

**EVSEL ATIKSULARIN KESİKLİ  
SİSTEMDE ELEKTROKOAGÜLASYON ARITIM  
YÖNTEMİ İLE ARITIMININ İNCELENMESİ**

**Merve VAROL**

**Yüksek Lisans Tezi  
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı  
Çevre Teknolojisi Bilim Dalı  
Doç. Dr. Alper Erdem YILMAZ  
2015**

**Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**EVSEL ATIKSULARIN KESİKLİ SİSTEMDE  
ELEKTROKOAGÜLASYON ARITIM YÖNTEMİ İLE  
ARITIMININ İNCELENMESİ**

**Merve VAROL**

**ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
Çevre Teknolojisi Bilim Dalı**

**ERZURUM  
2015**

**Her hakkı saklıdır**



T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

EVSEL ATIKSULARIN KESİKLİ SİSTEMDE ELEKTROKOAGÜLASYON  
ARITIM YÖNTEMİ İLE ARITIMININ İNCELENMESİ

Doç. Dr. Alper Erdem YILMAZ danışmanlığında, Merve VAROL tarafından hazırlanan bu çalışma 01/10/2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı – Çevre Teknolojisi Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Alper Erdem YILMAZ

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Şahset İRDEMEZ

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. İbrahim Hakkı KARAKAŞ

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 08/10/2015 tarih ve 39/1394 nolu kararı ile onaylanmıştır.

  
Prof. Dr. Ertan YILDIRIM  
Enstitü Müdürü

**Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### EVSEL ATIKSULARIN KESİKLİ SİSTEMDE ELEKTROKOAGÜLASYON ARITIM YÖNTEMİ İLE ARITIMININ İNCELENMESİ

Merve VAROL

Atatürk Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı  
Çevre Teknolojisi Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Alper Erdem YILMAZ

Bu çalışmada, evsel nitelikli atıksularının kesikli sistem elektrokoagülasyon yöntemiyle giderim verimini etkileyen parametreler incelenmiştir. Elektrokoagülasyon (EK) prosesinde anot elektrot malzemesi olarak alüminyum plakalar kullanılırken katot elektrot malzemesi olarak paslanmaz çelikten imal edilmiş plakalar kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar kesikli modda ve ceketli reaktörde gerçekleştirilmiştir. Giderim verimine etki eden deneysel parametreler olarak, atıksu başlangıç pH değeri, destek elektrolit türü ve konsantrasyonu ve akım şiddeti seçilmiştir. Elektrokoagülasyon prosesi ile yapılan deneysel çalışmaların optimum şartlarında KOİ giderim verimi %95 olarak tespit edilmiştir.

**2015, 76 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Elektrokoagülasyon, Atıksu arıtımı

## **ABSTRACT**

Master Thesis

### **DOMESTIC WASTEWATER INVESTIGATION TREATMENT BY ELECTROCOAGULATION TREATMENT METHOD IN THE BATCH SYSTEM**

Merve VAROL

Ataturk University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Environmental Engineering  
Department of Environmental Technology

Supervisor: Assoc. Doç. Dr. Alper Erdem YILMAZ

In this study, parameters affecting removal efficiency of domestic wastewater were investigated with electrocoagulation method. In the electrocoagulation process, aluminum plates as anode material and stainless steel plates as cathode material were used. Experimental batch studies were carried out in jacketed reactor. Wastewater initial pH value, current density, support electrolyte type and concentration parameters affecting removal efficiency were selected. COD removal efficiency 95% was reached at optimum experimental conditions with electrocoagulation process. As a result desired removal efficiency was obtained.

**2015, 76 pages**

**Keywords:** Electrocoagulation, Wastewater Treatment

## **TEŞEKKÜR**

Yüksek Lisans çalışmam sırasında, çalışmamın her aşamasında ilgi ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve deneyimleri ile bana ışık tutan, yol gösteren, çok değerli danışmanım Sayın Doç. Dr. Alper Erdem YILMAZ hocama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarım sırasında tecrübelerinden ve yardımlarından çokça faydalandığım ve her konuda bana destek olan Sayın Arş. Gör. Sinan KUL'a, Sayın Arş. Gör. Baybars Ali FİL'e, Sayın Arş. Gör. Atila TAŞDEMİR'e canıgönülden teşekkür ederim.

Eğitimim sırasında bana her daim destek olan, maddi ve manevi her açıdan yanımda olup bana moral veren kıymetli aileme teşekkürlerimi sunarım.

**Merve VAROL**

**Eylül, 2015**

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KURAMSAL TEMELLER.....</b>	<b>3</b>
2.1. Atıksuyun Tanımı.....	3
2.2. Evsel Atıksu.....	3
2.3. Evsel Atıksuyun Özellikleri.....	4
2.3.1. Fiziksel özellikler.....	4
2.3.3. Biyolojik özellikler.....	6
2.4. Evsel Atıksuyun Sınıflandırılması.....	6
2.5. Evsel Nitelikli Atıksuların Alıcı Ortama Deşarj Standartları SKKY (değişik: RG-13/2/2008-26786).....	8
2.6. Başlıca Atıksu Parametreleri.....	8
2.6.1. Biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ).....	8
2.6.2. Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ).....	9
2.6.3. Toplam organik karbon (TOK).....	9
2.6.4. Teorik oksijen ihtiyacı (TeOİ).....	9
2.6.5. Toplam oksijen ihtiyacı (TOİ).....	10
2.7. Elektrokimyasal Arıtım ve Elektrokimyasal Proseslere Ait Terimler.....	10
2.7.1. Elektrokimya.....	10
2.7.2. Elektrokimyasal atıksu arıtım prosesleri.....	10
2.7.3. Elektrokimyasal olay.....	11
2.7.4. Elektroliz.....	12
2.8. Elektrokoagülasyon Prosesinin Gelişimi.....	14
2.9. Elektrokoagülasyonun Teorisi.....	14

2.10. Gerçekleşen Reaksiyonlar .....	16
2.11. Elektrokoagülasyonun Avantajları .....	18
2.12. Elektrokoagülasyonun Dezavantajları.....	19
2.13. Elektrokimyasal Arıtımda Önemli İşletme Şartları.....	19
2.13.1. Elektrot tipi.....	19
2.13.2. Elektrotların yerleşimi.....	20
2.13.3. Akım yoğunluğu.....	20
2.13.4. pH.....	20
2.13.5. Bekletme zamanı .....	21
2.13.6. İletkenlik.....	21
2.13.7. Sıcaklık.....	21
2.14. Elektrokimyasal Reaktör Çeşitleri.....	21
2.14.1. Karıştırmalı tank reaktörler .....	23
2.14.2. Paralel plakalı reaktörler .....	23
2.14.3. Kapiler (Kılcal) aralıklı reaktörler.....	24
2.14.4. Partikül elektrotlu reaktörler .....	25
2.15. Konu ile İlgili Yapılmış Çalışmalar .....	28
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM.....</b>	<b>37</b>
3.1. Atıksuyun Temini ve Özelliklerinin Belirlenmesi .....	37
3.2. Elektrokoagülasyon Prosesinin Gerçekleştiği Düzenek.....	37
3.3. Deney Şartları ve Çalışma Düzeni .....	38
3.4. Analiz Metotları .....	39
3.4.1. Analizde kullanılan çözeltiler.....	39
3.5. Deneysel Verilerin Hesaplanması İçin Kullanılan Eşitlikler .....	41
3.5.1. Giderim (Arıtma) veriminin hesaplanması.....	41
3.5.2. Enerji tüketiminin hesaplanması .....	41
3.5.3. Akım yoğunluğunun hesaplanması .....	41
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI .....</b>	<b>42</b>
4.1. Atıksu Başlangıç pH Değerinin Giderim Verimine Etkisi.....	42
4.2. Akım Şiddetinin Giderim Verimine Etkisi.....	55
4.3. Destek Elektrolit Türünün ve Konsantrasyonun Giderim Verimine Etkisi .....	60
<b>5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....</b>	<b>68</b>



5.1. Atıksuyun Başlangıç pH Değerinin Etkisi .....	68
5.2. Akım Yoğunluğunun Giderim Verimine Etkisi .....	69
5.3. Destek Elektrolit Türünün Giderme Verimine Etkisi.....	70
5.4. Destek Elektrolit Konsantrasyonunun Etkisi .....	70
KAYNAKLAR .....	71
ÖZGEÇMİŞ .....	77

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

A	Amper
$A_s$	Aktif Yüzey Alanı
$C_e$	t anında atıksuda kalan kirletici konsantrasyonu (mg/l)
$C_0$	Başlangıçta atıksudaki kirletici konsantrasyonu (mg/l)
F	Faraday sabiti
I	Akım şiddeti (Amper)
N	Anot yüzeyinde adsorbe edilmiş olan $\cdot\text{OH}$ 'nin sayısı
Ne	Reaksiyon sırasında alınıp verilen elektron
$\text{OH}^-$	Hidroksil radikali
R	Organik Bileşik
$\text{R}\bullet$	Organik radikal
T	Sıcaklık
T	Zaman
V	Uygulanan potansiyel fark (Volt)
W	Enerji tüketimi (kW saat/m <sup>3</sup> )
$\eta$	Arıtma verimi
$\mu\text{S}$	Mikrosiemens
v	Reaktördeki toplam çözelti hacmi (m <sup>3</sup> )

### Kısaltmalar

AKM	Askıda Katı Madde
BOİ	Biyolojik Oksijen İhtiyacı
EAS	Evsel Atıksu
EK	Elektrokoagülasyon
KOİ	Kimyasal Oksijen İhtiyacı

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Günlük evsel su tüketim oranları.....	3
Şekil 2.2. Elektrokimyasal hücrenin şematik dizaynı.....	12
Şekil 2.3. Elektrokoagülasyon reaktör tiplerinin sınıflandırılması.....	22
Şekil 2.4. Paralel plakaların kullanıldığı elektrokimyasal hücre.....	24
Şekil 2.5. Kapiler aralıklı plakaların kullanıldığı elektrokimyasal hücre.....	25
Şekil 2.6. Süspansiyon yataklı, partikül elektrotların kullanıldığı elektrokimyasal hücre.....	27
Şekil 2.7. Akışkan yataklı partikül elektrotların kullanıldığı elektrokimyasal hücre.....	28
Şekil 3.1. Deney düzeneğinin şematik görünüşü.....	38
Şekil 3.2. KOİ analizinde kullanılan kalibrasyon eğrisi.....	40
Şekil 4.1. 5 Amper akım şiddetinde her bir başlangıç atıksu pH değerinin reaksiyon süresi boyunca değişimi.....	42
Şekil 4.2. 5 Amper akım şiddetinde her bir başlangıç pH değeri-elektriksel iletkenlik ve sıcaklık değerlerinin değişimi.....	44
Şekil 4.3. 5 Amper akım şiddetinde her bir başlangıç pH değeri-elektriksel iletkenlik ve sıcaklık değerlerinin değişimi.....	45
Şekil 4.4. Alüminyumun ortam pH'sına bağlı olarak çözünme diyagramı.....	46
Şekil 4.5. Enerji tüketimi üzerine atıksu başlangıç pH değerinin etkisi.....	47
Şekil 4.6. 10 Amper akım şiddetinde her bir başlangıç atıksu pH değerinin reaksiyon süresi boyunca değişimi.....	48
Şekil 4.7. 15 Amper akım şiddetinde her bir başlangıç atıksu pH değerinin reaksiyon süresi boyunca değişimi.....	49
Şekil 4.8. 20 Amper akım şiddetinde her bir başlangıç atıksu pH değerinin reaksiyon süresi boyunca değişimi.....	49
Şekil 4.9. 10 Amper akım şiddetinde her bir başlangıç pH değeri-elektriksel iletkenlik ve sıcaklık değerlerinin değişimi.....	50
Şekil 4.10. 15 Amper akım şiddetinde her bir başlangıç pH değeri-elektriksel iletkenlik ve sıcaklık değerlerinin değişimi.....	50

<b>Şekil 4.11.</b> 20 Amper akım şiddetinde her bir başlangıç pH değeri-elektriksel iletkenlik ve sıcaklık değerlerinin değişimi .....	51
<b>Şekil 4.12.</b> 10 Amper akım şiddetinde her bir başlangıç pH değeri-elektriksel iletkenlik ve sıcaklık değerlerinin değişimi .....	52
<b>Şekil 4.13.</b> 15 Amper akım şiddetinde her bir başlangıç pH değeri-elektriksel iletkenlik ve sıcaklık değerlerinin değişimi .....	52
<b>Şekil 4.14.</b> 20 Amper akım şiddetinde her bir başlangıç pH değeri-elektriksel iletkenlik ve sıcaklık değerlerinin değişimi .....	53
<b>Şekil 4.15.</b> Enerji tüketimi üzerine atıksu başlangıç pH değerinin etkisi .....	54
<b>Şekil 4.16.</b> Enerji tüketimi üzerine atıksu başlangıç pH değerinin etkisi .....	54
<b>Şekil 4.17.</b> Enerji tüketimi üzerine atıksu başlangıç pH değerinin etkisi .....	55
<b>Şekil 4.18.</b> Akım şiddetinin her bir başlangıç atıksu pH değerinin reaksiyon süresi boyunca değişimine etkisi .....	56
<b>Şekil 4.19.</b> Farklı akım şiddetlerinin çıkış suyu KOİ değerlerinin değişimine etkisi .....	58
<b>Şekil 4.20.</b> Enerji tüketimi üzerine uygulanan sabit akım şiddeti değerinin etkisi.....	59
<b>Şekil 4.21.</b> KOİ giderim verimi üzerine NaCl destek elektrolit türünün etkisi .....	61
<b>Şekil 4.22.</b> KOİ giderim verimi üzerine NaNO <sub>3</sub> destek elektrolit türünün etkisi .....	62
<b>Şekil 4.23.</b> KOİ giderim verimi üzerine Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> destek elektrolit türünün etkisi.....	62
<b>Şekil 4.24.</b> Enerji tüketimi üzerine NaCl destek elektrolit türünün etkisi .....	63
<b>Şekil 4.25.</b> Enerji tüketimi üzerine NaNO <sub>3</sub> destek elektrolit türünün etkisi .....	64
<b>Şekil 4.26.</b> Enerji tüketimi üzerine Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> destek elektrolit türünün etkisi.....	64
<b>Şekil 4.27.</b> Üç farklı destek elektrolit türünün KOİ giderim verimine etkisi .....	65
<b>Şekil 4.28.</b> Üç farklı destek elektrolit türünün enerji tüketimine etkisi .....	66

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b>Çizelge 2.1.</b> Evsel atıksuların fiziksel, kimyasal ve biyolojik bileşenleri .....	4
<b>Çizelge 2.2.</b> Evsel atıksuların genel bileşimi .....	7
<b>Çizelge 2.3.</b> SKKY göre evsel nitelikli atıksuların alıcı ortama deşarj standartları .....	8
<b>Çizelge 2.4.</b> Endüstriyel atıksu arıtımı için literatürde EK prosesi ile gerçekleştirilen örnek çalışmalar .....	31
<b>Çizelge 2.5.</b> İçme suyu arıtımı için literatürde EK prosesi ile gerçekleştirilen örnek çalışmalar .....	34
<b>Çizelge 2.6.</b> Evsel atıksu arıtımı için literatürde EK prosesi ile gerçekleştirilen örnek çalışmalar .....	36
<b>Çizelge 3.1.</b> Evsel atıksuyun karakteristik özellikleri.....	37
<b>Çizelge 3.2.</b> Evsel nitelikli atıksularının elektrokoagülasyon prosesi ile arıtılmasında prosesse etki eden parametreler (alüminyum elektrot).....	39

## 1. GİRİŞ

Dünyanın yaklaşık %70'i suyla kaplı olmasına rağmen, bu değer yaklaşık %97- 98'i tuzlu, geri kalan kısmı ise tatlı sudur. Mevcut tatlı su kaynakları, kentsel ve tarımsal tüketimde, endüstriyel üretimde, hidroelektrik üretiminde, termal enerji santrallerinin soğutulmasında, ulaşımda, balıkçılıkta ve rekreasyon alanlarının sulanmasında kullanılmaktadır. Ayrıca, canlıların içinde yaşadığı ve bağımlı olduğu ekosistemlerin sürekliliği için de su gereklidir.

Günümüzde dünya nüfusunun hızla artması günlük su kullanımını da beraberinde artırmış, evlerde kullanılan gerek organik gerekse deterjan gibi kimyasal içerikli maddelerin kanalizasyonlarda birleşmesi ile evsel nitelikli atıksuları oluşturmuştur.

Evsel atıksular; askıda, koloidal ve çözünmüş halde organik ve inorganik maddeler içerir. İklimsel koşullar, insanların yaşam düzeyleri ve kültürel alışkanlıkları, atıksu özelliğini önemli ölçüde etkiler. Şehir kanalizasyon şebekesine endüstriyel atıksuların kabulü, mevcut evsel atıksu özelliklerini büyük oranda değiştirir. Derişimler kişi başına günlük su kullanımı değerlerine bağlı olarak da değişir. Dolayısıyla atıksu özellikleri yalnızca kentten kente değil, ele alınan her bir yerleşim birimi için mevsimsel ve saatlik değişkenlikler gösterir.

Su kirliliği, çevre kirliliğinin en önemli kısmını teşkil etmektedir. Atıksuların gelişmiş güzel deşarj edilmesi; akarsuların, yer altı sularının, göllerin ve denizlerin kirlenmesi sonucu çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Atıksularda kirlilik sebebi olan maddeler; organik maddeler (proteinler, karbonhidratlar, yağ ve gres, fenoller, pestisitler, klorlu bileşikler vb.), ağır metal bileşikleri (antimon, arsenik, bor, bakır, baryum, çinko, kurşun, nikel, krom, kalay, kobalt, gümüş, magnezyum vb.), siyanür, poliklorobifenil (PCB), polibrobifenil (PBB), aromatik ve alifatik hidrokarbonlar, parçalanmaya dirençli deterjanlar olarak özetlenebilir. Burada sayılan kirleticilerin bulunduğu atıksuların,

standartlara uygun olarak sürekli kontrol edilmesi ve istenilen deşarj seviyesine kadar artırılması gerekmektedir.

Kentsel ve endüstriyel her türlü atıksuların alıcı ortamlara deşarj edilmeden önce kirletici özelliklerine bağılı olarak belirli yöntemler kullanılarak artırılması gerekmektedir. Bu yöntemlerden bazıları havalı ve havasız biyolojik arıtım prosesleri, kimyasal koagülasyon, flotasyon, adsorpsiyon, kimyasal oksidasyon, membran arıtım sistemleri, foto kimyasal ve elektrokimyasal arıtım prosesleri olarak sıralanabilir ve atık suyun özelliklerine göre tek başlarına veya birlikte kullanılabilir.

Evsel atıksu arıtımında kullanılan yöntemlerden biri de elektrokimyasal atıksu arıtım yöntemleridir. Bu atıksu arıtımı yöntemleri evsel ve endüstriyel birçok atıksu kaynağı için kolaylıkla uygulanabilir ve kirlilik problemlerinin uzaklaştırılması için yeni çalışma alanları oluşturmaktadır. Elektrokimyasal arıtım prosesleri, ana reaktifin elektron olması, yeni ürünlerin oluşması veya mevcut atıkların zararlarının en aza indirilmesi gibi birçok açıdan daha avantajlıdır.

Bu çalışmanın amacı, evsel nitelikli atıksuların alıcı ortam ile buluşmadan önce elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtım verimine etki eden parametrelerin saptanmasıdır. Çalışmalarda Erzurum Atatürk Üniversitesi Yerleşkesi kanalizasyon sisteminin şehir kanalizasyon sistemi ile birleştiğı yere yakın bir rögar noktasından alınan atıksular kullanılmıştır. Elektrokoagülasyon yöntemi ile optimum KOİ giderim verimi, atıksu başlangıç pH'sı, atıksu besleme hızı, destek elektrolit türü ve konsantrasyonu ve akım şiddetinin etkileri incelenmiştir.

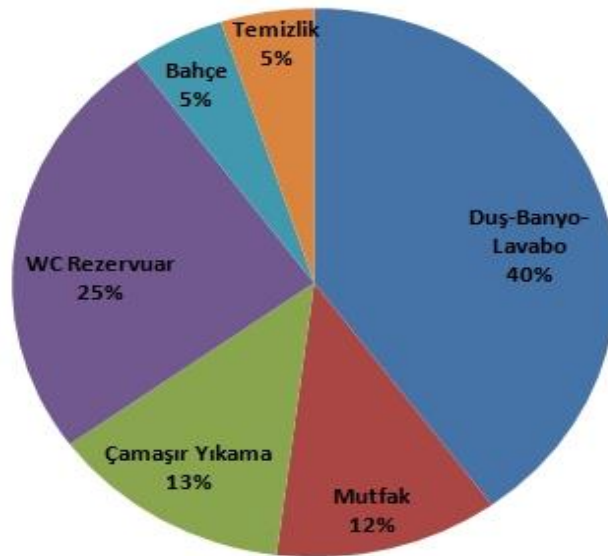
## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. Atıksuyun Tanımı

Evsel, endüstriyel, tarımsal ve diğer kullanımlar sonucunda kirlenmiş, özellikleri kısmen veya tamamen değişmiş sular ile maden ocakları ve cevher hazırlama tesislerinden kaynaklanan sular ve yapılaşmış kaplamalı ve kaplamasız şehir bölgelerinden cadde, otopark ve benzeri alanlardan yağışların yüzey veya yüzey altı akışa dönüşmesi sonucunda gelen sulara atıksu denir.

### 2.2. Evsel Atıksu

Su canlı organizmaların işlevselliğini devam ettirebilmeleri için ihtiyaç duydukları olmazsa olmaz bir hayat kaynağıdır. Bir insan günde ortalama 2,5 litre su içer ve yaklaşık 200 litre suyu diğer ihtiyaçlarına kullanır. Temiz su kaynaklarından temin edilen su, insani ve sıhhi ihtiyaçlar için kullanıldıktan sonra evsel atıksu (EAS) olarak tahliye edilmektedir.



Şekil 2.1. Günlük evsel su tüketim oranları



İnsanoğlunun bulunduğu ve su kullandığı her türlü alan evsel atıksu kaynaklarını oluşturmaktadır. Evsel atıksuyun kirlilik konsantrasyonunu etkileyen temel parametreler nüfus yoğunluğu ve kullanılan su miktarıdır (Kurt 2007).

### 2.3. Evsel Atıksuyun Özellikleri

Evsel atıksuların özelliklerini belirleyen fiziksel, kimyasal ve biyolojik birçok bileşenleri mevcuttur. Bu özellikler Çizelge 2.1’de ayrıntılı olarak belirtilmiştir.

**Çizelge 2.1.** Evsel atıksuların fiziksel, kimyasal ve biyolojik bileşenleri (Metcalf and Eddy 2003)

FİZİKSEL ÖZELLİKLER	KİMYASAL BİLEŞENLER			BİYOLOJİK BİLEŞENLER
	Organik	İnorganikler	Gazlar	
Renk	Karbonhidratlar	Alkalinite	Metan	Canlı Hücreler
Koku	Yağ ve Gres	Klorürler	Oksijen	Tek Hücreliler
Katı Maddeler	Pestisitler	Ağır Metaller	Hidrojen	Virüsler
Sıcaklık	Fenoller	Azot	Sülfür	
	Proteinler	pH		
	Yüzey aktif mad.	Fosfor		
		Sülfür		
		Toksik Bileşenler		

#### 2.3.1. Fiziksel özellikler

Evsel atıksulardaki temel fiziksel parametre katı maddelerdir. Bunun yanı sıra renk ve koku diğer önemli parametrelerdir.

