiyonlar sonucunda pH ve sıcaklık değerlerinin yükseldiği gözlemlenmiştir. Atıksu

numunesi-1 için %13,7 pH ve %32,3 sıcaklık, atıksu numunesi-2 için ise %8,1 oranında pH ve %33 oranında sıcaklık artışı gerçekleşmiştir.



Şekil 4.4. Çalışma sahasından alınan su numunelerinin ünite bazlı pH değişimleri

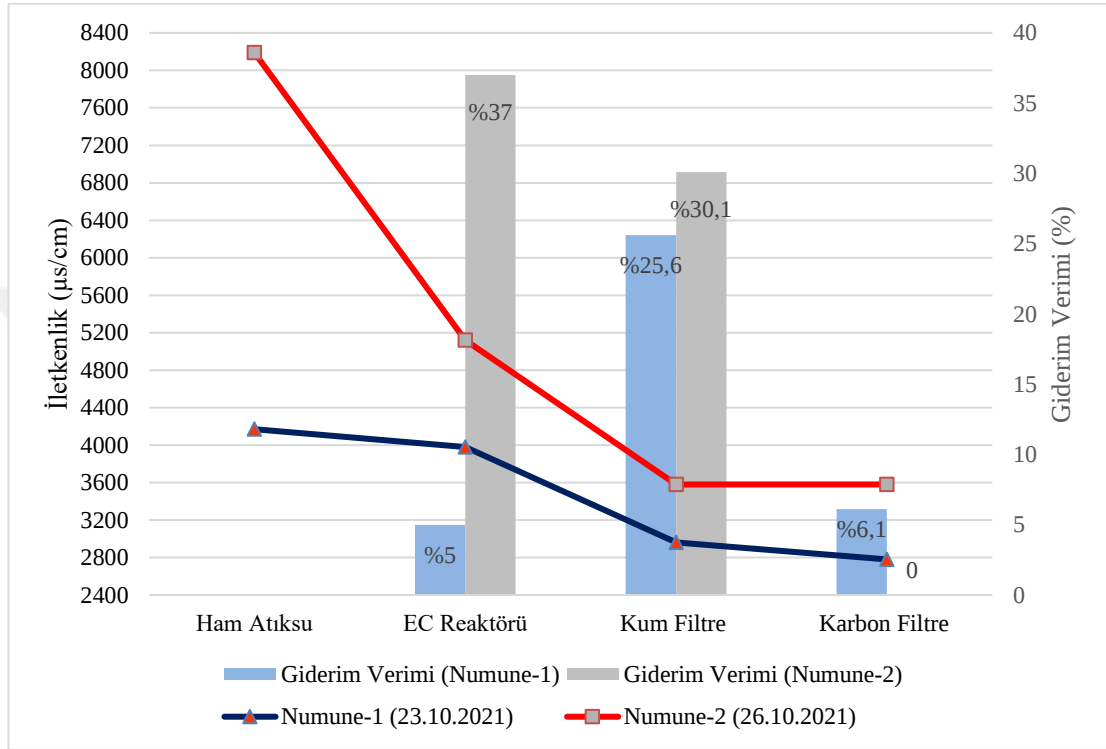


Şekil 4.5. Çalışma sahasından alınan su numunelerinin ünite bazlı sıcaklık değişimleri

4.2.1.1. İletkenlik giderim verimleri

Saha çalışmalarında, her ünitenin çıkışından alınan ürün suyu numuneleri için iletkenlik ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm sonuçları ve giderim verimleri Şekil 4.6'da gösterilmektedir. Giderim verimleri ünite bazlı ve kümülatif olarak değerlendirilmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre farklı günlerde alınan iki numune için, üretim reçetelerine bağlı olarak iletkenlik değerlerinin değişim gösterdiği tespit edilmiştir. Numune-1 için EC reaktörü iletkenlik giderim verimi %5, kum filtre iletkenlik giderim verimi %25,6 ve karbon filtre iletkenlik giderim verimi %6,1 olarak hesaplanmıştır. Numune-2 için ise EC reaktöründe %37 iletkenlik giderimi ve kum filtrede %30,1 iletkenlik giderimi

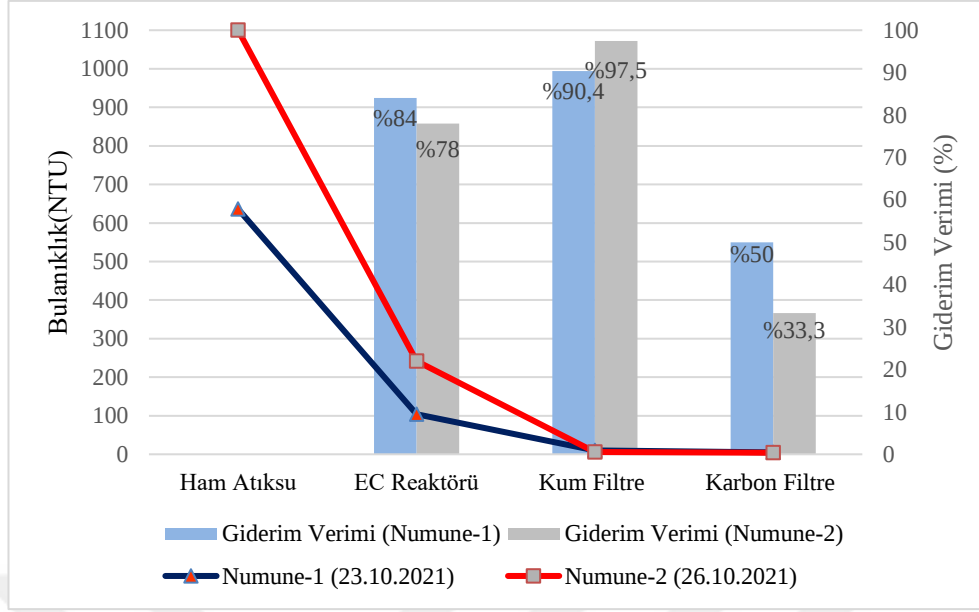
gerçekleşmiştir. Karbon filtrede iletkenlik giderimi gerçekleşmediği tespit edilmiştir. Buna göre, aynı koşullar altında işletilen EC reaktöründe başlangıç iletkenlik değerinin giderim verimini etkilediği belirlenmiştir. Yüksek iletkenliğe sahip atıksularda, EC reaktörü performansı daha yüksektir. Coconut bazlı aktif karbon minerali ile yüksek verimlerde iletkenlik giderimi gerçekleşmemektedir. Çalışma sonuçlarına göre işletilen sistemde kümülatif olarak, Numune-1 için %33,3 ve Numune-2 için %56,3 iletkenlik giderimi meydana gelmiştir.



Şekil 4.6. Ünite bazlı iletkenlik ölçüm sonuçları ve giderim verimleri

4.2.1.2. Bulanıklık giderim verimleri

Araştırma sahasından alınan su numunelerinin bulanıklık ölçüm sonuçları ve giderim verimleri Şekil 4.7.'de verilmiştir. Ham atıksu için alınan numunelerin iletkenlik parametresinde olduğu gibi bulanıklık değerleri de değişim göstermektedir. Numune-1 için ham atıksu bulanıklığı 636 NTU, Numune-2 için ise 1.100 NTU'dur. EC reaktöründe Numune-1 için %84 ve Numune-2 için %78 oranında bulanıklık giderimi gerçekleşmiştir. Antrasit ve 3-5 mm quartz kum içeren filtrasyon sisteminin bulanıklık giderimi için performansının oldukça yüksek olduğu tespit edilmiştir. Kum filtrede ham su iletkenlik değeri daha yüksek olan (8.190 µs/cm) Numune-2 için %97,5 bulanıklık giderimi gerçekleşmiştir. Kum filtre çıkışında bulanıklık, Numune-1 için 10 NTU ve Numune-2 için 6 NTU'ya kadar düşmüştür. Karbon filtrede ise %50 ve %33,3 bulanıklık giderimi meydana geldiği görülmüştür. EC reaktörü, kum filtre ve karbon filtreden oluşan sistemde kümülatif olarak %100'e yakın bulanıklık giderimi gerçekleşmiştir (Numune-1 için %99,2 ve Numune-2 için %99,6).



Şekil 4.7. Ünite bazlı bulanıklık ölçüm sonuçları ve giderim verimleri

4.2.2. Laboratuvar ölçüm sonuçları

İşletilen sistemin ünite bazlı olarak KOİ, AKM, yağ-gres, toplam azot ve toplam fosfor parametreleri üzerine etkisi Çevre ve Şehircilik Bakanlığı onaylı bir laboratuvar da detaylı olarak analiz edilmiştir. Detaylı ölçüm sonuçları, ölçüm yöntemleri, ölçüm belirsizliği ve Antalya Organize Sanayi Bölgesi Atıksu Bağlantısı ve Tarife Yönetmeliği limit değerleri Çizelge 4.8’de sunulmuştur. Ham atıksu ve her bir ünitenin çıkışından alınan numunelerde yapılan analiz sonuçları Çizelge 4.9’da özetlenmiştir. Kimyevi gübre ve zirai ilaç üretimi atıksuyu yüksek miktarda KOİ, yağ-gres ve azot içermektedir. Çalışmada, ham atıksu karakteristiğine göre konvasiyonel yöntemlerle arıtımı oldukça zor olan atıksuyun EC reaktörü ile giderim verimleri incelenmiştir.

Çizelge 4.8. Ham atıksu ve ünite bazlı ürün suyu için detaylı analiz sonuçları

Analizler	Yöntem	Limit Değeri	Ölçüm Belirsizliği	Sonuç
Ham atıksu analiz sonuçları				
pH	SM 4500 H+B:2017	6,5-10	± %0,5	7,38
Toplam Fosfor (mg/L)	SM 4500-P B,E:2017	-	± %8,3	15,34
AKM (mg/L)	SM 2540 D:2017	500	± %6,1	1.173
Yağ-Gres (mg/L)	SM 5520 B D:2017	250	± %6,2	336
KOİ (mg/L)	SM 5220 C:2017	4000	± %7,5	39.603
Toplam Azot (mg/L)	SM 4500-N C:2017	-	-	1.381,6

(Devamı Arkada)

Çizelge 4.8.'in devamı

EC reaktörü çıkışı analiz sonuçları				
pH	SM 4500 H + B:2017	6,5-10	± %0,5	8,17
Toplam Fosfor (mg/L)	SM 4500-P B, E:2017	-	± %8,3	4,51
AKM (mg/L)	SM 2540 D:2017	500	± %6,1	874
Yağ-Gres (mg/L)	SM 5520 B D:2017	250	± %6,2	106,5
KOİ (mg/L)	SM 5220 C:2017	4000	± %7,5	5.591
Toplam Azot (mg/L)	SM 4500-N C:2017	-	-	2.185
Kum filtre çıkışı analiz sonuçları				
pH	SM 4500 H + B:2017	6,5-10	± %0,5	8,03
Toplam Fosfor (mg/L)	SM 4500-P B,E:2017	-	± %8,3	0,49
AKM (mg/L)	SM 2540 D:2017	500	± %6,1	6
Yağ-Gres (mg/L)	SM 5520 B D:2017	250	± %6,2	54,4
KOİ (mg/L)	SM 5220 C:2017	4000	± %7,5	2.737
Toplam Azot (mg/L)	SM 4500-N C:2017	-	-	39,42
Karbon filtre çıkışı analiz sonuçları				
pH	SM 4500 H + B:2017	6,5-10	± %0,5	8,47
Toplam Fosfor (mg/L)	SM 4500-P B,E:2017	-	± %8,3	0,26
AKM (mg/L)	SM 2540 D:2017	500	± %6,1	6
Yağ-Gres (mg/L)	SM 5520 B D:2017	250	± %6,2	13,9
KOİ (mg/L)	SM 5220 C:2017	4000	± %7,5	92
KOİ (mg/L)	SM 4500-N C:2017	-	-	33,73