## Katı maddeler

- Askıda katı maddeler,
- Çözünebilir katı maddeler,
- Çökelebilen katı maddeler,
- Uçucu katı maddeler (550°C'de yanabilen) olarak tanımlanır.

### 2.3.2. Kimyasal özellikler

Evsel atıksularda kimyasal bileşenleri sırasıyla; organik, inorganik, çözülmüş gaz haldeki maddelerdir.

#### Organik maddeler

Evsel atıksularda AKM 'nin %70'i, filtrata geçen kısmın %40'ı organik maddeleri oluşturmaktadır. Organik maddelerin dağılımı ise %40–60 proteinler, %25–50 karbonhidratlar ve %10 yağlar şeklinde olmaktadır. Diğer bileşenler ise deterjanlar, fenoller ve pestisitlerdir.

#### İnorganik bileşenler

Alkalinite, klorür, ağır metaller, azot, fosfor, sülfür, toksik bileşenler, pH, evsel atıksudaki inorganik bileşenler olarak sınıflandırılmaktadır. Bu parametreler atıksuda, alıcı ortamda, arıtma proseslerindeki biyokimyasal faaliyetlerin içeriklerinin belirlenmesinde yardımcı olmaktadır. Azot ve fosfor parametreleri bakteriler tarafından besin olarak kullanılmaktadırlar. Ağır metaller, diğer toksik maddeler ve yüksek klorür konsantrasyonları organizma faaliyetlerini olumsuz yönde etkilemektedirler.

## Gazlar

Anaerobik biyolojik faaliyetler sonucu metan ve hidrojen sülfür gazları oluşmaktadır. Özellikle kapalı kanalizasyon sistemlerinin havasız ortamları bu gazların oluşumu için müsaittir. Hidrojen sülfür gazı hem toksik etkiye sahiptir hem de kanalizasyon boru sistemi üzerinde korozif etkiye neden olmaktadır. Bunun dışında protein yapıların hidrolizi sonucu aminoasitler ve amonyak gazı oluşabilmektedir.

### **2.3.3. Biyolojik özellikler**

Evsel atıksulardaki biyolojik bileşenler canlı hücreler, bitkiler, tek hücreliler, virüsler olarak sınıflandırılabilir. Tek hücreliler sınıfında bulunan bakteriler, protozoalar ve algler olumlu ya da olumsuz çevre şartlarının oluşmasında rol oynamaktadırlar. Bakteriler arıtma proseslerinde kirlilik olan parametrelerle beslenen ve onları nihai ürünlere dönüştüren tek hücreli organizmalardır. Bakteriler bu işlemleri gerçekleştirirken protozoaları da besin olarak kullanılmaktadırlar. Besi maddeleri (N ve P) konsantrasyonlarının artış göstermesi bu alandaki bakterilerin kontrolsüz şekilde çoğalmalarına dolayısıyla ötrofikasyona neden olmaktadır. Ötrofikasyon sonucu su yüzeyinin alglerle kaplanması zamanla anaerobik ortamın oluşumuna yol açmaktadır (Kurt 2007).

### **2.4. Evsel Atıksuyun Sınıflandırılması**

Evsel atıksular içerdikleri kirlilik parametrelerinin konsantrasyonlarına göre kuvvetli, orta kuvvette ve zayıf kuvvette olarak 3 sınıfta toplanılmaktadırlar. Yapılan çalışmalar sonucu ortaya çıkan ve genel kabul gören evsel atıksuların fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini gösteren veriler aşağıda Çizelge 2.2'de gösterilmiştir.

**Çizelge 2.2.** Evsel atıksuların genel bileşimi (Metcalf and Eddy 2003)

KİRLLETİCİ PARAMETRELER	BİRİM	KONSANTRASYON		
		ZAYIF	ORTA	KUVVETLİ
Toplam Katı Maddeler (TOK)	mg/L	350	720	1200
Toplam Çözünmüş Maddeler (TÇM)	mg/L	250	500	850
Sabit	mg/L	145	300	525
Uçucu	mg/L	105	200	325
Askıda Katı Maddeler (AKM)	mg/L	100	220	350
Sabit	mg/L	20	55	75
Uçucu	mg/L	80	165	275
Çökebilir Katı Maddeler (ÇKM)	mg/L	5	10	20
BOI <sub>5</sub>	mg/L	110	220	400
Toplam Organik Madde (TOK)	mg/L	80	160	290
KOI	mg/L	250	500	1000
Toplam Azot	mg/L	20	40	85
Organik Azot	mg/L	8	15	35
Serbest Amonyum Azotu	mg/L	12	25	50
Nitrit Azotu	mg/L	0	0	0
Nitrat Azotu	mg/L	0	0	0
Toplam Fosfor	mg/L	4	8	15
Organik	mg/L	1	3	5
İnorganik	mg/L	3	5	10
Klorür	mg/L	30	50	100
Sülfat	mg/L	20	30	50
Alkalinite (CaCO <sub>3</sub> olarak)	mg/L	50	100	200
Yağ-Gres	mg/L	50	100	150
Toplam Koliform	No/100ml	10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup> -10 <sup>8</sup>	10 <sup>7</sup> -10 <sup>9</sup>
Uçucu Organik Bileşikler (UOB)	µg/l	<100	100-400	>400

## 2.5. Evsel Nitelikli Atıksuların Alıcı Ortama Deşarj Standartları SKKY (değişik:RG-13/2/2008-26786)

Ülkemizde evsel nitelikli atıksuların alıcı ortama deşarj standartları, T.C. Çevre Bakanlığının 31.12.2004 tarihinde yayınlamış olduğu Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliđi, nüfusa ve kirlilik yüküne bağlı olarak Çizelge 2.3'te birleşik halde verilmiştir.

**Çizelge 2.3.** SKKY göre evsel nitelikli atıksuların alıcı ortama deşarj standartları (Değişik: RG-13/2/2008-26786)

	BOİ yükü 5-60kg/günNüfus 84-1000		BOİ yükü 60- 600kg/günNüfus 1000-10000		BOİ yükü 600- 6000kg/günNüfus 10000-100000		BOİ yükü>6000kg/gün Nüfus>100000	
	Kompozit Numune 2saat	Kompozit Numune 24 saat	Kompozit Numune 2saat	Kompozit Numune 24 saat	Kompozit Numune 2saat	Kompozit Numune 24 saat	Kompozit Numune 2saat	Kompozit Numune 24 saat
BOİ <sub>5</sub> (mg/L)	50	45	50	45	50	45	40	35
KOİ(mg/L)	180	120	160	110	140	100	120	90
AKM(mg/L)	70	45	60	30	45	30	40	25
pH	6-9	6-9	6-9	6-9	6-9	6-9	6-9	6-9

## 2.6. Başlıca Atıksu Parametreleri

### 2.6.1. Biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ)

Atıksular organik maddeler içerdiğinden, bunların konsantrasyonları, yani 1 L sudaki miktarları, kirlilik derecesinin ölçüsü olarak kabul edilir. Fakat atıksuların bileşimleri içindeki maddeleri bir formülle ifade etmek mümkün değildir. Ayrıca bu maddeler tasfiye tesisinde bozunmaya uğradıklarından, bu etki de dikkate alınmalıdır. Bu yüzden bu maddeleri konsantrasyonları ile ifade etme yoluna gidilmiştir. Organik maddenin ölçüsü olarak, biyokimyasal oksidasyon (karbonlu maddelerin oksitlenmesi) sırasında harcanan oksijen miktarı esas alınabilir ve bu değer de BOİ olarak adlandırılır.

Biyokimyasal oksidasyon, su içinde bir yanma olayı olup, bu yanma esnasında suda çözülmüş (erimiş) oksijen kullanılır. Ne kadar fazla oksijen sarf edilirse, sudaki organik madde miktarı da o kadar fazla demektir. Organik madde ihtiva eden sularda suların oksijen ihtiyacı  $BOI_5$ , karbonlu maddelerin, tamamen  $CO_2$ 'ye dönüşmesine kadar artar. Teorik olarak sonsuz, pratik olarak yaklaşık olarak 10 gün kadar bir müddet sonunda, bütün karbonlu maddeler ayrışır. Bu esnada sarf edilen oksijene, birinci kademe nihai biyokimyasal oksijen ihtiyacı denir ve  $BOI_u$  ile gösterilir. Evsel atıksular için  $BOI_5$  ile  $BOI_u$  arasında  $BOI_5/BOI_u \cong 0,68$  bağıntısı vardır.

### **2.6.2. Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ)**

Kimyasal olarak oksitlenebilen organik maddelerin oksijen ihtiyacı  $KOI$  ile ifade edilir.  $KOI$  asit ortamda kuvvetli bir kimyasal oksitleyici (potasyum dikromat gibi) vasıtasıyla ölçülür. Kimyasal oksijen ihtiyacı, biyolojik oksijen ihtiyacından daha büyüktür. Tasfiye edilmemiş atıksular için  $BOI_5/KOI = 0,4-0,8$  (ortalama 0,65) alınabilir.

### **2.6.3. Toplam organik karbon (TOK)**

Özellikle çok küçük organik madde konsantrasyonları için uygun bir parametredir. Bu parametre, bilinen konsantrasyonlarda bir numuneyi yüksek sıcaklıkta bir fırına enjekte ederek hesaplanabilir.  $BOI_5/TOK = 1-1,6$

### **2.6.4. Teorik oksijen ihtiyacı (TeOI)**

Atıksularda bulunan karbonhidratlar, yağlar, proteinler ve bunların ayrışma ürünleri genel olarak karbon, hidrojen, oksijen ve azottan meydana gelir. Numunenin kimyasal formülü biliniyorsa, içindeki karbonun oksitlenmesi için gerekli oksijen miktarı bulunabilir. Bu değer  $KOI$  ve  $BOI$ 'den daha büyüktür. Çünkü  $KOI$ 'de bile, kimyasal olarak oksitlenmeyen bir miktar karbonlu madde daima bulunur.

### **2.6.5. Toplam oksijen ihtiyacı (TOİ)**

TOİ parametresi ise diğer parametrelerin bulunmasından daha sonraki yıllarda geliştirilmiştir. TOİ deneyi, numuneyi platine katalizlenen bir yanma odasında kararlı son ürünlere çevirmeyi ve bu esnada sarf edilen oksijen miktarını bulmayı hedef alır.

## **2.7. Elektrokimyasal Arıtım ve Elektrokimyasal Proseslere Ait Terimler**

### **2.7.1. Elektrokimya**

Elektrokimya günümüzde yüksek derecede öneme sahip bir bilim dalıdır. Elektrokimya; elektrik enerjisi ile kimyasal enerji arasında oluşan bağıntıları, bu iki enerji türünün karşılıklı dönüşümlerini ve olaylarını inceleyen bir bilim dalıdır.

### **2.7.2. Elektrokimyasal atıksu arıtım prosesleri**

Elektrokimyasal arıtım yöntemleri, kolay kontrol edilebilmeleri, kirliliği kısa sürede maksimum düzeyde azaltmaları, işletimlerinin kolay olması, basit ve düşük maliyetli ekipmanlar kullanılması, sınırlı düzeyde kimyasal madde kullanılması, böylelikle daha az çamur oluşması özelliklerinden dolayı su ve atıksu arıtımında kullanımları yaygınlaşmaktadır.

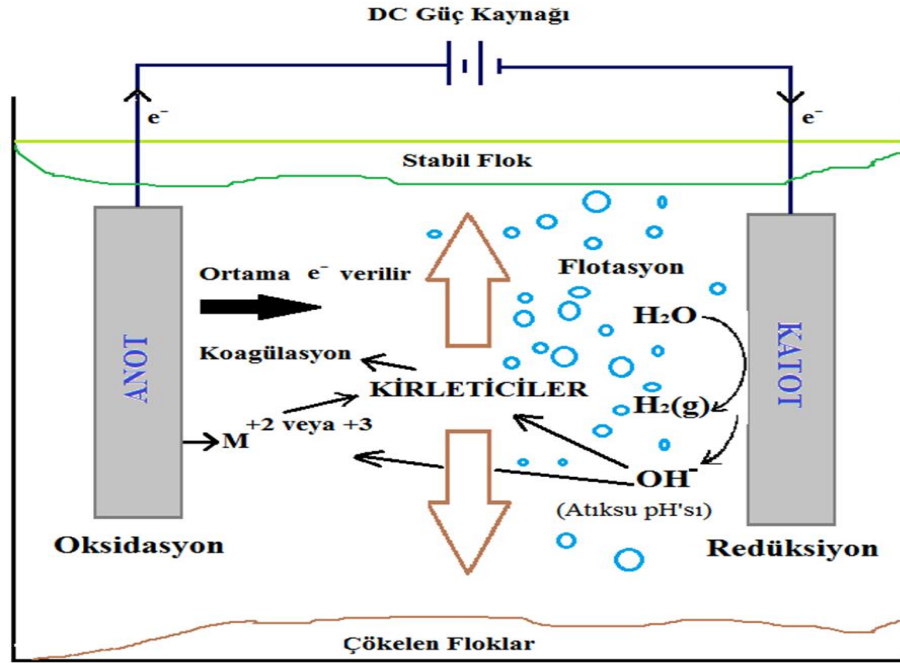
Elektrokimyasal atıksu arıtma yöntemleri genellikle yüksek derişime sahip organik ve inorganik kirleticilerin arıtılmasında, metal iyonların uzaklaştırılması veya geri kazanılmasında kullanılmaktadır.

Elektrokimyasal arıtım proseslerinin genel yapısında adsorbsiyon, absorbsiyon, çöktürme, flotasyon ve koagülasyon prosesleri bulunur (Ihara *et al.* 2004).

### 2.7.3. Elektrokimyasal olay

Elektrik üreten veya elektrik akımı yardımıyla gerçekleşen bir redoks reaksiyonudur. Redoks reaksiyonların her biri ise indirgenme ve yükseltgenme yarı reaksiyonlarından oluşmaktadır. Elektrik akımı da bir metalik iletken ve bir elektrolit iletken yardımıyla gerçekleştirilir (Koyuncu 2006). Elektrokimyasal proseslerin en belirgin farklılıkları prosesin şekli ve yapısıdır (elektrot tipi, uygulanan akım, elektriksel gerilim ve prosesin tipi). Özellikle elektrot tipi sistemin elektrokoagülasyonu mu yoksa elektrooksidasyonu mu tetikleyeceğini belirleyen unsurların başında gelmektedir. Elektrokimyasal prosesler, katı, sıvı ve gazlarda bulunan ve kirlilik oluşturan bileşenlere uygulanabilirlik, seyreltik ya da derişiklik, direkt veya indirekt indirgenme ve yükseltgenme, mikro litreden tonlarca litredeki hacimlere sahip miktarlara uygulanabilme gibi avantajlara sahiptir. Bu prosesler, diğer arıtım proseslerinde gerekenden daha düşük sıcaklık gerektirmesi, elektrotlar ve hücrelerdeki yan reaksiyonlarda, voltaj düşmesi veya akımın homojen dağılmaması durumunda meydana gelen güç kayıplarını en aza indirebilmesi gibi avantajlara da sahiptir (Güney 2013). Ayrıca elektrokimyasal proseslerin ortamdaki elektrolit ve elektrot ara yüzeyindeki heterojen reaksiyonlar üzerinden gerçekleşmesi sonucu, elektrodun yüzey büyüklüğü ve kütle transferinin sınırlı olması verimini etkilemektedir (Sarıkaya 1993).





Şekil 2.2. Elektrokimyasal hücrenin şematik dizaynı (Uygun 2003)

#### 2.7.4. Elektroliz

Elektrik iletkenliğinin olduğu elektrolitik ortamda bir bileşiği bileşenlerine ayırmak veya elektrolitik çözeltideki katyonları katot olarak seçilen eşya üzerine kaplamak amacıyla sıkça kullanılan bir elektrokimyasal yöntemdir.

Bir elektroliz hücresinden 1 Faraday (96500 kulon) elektrik akımı geçirildiğinde anottan 1 eşdeğer gram madde (anot metali iyonu) açığa çıkar (veya eşdeğeri kadar O<sub>2</sub> gazı veya yükseltgen formlar oluşur) ve katotta 1 eşdeğer gram madde indirgenir (veya eşdeğeri kadar H<sub>2</sub> gazı veya indirgen formlar oluşur).

$$M^+ = \frac{e * I * t}{96500} \quad (2.1)$$

Burada; e: Eşdeğer gram

I: Akım şiddeti (amper)

t: Elektroliz süresi (saniye)

Elektrokimyasal proseslerin çevre kirliliğini önlemede ve çözümede esas kriterleri şu şekildedir (Rajeshwar *et al.* 1994).

**Çok yönlülük:** Elektrokimyasal yükseltgenme ve indirgenme sonucu, çözeltilerin derişik hale getirilmesi veya seyreltilmesi yani faz ayırmaları gerçekleştirilir. Bunun sonucunda da birçok kirleticinin ve maddenin çok düşük konsantrasyonlara kadar bile ayrılması söz konusudur.

**Enerji etkinliği (verimliliği):** Elektrokimyasal prosesler elektrokimyasal olmayan proseslere göre daha düşük sıcaklıklara ihtiyaç duymaktadır (temel yanma gibi). Uygun elektrot ve hücre dizaynları sağlandığında enerji verimleri artırılabilir.

**Otomasyona uyumluluğu:** Sistemde kullanılan elektriksel birimler (voltaj ve akım) işlemin otomatik kontrolünü, otomasyonu ve veri alımını kolaylaştıran unsurlardır. Uygulanan potansiyel ya da akımı kontrol ederek reaksiyonların kontrolünü ele alırlar.

**Çevre ile etkileşimi:** Proseste reaktif olarak “Temiz Reaktif” denilen elektrot kullanılır ve başka bir reaktif gerektirmez. Bu olaylar yüksek sıcaklıkta gerçekleşir ve yüksek seçicilik özelliğine sahip olmasından ötürü ikincil ürünler oluşmaz. Arıtım ve geri kazanım yoluyla kirlilik problemleri ortadan kaldırılmış olur. İstenmeyen sıvı atıklar ve ya reaksiyon ürünleri üretimi, toksik ve tehlikeli madde kullanımı minimuma indirgenmiş olur (Özcan 2013).

**Maliyet verimi:** Elektrokimyasal teçhizatın üretimi, işletilmesi ve kontrolü daha kolaydır ve maliyeti düşüktür. Ayrıca çok daha küçük bir alanda gerçekleşirler. Oluşan atıklardan değerli kimyasal ve materyallerin geri dönüşüme kazandırılabilmesi de mümkündür (Özgürses 2003; Mollah *et al.* 2004).

Elektrokimyasal prosesler içme ve atıksu arıtımına yönelik Çevre Mühendisliğinde yaygın olarak 3 grupta gerçekleşmektedir:

- ✓ Elektrokoagülasyon
- ✓ Elektrokoksiasyon
- ✓ Elektroflotasyon

## 2.8. Elektrokoagülasyon Prosesinin Gelişimi

Elektrokoagülasyon atıksu arıtımı ilk olarak 1889'da İngiltere'de denenmiştir. Daha sonra ABD'de 1909'da demir ve alüminyum elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyon ile atıksuların arıtımı patenti alınmıştır.

Elektrokoagülasyon prosesi bir çok alanda kullanılmıştır, bunlardan bazıları şunlardır. Kağıt ve kağıt hamuru endüstrisi atıksularının, galvanize sanayi atıksularının, petrokimya endüstrileri atıksularının, boya ve tekstil endüstrisi atıksularının, yağ ve gres içeren atıksuların, deterjan ve maden üretim işlemlerinde ortaya çıkan atıksuların, çöp deponi sahası sızıntı sularının, zeytin karasuyunun, restoran atıksularının, gül proses sularının, yumurta prosesi atıksularının, kimyasal elyaf üretim prosesi atıksularının, deri endüstrisi atıksularının, elektro kaplama endüstrisi atıksularının, çamaşırhane atıksularının, kimyasal ve mekanik cilalama endüstrisi atıksularının, yarı iletken üretim prosesleri atıksularının, arsenik içerikli, bor içerikli ve nitrat içerikli atıksuların, süspanse partiküller, fenolik bileşikler, lignin ve EDTA gibi dirençli organik kirleticilerin arıtımında bakteri ve virüslerin giderilmesinde, içme ve kullanma sularının arıtımında kullanılmaktadır (İlhan 2006; Orkun 2007; Şimşeker 2009; Yılmaz 2009).

## 2.9. Elektrokoagülasyonun Teorisi

Elektrokoagülasyon prosenin mekanizmasında koagülasyon, adsorbsiyon, absorpsiyon, çöktürme ve flotasyon prosesleri kullanılarak kirleticilerin uzaklaştırılması sağlanır. Elektrokoagülasyon prosesinde sulu ortamda elektrik akımı ile destabilize olmuş kirleticiler çöktürme ve flotasyonla giderilmektedir. Elektrokoagülasyonda en çok tercih edilen elektrotlar alüminyum ( $Al^{+3}$ ) ve demir ( $Fe^{+3}$ ,  $Fe^{+2}$ )'dir (Bayar 2007). Bu elektrotla prosenin uygulama aşamasında suyla reaksiyona girerek  $Al(OH)_3$ ,  $Fe(OH)_2$

ve  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  gibi metal hidroksitleri oluşturmaktadır ve böylece arıtım başlamaktadır (Bakırcı 2014). Alüminyum ve demirin yanı sıra grafit ve titanyum gibi maddeler de elektrot olarak kullanılabilir.

Elektrokoagülasyon prosesi, çözünebilir anodun elektro-çözünmesi ile metalik hidroksit flokların oluşumu ile kirleticilerin uzaklaştırıldığı elektrokimyasal arıtım mekanizmasıdır (Koparal 2002). Yani adsorpsiyona elverişli olan metal hidroksitlerin sudaki farklı kirleticileri adsorbe ederek çöktürme yoluyla sudan uzaklaştırılmasıdır (Kabuk 2010).

Elektrokoagülasyonda genellikle 3 temel aşamada gerçekleşir;

- 1) Elektrotların yüzeyinde oluşan elektrolitik oksidasyon ile koagülantların oluşumu
- 2) Sıvı fazda koagülantların (metalik iyonların) oluşumu
- 3) Çözünebilir ya da koloidal kirleticilerin adsorpsiyon, koagülasyon, sedimentasyon veya flotasyon mekanizmaları ile giderilmesi (İlhan vd 2007).