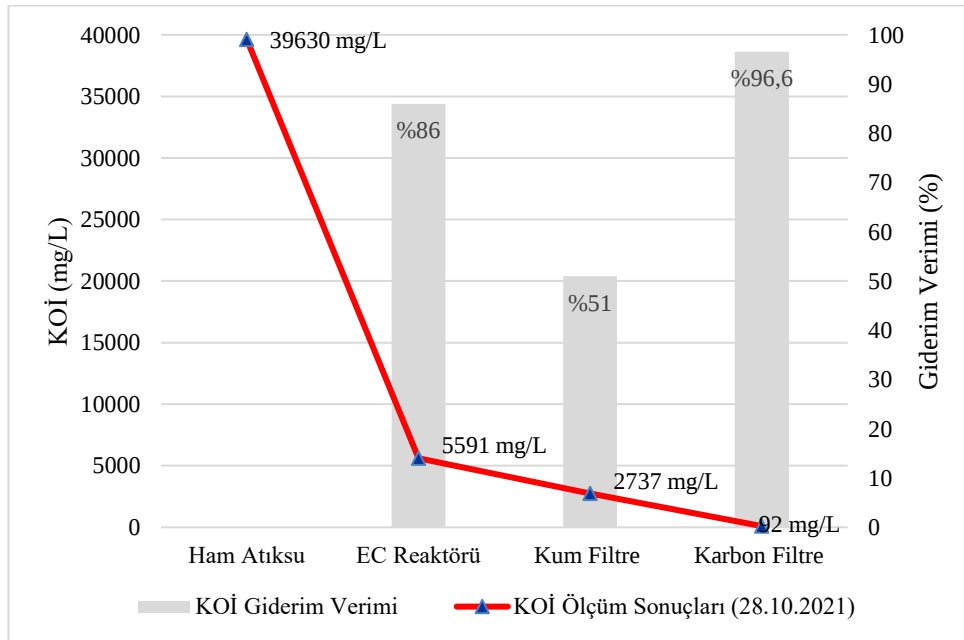
*Sınır değerler, Antalya Organize Sanayi Bölgesi Atıksu Bağlantısı ve Tarife Yönetmeliği Tablo 5.2'ye göre verilmiştir.

Çizelge 4.9. Ham atıksu ve ünite bazlı detaylı analiz sonuçlarının özeti

Parametreler	Ham Atıksu	EC Çıkışı	Kum Filtre Çıkışı	Karbon Filtre Çıkışı
pH	7,38	8,17	8,03	8,47
KOİ (mg/L)	39.603	5.591	2.737	92
AKM (mg/L)	1.173	847	6	6
Yağ-gres (mg/L)	336	106,5	54,4	13,9
Toplam Fosfor (mg/L)	15,34	4,51	0,49	0,26
Toplam Azot (mg/L)	1.381,6	2.185	39,42	33,73

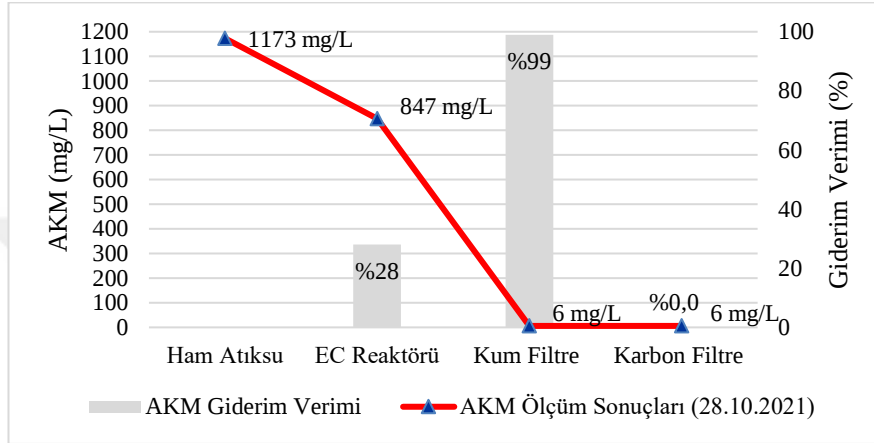
4.2.2.1. Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) giderim verimleri

KOİ analizleri, ölçüm kitleri aracılığı ile laboratuvar ortamında, Hach Lange DR3900 spektrofotometre ile gerçekleştirilmiştir. Ham atıksu pH değeri 7,38'dir. Sisteme kimyasal ilavesi yapılmamıştır. Ham atıksu KOİ değeri 39.630 mg/L, EC reaktörü çıkışında 5.591 mg/L, kum filtre çıkışında 2.737 mg/L ve karbon filtre çıkışında ise 92 mg/L olarak analiz edilmiştir (Şekil 4.8). EC reaktöründe %86 KOİ giderimi gerçekleşmiştir. Buna göre elektrokoagülasyon prosesinin KOİ giderimi için etkin bir şekilde kullanılabileceği tespit edilmiştir. Kum filtre ile %51, karbon filtre ile ise %96,6 oranında KOİ giderimi gerçekleşmiştir. Coconut bazlı aktif karbon mineralleri ile filtrasyonun KOİ gideriminde etkin bir yöntem olduğu tespit edilmiştir. Kimya endüstrisi atıksuyu için EC reaktörüne ek olarak filtrasyon sistemleri kullanılarak %99,8 KOİ giderim verimine ulaşılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

**Şekil 4.8.** Ünite bazlı KOİ ölçüm sonuçları ve giderim verimleri

4.2.2.2. Askıda katı madde (AKM) giderim verimleri

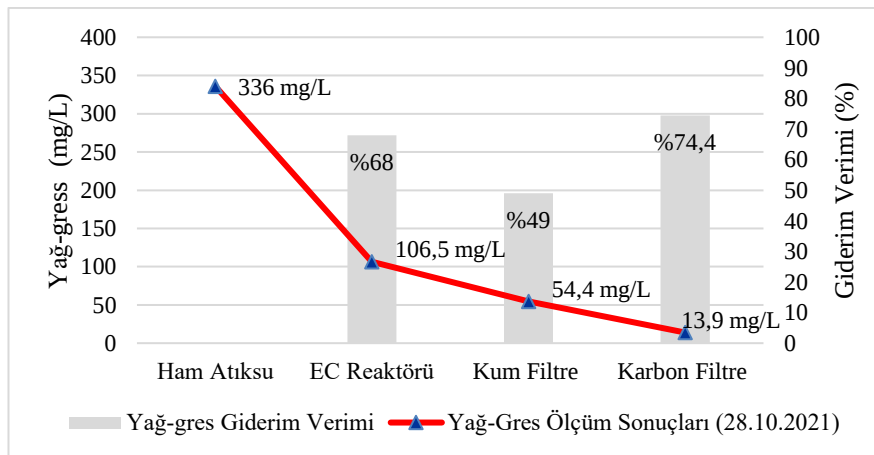
Çalışılan kimya endüstrisi ham atıksuyu için askıda katı madde konsantrasyonu 1.173 mg/L olarak analiz edilmiştir. Her bir ünite için AKM ölçüm sonuçlarına ve giderim verimlerine Şekil 4.9'da yer verilmiştir. Alüminyum elektrotlar ile 20 Amper, 5 V'ta ($11,16 \text{ A/m}^2$) 20 dakika boyunca çalıştırılan EC reaktöründe pH 7,38'de, %28 AKM giderimi gerçekleştirmiştir. Kum filtrede %99 giderim meydana gelmiş ve AKM değeri 6 mg/L'ye kadar düşmüştür. Karbon filtrede AKM giderimi gerçekleşmemiştir. Sistemin AKM giderimi üzerindeki kümülatif verimi %99 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.9. Ünite bazlı AKM ölçüm sonuçları ve giderim verimleri

4.2.2.3. Yağ-gres giderim verimleri

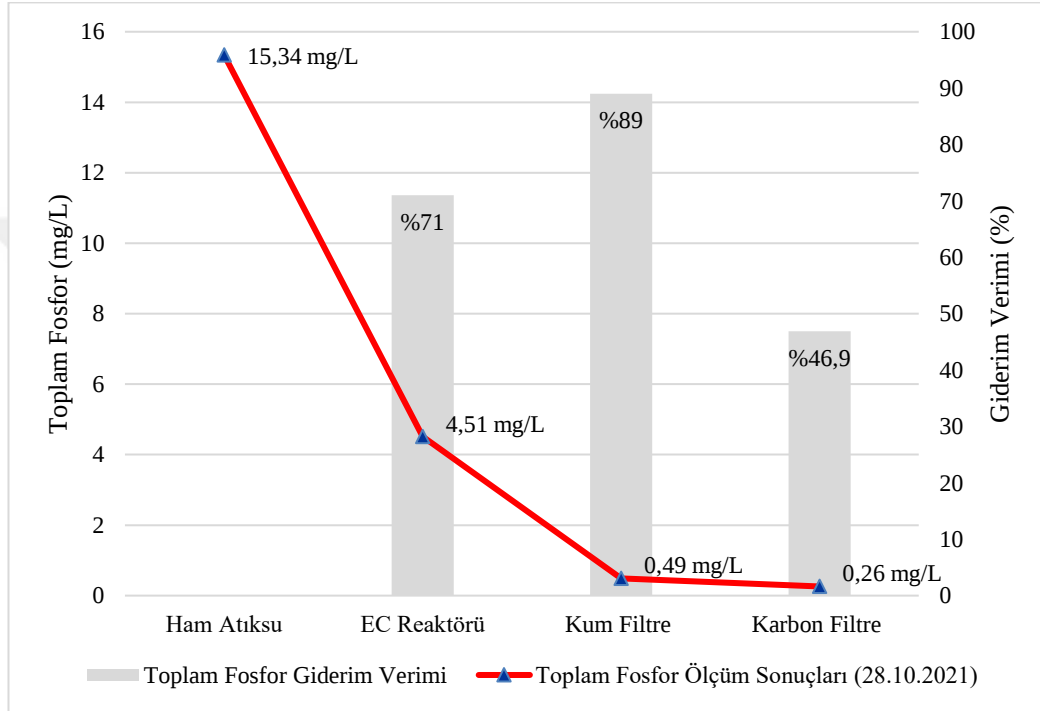
$11,16 \text{ A/m}^2$ akım yoğunluğunda 20 dakika işletim sonrasında, EC reaktöründe %68 yağ-gres giderimi gerçekleşmiştir. Başlangıçta 336 mg/L olan yağ-gres konsantrasyonu EC reaktörü çıkışında 106,5 mg/L, kum filtre çıkışında 54,4 mg/L ve karbon filtre çıkışında 13,9 mg/L olarak analiz edilmiştir. Kum filtre ile %49 giderim gerçekleşirken karbon filtre ile %74,4 yağ-gres giderimi meydana gelmiştir. Sahada çalıştırılan sistem kümülatif olarak değerlendirildiğinde, %96 oranında yağ-gres giderimi gerçekleştiği tespit edilmiştir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Ünite bazlı yağ-gres ölçüm sonuçları ve giderim verimleri

4.2.2.4. Toplam fosfor giderim verimleri

Ham atıksu için toplam fosfor konsantrasyonu 15,34 mg/L olarak analiz edilmiştir. Toplam fosfor ölçüm sonuçları ve giderim verimleri Şekil 4.11’de sunulmuştur. 20 dakika sonrasında EC reaktöründe %71 fosfor giderimi gerçekleşmiştir. En yüksek fosfor gideriminin kum filtrede gerçekleştiği tespit edilmiştir (%89). Karbon filtrede ise %46,9 oranında giderim gerçekleşmiş ve ürün suyu fosfor konsantrasyonu 0,26 mg/L olarak analiz edilmiştir. Elektrokoagülasyon reaktörünün ön arıtma sistemi olan kullanıldığı sistemde, %98 oranında toplam fosfor giderimi gerçekleşmiştir.