Kirleticilerin, askıdaki partiküllerin destabilizasyonu ve emülsiyonların kırılması şu şekilde gerçekleşmektedir;

- Solüsyon içerisinde akımın geçmesi ve kullanılan elektrodun çözünmesi ile üretilen iyonların etkileşimi ile oluşan yüklü türler etrafındaki difüze çift tabakanın sıkıştırılması.
- Kullanılan elektrotların elektrokimyasal olarak çözünmesi ile üretilen zıt iyonların oluşturduğu, atıksu içerisindeki mevcut iyonik türlerin yük nötralizasyonu (Bu zıt iyonların, elektrostatik partiküllerin içsel itme kuvvetini azaltmasından dolayı Van der Waals kuvvetleri baskın hale gelerek koagülasyon prosesini etkin hale getirir).
- Flok yapısı ve koagülasyon sonucundaki flok oluşumu, kompleksleşmeyen koloidal partikülleri yakalayan ve köprü kuran çamur tabakası oluşumu (Mollah *et al.* 2001; Solak 2013).

## 2.10. Gerçekleşen Reaksiyonlar

Temel bir elektrokoagülasyon reaktörü bir anot ve bir katot olmak üzere iki ayrı hücreden oluşur. Bu hücrelere elektrik potansiyeli uygulandığında anot yüzeyinde oksidasyon, katot yüzeyinde elementel metallerin indirgenmesi gerçekleşir.

Alüminyum elektrot kullanıldığında

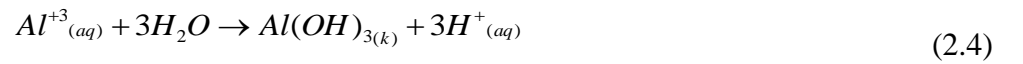
Katotta;



Anotta;



Çözeltideki çözünmüş oksijen ile;



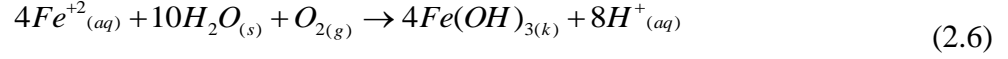
reaksiyonları gerçekleşmektedir. Bu reaksiyonlardan da anladığımız üzere gazlar, suyun ve metal bozunmasının elektrolizi boyunca katotta üretilir ve sonuçta floklar su yüzeyinde yüzen parçacıklara dönüşür.

Demir elektrot kullanıldığında

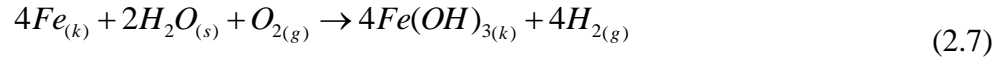
Anotta;



Çözeltide;



Toplam reaksiyon ise;



Şeklinde gerçekleşmektedir. Yukarıdaki reaksiyonlara ilaveten elektrokoagülasyon hücresinde aşağıdaki reaksiyonlar da gerçekleşebilir;

- ✓ Atıksudaki kirleticilerin katodik indirgenmesi
- ✓ Koloidal partiküllerin koagülasyonu
- ✓ Çözeltideki iyonların elektroforetik taşınımı
- ✓ Koagüle olmuş partiküllerin elektrotlarda oluşan  $O_2$  ve  $H_2$  gazları yardımı ile elektroflotasyonu
- ✓ Metal iyonlarının katotta indirgenmesi
- ✓ Diğer elektrokimyasal ve kimyasal prosesler

Bu reaksiyonlardan da anladığımıza göre elektrokoagülasyon; yumaklaşma ve yüzdürme işlemlerinin bir bileşimidir. Katottan çıkan hidrojen gazı kabarcıkları, oluşan yumaklara yapışarak onların yüzeye iletilmesini sağladığından elektrokoagülasyon sırasında elektroflotasyonun da gerçekleştiğini anlarız (Jiang *et al.* 2002).

Elektrokoagülasyonun verimini atıksuyun kirlilik yükü, partiküllerin büyüklüğü, suyun iletkenliği, pH sı, elektrot tipi, akım yoğunluğu ve elektroliz süresi değiştirmektedir.

Elektrokoagülasyon prosesinin elverişliliğini artırmak için elektrotların polaritesini değiştirmek gerekir. Ayrıca, iki elektrotlu elektrokoagülasyon hücreleri gerekli olan metal iyonların çözünmesi için daha büyük yüzey alanı gerekeceğinden atıksu arıtımı için uygun değildir. Bu prosesin performansının artırılması paralel ya da seri bağlı monopolar elektrotlar kullanılarak gerçekleştirilebilir. Paralel bağlı hücreler, iki paralel elektrot ve bir doğru akım güç kaynağı arasına yerleştirilmiş iletken metal plaka çiftlerinden oluşur. Seri bağlı hücrelerdeki monopolar elektrot düzenlemesi, elektriksel olarak birçok elektrota bağlı tek bir hücreye benzer. Elektrokoagülasyon prosesinde kullanılan iletken metal elektrotlara kurban elektrot denilmektedir. Kurban elektrotlar, anodun çözünme potansiyel farkını düşürür ve katotta elementel metalin indirgenmesini azaltır. Kurban elektrot ve katot aynı tür metalden yapılabileceği gibi farklı tür metallere de yapılabilir (Yılmaz 2009).

### **2.11. Elektrokoagülasyonun Avantajları**

- ❖ Kullanılan ekipmanlar ve işletme şartları basittir.
- ❖ Renksiz, kokusuz ve berrak sular elde edilebilir.
- ❖ Oluşan çamur yüksek oranda metal oksitler ve/veya hidroksitlerden oluştuğu için çöktürülebilir ve filtrelenebilir özelliğindedir. Böylelikle oluşan çamur miktarı azdır.
- ❖ Proseste oluşan floklar kimyasal floklara benzemektedir; daha büyük floklar olma özelliğinde ve daha az bağlı su içermektedirler. Asidik ortama dirençli ve stabildirler, filtrasyonla daha çabuk ayrılabilirler.
- ❖ Elektrokoagülasyon çıkış suyu daha az toplam çözünmüş katı madde içermektedir. Suların tekrar kullanılması istenildiğinde düşük toplam katı madde seviyesi geri kazanım giderininin daha düşük olmasına neden olur.
- ❖ Cihazların uyguladığı elektrik alan onların daha hızlı hareket etmelerini sağlayarak koagülasyonu kolaylaştırmaktadır. Böylece en küçük koloidal parçacıklar bile giderilebilir.
- ❖ Elektrokoagülasyonda ek bir kimyasal kullanılmamaktadır ve neticede yeni bir kirlilik oluşmamaktadır.

## 2.12. Elektrokoagülasyonun Dezavantajları

- ❖ Elektrotların çözünmesi sonucunda düzenli olarak yenilenmesi gerekmektedir (Jiang 2002).
- ❖ Bazen elektrik enerjisi pahalı olabilir.
- ❖ Elektrokoagülasyon prosesi ile kirletici maddelerin kısmi oksidasyonu gerçekleşmektedir.
- ❖ Arıtılansudaki demir ve alüminyum iyonlarının konsantrasyonları nispeten yüksektir.
- ❖ Katot üzerinde geçirimsiz tabaka oluşumu prosesin verimliliğini düşürebilir.
- ❖ Yüksek iletkenli atıksu gerekmektedir (Delipınar 2007).
- ❖ Bazı durumlarda jelâtinimsi hidroksit çözünme eğiliminde olabilir.
- ❖ EK reaktör dizaynı ve elektrot güvenilirliği konusunda sistematik katılımın eksikliği mevcuttur (özellikle kullanma ömrü dolan elektrotların pasivasyonu (metalim kimyasal olan aktif yüzeyinin aktivasyona zıt olarak çok daha az reaktif duruma dönüşmesi)) (Holt *et al.* 2005).

## 2.13. Elektrokimyasal Arıtımda Önemli İşletme Şartları

Elektrokimyasal arıtım proseslerinde verimi etkileyen bazı parametreler bulunmaktadır. Bu parametreler pH, iletkenlik, elektrot tipi, bekletme zamanı, kullanılan elektrot malzemesinin yüzey alanı ve akım yoğunluğu olarak incelenebilir.

### 2.13.1. Elektrot tipi

Elektrokimyasal arıtım türünü ve verimi doğrudan etkileyen bir parametredir. Uygun elektrot seçimi için; uygun elektrokatalitik ve elektrokimyasal özellikler, kimyasal ve elektrokimyasal kararlılık, fiziksel ve termal kararlılık, uygun fiziksel form ve imal, iyi elektrik iletkenliği, düşük aşırı gerilim, çevresel uygunluk, düşük maliyet faktörler dikkate alınmaktadır (Scott 1995). Elektrokoagülasyonda en yaygın demir, çelik ve



alüminyum elektrotlar kullanılmaktadır. Sebebi ise ucuz, kolay temin edilebilir olmaları ve etkinliklerinin kanıtlanmış olmasıdır (Chen *et al.* 2000 ; Güney 2013).

### **2.13.2. Elektrotların yerleşimi**

Elektrotların reaktör içerisindeki konumu kirletici giderim verimi açısından önemlidir. Monopolar ve bipolar elektrotlar kullanılarak seri ya da paralel bağlama tipleri ile farklı giderim verimleri sağlanabilmektedir. Elektrotlar arası mesafe arttığında üretilen iyonların hareketi yavaşlamakta ve flok oluşturma olasılığı artmaktadır (Daneshvar *et al.* 2004).

### **2.13.3. Akım yoğunluğu**

Akım verimi, gerçek elektrot tüketiminin teorik tüketime oranıdır. Elektrotların kullanım süresini etkilediğinden elektrokoagülasyon için önemli bir parametredir. Faraday kanununa göre teorik olarak devreden 1 F yük geçtiğinde bipolar elektrot kullanılan elektrokoagülasyon ünitesinde her anotta 9,0 g alüminyum çözünmektedir. Ancak gerçek elektrot tüketimi elektrokoagülasyon yan reaksiyonları nedeniyle bu teorik değerden atıksuyun özelliklerine ve işletme şartlarına bağlı olarak değişebilmektedir (Chen *et al.* 2000). Sistemde yüksek akım şiddeti verildiğinde işletme maliyeti artarken seçilen proses elektrokoagülasyon yöntemiye akım şiddetine bağlı olarak sistemde çamur oluşumu da artacaktır. Yüksek bir akım verimi sağlamak için akım yoğunluğu belirlenirken pH, sıcaklık, debi gibi işletme faktörleri de önemsenmelidir (Güney 2013).

### **2.13.4. pH**

pH, ortamdaki elektrokimyasal reaksiyonları doğrudan etkilediğinden çok önemli bir parametredir. Elektrokoagülasyon prosesine pH'ın etkisi, akım verimi ve metal hidroksitlerin çözünürlüğü ile ilişkilendirilir. Genelde alüminyum elektrotların kullanıldığı proseslerde akım verimi, nötrale göre asidik ve bazik ortamlarda daha

yüksektir. Elektrokoagülasyon prosesi ile arıtmadan sonra çıkış pH'ı asidik karakterli atıksu için artarken, bazik karakterli atıksu için azalır. Bu durumu prosesin avantajlarından görebiliriz. Asidik şartlardaki pH'ın artışı, katot üzerindeki hidrojen oluşumundan kaynaklanmaktadır. Anot çevresinde  $Al(OH)_3$  oluşumu  $H^+$  iyonlarını serbest bırakarak pH'ın düşmesine sebep olmaktadır. Elektrokimyasal arıtım proseslerinde giderim verimleri başlangıç pH değerlerine bağlı olduğu kadar çıkış suyu pH değerlerine de bağlıdır.

#### **2.13.5. Bekletme zamanı**

Bekletme zamanı tüm diğer arıtım proseslerinde olduğu gibi elektrokimyasal arıtım proseslerinde de etkilidir. Yapılacak çalışmalarda, bekletme zamanının optimizasyonu istenir. Elektroliz süresinin artması durumunda iyon konsantrasyonunda ve iyonların hidroksit floklarında artış meydana gelmektedir (Daneshvar *et al.* 2004; Güney 2013).

#### **2.13.6. İletkenlik**

Atıksuyun iletkenliğinin artırılması enerji ve elektrot tüketimini azaltmaktadır. Böylece iletkenlik artınca proses verimi de artmaktadır (Koby *et al.* 2008).

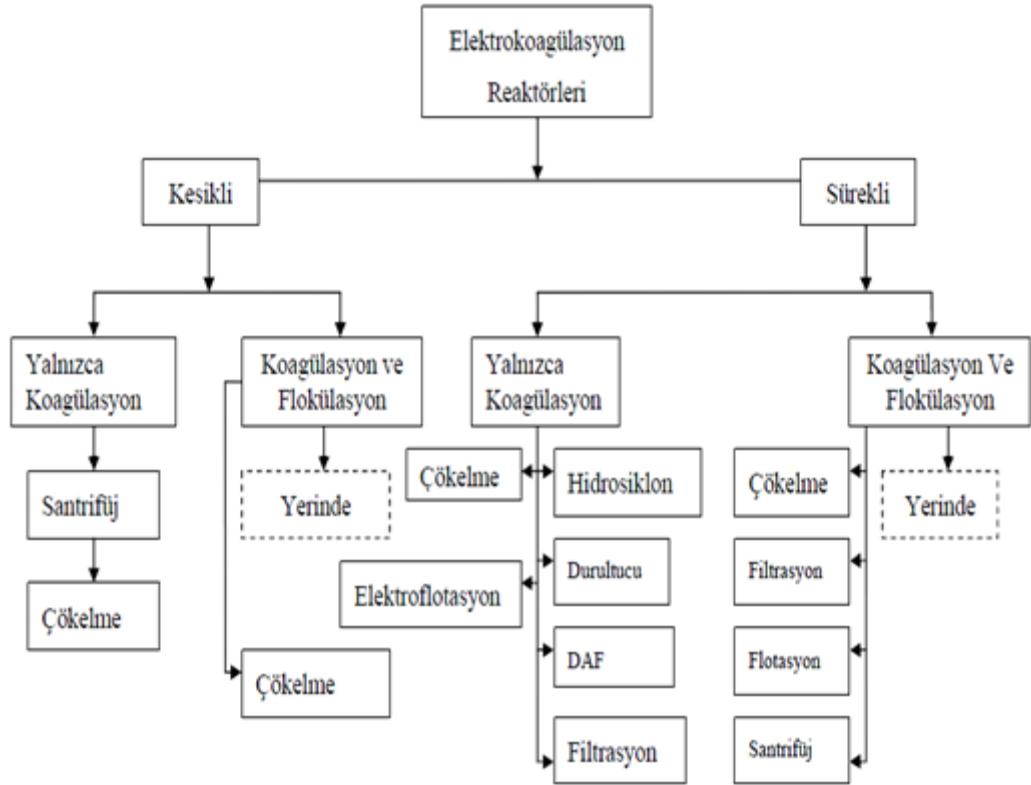
#### **2.13.7. Sıcaklık**

Elektrokoagülasyon reaksiyon hızı çözeltinin sıcaklığı arttığı zaman artmaktadır. Sıcaklık  $27^{\circ}C$ 'yi geçtiği zaman üretilen iyonların hareketi artmakta ve bu iyonların yumaklaşma ve metal hidroksit flokları oluşturması azalmaktadır. Böylece prosesin verimi düşmektedir (Daneshvar *et al.* 2004; Chen 2004; Güney 2013).

### **2.14. Elektrokimyasal Reaktör Çeşitleri**

Elektrokoagülasyon ünitelerinin dizaynında göz önünde bulundurulması gerekenler;

- 1) Kesikli ya da sürekli işlem
- 2) Elektrolitik gaz kabarcıklarının rolü
- 3) Su içindeki kirleticilerin sudan ayrılması



**Şekil 2.3.** Elektrokoagülasyon reaktör tiplerinin sınıflandırılması

Günümüzde elektrokoagülasyon için çok fazla reaktör dizayn çeşidi yoktur. Bilinen elektrokimyasal reaktörleri şu şekilde gruplandırabiliriz.

- 1) Karıştırılmalı tank reaktörler
- 2) Paralel plakalı reaktörler
- 3) Kapiler (kılcal) aralıklı reaktörler
- 4) Partikül elektrotlu reaktörler

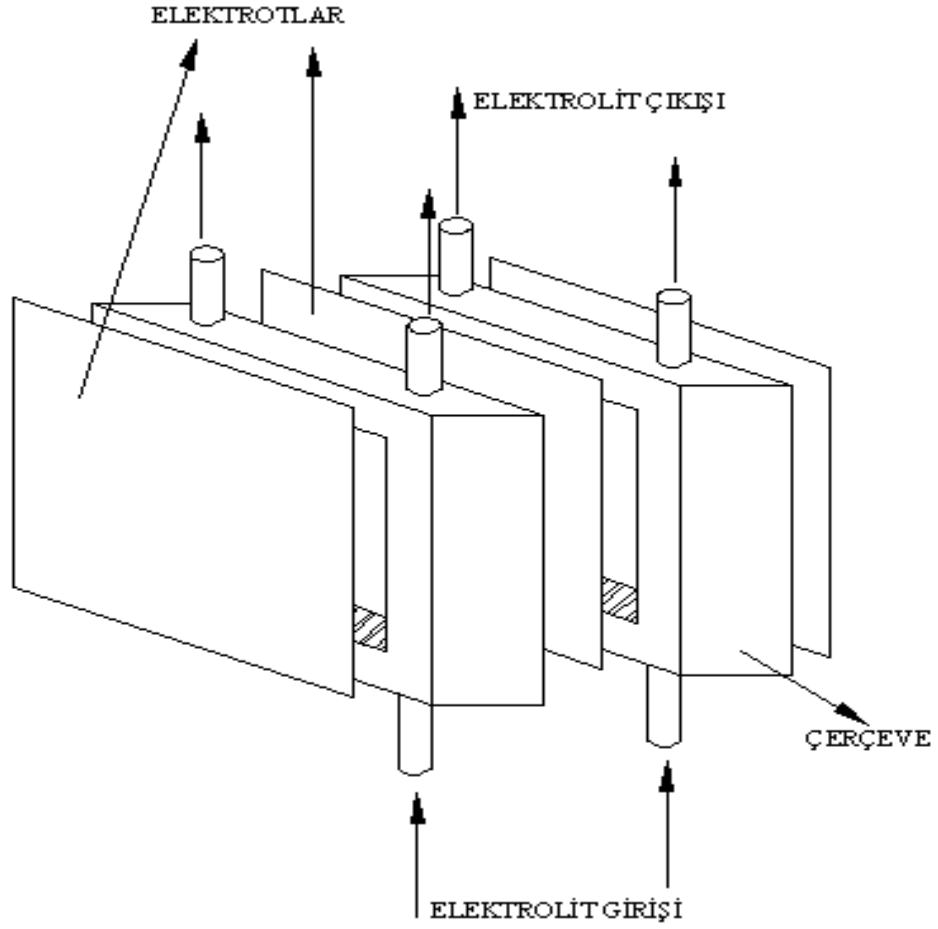
- a. Sabit yataklı reaktörler
- b. Süspansiyon yataklı partikül elektrotlu reaktörler
- c. Akışkan yataklı partikül elektrotlu reaktörler.

#### **2.14.1. Karıştırılmalı tank reaktörler**

Bu reaktörler bekletme süresinin uzun olduğu kesikli prosesler için kullanılmaktadır. Karıştırılmalı tank reaktörlerde ısı kontrolü dıştaki ceketten yapılabileceği gibi, reaktör içine yerleştirilecek olan spirallerden soğuk su geçirilerek iki şekilde yapılabilir. Reaktör malzemesi olarak genellikle tepkime vermeyecek katı malzemeler kullanılır. Bazı durumlarda ise reaktörün iç duvarı, elektrotlardan biri olacak şekilde iletken bir malzemedir de yapılabilir. Anottaki yükseltgenme ürününün katottaki indirgenme tepkimesi ile (veya tersi) etkileşmediği durumlar dışında diyafram gereklidir. Elektrotlar tel, yuvarlak ya da yassı çubuk, plaka veya tel kafes biçiminde dizayn edilebilirler. Elektrotlar arası uzaklık, hücre direncini ve oluşacak ısıyı azaltmak için küçük tutulmalıdır (Yıldız 2003; Yılmaz 2009).

#### **2.14.2. Paralel plakalı reaktörler**

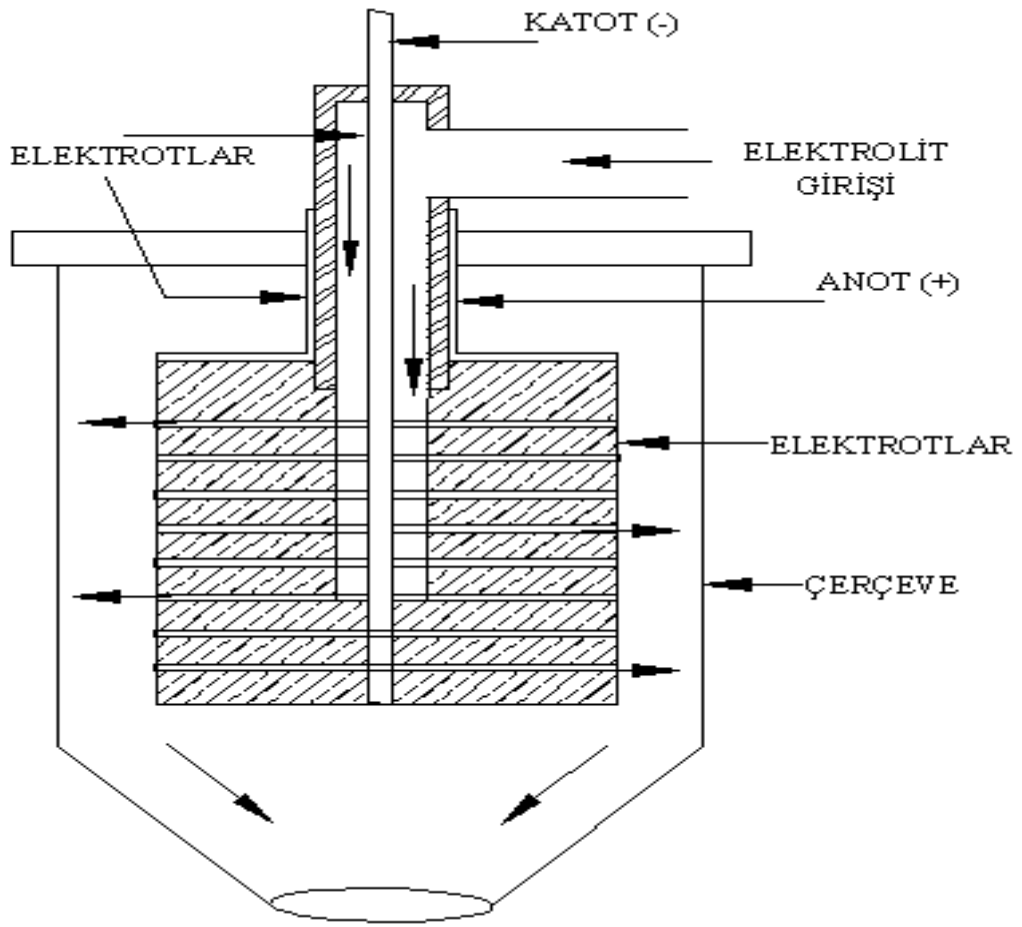
Bu reaktörler, endüstride büyük ölçekli sentezlerde sıklıkla kullanılan, filtre pres reaktörler olarak da bilinirler. Yalıtkan çerçevelerle birbirlerinden ayrılmış ve elektrolit için bölmeler oluşturacak şekilde yan yana konulmuş plaka elektrotlardan oluşmaktadırlar. Bu tip reaktörlerde kullanılan düzlemsel plakalar sabit elektrot gerilimi sağlamaktadır. Paralel plakalı reaktörlerde sürekli işlem kolay olmasına karşın reaktör içindeki sıcaklık kontrolünü sağlamak zordur. Bu reaktörler yüksek basınç altında çalışabilmelerine rağmen bakım ve onarımları zordur. Ayrıca iyi bir ısı aktarımı için akışkan hızlarının yüksek olması gerektiğinden pompalama maliyeti artmaktadır (Yıldız 2003; Yılmaz 2009)



**Şekil 2.4.** Paralel plakaların kullanıldığı elektrokimyasal hücre

### 2.14.3. Kapiler (Kılcal) aralıklı reaktörler

Bu tip reaktörlerde elektrotlar arası mesafenin küçültülmesi çözeltideki gerilim düşüşlerini en aza indirmektedir. Böylece daha az enerji tüketimi ile daha iyi hacim zaman verimi elde edilebilmektedir. Diyaframsız çift kutuplu olan bu reaktörler özellikle iletkenliği düşük olan çözeltilerde kullanılmaktadır. Bu reaktörlerde çözelti pompalama maliyetinin yüksek olmasına karşın, genel enerji tüketiminin içerisindeki payının az olması, ekonomik açıdan prosese yük getirmemektedir (Yıldız 2003; Yılmaz 2009).