Şekil 4.11. Ünite bazlı toplam fosfor ölçüm sonuçları ve giderim verimleri

4.2.2.5. Toplam azot giderim verimleri

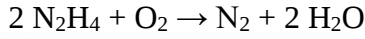
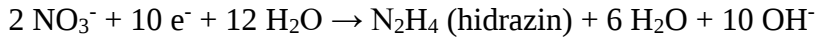
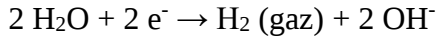
Ham atıksu toplam azot konsantrasyonu 1.381,6 mg/L olarak analiz edilmiştir. Toplam azot konsantrasyonundaki değişimler ve giderim verimleri Şekil 4.12’de verilmiştir. 20 Amper/5 Voltta işletilen EC reaktörünün toplam azot konsantrasyonunu artırdığı görülmektedir. Yan reaksiyonlar, azot bileşiklerinin farklı formlarına dönüşümü ve işlem parametrelerinin yanlış ayarlanması gibi faktörler azot konsantrasyonundaki artışı açıklayabilir (Liu vd. 2013; Hlihor vd. 2016). Elektrokoagülasyon işleminin, azot giderimi için yeterli süre boyunca uygulanmaması, arıtma veriminin azalmasına neden olabilir. Reaktörde yeterli süre sağlanmadığında, azot bileşiklerinin tam olarak ayrışmamasına bağlı olarak azot miktarında artış meydana gelebilir. Ek olarak, pH değerinin yanlış ayarlanması veya değişkenliği, azotun farklı formlarının reaktörden uygun şekilde uzaklaştırılamamasına ve sonuç olarak azot konsantrasyonunun artmasına neden olabilir (Olvera-Vargas vd. 2016; Huang 2008; Zhang vd. 2017).

Elektrokoagülasyon reaktöründe toplam azot artışına neden olabilecek örnek yan reaksiyonlar:

Azot indirgenmesi:

Atıksu içerisinde bulunan nitrat (NO_3^-) iyonları, EC reaktöründeki katot (negatif elektrot) yüzeyinde azotlu bileşiklere dönüşebilir. Bu reaksiyon aşağıdaki şekilde temsil edilebilir:

Katot (negatif elektrot):

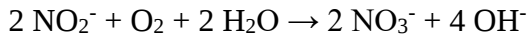
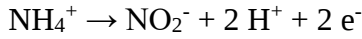


Bu reaksiyon sonucunda azotlu bileşikler olan hidrazin (N_2H_4) ve/veya azot gazı (N_2) oluşabilir.

Azot amonyum oksidasyonu:

Elektrokoagülasyon reaktöründeki anot (pozitif elektrot) yüzeyinde amonyum iyonları (NH_4^+), nitrit (NO_2^-) ve/veya nitrat (NO_3^-) iyonlarına oksitlenebilir. Bu reaksiyon aşağıdaki şekilde temsil edilebilir:

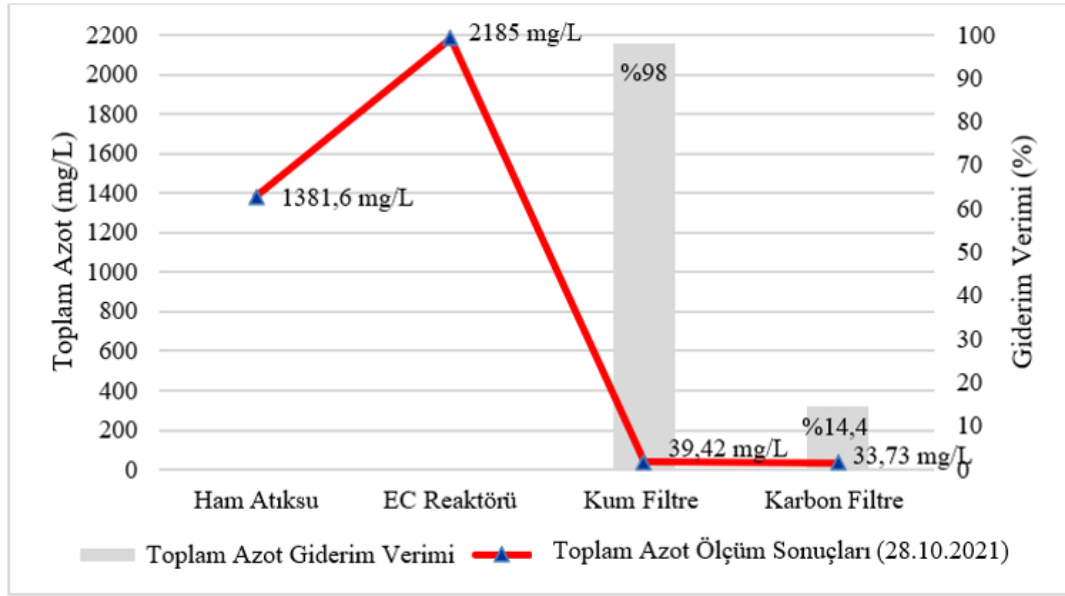
Anot (pozitif elektrot):



Bu reaksiyon sonucunda amonyum iyonları (NH_4^+), nitrit (NO_2^-) ve/veya nitrat (NO_3^-) iyonlarına oksitlenebilir. Verilen reaksiyon denklemleri, EC reaktörlerinde meydana gelebilecek yan reaksiyonları temsil etmektedir. Ancak, belirli bir uygulama için reaksiyonlar; reaktörün işletme koşullarına, elektrot malzemesine ve su kaynağındaki kirlilik seviyesine bağlı olarak değişiklik gösterebilir (Liu vd. 2013; Hlihor vd. 2016).

Kum filtre ile %98 oranında toplam azot giderimi gerçekleşirken karbon filtrede %14,4 toplam azot giderimi gerçekleşmiştir. Sahada çalıştırılan sistemin toplam azot giderim verimi %98 olarak hesaplanmıştır.

Filtrasyon sistemlerinin toplam azot giderimine katkı sağladığı belirlenmiştir. Kum filtre içerisinde bulunan gözenekli filtre medyası, suyun geçişine izin verirken kirlleticilerin süzülerek medya üzerinde tutulmasını sağlar. Kum filtre ile azot gideriminde amonyum ve bazı nitratların tutulması etkili olabilir. Karbon filtredeki azot giderimi ise özellikle organik azot bileşiklerinin ve nitratların aktif karbon ile adsorpsiyonu ile açıklanabilir.

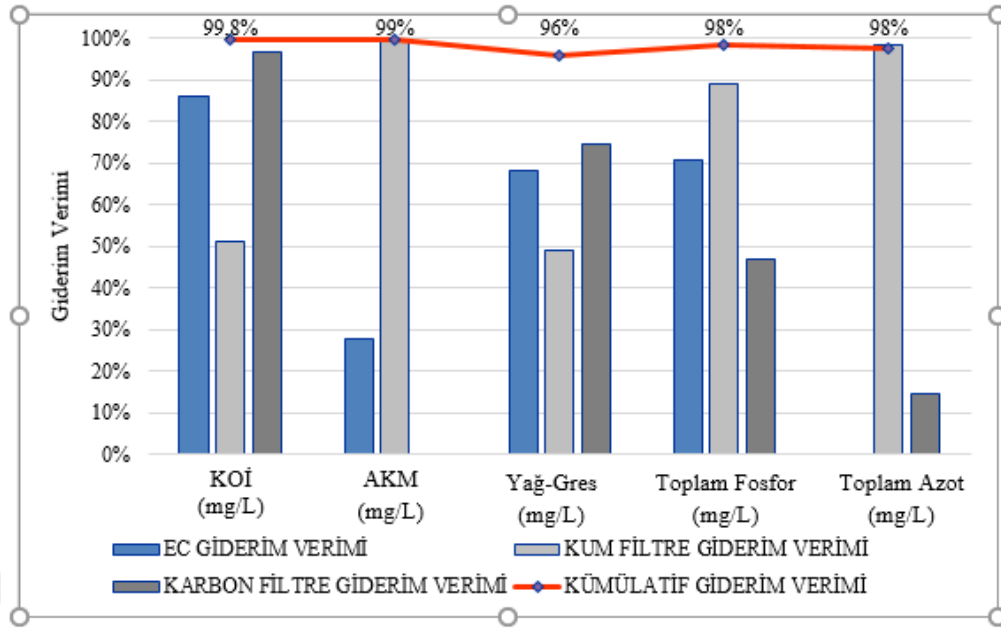


Şekil 4.12. Ünite bazlı toplam azot ölçüm sonuçları ve giderim verimleri

4.2.2.6. Kümülatif giderim verimleri

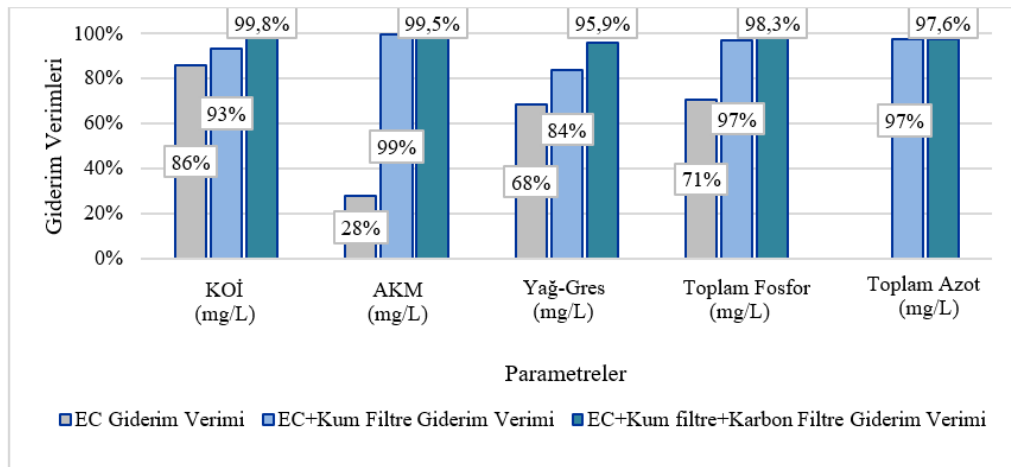
KOİ, AKM, yağ-gres, toplam azot ve toplam fosfor giderimleri için EC reaktörü, kum filtre ve karbon filtre için ünite bazlı ve kümülatif giderim verimleri Şekil 4.13'te özetlenmiştir. Giderim verimleri ünite bazlı olarak incelendiğinde, KOİ ve yağ-gres için en yüksek giderim karbon filtrede gerçekleşmiştir. AKM, toplam azot ve toplam fosfor giderim verimi en yüksek olan ünitenin ise kum filtre olduğu belirlenmiştir. Karbon filtre çıkışında AKM konsantrasyonunda herhangi bir değişim meydana gelmemiştir. Reaktörün işletim koşullarının ve parametrelerinin yanlış ayarlanması veya yan reaksiyonlar gibi faktörlerden dolayı EC reaktöründe toplam azot giderimi gerçekleşmemiştir.