Şekil 2.5. Kapiler aralıklı plakaların kullanıldığı elektrokimyasal hücre

#### 2.14.4. Partikül elektrotlu reaktörler

Üç temel grupta incelenen bu reaktörlerin en büyük özelliği elektrot olarak partiküllerin kullanılarak daha uygun ısı ve kütle aktarımının sağlanabilmesidir.

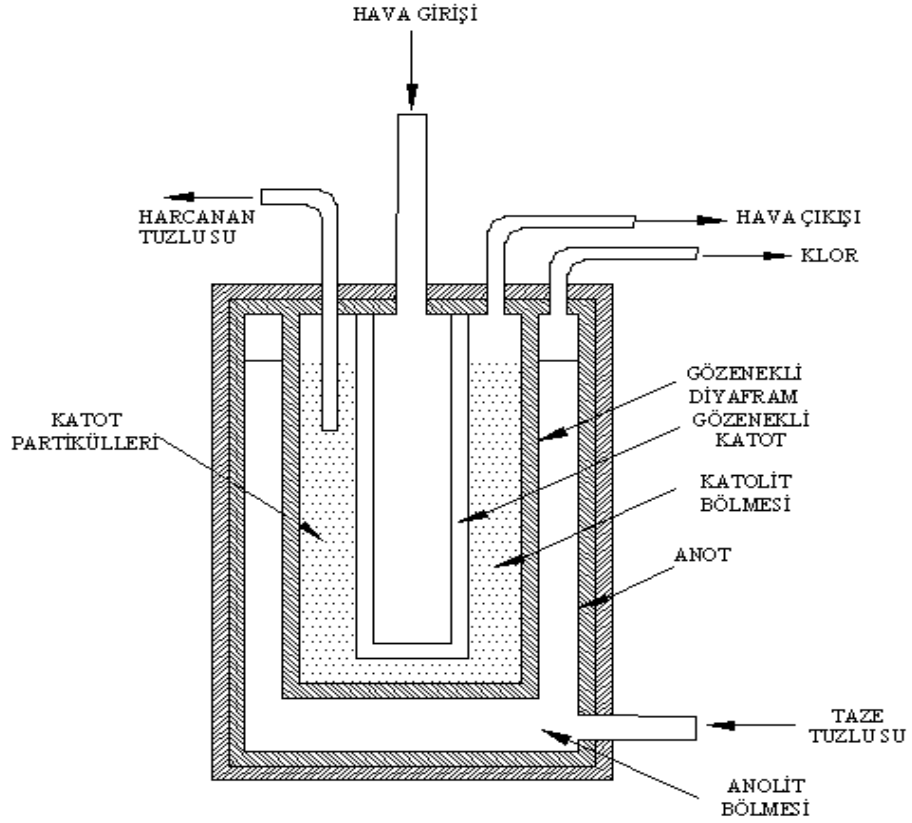
##### a. Sabit yataklı, partikül elektrotlu reaktörler

Reaktörler, yalıtkan malzemelerle birbirlerinden ayrılmış iki kutuplu taneciklerden ve her iki uça bulunan elektrot bağlantılarından oluşmuştur. Bu tip reaktörler, özellikle çözelti iletkenliğinin düşük fakat anolit ve katolitin birbiri ile karışmasının sakıncalı olmadığı durumlarda tercih edilmelidir. Çok fazlı proseslere uygun olması ve yüksek

kütle aktarım özelliğine sahip olması avantajlarıdır. Ayrıca bu tip reaktörlerde oluşabilecek by-pass elektrolit geçişleri, akımın düşmesine sebep olmaktadır. Bu tip reaktörlerde elektrolit, akış hızı düşürülerek reaktöre üstten verilirse ve elektrotlara ulaşmadan bir dağıtıcıdan geçirilerek ince bir film oluşturması sağlanırsa, iki kutuplu damlamalı reaktör elde edilmiş olur. Bu reaktörler için akış hızının yanı sıra reaktörün ve elektrotların boyutları da değişken olarak incelenmiş, reaktör performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır (Yıldız 2003; Yılmaz 2009).

#### **b. Süspansiyon yataklı, partikül elektrotlu reaktörler**

Elektrot bölmelerinin birinde veya ikisinde süspansiyon halinde iletken partiküller bulunan reaktörlerdir. Reaktör, bir cam veya polipropilen silindirden oluşmaktadır. Katot ve anot, bir sinter cam veya asbest diyaframla ayrılmıştır. Katolit bölmesine eş merkezli, gözenekli grafit katot yerleştirilmiştir. Hücrenin iç duvarı, anot görevini yapan, karbon veya platinlenmiş grafitle kaplanmıştır. Katodun içine oksijen veya hava verilir. Katot ve diyafram arasına grafit partiküller yerleştirilmiştir. Bu partiküller çözelti ile süspansiyon oluştururlar (Yıldız 2003; Yılmaz 2009).

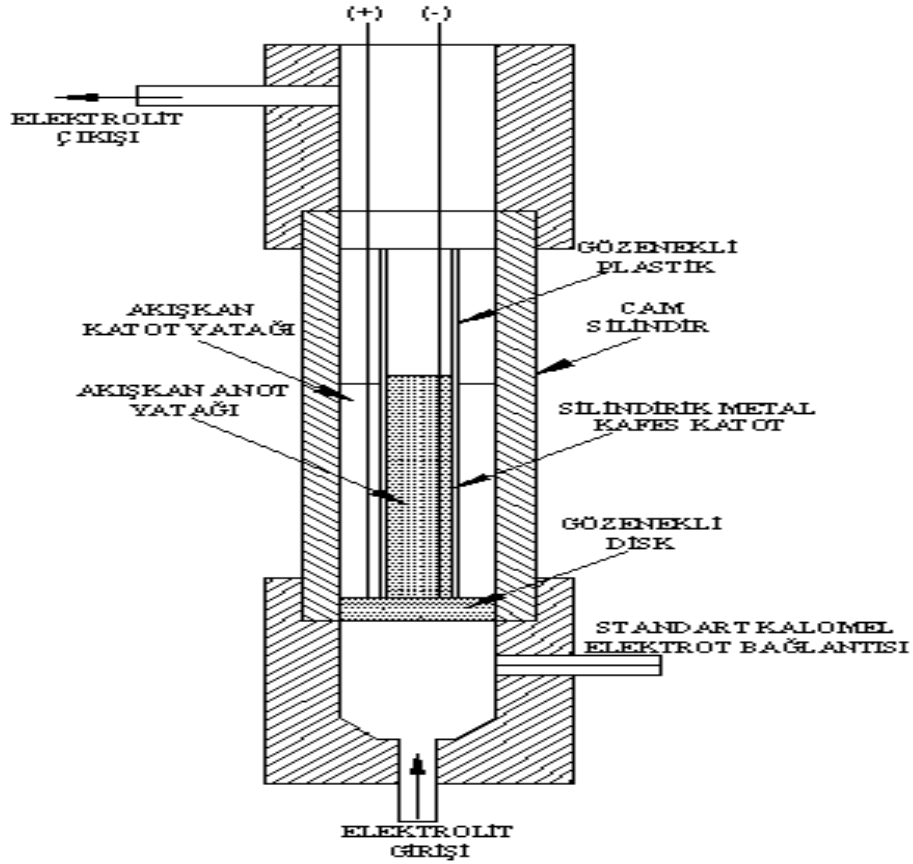


**Şekil 2.6.** Süspansiyon yataklı, partikül elektrotların kullanıldığı elektrokimyasal hücre

### c. Akışkan yataklı partikül elektrotlu reaktörler

Bu reaktörler bir veya iki elektrot veya elektrolitin yukarı doğru akışı ile akışkan hale getirilmiş (%10-20 genişleme), metal veya metal kaplanmış partiküllerin yatağından oluşmuştur. Bu tip reaktörler süspansiyon yataklı reaktörlerin geliştirilmiş şeklidir. Akışkan yatak, elektrot alanının hücre hacmine oranının yüksek olmasını sağlar. Bu reaktörde derişik çözeltilerle yapılan çalışmalarda, partiküllerin prosesi durduracak kadar birikmemelerine dikkat edilmelidir (Yıldız 2003; Yılmaz 2009).





Şekil 2.7. Akışkan yataklı partikül elektrotların kullanıldığı elektrokimyasal hücre

### 2.15. Konu ile İlgili Yapılmış Çalışmalar

Günümüzde elektrokoagülasyon ile arıtım yöntemi birçok farklı tipte atıksuyun arıtımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yaygın kullanım alanı birçok farklı araştırmanın yapılabilmesi için taban oluşturmuştur.

Tekstil atıksularının arıtımında, endüstriyel atıksulardan metal gideriminde, maden atıksularından metal gideriminde, yağ içeren atıksuların arıtımında, sızıntı sularından organik madde gideriminde, boya endüstrisi atıksularının gideriminde, arsenik gideriminde, yer altı suyu temizlenmesinde, içme suyu arıtımında, evsel atıksu arıtımında, gıda endüstrisinde, çamaşırhane atıksularında, kağıt endüstrisi atıksularında, petrol ve gaz rafinerileri atıksularında, membran filtrasyonu öncesi ön arıtımda, elektrokoagülasyon yöntemi kullanım alanı bulmaktadır.

Mavrov ve arkadaşları (2005) te yaptıkları araştırmada, endüstriyel atıksularda bulunan ağır metallerin elektrokoagülasyonla birlikte mikro filtrasyon uygulanarak giderilmesini incelemişlerdir. Çalışmada; su içinde bulunan As ve Se ağırlıklı olmak üzere, Cd, Zn, Cu ve Pb giderimi de incelenmiştir. Çalışma sonucunda; 4,8 mA/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğunda 20 dakikalık bir arıtım periyodunda giderim verimleri; Se: %98,7, As: %99,9, Cu ve Pb: %98,0, Zn ve Cd: %99,9 şeklinde olmuştur.

Ağır metal ve boya ilacı gideriminde elektrokoagülasyon yaygın olarak tercih edilmektedir. Literatürde renk giderimi ile ilgili yapılan bir çalışmada tekstil atıksuyu ile 100 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğunda 15 dakikalık bir reaksiyon süresi sonunda %99.9 oranında bir renk giderimi elde edilebilmiştir (Kobyas *et al.* 2011).

Sızıntı suyu ile ilgili yapılan bir çalışmada ise, katot bakır olmak üzere demir ve alüminyum anotlar denenerek KOİ giderimleri belirlenmiştir. Sızıntı sularında 10 V ile 20 dakika süren bir çalışmada Fe-Cu elektrot çifti ile %41,8 TOK giderimi sağlanırken bu değer Al-Cu elektrot çifti için %39,6 olarak belirlenmiştir (Tsai *et al.* 1997).

Yapılan bir başka çalışmada 500 ml numune hacminde Fe ve Al elektrotlar kullanılarak sızıntı suyunun arıtılabilirliği karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda Fe elektrotlar kullanıldığında %75 KOİ, %65 TOK, %95 renk ve %98'de krom giderimi sağlanmıştır.

Al elektrotlar kullanıldığında ise %80'lik bir KOİ giderimi elde edilirken, %70 TOK, %97 renk ve %90 krom giderimi elde edilebilmiştir. Bu sonuçlar sızıntı suyu arıtımında elektrokoagülasyon yönteminin uygulanabileceğini ve alüminyum elektrotların sızıntı suyu için genel itibariyle daha verimli sonuçlar verdiğini göstermektedir (Öztürk vd 2005).

Borlu atıksuların arıtımı için yapılan bir çalışmada ise 50 dakikalık süre sonunda 30 mA/cm<sup>2</sup> akımda bor giderimi %92-96 seviyelerinde bulunmuştur. Gerekli optimizasyon sonrasında ise akım yoğunluğu 20 mA/cm<sup>2</sup> seçilmiş ve 20-30 dakika süre sonunda

%90'lık bir bor giderimi söz konusu olmuştur. Bu şartlar için elektrik ihtiyacı ise 2,5-4,5 kW-sa/m<sup>3</sup> atıksu olarak belirlenmiştir (Sayiner 2003).

Literatürde yağlı atıksularla yapılan bir çalışmada optimum işletme şartları belirlenirken akım yoğunluğu 10-14 A/m<sup>2</sup> olarak ayarlanıp 30 dakikalık bir arıtım uygulanmıştır. Elektrokoagülasyon performansı incelenirken pH'ın 3-10 aralığında elektrokoagülasyon prosesi için çok önemli bir etkisi olmadığı belirlenmiştir. Optimum işletme şartlarında yapılan arıtım sonucunda ise %95 oranında bir yağ giderimi ve %75 oranında ise KOİ giderimi sağlanabilmiştir (Xu and Zhu 2004).

Benzer konuda İnan vd (2004), zeytinyağı endüstrisi atıksularını farklı pH, elektrot tipi ve akım şartları altında arıtılabilirliğini araştırmışlardır. pH:6.2'de, 10 mA/cm<sup>2</sup>'lik akım yoğunluğu, 12 V voltaj ve 10 dakikalık elektroliz süresi sonrasında Al ve Fe elektrotlar için KOİ giderimleri, %52 ve %42 olarak, renk giderimleri ise, %90 ve %97 olarak bulunmuştur.

Feng *et al.* (2007), deri sanayi atıksularının elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmalarında düşük akım yoğunluğu (<1A) ve alüminyum-çelik elektrotlarını kullanmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda çelik elektrotların sülfür gideriminde Al elektroda göre daha verimli olduğu görülmüştür. Bu çalışma sonucunda %68 KOİ, %43,1 Amonyak, %55,1 TOK, %96,7 Sülfür, %84,3 renk giderimi gerçekleşmiştir.

Endüstriyel atıksu arıtımı için kirletici türü ve miktarının değişken olması ve atıksu debisinin sürekli değişken olmasından dolayı atıksu özelliklerine bağlı olarak arıtım tipinin belirlenmesi gerekmektedir. EK prosesi ile arıtılabilecek kirletici türü yağ ve emülsiyonlardan, organik maddelere, inorganik kirleticilerden partiküler maddelere ve mikroorganizmalara kadar geniş bir aralık içerdiğinden dolayı endüstriyel atıksu arıtımı için EK prosesi çok uygun bir arıtım yöntemidir ve son yıllarda bu tür atıksuların arıtımında sıklıkla kullanılmaktadır. Endüstriyel atıksu miktarındaki değişime göre kurulacak EK prosesinde reaktör sayısı eş zamanlı değiştirilebilir veya akış hızı

değişimi ile sabit reaktör sayısı ile atıksu arıtımı gerçekleştirilebilir. Endüstriyel atıksu arıtımında kullanılan EK prosesi için hazırlanmış Çizelge 2.4. incelendiğinde literatürde yapılan çalışmalardan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir;

- 1- Endüstriyel atıksu arıtımında sık kullanılan elektrot türü alüminyum ve demir elektrottur.
- 2- EK prosesi farklı endüstriyel atıksuların arıtımı için uygun bir prosestir.
- 3- EK prosesi ile atıksu özelliğine bağlı olarak eş zamanlı flotasyon, adsorbsiyon ve oksidasyon işlemleri gerçekleştirilebilir.

**Çizelge 2.4.** Endüstriyel atıksu arıtımı için literatürde EK prosesi ile gerçekleştirilen örnek çalışmalar

Çalışma	Kirletici	Elektrot	Verim, %	Yazar
Boron removal by electrocoagulation and recovery	Bor	Al	99,7	Isa <i>et al.</i> (2014)
An empirical model for kinetics of boron removal from boron containing wastewaters by the electrocoagulation method in a batch reactor		Al	99	Yılmaz <i>et al.</i> (2008)
Evaluation of boron removal by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes,		Al	95	Sayiner <i>et al.</i> (2008)
		Fe	95	
Electrochemically assisted coagulation for the removal of boron from water using zinc anode		Zn	93,2	Vasudevan <i>et al.</i> (2013)
Treatment of potable water containing low concentration of arsenic with electrocoagulation: Different connection modes and Fe–Al electrodes	Arsenik	Al	93,5	Kobyas <i>et al.</i> (2011)
		Fe	94,1	
Removal of arsenic from aqueous solution using electrocoagulation		SS	94	Balasubramanian <i>et al.</i> (2009)
Studies on the electrochemical decontamination of wastewater containing arsenic		SS	98	Lakshmi patiraj <i>et al.</i> (2010)

Çizelge 2.4 (devam)

Direct red 81 dye removal by a continuous flow electrocoagulation/flotation reactor	Boya	Al	90,2	Zodi <i>et al.</i> (2013)
Binary system dye removal by electrocoagulation from synthetic and real colored wastewaters		Al	98	Pajootan <i>et al.</i> (2012)
Optimization of Bomaplex Red CR-L dye removal from aqueous solution by electrocoagulation using aluminum electrodes		Al	99	Yıldız (2008)
Removal of Acid Brown 14 in aqueous media by electrocoagulation: Optimization parameters and minimizing of energy consumption		Al	91	Parsa <i>et al.</i> (2011)
Separation of cottonseed oil from oil–water emulsions using electrocoagulation technique	Yağ	SS	99	Fouad (2014)
Treatment of petroleum refinery sulfidic spent caustic wastes by electrocoagulation	Sülfit	Al	60	Hariz <i>et al.</i> (2013)
		Fe	84	
	KOİ	Fe	80	
Electrocoagulation of heavy metals containing model wastewater using monopolar iron electrodes	Cu	Fe	95	Aji <i>et al.</i> (2012)
	Ni		95	
	Zn		95	
	Ma		72,6	
Optimization of baker's yeast wastewater using response surface methodology by electrocoagulation	Renk	Al	88	Gengec (2012)
	KOİ		49	
	TOK		49	
Electrocoagulation of yogurt industry wastewater and the production of ceramic pigments from the sludge	KOİ	Fe	84	Un and Ozel (2013)
Removal of organic pollutants in industrial wastewater with an integrated system of copper electrocoagulation and electrogenerated H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	KOİ	Cu	78	Díaz <i>et al.</i> (2014)
	BOİ		81	
	Renk		97	
	F. koliform		99,9	
Treatment of the industrial wastewaters by electrocoagulation: Optimization of coupled electrochemical and sedimentation processes	KOİ	Al	70	Zodi <i>et al.</i> (2010)
	Top. Katı		50	
	Bulanıklık		90	

Elektrokoagülasyon sistemi içme suyu arıtımında sertlik, arsenik, florür, nitrat ve doğal organik maddeler gibi pek çok kirleticinin giderimi için değişik çalışma grupları tarafından kullanılmıştır. Bu çalışmalarda genellikle alüminyum ve demir elektrotlar kullanılmıştır. Bu elektrotlar içme suyu arıtımında sık uygulama alanı bulan kimyasal koagülasyon prosesinde kullanılan alüminyum ve demir tuzlarının karşılıklarıdır. EK ile yapılan çalışmalarda farklı kirletici giderimleri gerçekleştirilse de her bir kirletici giderim verimlerinin yüksek olduğu Çizelge 2.3'ten görülmektedir. Bu sonuçlarda EK prosesinin içme suyu arıtımı için uygun bir proses olduğunu göstermektedir. İçme suyu arıtımı için EK prosesi kullanıldığında çalışma elektrotuna bağlı olarak uygun pH aralığı belirlendiğinde, oluşturulan flok miktarı çok yüksek olduğundan koagülantın iyon formunda su ortamında standart değerlerin de altında bulunduğu tespit edilmiştir. Su ortamında her geçen gün kirlilik çeşidinin ve miktarının arttığı göz önünde bulundurulduğunda, EK prosesinin farklı kirletici tiplerinin arıtımında gösterdiği başarı, prosesin işletilmesinin kolaylığı ve ucuzluğu nedeni ile içme suyu arıtımı için çok uygun bir sistem olduğu görülmektedir. Belirtilen literatür çalışmalarının yakın zamanda yapılmış olması da EK prosesinin güncel, başarılı ve uygulama alanı geniş bir proses olduğunun kanıtıdır.