Atıksuda 39.603 mg/L seviyelerinde olan KOİ, EC reaktörü çıkışında %86 giderim verimi ile 5.591 mg/L seviyelerine düşmüştür. Kum filtrede %51 ve karbon filtrede %96,6 KOİ giderimi gerçekleşmiştir. AKM giderimi için pH 7,38'de alüminyum elektrotlar kullanılan EC reaktöründe giderim verimi %28 olarak hesaplanmıştır. AKM giderim veriminin kum filtre ve karbon filtre kullanımı ile %99,5'e kadar yükseldiği gözlemlenmiştir. EC reaktöründe 20 dakika sonrasında %68 yağ-gres giderimi gerçekleşmiştir. Kum filtrede %49, karbon filtrede ise %74,4 yağ-gres giderim verimi elde edilmiştir. Toplam fosfor için yapılan çalışmalar sonucunda EC reaktöründe %71, kum filtrede %89 ve karbon filtrede ise %46,9 oranında toplam fosfor giderimi meydana gelmiştir.



Şekil 4.13. KOİ, AKM, yağ-gres, toplam azot ve toplam fosfor için ünite bazlı ve kümülatif giderim verimleri

Şekil 4.14'te KOİ, AKM, yağ-gres, toplam azot ve toplam fosfor için EC reaktörünün ve EC reaktörüne ek olarak kum ve karbon filtrelerin kullanılması durumunda elde edilen kümülatif giderimler sunulmuştur. KOİ parametresi için kümülatif olarak giderim verimleri incelendiğinde; KOİ'nin neredeyse tamamı sistemden uzaklaştırılmış ve sistemin giderim verimi %99,8 olarak belirlenmiştir. Sistemde %96 yağ-gres giderimi gerçekleşmiş ve ham atıksuda 336 mg/L olarak ölçülen yağ-gres konsantrasyonu, ürün suyunda 13,9 mg/L seviyelerine kadar düşmüştür. Sistemin toplam fosfor için giderim verimi %98 olarak hesaplanmıştır. EC reaktöründe, 11,16 A/m² akım yoğunluğunda, pH 7,38'de toplam azot giderimi gerçekleşmemiştir. Fakat sahada işletilen sistemin, kum filtre ve karbon filtre kullanımı ile %98 oranında toplam azot giderim verimine ulaştığı belirlenmiştir.



Şekil 4.14. EC reaktörü, EC + kum filtre ve EC + kum filtre + karbon filtre için kümülatif giderim verimleri

Sistemin kümülatif giderim verimleri incelendiğinde; KOİ, AKM, yağ gres, toplam fosfor ve toplam azot giderim verimlerinin her birinin %100'e yakın olduğu tespit edilmiştir. Sistemde %99,8 KOİ giderimi, %99 AKM giderimi, %96 yağ-gres giderimi, %98 toplam fosfor giderimi ve %98 toplam azot giderimi gerçekleşmiştir. Üretim proseslerine bağlı olarak sürekli değişim gösteren; yüksek KOİ, AKM ve yağ-gres içeriğine sahip kimya endüstrisi atıksuyu arıtımı için pH0=7,38'de, 11,16 A/m² akım yoğunluğunda, 20 dakika işletilen EC reaktörü ve filtrasyon sistemlerinin ekonomik ve uygulanabilir bir yöntem olarak kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

4.3. İşletme ve İlk Yatırım Maliyeti

Hazır olarak temin edilen, kurulan ve işletilen EC reaktörünün maksimum arıtılabilirlik şartlarındaki işletme maliyetleri, tüketim kalemleri bazında hesaplanmıştır. Çalışmaların gerçekleştirildiği kimyevi gübre ve zirai ilaç üretimi gerçekleştirilen firma için reaktörün tam ölçekli olarak üretilmesi durumunda işletme maliyeti (enerji ve sarf malzeme işletme maliyeti) hesaplanmıştır. Firmada üretim faaliyetleri sonucunda oluşan atıksu miktarları baz alınarak, kapasite 6 m³/gün (250 L/saat) olarak belirlenmiştir. İşletme maliyetinin belirlenebilmesi için öncelikli olarak çalışma yapılan endüstri için projelendirme yapılmıştır. Kimya-gübre endüstrisi atıksuyu arıtma sistemi dizaynı için kabul edilen ham su analizi Çizelge 4.10'da verilmiştir.

Çizelge 4.10. Kimya-gübre endüstrisi atıksuyu arıtma sistemi dizaynı için kabul edilen ham su analizi

Parametre	Birim	Ham Atıksu
Fiziksel Parametreler		
Renk	Pt-Co	Berrak
Koku		Yok
Bulanıklık	NTU	< 1.100
Sıcaklık	°C	19
Fizikokimyasal Parametreler		
AKM	mg/L	< 1.173
İletkenlik	$\mu\text{S}/\text{cm}$	< 8.200
KOİ	mg/L	< 39.600
Yağ-Gres	mg/L	<336
Toplam Azot	mg/L	<15,5
Toplam Fosfor	mg/L	<1.385
pH	-	7 $\pm$ 0,2
Bakteriyolojik Parametreler		
Total Koliform	ctu/mL	Yok
E. Koli	ctu/mL	Yok

Projelendirilen arıtma sisteminde kullanılacak olan arıtma üniteleri ve özellikleri Çizelge 4.11'de verilmiştir. Elektrokoagülasyon sistemi, kum-karbon filtre besleme

pompası, kum-karbon filtre ters yıkama pompası, kum filtre, aktif karbon filtre üretimi, sistemin kurulumu, cihazlar arası borulama ve montaj-devreye alma işçilik maliyetleri dahil arıtma sisteminin toplam ilk yatırım maaliyeti 11.115 Euro olarak hesaplanmıştır. Sistemde kullanılacak olan ürün suyu deposu firma bünyesinde mevcut olduğu için fiyatlandırmaya dahil edilmemiştir. Fiyatlar, gerçek ölçekte projelendirilecek olan sistemler için fikir oluşturulması adına farklı firmalardan alınan teklifler sonucunda, minimum maliyet oluşturacak şekilde hesaplanmıştır. İlk yatırım maliyeti, sistemde kullanılacak olan ekipmanların marka/modellerine göre fiyatlar değişiklik gösterecektir.

Çizelge 4.11. Projelendirilen sisteminde kullanılacak olan arıtma üniteleri ve özellikleri

Elektrokoagülasyon Reaktörü	
Reaktör Adedi	1 Adet
Reaktör Boyutları	780 x 300 x 350 mm
Elektrot Türü	Alüminyum Elektrot
Borulama Malzemesi	PVC
Kontrol Panosu	Dahil
Sistem Besleme Pompası	
Pompa Tipi	Dalgıç Tip
Pompa Adedi	2 Adet (1 Servis + 1 Raf Yedek)
Çamur Pompası	
Pompa Adedi	1 Adet (Depolardan ortak emiş yapılacaktır)
Ham su Transfer Deposu	
Adet	1 Adet
Kapasite	1 m ³
Depo Yüksekliği	H: 184 cm
Tip	Silo Tip
Malzeme	Polietilen
EC Ürün Suyu Deposu	
Adet	1 Adet
Kapasite	1 m ³
Depo Yüksekliği	H: 130 cm
Tip	Silo Tip
Malzeme	Polietilen
Merdiven-Platform	
Malzeme	Dahil
Malzeme	ST-37.2 Epoksi Boyalı Karbon Çelik
Kum-Karbon Filtre Besleme Pompası	
Miktar	1 Adet
Kapasite	1 m ³ /saat @ ~2,5-3 bar
Borulama	PVC-U

(Devamı Arkada)

Çizelge 4.11.'in devamı

Kum-Karbon Filtre Ters Yıkama Pompası	
Miktar	1 Adet
Kapasite	1,5 m ³ /saat @ ~2,5-3 bar
Borulama	PVC-U
Kum Filtre Ünitesi	
Miktar	1 Adet
Nominal Debi	0,25 m ³ /saat
Filtrasyon Alanı	0,05 m ²
Filtrasyon Kesit Hızı	5 m/saat
Kontrol Mekanizması	Filtre Valf
Tank Boyutları	10"x 54"
Tank Malzemesi	FRP
Mineral Miktarı	15 lt Antrasit + 38 kg Quartz
Giriş-Çıkış Bağlantı Çapı	3/4"
Ters Yıkama Debisi	1,5 m ³ /saat
Test Basıncı	9 bar
Çalışma Basıncı	2-6 bar
Aktif Karbon Filtre Ünitesi	
Miktar	1 Adet
Nominal Debi	0,25 m ³ /saat
Filtrasyon Alanı	0,05 m ²
Filtrasyon Kesit Hızı	5 m/saat
Kontrol Mekanizması	Filtre Valf
Tank Boyutları	10"x 54"
Tank Malzemesi	FRP
Mineral Miktarı	25 kg Granüler Aktif Karbon (Coconut bazlı)
Giriş-Çıkış Bağlantı Çapı	3/4"
Ters Yıkama Debisi	1,5 m ³ /saat
Test Basıncı	9 bar
Çalışma Basıncı	2-6 bar
Ürün Suyu Deposu	
Miktar	1 Adet
Malzeme	Polietilen

Tasarlanan sistemde mekanik, elektrik/elektronik, sarf malzemeler vb. maliyet oluşturan unsurlar belirlenmiştir. Seçilen endüstride tasarlanan sisteme ait tüm süreçleri içine alacak şekilde artırılan/geri kazanılan su hacmi bazında işletme (Euro/m³) ve enerji (kW/m³) birim maliyetleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.12). Saha ve laboratuvar ölçüm sonuçları dikkate alınarak sisteme kimyasal ilavesi yapılmaması planlanmıştır. Enerji tüketim kalemleri EC reaktörü besleme pompası, çamur pompası, filtrasyon besleme pompası ve EC reaktörü kontrol panosunda yer alan akım regülatörü olarak belirlenmiştir.

Pompalar, yedeksiz olarak planlanmış ve yedek pompa kullanılması durumunda eş yaşlandırılmalı olarak çalıştırılmayacağı, raf yedek olarak kullanılacağı kabul edilmiştir. Maksimum işletme verimlerini hesaplayabilmek için sistemin sürekli olarak çalışacağı öngörülmüştür. Antalya Organize Sanayi Bölgesi elektrik birim maliyeti 0,1 Euro olarak alınmıştır. EC reaktörü besleme pompası motor gücü 0,26 kW/h, çamur pompası motor gücü 0,75 kW/h, filtrasyon besleme pompası 0,55 kW/h ve akım regülatörü 3,6 kW/h'tir. Buna göre sürekli olarak çalıştırılan sistemin enerji tüketimi 123,8 kWh/gün ve enerji işletme maliyeti 12,38 Euro/gün olarak hesaplanmıştır.