**Çizelge 2.5.** İçme suyu arıtımı için literatürde EK prosesi ile gerçekleştirilen örnek çalışmalar

Çalışma	Kirletici	Elektrot	Verim, %	Yazar
Performance evaluation of electrocoagulation process using iron-rod electrodes for removing hardness from drinking water	Sertlik	Fe	97,4	Malakootian <i>et al.</i> (2010)
Removal of Fe(II) from tap water by electrocoagulation technique	Fe(II)	Al	99,2	Ghosh <i>et al.</i> (2008)
Factors influencing arsenic and nitrate removal from drinking water in a continuous flow electrocoagulation (EC) process	Arsenik	SS	75	Kumar and Goel (2010)
	Nitrat		84	
Treatment of fluoride containing drinking water by electrocoagulation using monopolar and bipolar electrode connections	Fluoride	Al	92	Ghosh <i>et al.</i> (2008)
Removal of arsenic from drinking water by the electrocoagulation using Fe and Al electrodes	Arsenik	Fe	93,5	Kobyas <i>et al.</i> (2011)
		Al	95,7	
Combined electrocoagulation and electroflotation for removal of fluoride from drinking water	Fluoride	Al	78	Zuo <i>et al.</i> (2008)
Effects of water chemistry on arsenic removal from drinking water by electrocoagulation	Arsenik	Fe	99	Wana <i>et al.</i> (2011)
Removal of nitrates from groundwater by electrocoagulation	Nitrat	Al	98	Lacasa <i>et al.</i> (2011)
		Fe	92	
Effect of electrochemical cell structure on natural organic matter (NOM) removal from surface water through electrocoagulation (EC)	TOC	Al SS	78	Vepsäläinen <i>et al.</i> (2012)
Removal of natural organic matter and arsenic from water by electrocoagulation/flotation continuous flow reactor	TOC	Al	78	Mohora <i>et al.</i> (2012)
	Arsenik		85	

Evsel atıksular içerdikleri kirlilik yüklerinden dolayı alıcı ortamlara direk deşarj edilemezler. Ülkemizde ve dünyada evsel atıksuların arıtım için sık kullanılan proseslerin başında biyolojik arıtım prosesleri gelmektedir. Elektrokimyasal arıtım proseslerinin çok yakın geçmişte uygulama alanı bulması ve bilimsel olarak evsel atıksuların bu proses ile yeterince incelenmemiş olması biyolojik arıtım yöntemlerinin üstünlüğünün devam etmesini sağlamaktadır. Son zamanlarda literatürde, laboratuvar ölçekli EK proseslerinin evsel atıksu arıtımı için kullanıldığı görülmektedir. Evsel artık suda bulunan mikroorganizma, bulanıklık, AKM, partiküler maddeler, amonyak, fosfor ve organik madde miktarının EK prosesi ile ilgili yönetmelik deşarj limitlerine indirilmesi için çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar incelendiğinde, her bir kirletici tipi için giderim verimlerinin çok yüksek olduğu görülmektedir. Evsel atıksu giderimi için gerçekleştirilen çalışmalarda kullanılan anot malzemesi BDD (bor kaplı elmas) ve DSA (boyutsal kararlı anot) elektrottur. Bu tür elektrotlar çözünür özellik göstermediğinden dolayı su ortamında elektriksel alanda oksidasyonun gerçekleşmesini sağlarlar. Belirtilen elektrot malzemelerinin elektriksel oksidasyon kapasiteleri son derece yüksek olmasına rağmen maliyetleri oldukça pahalıdır. Mikroorganizma giderimi laboratuvar ölçekli reaktörlerde gerçekleştirilebilse bile bu tür sistemlerin pilot tesis veya gerçek uygulama ölçeğinde kurulması yatırım maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı çok tercih edilmez. Çizelge 2.4 incelendiğinde literatürde evsel atıksu giderimi için EK prosesinin kullanıldığı çalışmaların çoğunda anot malzemesi olarak BDD, DSA, Ti, RuO<sub>2</sub>/Ti ve SS gibi oksidasyon kapasitesi yüksek malzemeler incelenmiştir. Bu çalışmaların bazılarında alüminyum bipolar elektrotlar kullanılarak hem oksidasyon hem de koagülasyon mekanizmalarının eş zamanlı gerçekleşmesi sağlanmıştır. Evsel atıksuların EK prosesi ile giderimi ile ilgili çalışmalar yukarıda belirtilen kısıtları olmasına rağmen literatürde yer almaya başlamıştır. Bu çalışmada literatürdeki kısıtlar göz önüne alınarak daha uygulanabilir, ilk yatırım ve işletme maliyetleri daha düşük, elektrot malzemesi olarak alüminyum ve demirin kullanılacağı sistemler geliştirilerek evsel atıksuyun arıtımına etki eden parametreler incelenecektir.



**Çizelge 2.6.** Evsel atıksu arıtımı için literatürde EK prosesi ile gerçekleştirilen örnek çalışmalar

Çalışma	Kirletici	Elektrot	Verim, %	Yazar
Effect of bipolar electrode material on the reclamation of urban wastewater by an integrated electrodisinfection/electrocoagulation process	E.coli	BDD SS	100	Llanos <i>et al.</i> (2014)
	Bulanıklık		92	
Optimization of an integrated electrodisinfection/electrocoagulation process with Al bipolar electrodes for urban wastewater reclamation	E.coli	BDD, DSA SS	100	Cotillas <i>et al.</i> (2013)
	Bulanıklık		100	
Grey water treatment by a continuous process of an electrocoagulation unit and a submerged membrane bioreactor system	Bulanıklık	Al	97	Melhem and Smith (2012)
	Renk		37	
	AKM		100	
	KOİ		89	
Phosphorus removal from spiked municipal wastewater using either electrochemical coagulation or chemical coagulation as tertiary treatment	Fosfor	SS	98	Tran <i>et al.</i> (2012)
Electrochemical technologies for the regeneration of urban wastewaters	Fosfor	BDD	100	Rodrigo <i>et al.</i> (2010)
	KOİ	SS	100	
	Fosfor	Al	100	
	KOİ		70	
Electrochemical sulfide removal from synthetic and real domestic wastewater at high current densities	Sülfit	Ti SS	77	Pikaar <i>et al.</i> (2011)
Investigation of the electro-coagulation treatment process for the removal of total suspended solids and turbidity from municipal wastewater	AKM	SS SS	95	Bukhari (2008)
	Bulanıklık		80	
	Partiküler BOİ		99	
	Amonyak		98	

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Atıksuyun Temini ve Özelliklerinin Belirlenmesi

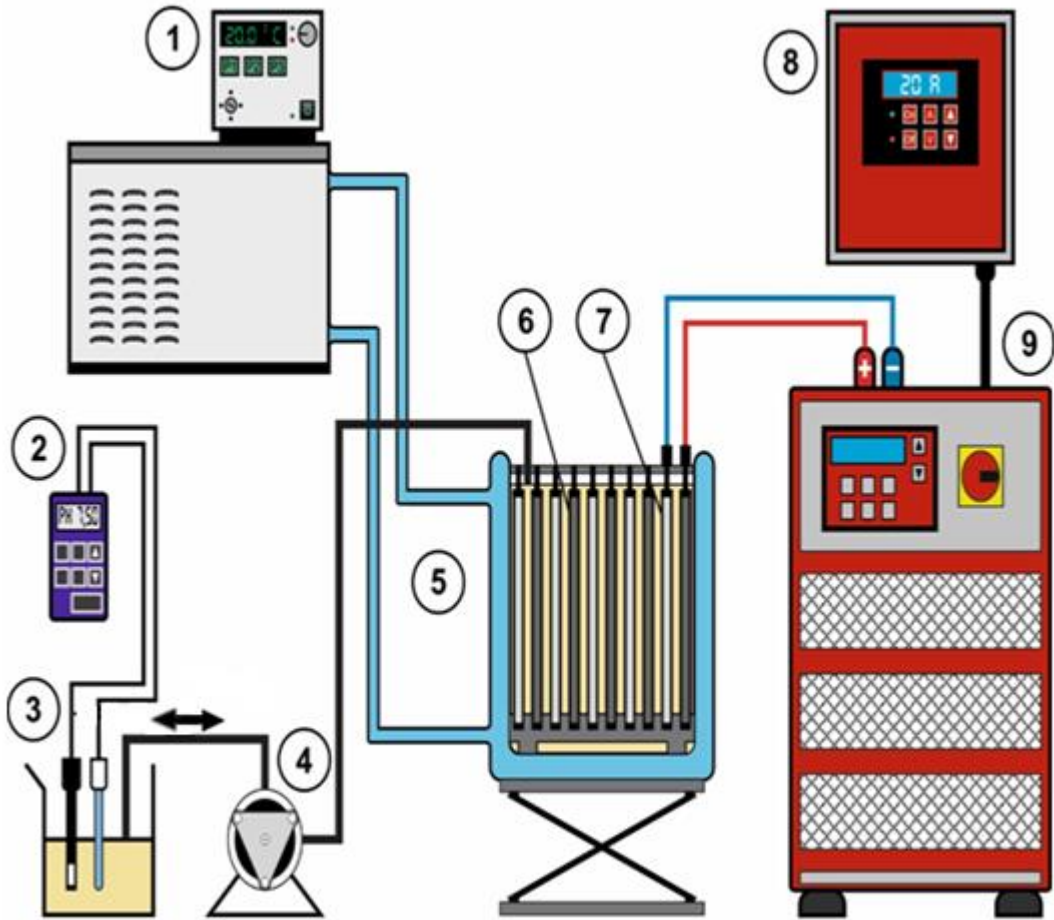
Çalışmalarda kullanılan atıksu Erzurum Atatürk Üniversitesi Yerleşkesi kanalizasyon sisteminin şehir kanalizasyon sistemi ile birleştiği yere yakın bir rögar noktasından temin edilmiştir. Evsel nitelikli atıksuyun karakteristik özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Evsel atıksuyun karakteristik özellikleri

KOI, mg/L	250
BOİ, mg/L	175
AKM, mg/L	80-100
İletkenlik, $\mu\text{S}/\text{cm}$	1000-1050
Sıcaklık, $^{\circ}\text{C}$	$15 \pm 3$

#### 3.2. Elektrokoagülasyon Prosesinin Gerçekleştiği Düzenek

Elektrokoagülasyon ünitesi olarak 1L lik ceketli reaktör kullanılmıştır. Deneylede gerekli olan elektrik akımını sağlamak için bir adet Chroma marka dijital kontrollü doğru akım güç kaynağı (62024P-40-120 model 0-40V, 1-120A) kullanılmıştır. Reaksiyon başlangıcında atıksuyun pH, iletkenlik ve sıcaklık değerlerini ayarlayabilmek ve reaksiyon süresince bu değerleri anlık okuyabilmek için bir adet WTW marka multimetre sisteme monte edilmiştir. Deneylede 7 adet paslanmaz çelik elektot ve 7 adet de alüminyum elektrot kullanılmıştır. Paslanmaz çelik ve alüminyum plakaların boyutları 9,5 cm boyunda 9 cm genişlikte ve 3 mm et kalınlığına sahiptir. Plakaların toplam yüzey alanı yaklaşık 2400  $\text{cm}^2$ ’dir. İki plaka arası mesafe ise 5 mm’dir. Bu deneylede arıtma parametreleri olarak, atıksu besleme hızı, NaCl,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ve  $\text{NaNO}_3$  destek elektrolit türlerinin ve konsantrasyonlarının, atıksu başlangıç pH değerinin ve akım şiddetinin etkisi incelenmiştir. Deneysel düzenek Şekil 3.1’de verilmiştir.



**Şekil 3.1.** Deney düzeneğinin şematik görünüşü

(1: Soğutma suyu tankı 2: pH kontrol hücresi, 3 :atıksuyun alındığı beher, 4: pompa, 5: ceketli reaktör,6 :anot materyal, 7: katot materyal, 8 :enerji güç ekran paneli, 9: enerji güç kaynağı)

### 3.3. Deney Şartları ve Çalışma Düzeni

Evsel nitelikli atıksularının arıtılabilirlik çalışmaları elektrokoagülasyon yöntemi kullanılarak atıksu başlangıç pH değeri, destek elektrolit türü ve konsantrasyonu ve akım şiddeti gibi parametreler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney şartları ve çalışma aralıkları aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir (Çizelge 3.2).

**Çizelge 3.2.** Evsel nitelikli atıksularının elektrokoagülasyon prosesi ile arıtılmasında prosese etki eden parametreler (alüminyum elektrot)

İncelenen parametreler	Parametre aralığı	Sabit tutulan değişkenler
Destek elektrolit türü	NaCl, Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ve NaNO <sub>3</sub>	pHi≈7≈ 8 (Doğal), T=20±5°C
Destek elektrolit konsantrasyonu (NaCl, M)	5 – 10 – 25 – 50 mM	pHi≈7≈ 8 (Doğal), T=20±5°C
Destek elektrolit konsantrasyonu (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , M)	5 – 10 – 25 – 50 mM	pHi≈7≈ 8 (Doğal), T=20±5°C
Destek elektrolit konsantrasyonu (NaNO <sub>3</sub> , M)	5 – 10 – 25 – 50 mM	pHi≈7≈ 8 (Doğal), T=20±5°C
Atıksu başlangıç pH'sı (pHi)	5 – 6 – 7 -8 – doğal	pHi≈7≈ 8 (Doğal), T=20±5°C
Akım şiddeti (A)	5 – 10 – 15 – 20	pHi≈7≈ 8 (Doğal), T=20±5°C

### 3.4. Analiz Metotları

Evsel nitelikli atıksularının elektrokoagülasyon prosesi ile arıtımına etki eden parametrelerin incelenmesi KOİ analizleri sayesinde izlenmiştir. Numunelerin pH değerleri, WTW pH 330i pH metre cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

#### Kullanılan Ekipmanlar;

Kimyasal oksijen ihtiyacı analizleri standart metotlarda (AWWA 1985) belirtilen kapalı sistem (reflux) yöntemine göre yapılmıştır. KOİ ölçümleri için öncelikle potasyum hidrojen fitalat standart çözeltisi kullanılarak bir standart eğri hazırlanmış olup, kalibrasyon eğrisi grafiği Şekil 3.2'de verilmiştir.

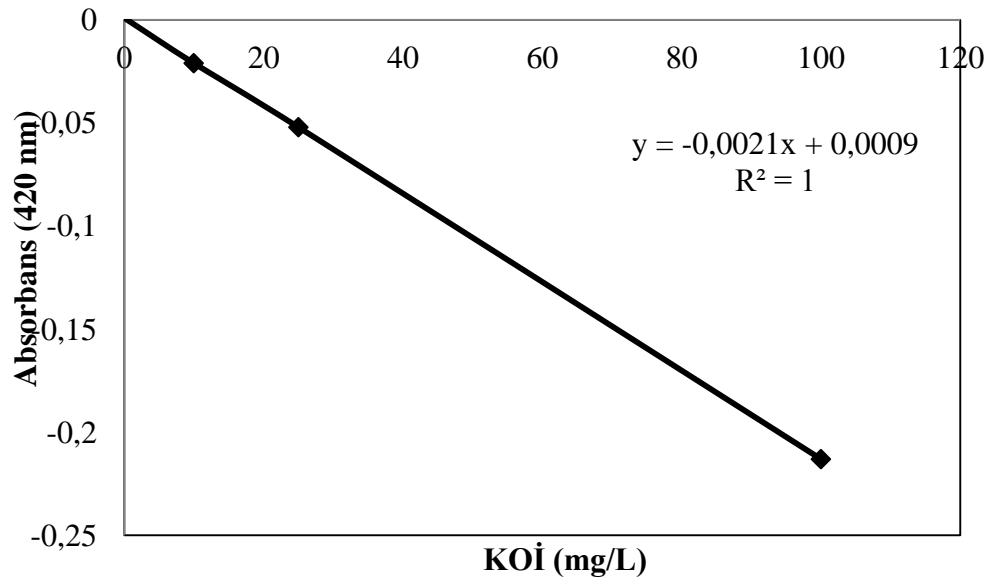
#### 3.4.1. Analizde kullanılan çözeltiler

**Parçalama çözeltisi:** 10,216 g K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> (potasyumdikromat) tan 1/5 oranında alınarak ve 33 g HgSO<sub>4</sub> alınarak, 167 mL derişik H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> içerisinde çözülmüş ve çözelti saf su ile bir litreye tamamlanmıştır.

**Asit çözeltisi:** 11 g  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$ , derişik 1 litre  $\text{H}_2\text{SO}_4$  içerisinde çözülerek hazırlanmıştır.

**Potasyum Hidrojen Fitalat:** ( $\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$ , MA=204,23 g/mol) KOİ testinde uygulanacak aralığa göre standart kalibrasyon eğrisinin hazırlanmasında kullanılmıştır.

**Analizin yapılışı:** Reaksiyon süresince belirli zaman aralıklarında alınan belirli hacimdeki atıksu numuneleri 0,45  $\mu\text{m}$  por boyutuna sahip membran filtreden süzöldükten sonra süzöntü içerisinde 1,5 ml örnek alınarak borosilikat tüplere konulmuştur. Üzerine 1 ml parçalama çözeltisi, 2 ml asit çözeltisi ilave edildikten sonra 148°C’de bir termoreaktörde (WTW CR 3200) 2 saat bekletilmiş ve oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra 420 nm dalga boyunda spektrofotometre (Spekol-1100 UV-Vis Spectrophotometer) cihazı ile absorbans değeri okunarak standart KOİ eğrisinden KOİ konsantrasyonları bulunmuştur. Kalibrasyon eğrisini hazırlamak için de aynı yöntem uygulanmış ve model kirletici olarak potasyum-hidrojen-fitalat çözeltisi kullanılmıştır. Bu çözeltiden farklı seyreltme oranlarında hazırlanan numuneler alınarak KOİ analiz yönteminde açıklanan prosedür uygulanmış ve Şekil 3.2’de KOİ analizlerinde kullanılan kalibrasyon eğrisi elde edilmiştir.



**Şekil 3.2.** KOİ analizinde kullanılan kalibrasyon eğrisi

### 3.5. Deneysel Verilerin Hesaplanması İçin Kullanılan Eşitlikler

#### 3.5.1. Giderim (arıtma) veriminin hesaplanması

$$\eta(\%) = \left( \frac{C_0 - C_e}{C_0} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

$C_0$ , başlangıçta kirletici konsantrasyonu (mg/L).

$C_e$ , t anında atıksuda kalan kirletici konsantrasyonu (mg/L).

#### 3.5.2. Enerji tüketiminin hesaplanması

$$W \left( \frac{kWsaat}{m^3} \right) = \frac{VxIxt}{v} \quad (3.2)$$

W: enerji tüketim değeri (kWsaat/m<sup>3</sup>)

I: uygulanan akım şiddeti (A)

V: sistemde oluşan potansiyel farkı (Volt)

t: zaman (dakika) ve

v: reaktördeki toplam çözelti hacmi (m<sup>3</sup>).

#### 3.5.3. Akım yoğunluğunun hesaplanması

$$J = \frac{I}{A_s} \quad (3.3)$$

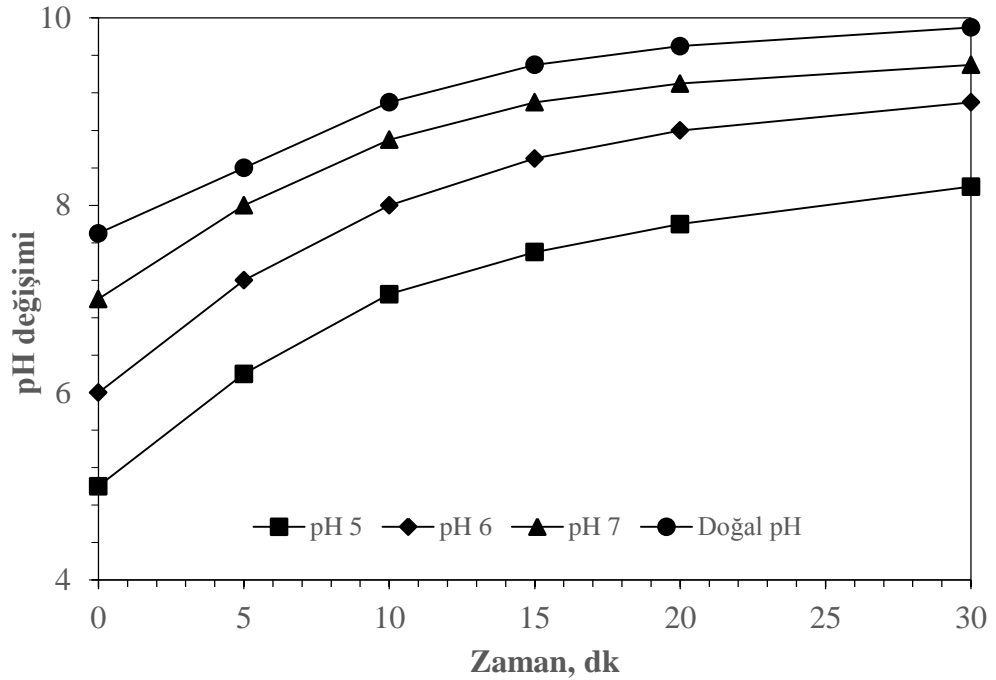
J :Akım yoğunluğu (mA/cm<sup>2</sup>)

I : Uygulanan akım şiddeti (A)  $A_s$ : Aktif elektrot yüzey alanı (cm<sup>2</sup>).

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

##### 4.1. Atıksu Başlangıç pH Değerinin Giderim Verimine Etkisi

Elektrokoagülasyon prosesinde ortamın pH değeri, elektrokimyasal olarak çözünen anot elektrot materyalinin ortamda bulunduğu formu etkilediğinden dolayı evsel atık sularının arıtılmasını etkileyen önemli parametrelerin başında gelir. Atıksu başlangıç pH değerinin atıksudan KOİ giderim verimi üzerine etkisi alüminyum anot kullanılarak incelenmiştir. Alüminyum anodun kullanıldığı denemelerde atıksu başlangıç pH değerinin giderim verimi üzerine etkisinin incelenmesi için atıksuyun başlangıç pH değerleri 5, 6, 7 ve 7.6 olan doğal pH değeri olarak ayarlanmış ve reaksiyon gerçekleştirilmiştir. Atıksuyun başlangıç pH değerinin giderim verimine etkisi incelenirken, kesikli sistemde, 5, 10, 15 ve 20 Amper gibi farklı akım şiddetlerinde ve destek elektrolitsiz ortamda 1000 mL'lik reaktör hacminde araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.1-4.2'de grafiksel olarak gösterilmiştir.



**Şekil 4.1.** 5 Amper akım şiddetinde her bir başlangıç atıksu pH değerinin reaksiyon süresi boyunca değışımi

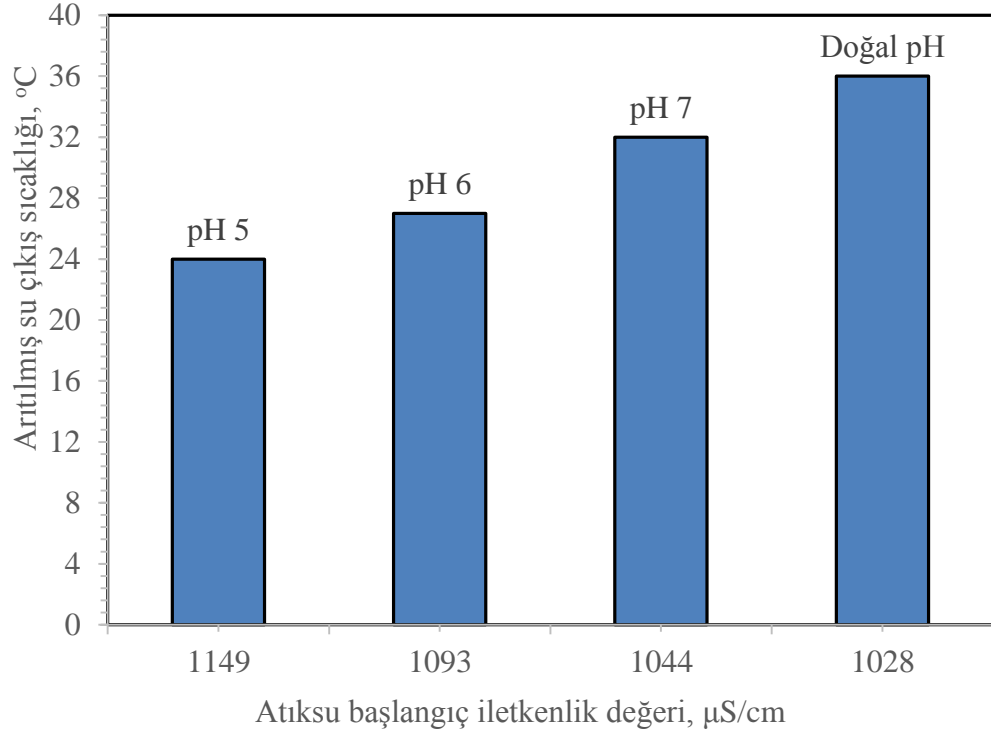
\*Akım şiddeti: 5 A, Reaksiyon süresi: 30 dakika, Destek elektrolit: yok

Şekil 4.1 incelendiğinde araştırılan her bir başlangıç atıksu pH değeri ile gerçekleştirilen denemelerde, reaksiyon boyunca ortam pH değerinin arttığı görülmektedir. Elektrokimyasal reaksiyonların doğası gereği katot bölgesinde eşitlik 2.2 gereği sürekli olarak suyun elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu hidrolize olması ve nihayetinde ortaya çıkan  $H^+$  iyonlarının elektron alarak  $H_2$  gazına dönüşmesi sonucu ortam pH değeri baziklik lehine bozulmaktadır. Atıksuyun pH değerindeki artış incelenen her bir başlangıç pH değeri için reaksiyonun ilk 5 dakikasında hızlı bir şekilde artış göstermiş ve 30 dakikalık reaksiyon süresinin geri kalan kısmında daha düşük bir hızla artış göstermiştir. Atıksu başlangıç pH değeri 5'e ayarlandığında 5 dakikalık elektrokimyasal reaksiyon süresi sonunda ortam pH değeri 7.3, başlangıç pH değeri 6'ya ayarlandığında reaksiyon süresi sonunda ortam pH değeri 8,1, başlangıç pH değeri 7'ye ayarlandığında reaksiyon süresi sonunda ortam pH değeri 8.9 ve başlangıç pH değeri atıksuyun doğal pH değeri olan 7.6 değerinde çalışıldığında reaksiyon süresi sonunda ortam pH değeri 9.5 değerine kadar artış göstermiştir. Değerler dikkatli incelendiğinde düşük başlangıç pH değerlerine sahip atıksular ile gerçekleştirilen denemelerde pH artış hızının daha yüksek olduğu görülmektedir.

Erzurum Atatürk Üniversitesi Yerleşkesi kanalizasyon sisteminin şehir kanalizasyon sistemi ile birleştiği yere yakın bir rögar noktasından temin edilen atıksuyun yaklaşık 7.6 olan doğal pH değerinde elektriksel iletkenlik değeri 1000-1050  $\mu S/cm$  civarındadır. Atıksu başlangıç pH değerinin giderim verimine etkisi incelenirken 5, 6, 7 ve 7.6 gibi dört farklı pH değeri seçilmiştir. Doğal pH değeri olan 7.6'dan diğer pH değerlerine sahip çözeltiler hazırlanırken atıksuya istenilen pH değerine bağlı olmak üzere asit ilavesi gerçekleştirilmiştir. Atıksuya ilave edilen her bir iyon atıksuyun elektriksel iletkenlik değerinin yükselmesine sebep olmaktadır. Doğal pH değerinde 1028  $\mu S/cm$  civarında elektriksel iletkenlik değerine sahip olan atıksu asit ilavesi ile sırasıyla pH 7 değerine sahip atıksu için 1044, pH 6 değerine sahip atıksu için 1093 ve pH 5 değerine sahip atıksu için 1149 değerlerine ulaşmıştır. Elektriksel iletkenlik değerinin artması sistemde oluşacak elektriksel direnç değerinin azalmasına yol açacağından dolayı elektrokoagülasyon sistemine verilen sabit akım şiddeti altında oluşacak elektrik enerjisinin ısı enerjisine daha az dönüşmesine sebep olacaktır. Çalışılan her bir atıksu başlangıç pH değeri için başlangıç pH değeri-elektriksel iletkenlik ve ısı enerjisi



oluşumunu ifade edecek elektrokoagülasyon reaktöründeki sıcaklık değerlerini gösteren ifade Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



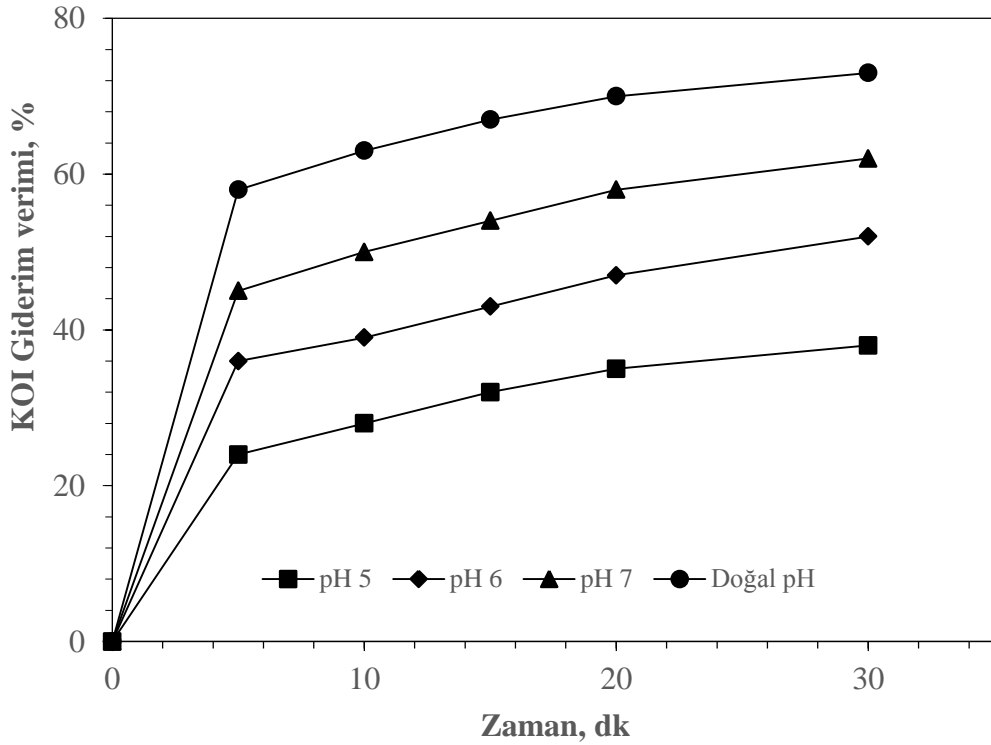
**Şekil 4.2.** 5 Amper akım şiddetinde her bir başlangıç pH değeri-elektriksel iletkenlik ve sıcaklık değerlerinin değişimi

\*Akım şiddeti: 5 A, Reaksiyon süresi: 30 dakika, Destek elektrolit: yok

Şekil 4.2’den görüldüğü gibi elektriksel iletkenlik değerinin artması elektrokoagülasyon reaktöründe sabit akım şiddeti altında reaktör ortam sıcaklığının daha düşük değerlerde gerçekleşmesine sebep olmaktadır. Başlangıç atıksu pH değeri 5 iken reaksiyon süresi sonunda ulaşılan sıcaklık  $24^{\circ}\text{C}$ , pH 6 değeri için ulaşılan ortam sıcaklığı  $27^{\circ}\text{C}$ , pH 7 değeri için ulaşılan ortam sıcaklığı  $32^{\circ}\text{C}$  ve atıksuyun doğal pH değeri ile gerçekleştirilen denemelerde reaksiyon süresi sonunda ortaya çıkan ortam sıcaklığı  $36^{\circ}\text{C}$ ’ye kadar yükselmiştir.

Başlangıç pH değerinin evsel atıksuların elektrokoagülasyon prosesi ile arıtımına etkilerinin incelendiği denemelerde yukarıda ifade edilen elektrokimyasal reaksiyon süresi boyunca gerçekleşen atıksu pH değişimi ve elektriksel iletkenlik değerine bağlı

olarak ortaya çıkan atıksu sıcaklık değişiminin yanında organik madde gideriminin bir ifadesi olan KOİ verileri de reaksiyon süresi boyunca incelenmiş ve elde edilen veriler yardımıyla 5 Amperlik sabit akım şiddeti altında Şekil 4.3'te gösterilen grafiksel sonuçlar hazırlanmıştır.

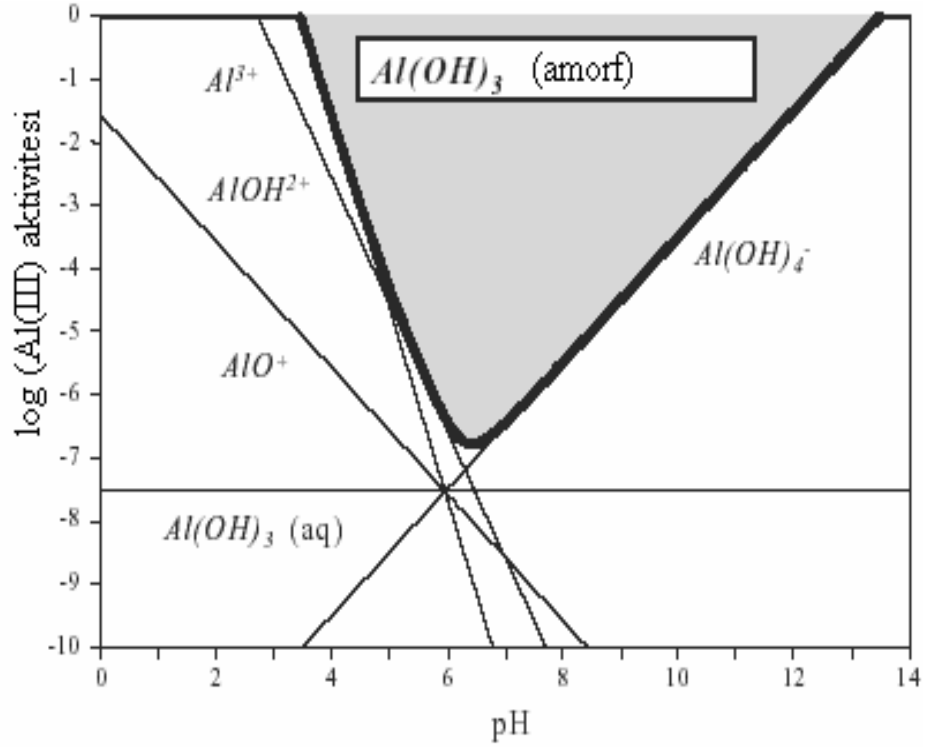


**Şekil 4.3.** 5 Amper akım şiddetinde her bir başlangıç pH değeri-elektriksel iletkenlik ve sıcaklık değerlerinin değişimi

\*Akım şiddeti: 5 A, Destek elektrolit: yok, Reaksiyon süresi: 30 dakika

KOİ değerlerinin bütün pH aralıklarındaki giderim verimleri incelendiğinde ortalama olarak en yüksek giderim veriminin atıksuyun doğal pH değerinde olduğu söylenebilir. Atıksuyun başlangıç pH değeri 5'den pH değeri 6'ya çıkarıldığında 30 dakikalık elektrokimyasal reaksiyon süresi sonunda KOİ giderim verimi %38'den %52'ye yükselmiştir. pH değeri 7'ye çıkarıldığında 30 dakikalık elektrokimyasal reaksiyon süresi sonunda KOİ giderim verimi %62'ye yükselmiştir. Atıksuyun başlangıç pH değeri doğal pH değerinde gerçekleştirilen deneme sonucunda KOİ giderme verimi %73'e kadar artış göstermiştir. Atıksuyun doğal pH değerinin en iyi sonucu vermesinin sebebi, Şekil 4,1'de verilen sabit akım şiddetinde farklı başlangıç pH değerlerine sahip

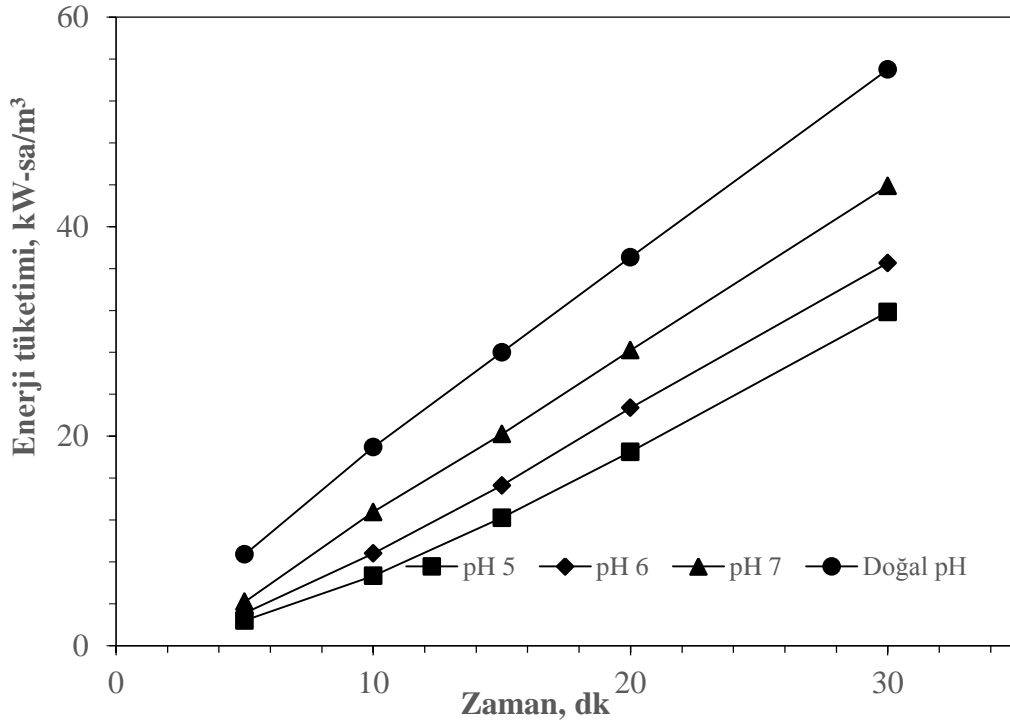
atıksuların reaktör çıkışı pH değerlerini gösteren grafiksel sonuçlar ve Şekil 4,4'de verilen ortam pH değerine bağlı olarak alüminyumun çözünme diyagramı incelendiğinde daha iyi anlaşılacaktır.  $Al(OH)_3$ 'ün çözünürlüğünün en düşük olduğu pH aralığı Şekil 4.4'den 5.5-7.5 olarak görülmektedir.



**Şekil 4.4.** Alüminyumun ortam pH'sına bağlı olarak çözünme diyagramı (Jiang *et al.* 2002)

Yukarıdaki değerler dikkate alındığında daha sonra incelenecek parametreler için gerçekleştirilecek denemelerde atıksu başlangıç pH değeri olarak atıksuyun kendi doğal pH değerinin kullanılmasına karar verilmiştir.

Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3'de gösterildiği gibi, atıksu başlangıç pH değerinin KOİ giderim verimine etkileri incelenirken, akım şiddeti 5 Amper olarak seçilmiştir. Gerçekleştirilen denemeler neticesinde sabit akım şiddeti altında zamana bağlı olarak reaktör içerisinde farklı potansiyel farklar oluşmaktadır. Eşitlik 3.2 kullanılarak sabit akım şiddeti altında ortaya çıkan enerji tüketimi değerleri hesaplanmış ve Şekil 4.5'te gösterilmiştir.

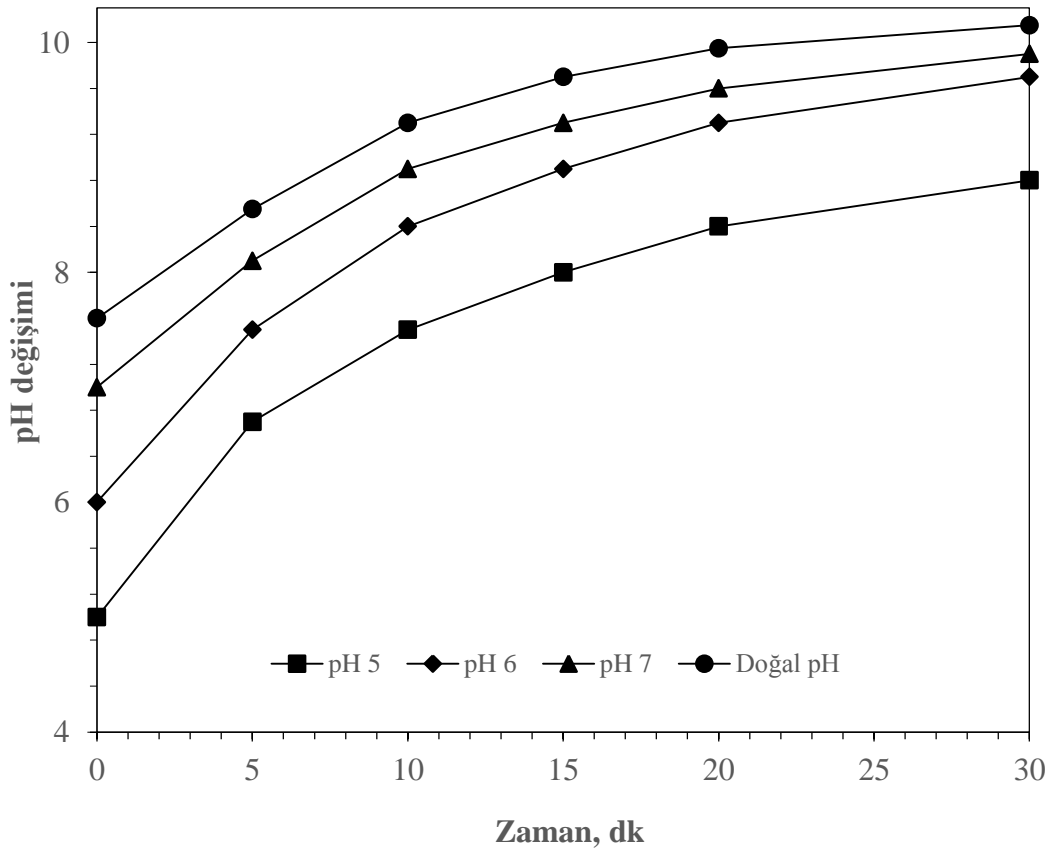


**Şekil 4.5.** Enerji tüketimi üzerine atıksu başlangıç pH değerinin etkisi

\*Akım şiddeti: 5 A, Reaksiyon süresi: 30 dakika, Destek elektrolit: yok

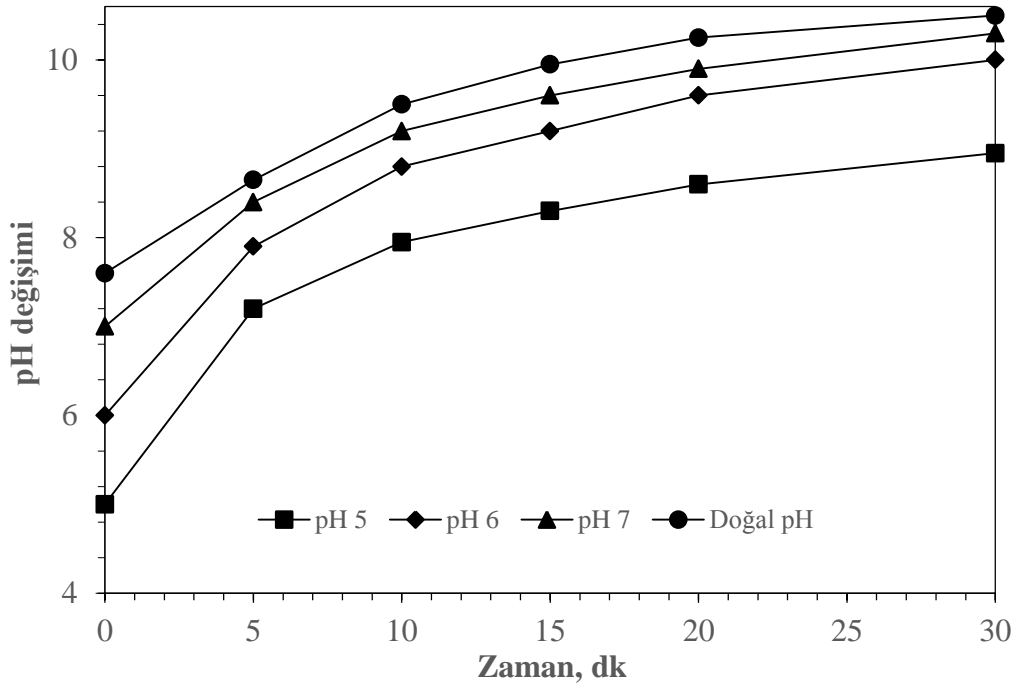
Şekil 4.5'ten de görüldüğü gibi en yüksek enerji tüketimi 5 Amperlik akım şiddeti değeri için atıksuyun doğal pH değeri olan 7.6'da gerçekleşmektedir. Bu durum beklenen doğal bir sonuçtur. Atıksuyun doğal pH değerinin altında ve üstünde pH değerlerinin elde edilebilmesi için atıksu ya asit ya da baz ile muamele edilmelidir. Bu durumda, atıksuyun elektriksel iletkenlik değerinin her iki durum için artmasına sebep olmaktadır. Artan elektriksel iletkenlik değeri sabit akım şiddeti altında sisteme uygulanan potansiyel fark değerlerinin azalmasına neden olmaktadır. Eşitlik 3.2 iyi bir şekilde incelendiğinde sistemde oluşan potansiyel fark değerlerinin enerji tüketimi ile doğrusal bir ilişki içerisinde olduğu görülmektedir. Potansiyel farkın artması sistemde oluşan enerji tüketimi değerlerinin artmasına, potansiyel farkın azalması sistemde oluşan enerji tüketimi değerlerinin azalmasına sebep olmaktadır. Atıksuyun doğal pH değerinde içermiş olduğu elektriksel iletkenlik değeri diğer pH değerlerinin içermiş olduğu elektriksel iletkenlik değerlerinden daha düşük olduğundan dolayı sabit akım şiddeti altında gerçekleştirilen denemelerde bu pH değerinde daha yüksek potansiyel fark oluşacak ve doğal olarak bu pH değerinde enerji tüketimi daha fazla olacaktır.

Atıksu başlangıç pH değerinin giderim verimine etkileri incelenirken yukarıda verilen 5 Amperlik akım şiddeti yanında 10 A, 15 A ve 20 Amperlik akım şiddetleri de ayrı ayrı incelenmiştir. Atıksu başlangıç pH değerinin sabit akım şiddeti altında çıkış suyu pH değeri değişimi, atıksu başlangıç pH değeri-elektriksel iletkenlik değeri-çıkış suyu sıcaklık değişimi, KOİ giderim verimi ve enerji tüketimine etkileri her bir akım şiddeti için ayrı ayrı incelenmiştir. Değişen akım şiddetinin atıksu başlangıç değeri ile elektrokoagülasyon prosesi çıkış suyu pH değeri arasındaki değişimi veren veriler aşağıda verildiği gibidir. Şekil 4.6, 4.7 ve 4.8 incelendiğinde elektrokimyasal reaksiyon süresi boyunca pH değişiminin Şekil 4.1’de verilen 5 Amper sabit akım şiddeti ile gerçekleştirilen denemelerden elde edilen veriler ile benzerlik gösterdiği görülmektedir.