Coconut bazlı aktif karbon mineralinin yılda bir kez değiştirileceği ve kum filtrede kullanılan antrasit ve 3-5 mm quartz kumun ise değişim periyodunun 3 yılda bir olacağı kabul edilmiştir. EC reaktöründe kullanılan alüminyum elektrotlar yılda 6 kez (2 ayda bir) değiştirilecektir. Buna göre, sarf malzemeler için yıllık işletme maliyeti 10.700 Euro olarak hesaplanmıştır. Sarf malzemeler için birim fiyatlar 28.10.2021 tarihinde alınmıştır. Sistemde kullanılacak sarf malzeme birim fiyatları güncel olarak ve kullanılan markalara göre değişim gösterebilir. Sistemin toplam sarf malzeme işletme maliyeti 29,31 Euro/gün olarak hesaplanmıştır. Enerji ve sarf malzemeler için toplam işletme maliyeti 41,70 Euro/gün'dür. 1 m³ su için işletme maliyeti 6,95 Euro/m³gün olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.12. Kimyevi gübre ve zirai ilaç üretimi atıksuyu işletme maliyeti

ENDÜSTRİ: Kimya Endüstrisi						
Atıksu Kaynağı: Kimyevi gübre ve zirai ilaç üretimi atıksuyu						
Kapasite: 6 m ³ /gün (250 L/saat)						
ENERJİ TÜKETİMİ						
Malzeme	Motor Gücü	Miktar	Çalışma Saati	Tüketim (kWh/gün)	Elk. Birim Fiyatı	Günlük Tutar
EC Besleme Pompası	0,26 kW/h	1 adet	24	6,2	0,10 €	0,62 €
Çamur Pompası	0,75 kW/h	1 adet	24	18,0	0,10 €	1,80 €
Filtrasyon Besleme Pompası	0,55 kW/h	1 adet	24	13,2	0,10 €	1,32 €
Akım Regülatörü	3,6 kW/h	1 adet	24	86,4	0,10 €	8,64 €
Enerji İşletme Maliyetleri Toplamı						12,38 Euro
SARF MALZEME TÜKETİMİ						
Malzeme	Marka / Model	Minimum Çalışma Süresi	Miktar	Birim Fiyat	Yıllık Tüketim Miktarı	Günlük Tutar
Aktif Karbon-Coconut Bazlı	Aqualine	1 yıl	25 kg	3,03 €	76 €	0,21 €
Kum Filtre-Antrasit	Aqualine	3 yıl	15 kg	0,50 €	3 €	0,007 €
Kum Filtre-Quartz	Aqualine	3 yıl	38 kg	0,13 €	2 €	0,005 €
Alüminyum Elektrot	Aqualine	2 ay	1 set	1.770,00 €	10.620,00 €	29,10 €
Sarf Malzeme İşletme Maliyetleri Toplam						29,31 Euro
NOTLAR						
* Elektrik birim maliyeti 0,1 EURO kabul edilmiştir.						
* Sistemin 24 saat çalıştığı kabul edilmiştir.						
TOPLAM İŞLETME MALİYETİ					41,70 Euro/gün	
1 m³ SU İÇİN İŞLETME MALİYETİ					6,95 Euro/m³gün	

5. SONUÇLAR

Kimya endüstrisi atıksuları çevre kirliliğine neden olan farklı üretim proseslerine sahiptir. Elektrokoagülasyon, atıksu arıtımı/geri kazanımı için mevcut yöntem ve teknolojilere alternatif, yenilikçi ve çevre dostu bir arıtma teknolojisidir. Bu tez çalışması kapsamında, Antalya Organize Sanayi Bölgesi'nde faaliyet gösteren bir firmaya ait kimyevi gübre ve zirai ilaç endüstri atıksuyunun elektrokoagülasyon prosesi ile arıtılabilirliği araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, gerçek atıksu ve pilot ölçek EC reaktörü kullanılarak tam ölçeğe yakın proje ve işletme şartları tespit edilmiştir.

İlk olarak elektrokoagülasyon reaktörüne ait mekanik ve elektrik tesisatı ile ekipmanların kararlı bir şekilde çalıştığı doğrulanmıştır. Pilot ölçekli EC reaktörü ile kurulan sistem, temiz su ön testleri gerçekleştirilerek gerçek atıksu denemelerine hazır hale getirilmiştir. Ön testler; şebeke suyu, yumuşatma filtresi atıksuyu (yumuşatma ünitesi ters yıkama + rejenerasyon + hızlı-yavaş durulama karışık atık akımı) ve ters osmoz konsantre akımı ile gerçekleştirilmiştir. Ön testler sonucunda, çok yüksek iletkenliğe sahip atıksularda EC reaktörü ile giderim gerçekleşmediği fakat iletkenlik arttıkça harcanan gücün azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Yapılan fizibilite çalışmalarına göre kimya endüstrisi atıksuyu için alüminyum elektrotların, demir elektrotlara göre daha verimli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çalışmaların gerçekleştirildiği işletmede, yaklaşık 650 farklı üretim reçetesine bağlı olarak çok farklı konsantrasyonlara sahip, geniş spektrumlu sentetik kimyasal madde kullanımı mevcuttur. Bu durum, üretimden kaynaklanan atıksuyun sabit bir karaktere sahip olmadığını ve spesifik olarak bir kirleticinin giderim veriminin gerçek durumu yansıtamayacağını ortaya koymaktadır. Sahada gerçek atıksu ile pilot ölçekte yapılan çalışmalardan elde edilen veriler doğrultusunda, EC sisteminin ana arıtma prosesi olarak kullanımının yetersiz kalacağına karar verilmiş ve EC reaktörü ön arıtma prosesi olarak kullanılmıştır. Projelendirilen sistem için maksimum giderim hedefli proses iyileştirme çalışmaları yapılmış ve EC reaktörünün ön arıtma prosesi olarak kullanıldığı sistem; kum filtre, karbon filtre ve housing filtreler kullanılarak desteklenmiştir.

EC arıtılabilirlik testlerinden elde edilen veriler doğrultusunda optimum işletme parametreleri; alüminyum elektrotlar ile 20 dakika hidrolik alıkonma süresi, 11,16 A/m² sabit akım yoğunluğu (EC reaktörü, çalışılan atıksu için alüminyum elektrotlar ile 20 V/5 Amper işletme şartlarında çalıştırılmıştır) ve elektrotlar arası mesafe 1 cm olarak belirlenmiştir. Alüminyum elektrotlar kullanılan pilot ölçekli EC reaktörü ile kurulan sistemde KOİ, AKM, yağ-gres, toplam azot, toplam fosfor, iletkenlik ve bulanıklık giderim verimleri tespit edilmiştir. Ham atıksu pH değeri 7,38 olarak ölçülmüş ve sisteme herhangi bir kimyasal ilavesi yapılmamıştır.

EC reaktörünün 11,16 A/m² akım yoğunluğunda 20 dakika boyunca çalıştırılması sonucunda; 4.170 µs/cm ham atıksu iletkenliğine sahip numune ile yapılan çalışmalarda EC reaktörü ile %5, kum filtre ile %25,6, karbon filtre ile %6,1 ve işletilen sistemde kümülatif olarak %33,3 iletkenlik giderim verimi elde edilmiştir. 8.190 µs/cm iletkenliğe sahip ham atıksu numunesi ile yapılan çalışmalarda ise EC reaktörü ile %37, kum filtre ile %30,1 ve işletilen sistemde kümülatif olarak %56,3 iletkenlik giderim verimi elde edilmiştir. Karbon filtre çıkışında, iletkenlik değerinde herhangi bir değişim olmadığı tespit edilmiştir. Saha ölçümlerinden elde edilen sonuçlar doğrultusunda, EC reaktörü ile

yüksek giderim verimleri elde etmek için ham atıksu iletkenliğinin önem taşıdığı sonucuna ulaşılmıştır. Düşük iletkenliğe sahip atıksularda EC reaktörünün verimi düşmektedir. Sahada online olarak takip edilen bulanıklık ölçümleri sonucunda, işletilen sistemin bulanıklık gideriminde başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Ham atıksu iletkenlik değeri 4.170 $\mu\text{S}/\text{cm}$ olan numunede %99,2 ve 8.190 $\mu\text{S}/\text{cm}$ olan numunede ise %99,6 bulanıklık giderimi gerçekleşmiştir.

EC reaktörü, kum filtre ve karbon filtreden oluşan sistem ile KOİ, AKM, yağ-gres, toplam azot ve toplam fosfor parametrelerinden herbirinin neredeyse tamamı sistemden uzaklaştırılmıştır. KOİ parametresi için sistemin kümülatif giderim verimi %99,8, AKM için %99,5, yağ-gres için %96, toplam azot ve toplam fosfor için %98 olarak hesaplanmıştır.

Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar incelendiğinde, optimum şartlarda ($\text{pH}_0 = 7,38$, alüminyum elektrot, elektrotlar arası mesafe = 1 cm, 11,16 A/m^2 akım yoğunluğu ve 20 dakika işlem süresi) %56,3 iletkenlik giderimi gerçekleşmiştir. Bulanıklık, KOİ, AKM, yağ-gres, toplam fosfor ve toplam azot için %95 üzerinde giderim verimlerine ulaşılmıştır. Buna göre, EC reaktörünün ön arıtma sistemi olarak kullanıldığı prosesin birbirinden farklı karakteristik özellik gösteren atıksularda verimli olarak çalıştırılması mümkündür. Çalışmalar sonucunda, sistemin farklı kirliliklerin (KOİ, AKM, yağ ve gres, azot, fosfor, bulanıklık gibi parametreler) gideriminde başarılı olduğu ve yüksek kirletici içeriğini önemli ölçüde azaltabileceği saptanmıştır.

Çalışma sonucunda elde edilen ürün suyu kalitesi, Antalya Organize Sanayi Bölgesi Atıksu Bağlantısı ve Tarife Yönetmeliği'ne göre deşarj parametrelerine uygundur. Çalışmanın gerçekleştirildiği kimyevi gübre ve zirai ilaç üretimi yapılan firmada, yüksek performanslı sıvı kromatografisi (HPLS) çalışılmaktadır. Bu yöntemin başarıyla uygulanabilmesi için kullanılan suyun belirli özellikleri taşıması önemlidir. HPLC'de kullanılan suyun kalitesi, analiz sonuçlarına doğrudan etki edebileceği için yüksek saflıkta olmalıdır. Projelendirilen sistem ile elde edilen ürün suyu, özellikle KOİ konsantrasyonu üretimde direkt olarak kullanılabilir nitelikte değildir. Ancak proses çıkışında elde edilen su, nanofiltrasyon, ters osmoz ve elektrodionizasyon proseslerinden geçirilerek üretimde tekrar kullanım potansiyeline sahiptir. Sahada işletilen sistemin ürün suyu, firmada makine ve ekipman yıkaması için kullanılarak değerlendirilecektir.

EC reaktöründe, arıtılan atıksuyun hacmi ile kıyaslandığında çamur hacminin %20 oranında ve yüzen ağırlıklı olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmada, reaktörde oluşan çamurun arıtımı veya sistemden uzaklaştırılması için ek bir proses kullanılmamıştır. Gerçek ölçekte tasarlanacak ve sürekli çalışacak sistemlerde; EC reaktörünün üst kısmında biriken çamurun sistemden uzaklaştırılması için filtre benzeri bir yapı kullanımı önerilmekte ve kum ve karbon filtrelerin hızlı tıkanmasını önlemek amacı ile ters yıkama için ayrı bir depo kullanımı tavsiye edilmektedir.

250 L/saat kapasiteli sistem için enerji işletme maliyeti 12,38 Euro/gün, sarf malzeme tüketimi ise 29,31 Euro/gün olarak hesaplanmıştır. Gerçek ölçekte, optimum işletme koşullarında sistem kapasitesi arttıkça toplam işletme maliyeti düşecektir. Prosesin optimum şartlarda işletilmesi, elektrotların tüketimi ve harcanacak elektrik enerjisi açısından büyük önem taşımaktadır. Kum filtre ve karbon filtre geri yıkamalarının

düzenli olarak yapılması filtrasyon için kullanılan minerallerin kullanım ömrünün artmasını sağlayacaktır. EC yönteminde enerji giderleri göz önüne alındığında, uygun maliyetli ve alternatif/yenilenebilir enerji kaynakları olan güneş ve rüzgar enerjisi gibi kaynakların kullanımı, uygulamanın daha sürdürülebilir hale gelmesini sağlayacaktır.

Elektrokoagülasyon yönteminin mevcut atıksu arıtımı/geri kazanım tekniklerine göre avantajlı olmasının başlıca nedenleri arasında, ilave koagülasyon kimyasallarına ihtiyaç duyulmaması ve oluşan çamur miktarının daha az olması yer almaktadır. Çalışmalar sonucunda elde edilen %95'in üzerinde giderim verimleri, EC prosesinin ön arıtma prosesi olarak kullanıldığı sistemlerin, uzun vadede yüksek kirlilik yüklerine sahip endüstriyel atıksuların arıtım ve geri kazanımında yaygın olarak kullanılan arıtma teknikleri içerisinde yer alabileceğini göstermektedir. Elektrokoagülasyon prosesi; elektrot cinsi, pH değeri, akım yoğunluğu, işletme süresi gibi değişkenler üzerinde yapılan araştırmalar ile optimum çalışma standartları belirlenmeye devam eden bir yöntemdir. Bu yöntemin, kimya endüstrisi atıksuları için çözüm üretme potansiyeli mevcuttur.

Literatürde gerçek endüstriyel atıksu ve pilot ölçekli EC reaktörü ile yapılan az sayıda çalışma bulunması nedeniyle; elde edilen verilerin bilimsel yayına dönüşme potansiyeli yüksek olup ileride büyük bütçeli ve kurum dışı kaynaklı projelerin hayata geçirilebilmesine katkı sağlayacağı öngörülmektedir. Ülkemizde endüstriyel atıksuların yüksek verimde, düşük işletme maliyeti ile arıtılması ve geri kazanımı ile çevresel kaynakların sürdürülebilirliği konularını bir arada barındıran bu tez çalışmasının sonuçlarının; atıksu arıtma sektöründeki yenilikçi mühendislik çalışmaları için bilgi altlığı oluşturacağı düşünülmektedir. Elde edilen sonuçlarla endüstriyel atıksuyun niteliğine en uygun, maksimum verimli tasarımların yapılması mümkündür. EC reaktörünün ön arıtma ünitesi olarak tasarlandığı sistemin, yerli mühendislik çalışmalarına ilham vererek orta ve uzun vadeli Ar-Ge projeleri üretilmesi için kapasite oluşturması beklenmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Aber, S., Amani-Ghadim, A. R., Mirzajani, V. 2009. Removal of Cr(VI) from polluted solutions by electrocoagulation: Modeling of experimental results using artificial neural network. *Journal of Hazardous Materials*, 171(1-3), 484–490.
- Abdel-Gawad, S. A., Baraka, A. M., Omran, K. A., Mokhtar, M. M. 2012. Removal of some pesticides from the simulated waste water by electrocoagulation method using iron electrodes. *International Journal of Electrochemical Science*, 7, 6654- 6665.
- AlJaberi, F.Y., Ahmed, A.A., Makki, H.F. 2020. Electrocoagulation treatment of high saline oily wastewater: evaluation and optimization. *Heliyon*, 6, e03988.
- Akbulut, H.Y., Karpuzcu, M., Cihan, F., Dimoglo, A. 2003. Petrol İçeren Atıksuların Elektrokimyasal Yöntemlerle Arıtılması. 5. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi, s.164-177.
- Akkaya, G., K. 2022. Treatment of petroleum wastewater by electrocoagulation using scrap perforated (Fe-anode) and plate (Al and Fe-cathode) metals: Optimization of operating parameters by RSM. *Chemical Engineering Research and Design*, 187.
- Akyol, A., Can, O., T., Demirbaş, E., Kobya, M. 2012. Elektrokimyasal proses ile hümkik madde içeren sıvı organik gübre üretim atıksularının arıtımı. *SAÜ Fen Edebiyat Dergisi*.
- Al-Shannag, M., Lafi, W., Bani-Melhem, K., Gharagheer, F., Dhaimat, O. 2012. Reduction of COD and TSS from paper industries wastewater using electrocoagulation and chemical coagulation. *Separation Science and Technology*, 47(5), 700–708.
- Azadi Aghdam, M., Kariminia, H.R., Safari, S. 2015. Removal of lignin, COD, and color from pulp and paper wastewater using electrocoagulation. *Desalination and Water Treatment*, 57(21), 9698–9704.
- Azimi, A., Azari, A., Rezakazemi, M., Ansarpour, M. 2017. Removal of heavy metals from industrial wastewaters: a review. *ChemBioEng Reviews*, 4(1), 37–59.
- Babu, B.V., Rana, H.T., Karishna, V.R. and Sharma, M. 2000. COD reduction of reactive dyeing effluent from cotton textile industry. *Department of Chemical Engineering, Journal of the Institution of Public Health Engineers India*, Vol. 2000 (No.4), pp5-11.
- Bağcı, Y. 2019. İçme-kullanma sularında elektrokoagülasyon prosesi ile arsenik gideriminin araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa*, 83 s.
- Bener, S., Bulca, Ö., Palas, B., Tekin, G., Atalay, S., Ersöz, G. 2019. Electrocoagulation process for the treatment of real textile wastewater: effect of operative conditions on the organic carbon removal and kinetic study. *Process Safety and Environmental Protection*, 129: 47 – 54.
- Brillas, E., Boye, B., Baños, M. A., Calpe, J. C., Garrido, J. A. 2003. Electrochemical degradation of chlorophenoxy and chlorobenzoic herbicides in acidic aqueous medium by the peroxi-coagulation method. *Chemosphere*, 51(4), 227–235.

- Chafi, M., Gourich, B., Essadki, A., Vial, C., Fabregat, A. 2011. Comparison of electrocoagulation using iron and aluminium electrodes with chemical coagulation for the removal of a highly soluble acid dye. *Desalination*, 281: 285–92.
- Chen, G. 2004. Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, vol. 38, pp. 11-41, 2004.
- Crini, G., Lichtfouse, P. 2018. Green adsorbents for pollutant removal: *Innovative Materials and Technology*, Springer.
- Curteanu, S., Piuleac, C. G., Godini, K., & Azaryan, G. 2011. Modeling of electrolysis process in wastewater treatment using different types of neural networks. *Chemical Engineering Journal*, 172(1), 267–276.
- Daneshvar, N., Khataee, A. R., Djafarzadeh, N. 2006. The use of artificial neural networks (ANN) for modeling of decolorization of textile dye solution containing C. I. Basic Yellow 28 by electrocoagulation process. *Journal of Hazardous Materials*, 137(3), 1788–1795.
- Delipinar, Ş. 2007. Maya endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyon ve kimyasal koagülasyon ile arıtımı. Yüksek Lisans Tezi, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gebze.
- Demirci, Y., Pekel, L. C., Altınten, A., & Alpbaz, M. (2015). Application of fuzzy control on the electrocoagulation process to treat textile wastewater. *Environmental Technology*, 36(24), 3243–3252.
- Dimoglo, A., Akbulut, H. Y., Cihan, F., Karpuzcu, M. 2004. Petrochemical wastewater treatment by means of clean electrochemical Technologies. *Clean Techn Environ Policy*, 6, 288–295.
- Durmaz, U. 2018. Deri sanayi atıksularının elektrokoagülasyon ile arıtımı. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Niğde, 70 s.
- Elvan, S., Kabay, N., Akbal, F., Gönder, Z. B. (2017). Treatment of food industry wastewater by electrocoagulation using a fixed bed reactor. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(2), 1262-1270.
- Ensano, B., Borea, L., Naddeo, V., Belgiorno, V., de Luna, M., & Ballesteros, F. 2017. Removal of Pharmaceuticals from Wastewater by Intermittent Electrocoagulation. *Water*, 9(2), 85.
- Esfandyari, Y., Saeb, K., Tavana, A., Rahnavard, A., Fahimi, F. G. 2020. Effective removal of cefazolin from hospital wastewater by electrocoagulation process. *Water Science and Technology*, 80: 2422 – 2429.
- Eyvaz, M., Bayramoğlu, M., Kobya, M. 2006. Tekstil endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyon ile arıtılması: Teknik ve ekonomik değerlendirme. *İTÜ Dergisi*, 16: 55-65.
- Farhadi, S., Aminzadeh, B., Torabian, A., Khatibikamal, V., Fard, M. A. 2012. Comparison of COD removal from pharmaceutical wastewater by electrocoagulation, photoelectrocoagulation, peroxi-electrocoagulation and peroxi-photoelectrocoagulation processes. 219-220, 35–42.

- Fakhri, A., Zarei, M., Karimi, M., Gholami, M., Vosoughi, M., Amini, A., Conti, G. O. (2021). Efficient treatment of petrochemical wastewater using electrocoagulation process: A comprehensive study of operating parameters and reaction kinetics. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(6), 106288.
- Garcia-Segura, S., Eiband, M. M. S. G., de Melo, J. V., Martinez-Huitle, C. A. 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.
- Ghalwa MA, N. 2015. Removal of Imidacloprid Pesticide by Electrocoagulation Process using Iron and aluminum Electrodes. *Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 02(04).
- Gong, C., Shen, G., Huang, H., He, P., Zhang, Z., Ma, B. 2017. Removal and transformation of polycyclic aromatic hydrocarbons during electrocoagulation treatment of an industrial wastewater. *Chemosphere*, 168, 58–64.
- Göktürk, F.A., 2007. Pestisit Endüstrisi Atıksularının Fenton Prosesi ile Arıtımı. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, 84 s.
- Gündüz, Z., Atabey, M. 2019. Effects of Operational Parameters on the Decolourisation of Reactive Red 195 Dye from Aqueous Solutions by Electrochemical Treatment. *International Journal Of Electrochemical Science*, 5868-5885, doi: 10.20964/2019.06.37.
- Güney, S. 2013. Elektrokoagülasyon prosesinin çevre mühendisliğindeki uygulamaların araştırılması. Yayınlanmamış yüksek lisans tezi. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 84 s.
- Hakizimana, J.N., Gourich, B., Chafi, M., Stiriba, Y., Vial, C., Drogui, P., Naja, J. 2017. Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. *Desalination*, 404, 1-21.
- Hansen, H. K., Pena, S. F., Gutierrez, C., Lazo, A., Lazo, P., Ottosen, L. M. 2018. Selenium removal from petroleum refinery wastewater using an electrocoagulation technique. *Journal of Hazardous Materials*, 364: 78–81
- Hlihor, R. M., Petrescu, L., Sandru, C., Parvulescu, V. I. 2016. Electrochemical nitrogen removal from water. *Chemical Engineering Journal*, 288, 458-470.
- Holt, P., K., Barton, G., V., Mitchell, C., A. 2005. The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. , 59(3), 0–367.
- Holt, P., Barton, G. W., Mitchell, C. A. 2001. Deciphering The Science Behind Electrocoagulation To Remove Suspended Clay Particles From Water, *Water Science and Technology*, 50, 177–184.
- Hu, Y., Zhou, L., Zhu J., Gao, J. 2023. Efficient removal of polyamide particles from wastewater by electrocoagulation. *Journal of Water Process Engineering*. 51, 103417.
- Huang, X., Qu, J., Li, D., Chen, J. 2008. Electrochemical removal of nitrate from water by Pd/C cathode: Mechanism and production of ammonium. *Electrochimica Acta*, 53(1), 235-241.