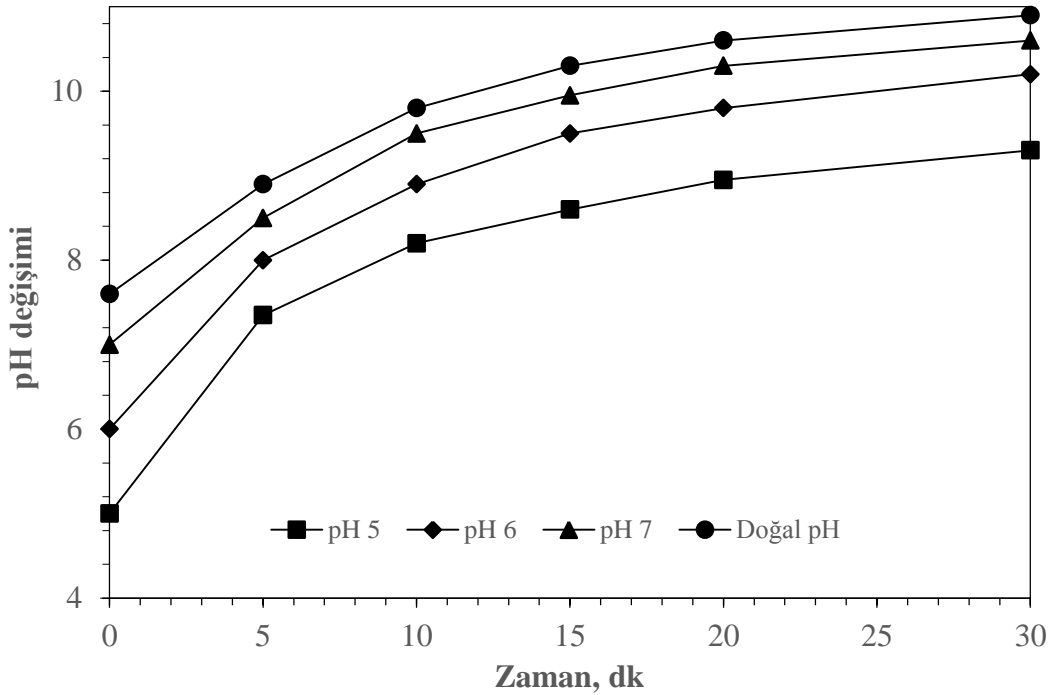
**Şekil 4.6.** 10 Amper akım şiddetinde her bir başlangıç atıksu pH değerinin reaksiyon süresi boyunca değişimi

\*Akım şiddeti: 10 A, Reaksiyon süresi: 30 dakika, Destek elektrolit: yok



**Şekil 4.7.** 15 Amper akım şiddetinde her bir başlangıç atıksu pH değerinin reaksiyon süresi boyunca değışimi

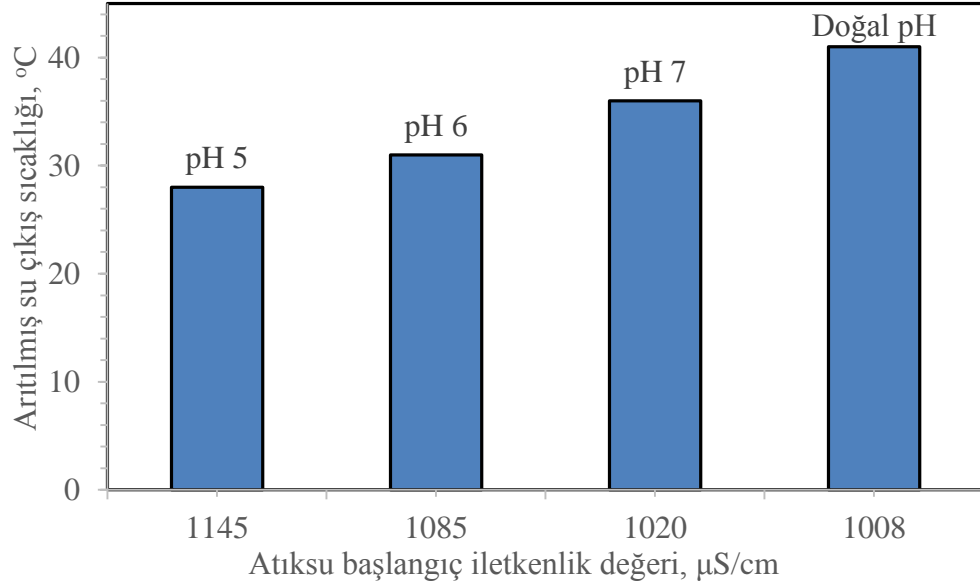
\*Akım şiddeti: 15 A, Reaksiyon süresi: 30 dakika, Destek elektrolit: yok



**Şekil 4.8.** 20 Amper akım şiddetinde her bir başlangıç atıksu pH değerinin reaksiyon süresi boyunca değışimi

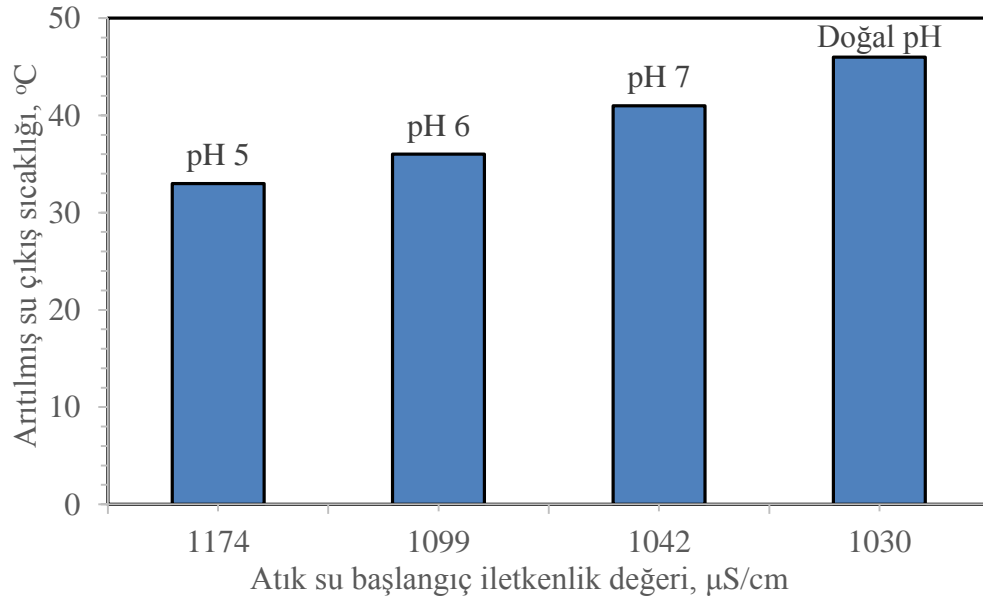
\*Akım şiddeti: 20 A, Reaksiyon süresi: 30 dakika, Destek elektrolit: yok

Akım şiddetinin artması ile elektriksel iletkenlik değeri, atıksuyun başlangıç pH değeri ve çıkış suyu sıcaklığı arasında gerçekleşen değişim incelenmiş ve ortaya çıkan sonuçlar aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



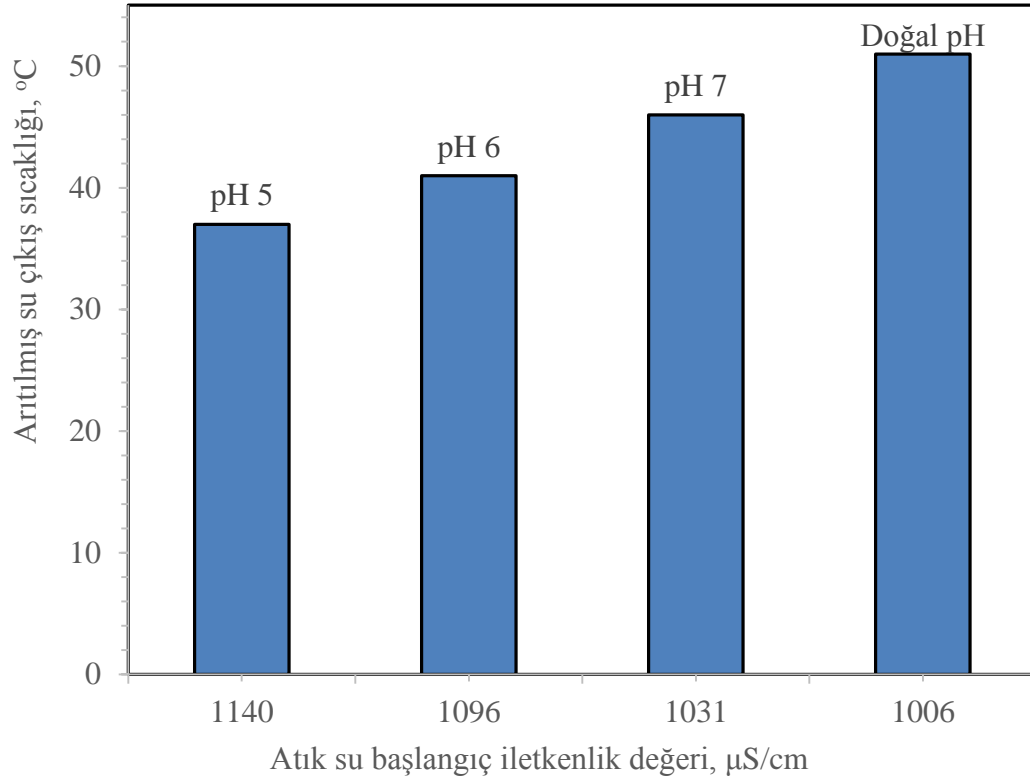
**Şekil 4.9.10** Amper akım şiddetinde her bir başlangıç pH değeri-elektriksel iletkenlik ve sıcaklık değerlerinin değişimi

\*Akım şiddeti: 10 A, Reaksiyon süresi: 30 dakika, Destek elektrolit: yok



**Şekil 4.10.** 15 Amper akım şiddetinde her bir başlangıç pH değeri-elektriksel iletkenlik ve sıcaklık değerlerinin değişimi

\*Akım şiddeti: 15 A, Reaksiyon süresi: 30 dakika, Destek elektrolit: yok



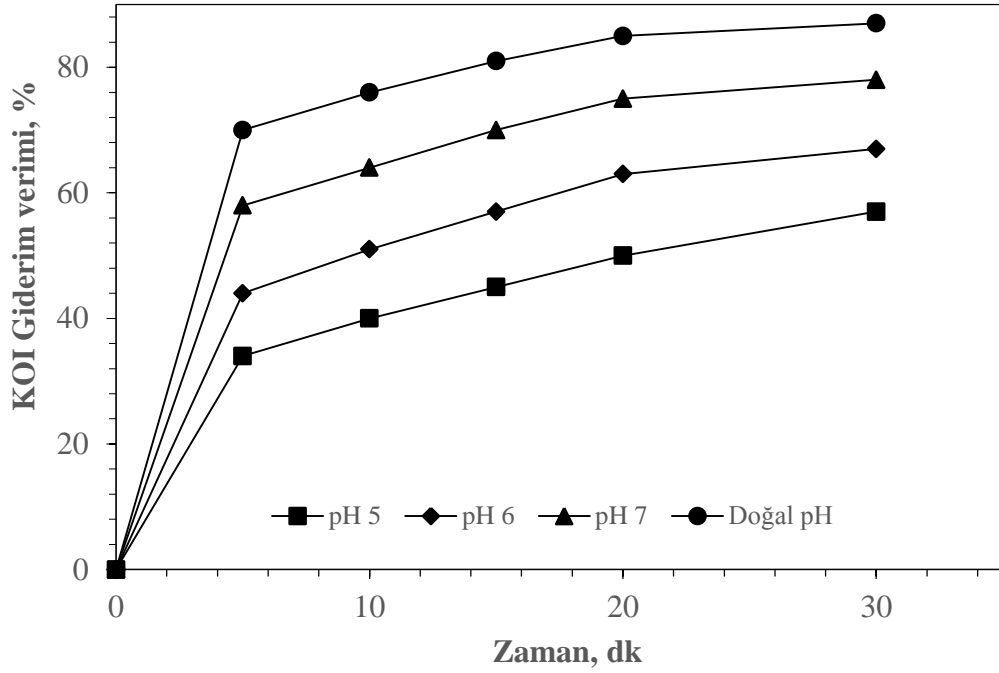
**Şekil 4.11.** 20 Amper akım şiddetinde her bir başlangıç pH değeri-elektriksel iletkenlik ve sıcaklık değerlerinin değişimi

\*Akım şiddeti: 20 A, Reaksiyon süresi: 30 dakika, Destek elektrolit: yok

10 A, 15 A ve 20 Amperlik sabit akım şiddetlerinde gerçekleştirilen denemelerden elde edilen sonuçlar 5 Amperlik sabit akım şiddeti ile gerçekleştirilen denemeden elde edilen veriler ile uyumlu görünmektedir. Elektriksel iletkenlik değerinin artması her bir akım şiddeti için incelenen bütün başlangıç pH değerlerinde çıkış suyu sıcaklığının azalmasına sebep olmuştur.

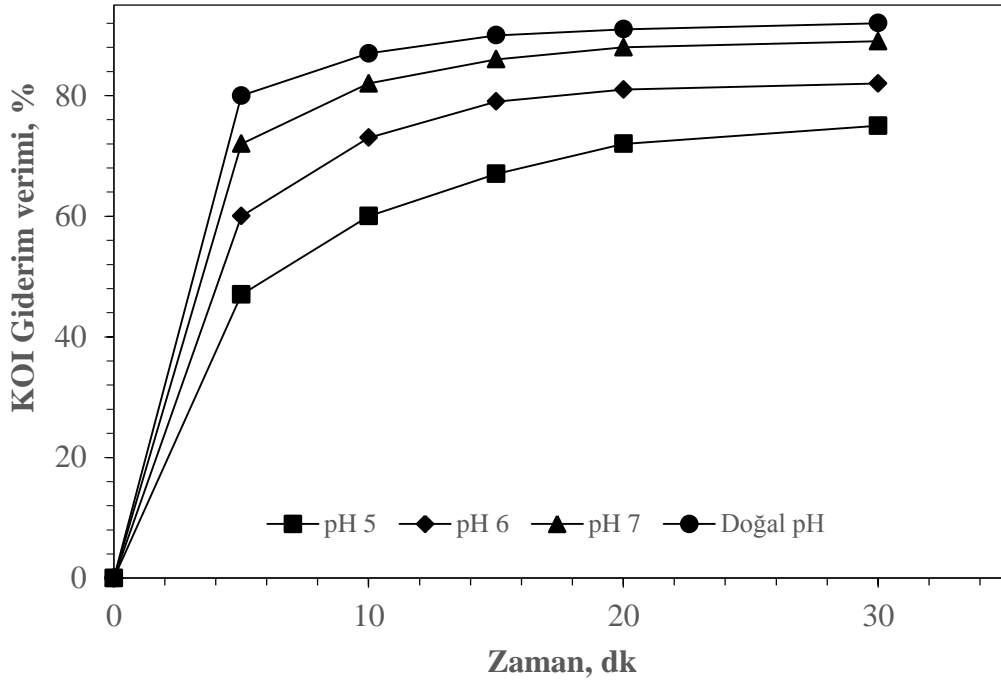
Atıksuyun başlangıç pH değerinin elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu KOİ giderim verimine etkilerinin incelendiği 5 Amperlik sabit akım şiddetinin yanı sıra 5, 6, 7 ve 7.6 gibi başlangıç pH değerlerinin her biri için 10, 15 ve 20 Amperlik sabit akım şiddetleri için elde edilen veriler yardımıyla ortaya çıkan KOİ giderim verim değerleri hesaplanmış ve Şekil 4.12, 4.13 ve 4.14'te grafiksel olarak gösterilmiştir.





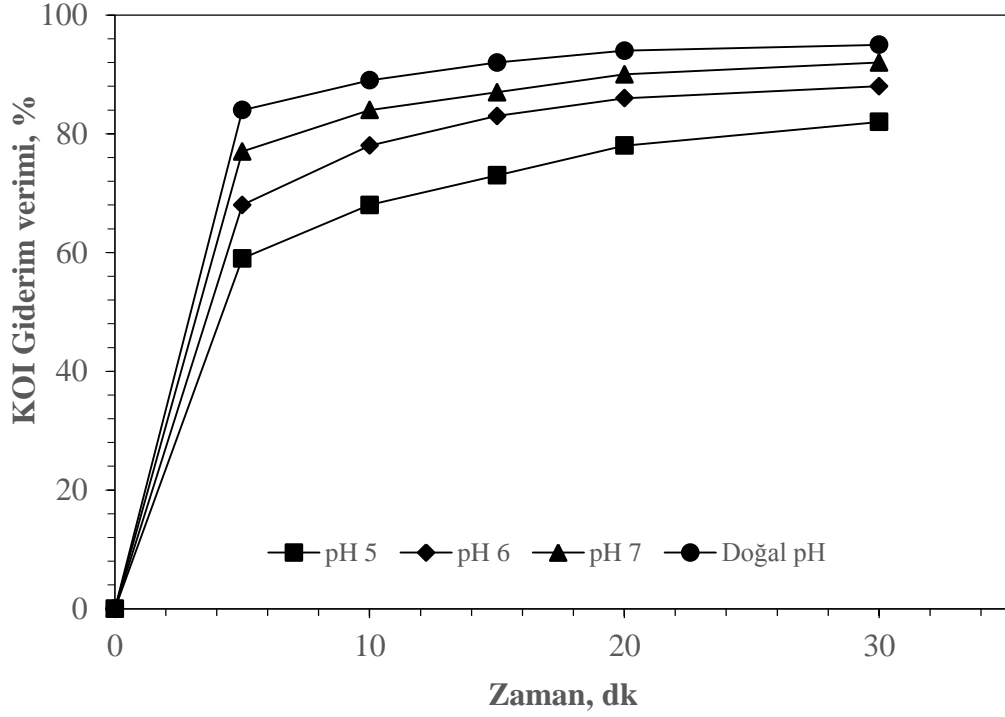
**Şekil 4.12.** 10 Amper akım şiddetinde her bir başlangıç pH değeri-elektriksel iletkenlik ve sıcaklık değerlerinin değişimi

\*Akım şiddeti: 10 A, Destek elektrolit: yok, Reaksiyon süresi: 30 dakika



**Şekil 4.13.** 15 Amper akım şiddetinde her bir başlangıç pH değeri-elektriksel iletkenlik ve sıcaklık değerlerinin değişimi

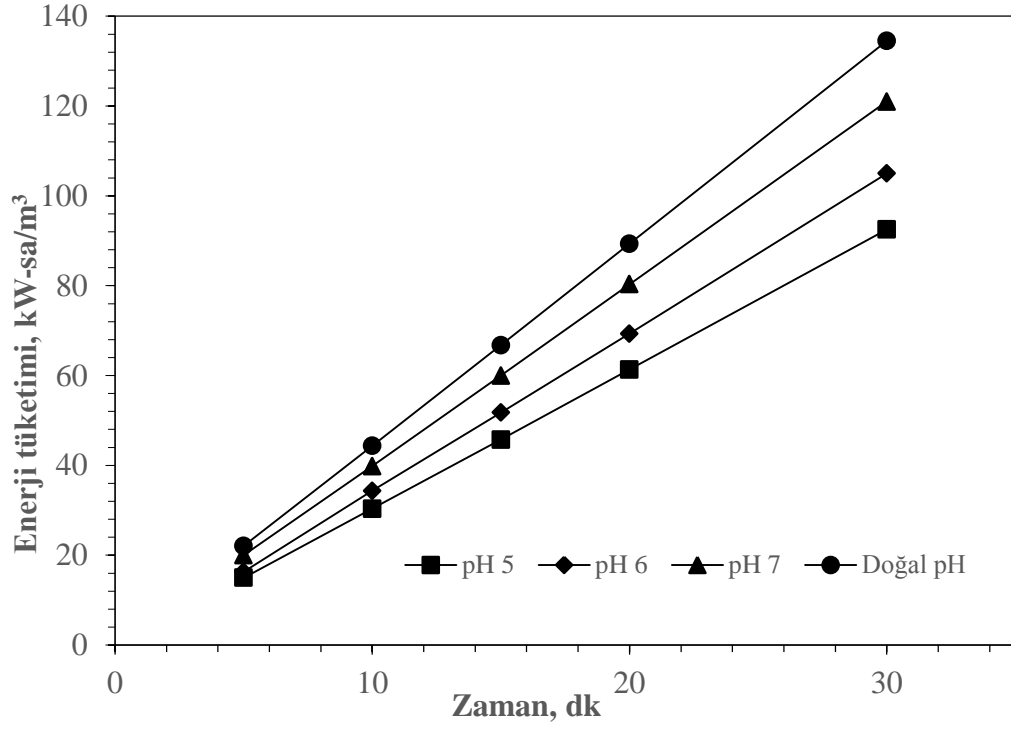
\*Akım şiddeti: 15 A, Destek elektrolit: yok, Reaksiyon süresi: 30 dakika



**Şekil 4.14.** 20 Amper akım şiddetinde her bir başlangıç pH değeri-elektriksel iletkenlik ve sıcaklık değerlerinin değişimi

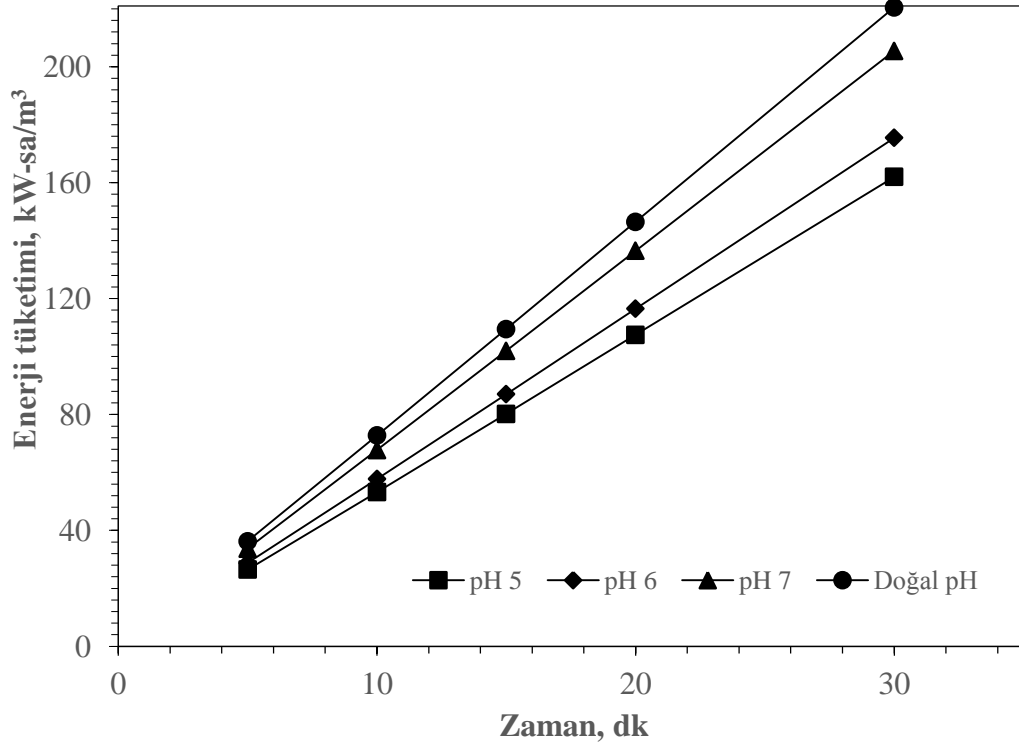
\*Akım şiddeti: 20 A, Destek elektrolit: yok, Reaksiyon süresi: 30 dakika

Atıksuyun başlangıç pH değerinin elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu KOİ giderim verimine etkilerinin incelendiği 5 Amperlik sabit akım şiddetinin yanı sıra 5, 6, 7 ve 7.6 gibi başlangıç pH değerlerinin her biri için 10, 15 ve 20 Amperlik sabit akım şiddetleri için elde edilen veriler yardımıyla ortaya çıkan enerji tüketimi değerleri Eşitlik 3.2’de verilen matematiksel ifade yardımıyla hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.15, 4.16 ve 4.17’de grafiksel olarak gösterilmiştir.