- Huda, N., Raman, A., Bello, M., Ramesh, S. 2017. Electrocoagulation treatment of raw landfill leachate using iron-based electrodes: Effects of process parameters and optimization. *Journal of Environmental Management*, 204, 75–81.
- Igwegbe, C., A., Onukwuli, O., D., Ighalo, j., O., Umembamalu, C.,J. 2021. Electrocoagulation-flocculation of aquaculture effluent using hybrid iron and aluminium electrodes: A comparative study. *Chemical Engineering Journal Advances*.
- Khandegar, V. and Saroha, A. K. 2013. Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent – a review. *Journal of Environmental Management*, 128, 949-963.
- Khataee, S., A., Vatanpour, M., Keshtkar, A. 2014. Application of electrocoagulation process in treatment of wastewater: A review study, *Journal of Molecular Liquids*, vol. 192, pp. 387-394.
- Koby, M., Demirbaş, E., Öncel, S. 2009. Treatment of hazardous wastewater by electrocoagulation/electroflotation", *Journal of Environmental Management*, vol. 90, no. 2, pp. 722-729.
- Liu, Y., Li, Y., Qu, J. 2013. Electrocoagulation of Nitrogen Species from Wastewater: Mechanisms and Influencing Factors. *Water Research*.
- Mariam, T., Al Hattab, Abdel, E., Ghaly. 2012. Disposal and treatment methods for pesticide containing wastewaters: critical review and comparative analysis. *Journal of Environmental Protection*, 3, 431-453.
- Merma, A. G., Santos, B. F., Rego, A. S. C., Hacha, R. R., Torem, M. L. 2020. Treatment of oily wastewater from mining industry using electrocoagulation: Fundamentals and process optimization. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), 15164–15176.
- Nasr, M., Ateia, M., Hassan, K. 2015. Artificial intelligence for greywater treatment using electrocoagulation process. *Separation Science and Technology*, 51(1), 96–105.
- Oden, M.K., Sari-Erkan, H. 2008. Treatment of metal plating wastewater using iron electrode by electrocoagulation process: optimization and process performance. *Process Safety and Environmental Protection*, 119:207–217.
- Ogando, F.I.B., de Aguiar, C.L., Viotto JVN, Heredia, F.J., Hernanz, D. 2019. Removal of phenolic, turbidity and color in sugarcane juice by electrocoagulation as a sulfur-free process. *Food Research International*, 122:643–652.
- Oller, I., Malato S. ve Sanchez-perez, J. A. 2011. Combination of advanced oxidation processes and biological treatments for wastewater decontamination: A review. *Science of The Total Environment*, 409 (20), 4141–4166.
- Olvera-Vargas, H., Ureta-Zañartu, M.S., Carlesi, C. 2016. The influence of pH on nitrogen removal from wastewater by electrocoagulation. *Journal of Environmental Management*.
- Özbay, İ., Veli, S., Özbay, B., Arslan, A. 2018. Elektrokoagülasyon prosesi ile gıda endüstrisi atıksuyunun arıtımında optimum koşulların belirlenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 22(2):10.

Özmez, C. 2020. Reaktif blue 222 boyarmaddesinin sulu çözeltilerden elektrokoagülasyon ve ultrases elektrokoagülasyon yöntemlerini kullanarak gideriminin incelenmesi. Yüksek lisans tezi. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 92 s.

Özyonar, F. and Karagozoglu, B. 2012. Systematic assessment of electrocoagulation for the treatment of marble processing wastewater. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 9, 637-646.

Patel, R., K., Shankar, R., Khare, P., Mondal, P. Treatment of sugar processing industry wastewater using copper electrode by electrocoagulation: Performance and economic study. *Journal of the Indian Chemical Society*, 99 (8), 100563.

Perren, W., Wojtasik, A., Cai, Q. 2018. Removal of Microbeads from Wastewater Using Electrocoagulation. *ACS Omega*, 3(3), 3357–3364.

Pooja, K., Salkar, V.D. 2017. Review of studies on hardness removal by electrocoagulation. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 10 (1), 309-313.

Ramyaa, T., Premkumarb, P., Thanarasub, A., Velayuthamb, K., Dhanasekaranc, A., Sivanesanb, S. 2019. Degradation of pesticide-contaminated wastewater (coragen) using electrocoagulation process with iron electrodes. *Desalination and Water Treatment*, 165, 103–110.

Sabuncu, M., E. 2014. Süt ve süt ürünleri endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımında rsm kullanılarak proses optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 90 s.

Sahu, O. P., Gupta, V., Chaudhari, P. K., Srivastava, V. C. 2015. Electrochemical treatment of actual sugar industry wastewater using aluminum electrode. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(11), 3519–3530.

Saleh, I. A., Zouari, N., Al-Ghouti, M. A. (2020). Removal of pesticides from water and wastewater: Chemical, physical and biological treatment approaches. *Environmental Technology and Innovation*, 101026.

Shen, M., Zhang, Y., Almatrafi, E., Hu, T., Zhou, C., Song, B., ... Zeng, G. 2022. Efficient removal of microplastics from wastewater by an electrocoagulation process. *Chemical Engineering Journal*, 428, 131161.

Sillanpää, M., Shestakova, M. 2017. Electrochemical Water Treatment Methods Equipment for Electrochemical Water Treatment, 227–263.

Silva, D. M. L., Carneiro, M. T. W. D., Ribeiro, J. 2019. Boron Removal from Mining and Synthetic Effluents by Electrocoagulation Using Aluminum Electrodes. *The Scientific World Journal*, 1–7.

Singh, D., B., Amatya, I., M. 2021. Treatment efficiency of rapid sand filters on intermittent use. *Tribhuvan University Lalitpur, Nepal*, 10(09).

Solak, M. 2007. Elektrokoagülasyon prosesi ile mermer atıksularının arıtılması. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta 100 s.

Song, H., Wang, Y., Xu, Q., Li, X., Zhang, H., Li, H., Zhang, Y. (2019). Electrocoagulation of chemical industrial wastewater using Fe-C microelectrodes: process optimization and performance evaluation. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(10), 9814-9825.

Subramani, A., Cryer, E., Liu, L., Lehman, S., Ning, R. Y., Jacangelo, J. G. 2012. Impact of intermediate concentrate softening on feed water recovery of reverse osmosis process during treatment of mining contaminated groundwater. *Separation and Purification Technology*, 88, 138–145.

Taheri, M., Moghaddam, M. R. A., & Arami, M. (2015). Improvement of the /Taguchi/ design optimization using artificial intelligence in three acid azo dyes removal by electrocoagulation. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 34(6), 1568–1575.

Tak, B., Kim, Y., Park, Y., Yoon, Y., Min, G. 2015. Optimization of color and COD removal from livestock wastewater by electrocoagulation process: Application of Box–Behnken design (BBD). *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 28, 307–315.

Tianzhu, F., Wei, D., Xuhui, F., Fuping, P., Ying, L. 2020. An integrated electrocoagulation-Electrocatalysis water treatment process using stainless steel cathodes coated with ultrathin TiO₂ nanofilms. *Chemosphere*, 254.

Topal, S., 2015. Kağıt endüstrisi atıksuyunun elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımı, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 148 s.

Valente, G. F. S., Mendonça, R. C. S., Pereira, J. A. M., & Felix, L. B. 2015. Artificial neural network prediction of chemical oxygen demand in dairy industry effluent treated by electrocoagulation. *Separation and Purification Technology*, 132, 627–633.

Yaqub, A., Raza, H., Ajab, H., Shah, S., H., Shad, A., Bhatti, Z., A. Decolorization of reactive blue-2 dye in aqueous solution by electrocoagulation process using aluminum and steel electrodes. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 9, 100248

Yeh, R.Y., Hung Y.T., Liu, R.L.H., Chiu, H.M., Thomas, A. 2002. Textile wastewater treatment with activated sludge and powdered activated carbon. *International Journal of Environmental Studies*, Volume 59, 607- 622.

Yılmaz, Z., Karagözoğlu, B., K. 2019. Atıksuların Arıtılmasında Elektrokoagülasyon Uygulamaları. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*. 8 (1), 319-334.

Zaied, M., Bellakhal, N. 2009. Electrocoagulation treatment of black liquor from paper industry. *Journal of Hazardous Materials*, 163(2-3), 995–1000.

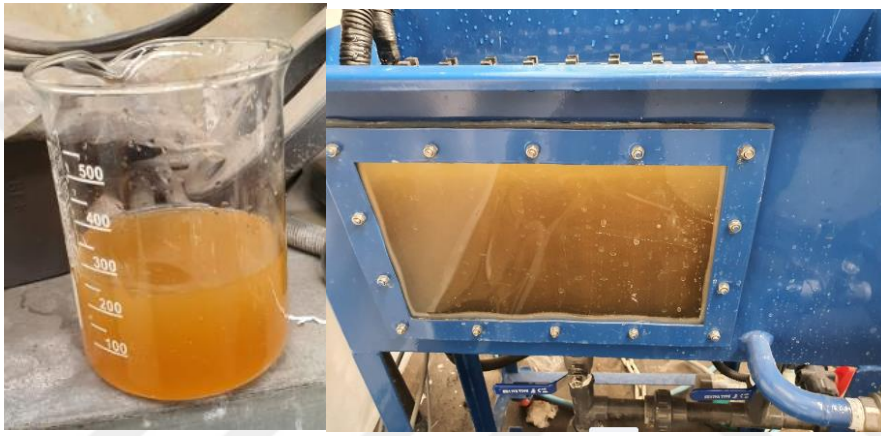
Zhang, Y., Wang, J., Feng, C., Xu, K., Li, G., Wang, X. 2017. Nitrogen removal from landfill leachate by electrocoagulation: Influence of operational parameters and reaction kinetics. *Journal of Environmental Sciences*, 60, 114-123.

Zhang, X., Lin, H., Wei, W., Hu, B. 2020. Electrocoagulation of Dairy Manure Using Low-Carbon Steel Electrodes for Phosphorus Removal. *Journal of Environmental Engineering*, 146(6), 04020044.

7. EKLER

EK-1: Kağıt Endüstrisi Atıksuyu ile Yapılan Fizibilite Çalışması ve Çalışma Sonuçları

Fizibilite çalışmaları kapsamında temiz suya ek olarak; EC reaktörünün atıksu arıtımındaki performansını değerlendirebilmek ve reaktörde gerekli proses iyileştirmelerini yapabilmek amacıyla atıksu numunesi kullanılarak ek bir çalışma daha yapılmıştır. Adana Organize Sanayi Bölgesi'nde bulunan kağıt endüstrisinde faaliyet gösteren bir firmanın atıksu numunesi ile arıtılabilirlik çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.1'de gösterilen kağıt endüstrisi atıksu numunesi için anlık olarak, yerinde yapılmış olan ölçüm sonuçları Çizelge 7.1'de verilmiştir.

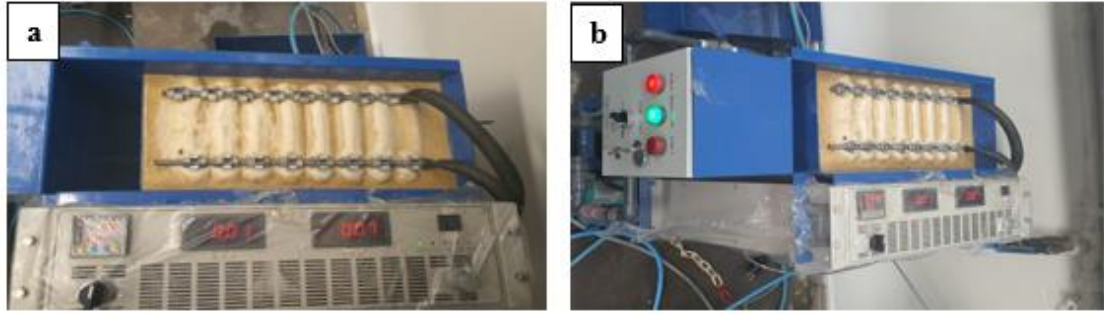


Şekil 7.1. Kağıt endüstrisi atıksuyu

Çizelge 7.1. Kağıt endüstrisi atıksuyu ölçüm sonuçları

Parametreler	Ölçüm sonuçları
Sıcaklık (°C)	29,5
pH	6,36
İletkenlik (µs/cm)	3.000
Bulanıklık (NTU)	1.100
Renk (Pt-Co)	4.078

Elektrokoagülasyon reaktörü; alüminyum elektrotlar kullanarak, 7 Amper akım yoğunluğunda, 15 A/m^2 işletme parametrelerinde 10 ve 20 dakikada hidrolik alıkonma süresinde işletilmiştir (Şekil 7.2). Her 5 dakikada bir anot-katot değişimi yapılmıştır. Kağıt endüstrisi atıksuyu için 10 ve 20 dk hidrolik alıkonma süresi sıcaklık ve pH değerlerinin değişimi Çizelge 7.2'de verilmiştir.

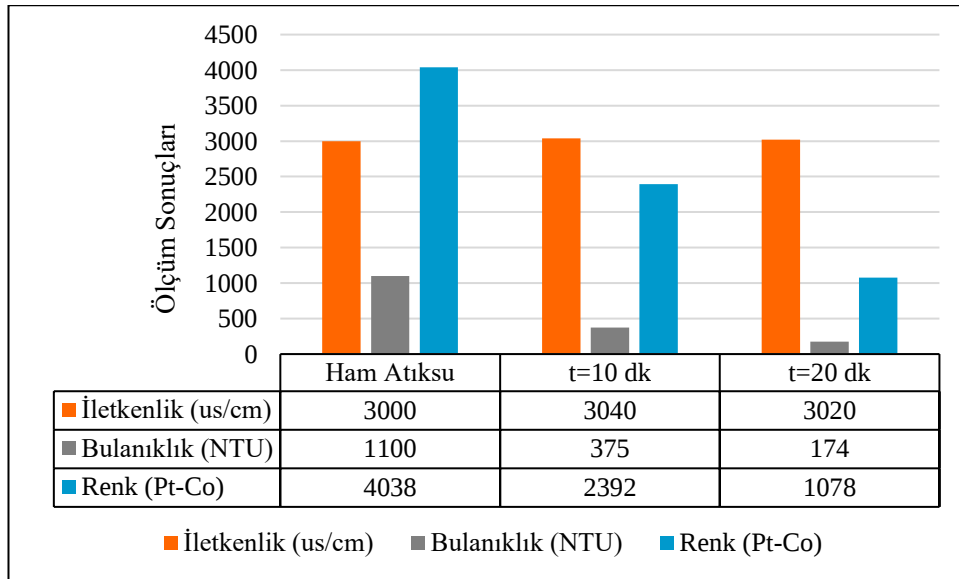


Şekil 7.2. Kağıt endüstrisi atıksuyu arıtılabilirlik çalışmaları; **a)** 10 dk hidrolik alıkonma süresi; **b)** 20 dk hidrolik alıkonma süresi

Çizelge 7.2. Kağıt endüstrisi atıksuyu için 10 ve 20 dk hidrolik alıkonma süresinde sıcaklık ve pH değimi

Parametreler	Ham Atıksu	t=10 dk	t=20 dk
Sıcaklık (°C)	29,5	29,1	28,9
pH	6,36	6,01	6,08

Alüminyum elektrotlar ile 15 A/m^2 'de iletkenlik giderimi olmadığı tespit edilmiştir. 10 dk hidrolik alıkonma süresinde %66 bulanıklık, %41 renk giderimi; 20 dk hidrolik alıkonma süresinde ise %84 bulanıklık, %73 renk giderimi gerçekleşmiştir (Şekil 7.3). Çalışma sonucunda, düşük akım yoğunluğu ve hidrolik alıkonma süresinde EC reaktörü ile kısa sürede, yüksek verimde renk ve bulanıklık giderimi yapılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

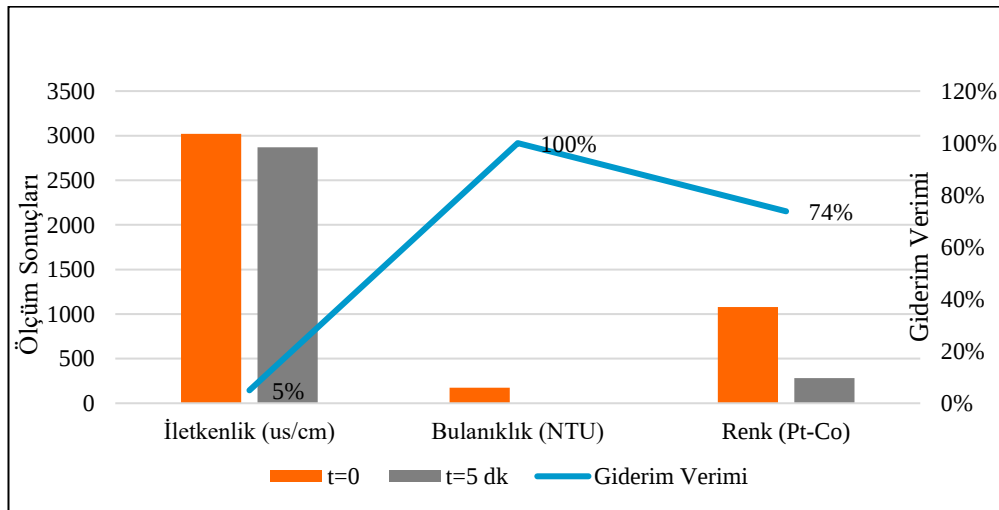


Şekil 7.3. Kağıt endüstrisi atıksuyu arıtılabilirlik çalışmaları sonuçları (7 Amper)

EC reaktöründe akım yoğunluğunun giderim verimine etkisini gözlemleyebilmek amacıyla akım yoğunluğu 60 Ampere, voltaj 6 Volt'a yükseltilerek 5 dakika hidrolik alıkonma süresinde giderim verimleri tekrar değerlendirilmiştir (Şekil 7.4). Reaktörde alüminyum elektrotlar kullanılmıştır. EC reaktörünün giriş ve çıkışından alınan numuneler için ölçümler yerinde, anlık olarak yapılmıştır. Sıcaklık ve pH değerlerinde herhangi bir değişim gözlemlenmemiştir. Ölçüm sonuçlarına göre, 5 dakika sonunda $\cong$ %100 bulanıklık giderimi, %74 renk giderimi ve %5 iletkenlik giderimi gerçekleşmiştir (Şekil 7.5). Yüksek akım yoğunluğunda, verimli iletkenlik giderimi yapılamadığı görülmüştür. Bulanıklık ve renk parametrelerinin yüksek olduğu atıksularda sistemin optimum koşullarda işletimi sağlamak için düşük akım yoğunluğunun yeterli olduğu tespit edilmiştir.

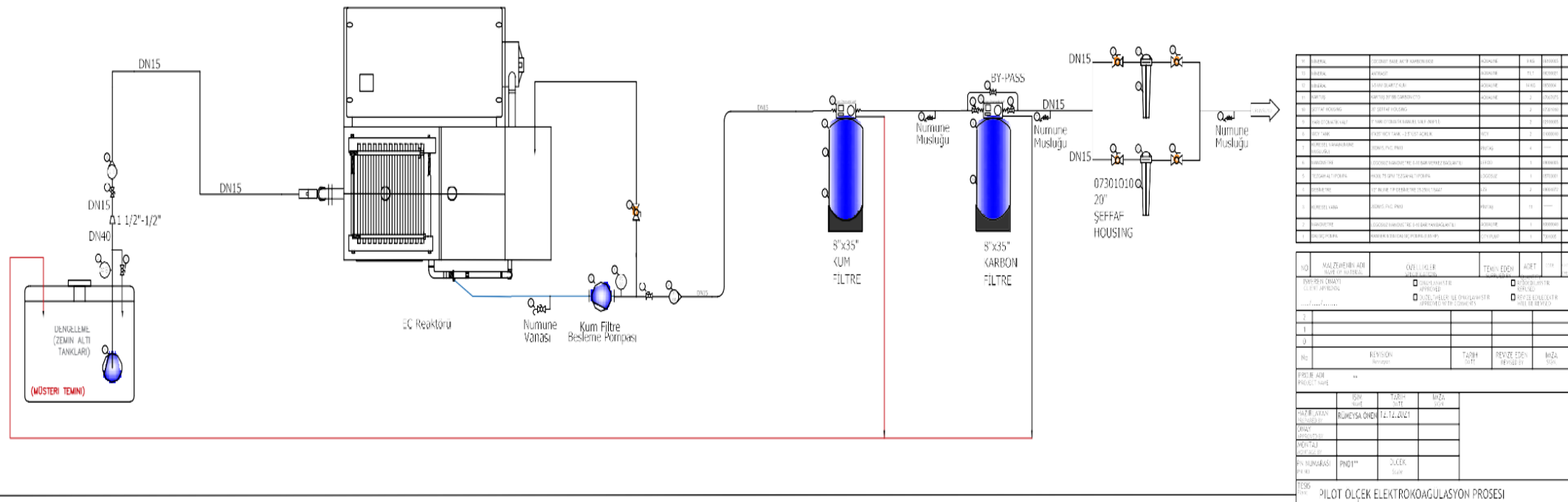


Şekil 7.4. Kağıt endüstrisi atıksuyu arıtılabilirlik çalışmaları sonuçları (60 Amper)



Şekil 7.5. Kağıt endüstrisi atıksuyu arıtılabilirlik çalışmaları sonuçları (60 Amper)

EK-2: Gübre ve Zirai İlaç Endüstrisi Atıksuyu Arıtımı P&ID Diyagramı



ÖZGEÇMİŞ

RÜMEYSA ÖNEN

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2020-2023	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans 2015-2020	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Antalya

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Ar-Ge Mühendisi 07.2022-Devam Ediyor	Maquet Getinge Group
Proje Mühendisi 05.2022-07.2022	HSC Arıtım Sanayi ve Ticaret A.Ş.
Proje Mühendisi 07.2020- 05.2022	ESLİ Endüstriyel Ürünler Paz. San. Ve Tic. Ltd. Şti.