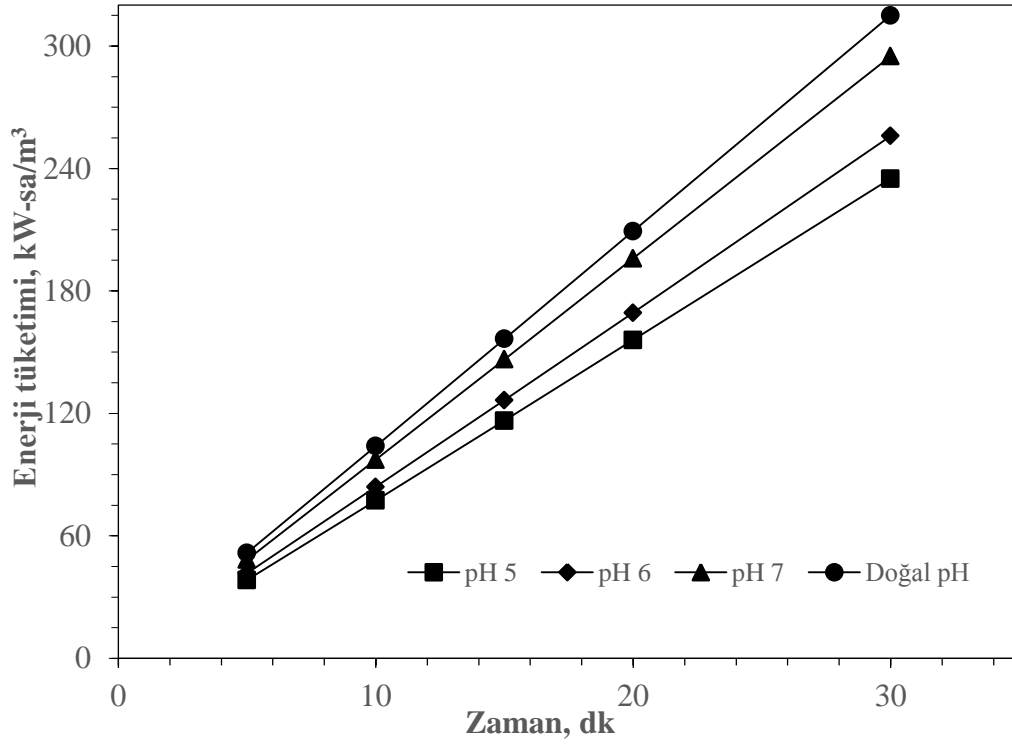
**Şekil 4.15.** Enerji tüketimi üzerine atıksu başlangıç pH değerinin etkisi

\*Akım şiddeti:10 A, Reaksiyon süresi: 30 dakika, Destek elektrolit: yok



**Şekil 4.16.** Enerji tüketimi üzerine atıksu başlangıç pH değerinin etkisi

\*Akım şiddeti:15 A, Reaksiyon süresi: 30 dakika, Destek elektrolit: yok



**Şekil 4.17.** Enerji tüketimi üzerine atıksu başlangıç pH değerinin etkisi

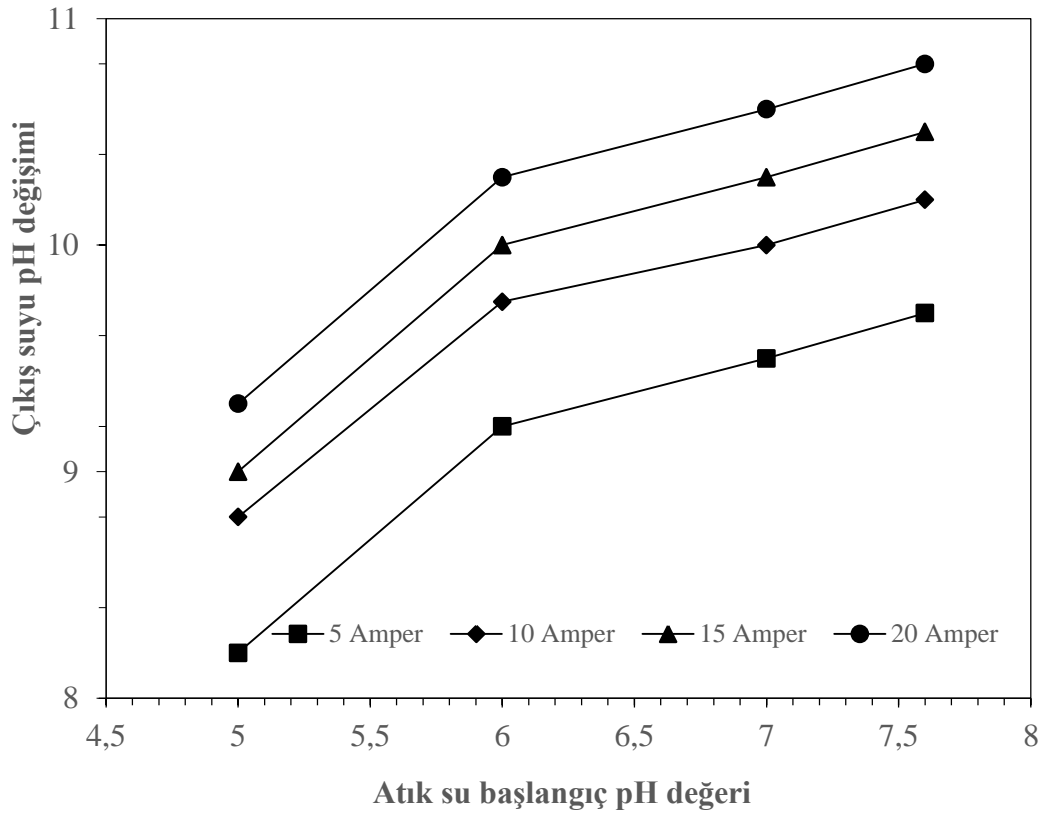
\*Akım şiddeti:20 A, Reaksiyon süresi: 30 dakika, Destek elektrolit: yok

Akım şiddetindeki artış, atıksu başlangıç pH değerlerinin enerji tüketimine etkilerinde herhangi bir farklılık göstermemiştir. Doğal pH değerinde elde edilen en yüksek enerji tüketimi eğilimi her bir akım şiddeti için aynı olmuştur. İlave edilen asit ile değiştirilen atıksuyun başlangıç pH değerleri ve bu değerlere bağlı olarak değişen atıksuyun elektriksel iletkenlik değerleri sabit akım şiddeti altında ortaya çıkan potansiyel fark ve dolayısı ile enerji tüketimi üzerinde en önemli etkiye sahip olmuştur. Bu eğilim incelenen her bir akım şiddeti için bütün başlangıç pH değerleri için geçerliliğini korumuştur.

#### 4.2. Akım Şiddetinin Giderim Verimine Etkisi

Akım şiddeti reaktör içerisine elektrokimyasal olarak koagülant madde miktarının girişini tespit ettiği için, elektrokoagülasyon yöntemi ile kirletici giderim verimi incelenirken dikkate alınması gereken önemli bir parametredir. Evsel atıksularından

KOİ giderim verimi üzerine akım şiddetinin etkisi incelenirken yaklaşık 250 mg/L başlangıç konsantrasyonuna sahip evsel atıksu ile 5, 10, 15 ve 20 A akım şiddetlerinde denemeler yapılmış ve bu denemelerde atıksu pH değeri 5, 6, 7 ve doğal pH değeri olarak alınmıştır. 5, 6 ve 7 pH değerlerinde gerçekleştirilen denemelerden elde edilen sonuçlar ile doğal pH değeri ile elde edilen sonuçlar benzer eğilim gösterdiğinden ve en iyi giderim verimi doğal pH değerinde elde edildiğinden dolayı bu pH değerinde elde edilen sonuçlar verilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar başlangıç pH değeri ile elektrokoagülasyon prosesi süresince artılmış suyun pH değerindeki değişimi cinsinden aşağıdaki şekilde grafiksel olarak gösterilmiştir.



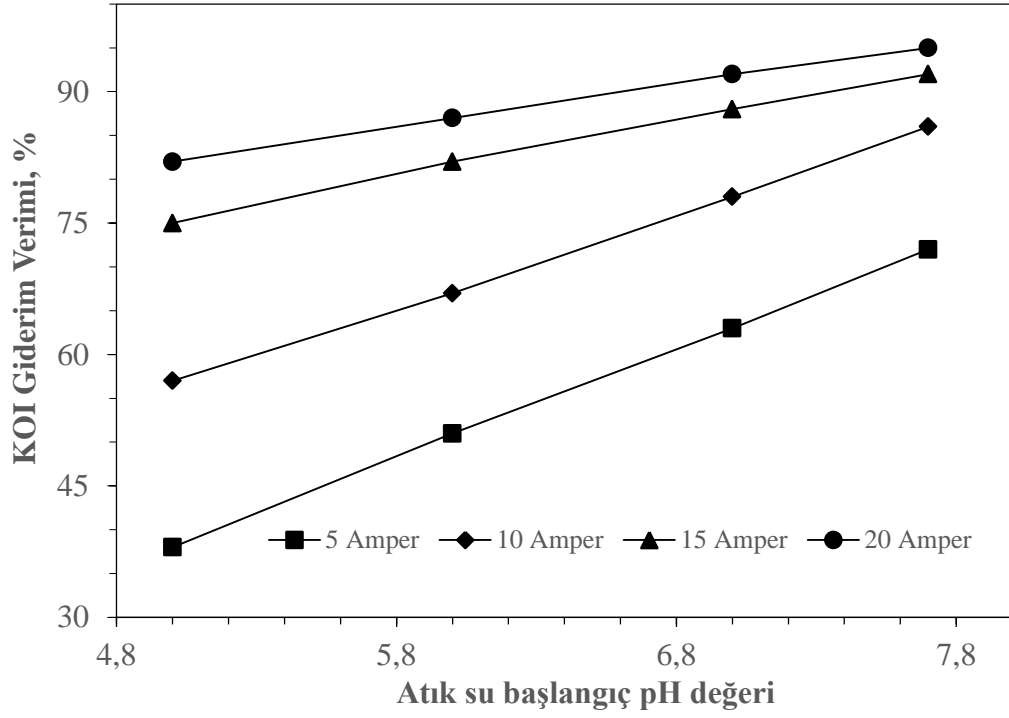
**Şekil 4.18.** Akım şiddetinin her bir başlangıç atıksu pH değerinin reaksiyon süresi boyunca değişimine etkisi

\*Akım şiddeti: 5, 10, 15 ve 20 A, Reaksiyon süresi: 30 dakika, Destek elektroliti: yok

Şekil 4.18 incelendiğinde, çalışılan bütün akım şiddeti değerlerinde atıksu başlangıç pH değerinin reaksiyon süresi boyunca artmasına sebep olmuştur. Akım şiddetinin artması,

reaktör içerisinde anot elektrotta elektrokimyasal olarak daha fazla koagülant maddenin çözünmesine ve katot bölgesinde daha yüksek hızda  $H_2$  gazı çıkışına sebep olduğundan dolayı çıkış suyu pH değerinin artmasına sebep olmuştur. Reaksiyon süresince pH değerinin akım şiddeti ile doğru orantılı olarak artması daha fazla koagülant madde çözünmesine rağmen pH değerinin  $Al(OH)_3$ 'ün çözünürlüğünün düşük olduğu ve daha fazla flok yapma eğilimi gösterdiği pH değerinden uzaklaştığı için giderim verimi açısından beklenen değerlere ulaşılmamasının önüne geçmiştir. Akım şiddetinin artması, incelenen her atıksu başlangıç pH değerlerinde, ortama elektrokimyasal olarak çözünen daha fazla koagülant madde girişine sebep olduğundan dolayı KOİ giderim veriminin artmasına yol açmıştır. Bununla birlikte akım şiddetinin artması daha fazla koagülant oluşmasına sebep olmakla birlikte reaktör çıkış suyu pH değerinin de artmasına yol açmaktadır. Elektrokoagülasyon işlemi alüminyum elektrot kullanıldığında oluşması amaçlanan  $Al(OH)_3$  floklarının ortam pH değerine sıkı sıkıya bağlı olduğu unutulmamalıdır.  $Al(OH)_3$  floklarının çözünürlüğünün en düşük olduğu pH aralığı yaklaşık olarak 5,5-7,5 aralığıdır. Şekil 4.15'teki veriler incelendiğinde evsel atıksuyun doğal pH değeri ile gerçekleştirilen denemelerde 5 Amperlik akım şiddeti ile elektrokimyasal reaksiyon süresi sonucunda çıkış suyu pH değeri 10.7, 10 Amperlik akım şiddeti ile elektrokimyasal reaksiyon süresi sonucunda çıkış suyu pH değeri 11.1, 15 Amperlik akım şiddeti ile elektrokimyasal reaksiyon süresi sonucunda çıkış suyu pH değeri 11.45 ve 20 Amperlik akım şiddeti ile elektrokimyasal reaksiyon süresi sonucunda çıkış suyu pH değeri 11.8 değerlerine ulaşılmıştır.

Elektrokimyasal reaktöre uygulanan sabit akım şiddeti reaktör içerisine elektrokimyasal olarak çözünerek geçen koagülant madde miktarının girişini Faraday Kanunu ile belirlediği için, elektrokoagülasyon yöntemi ile kirletici giderim verimi incelenirken dikkate alınması gereken önemli bir parametredir. Yaklaşık 250 mg/L KOİ içeren evsel atıksuyun elektrokoagülasyon prosesi ile arıtımına akım şiddetinin etkisinin incelendiği denemelerde elde edilen veriler KOİ giderim verimi cinsinden ele alınmış ve Şekil 4.19'da gösterilen grafiksel sonuçlar elde edilmiştir.

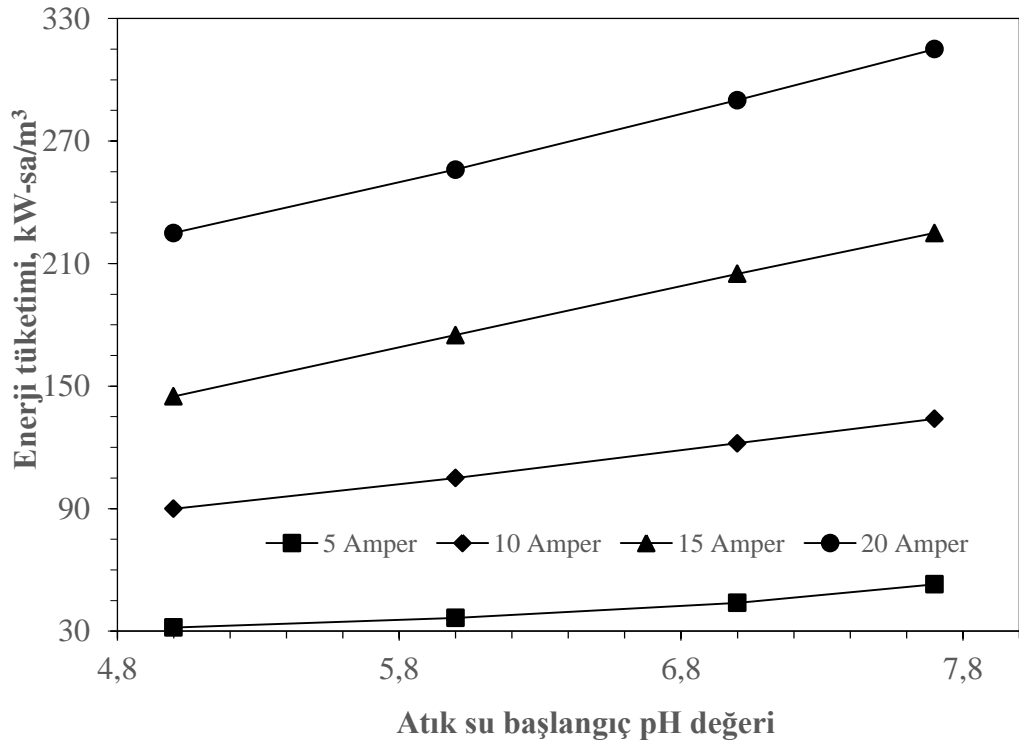


**Şekil 4.19.** Farklı akım şiddetlerinin çıkış suyu KOİ değerlerinin değişimine etkisi

\*Akım şiddeti: 5, 10, 15 ve 20 A, Reaksiyon süresi: 30 dakika, Destek elektrolit: yok

Şekil 4.19 incelendiğinde atıksu başlangıç değerinin 5, 6, 7 ve doğal pH değerlerinde gerçekleştirilen denemelerde, 5 Amperlik sabit akım şiddeti için sırası ile %38, %51, %63 ve %72, 10 Amperlik sabit akım şiddeti için sırası ile %57, %67, %78 ve %86, 15 Amperlik sabit akım şiddeti için sırası ile %75, %82, %88 ve %92 ve 20 Amperlik sabit akım şiddeti için sırası ile %82, %87, %92 ve %95 olarak gerçekleştiği görülmektedir. Sayısal verilerden de görüldüğü gibi, hem başlangıç pH değerinin doğal pH değerine kadar artırılması hem de akım şiddetinin 5 Amperden 20 Ampere artırılması KOİ giderim verimini önemli bir şekilde artırmıştır. Bununla birlikte Şekil 4.16 dikkatli bir şekilde incelendiğinde, artan akım şiddetinin birim reaksiyon süresinde atıksu pH değerinin artış hızını önemli şekilde artırdığından dolayı, KOİ giderim verimi olması gereken artış hızını gerçekleştirememiştir. 5 Amperlik sabit akım şiddeti altında başlangıç pH değerine bağlı olarak en düşük pH değeri (5 pH) ile en yüksek pH değeri (doğal pH) arasındaki giderim verimi açısından %34 (72-38) fark varken, 20 Amperlik akım şiddeti açısından bu fark %13 (95-82) olarak gerçekleşmiştir.

Akım şiddetinin KOİ giderim verimine etkilerinin incelendiği denemelerde dikkat edilmesi gereken önemli parametrelerden biri de sisteme uygulanan potansiyel fark sonucu ortaya çıkacak bir arıtılmış su hacmi başına düşen enerji tüketimi değerlerinin belirlenmesidir. Elektrokimyasal proseslerde ortaya çıkacak enerji tüketimi değerleri hesaplanırken Eşitlik 3.3’de verilen matematiksel eşitlikten yararlanır. İncelenen her bir başlangıç değeri ile her bir akım şiddeti için ortaya çıkan birim arıtılmış su hacmi başına enerji tüketimi değerleri Şekil 4.20’de grafiksel olarak gösterilmiştir.



**Şekil 4.20.** Enerji tüketimi üzerine uygulanan sabit akım şiddeti değerinin etkisi

\*Akım şiddeti: 5, 10, 15 ve 20 A, Reaksiyon süresi: 30 dakika, Destek elektrolit: yok

Şekil 4.20’den de görüldüğü gibi 5 pH başlangıç atıksu değerinde 5 Amperlik akım şiddeti için gerçekleşen enerji tüketimi 30 dakikalık reaksiyon süresi sonunda yaklaşık 32 kW-sa/m<sup>3</sup> iken aynı pH değeri için 20 Amperlik akım şiddetinde enerji tüketimi değeri 225 kW-sa/m<sup>3</sup> değerine ulaşmaktadır. 6 pH başlangıç atıksu değerinde 5 Amperlik akım şiddeti için gerçekleşen enerji tüketimi 30 dakikalık reaksiyon süresi sonunda yaklaşık 36 kW-sa/m<sup>3</sup> iken aynı pH değeri için 20 Amperlik akım şiddetinde



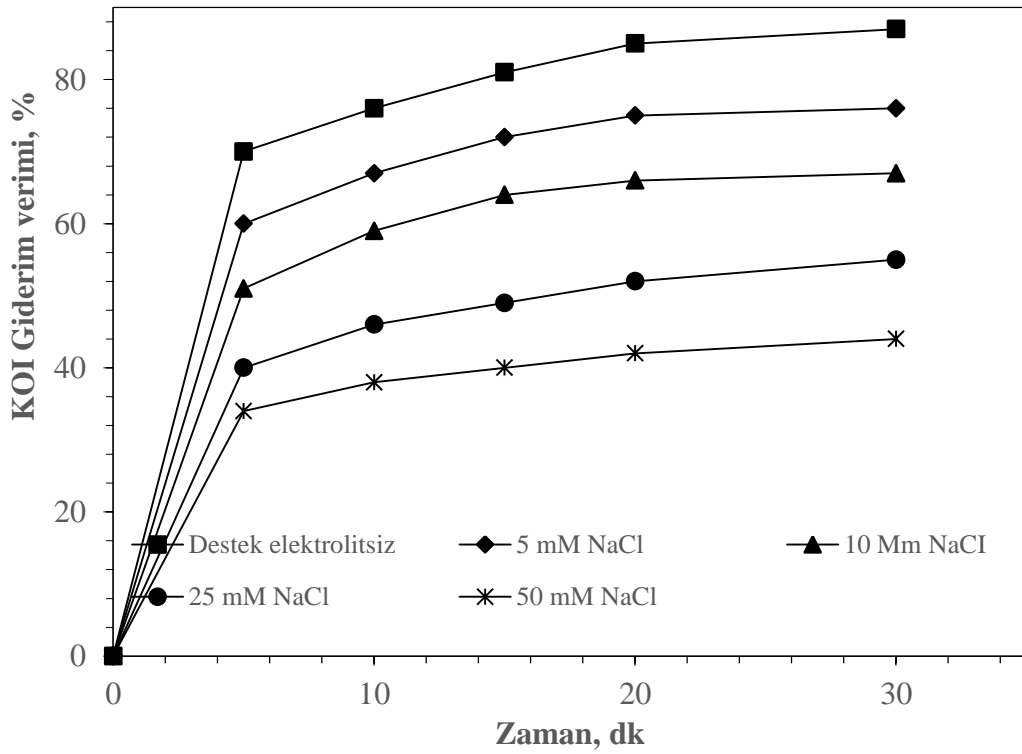
enerji tüketimi değeri  $256 \text{ kW-sa/m}^3$  değerine ulaşmaktadır. 7 pH başlangıç atıksu değerinde 5 Amperlik akım şiddeti için gerçekleşen enerji tüketimi 30 dakikalık reaksiyon süresi sonunda yaklaşık  $44 \text{ kW-sa/m}^3$  iken aynı pH değeri için 20 Amperlik akım şiddetinde enerji tüketimi değeri  $290 \text{ kW-sa/m}^3$  değerine ulaşmaktadır. Atıksuyun doğal pH değerinde 5 Amperlik akım şiddeti için gerçekleşen enerji tüketimi 30 dakikalık reaksiyon süresi sonunda yaklaşık  $53 \text{ kW-sa/m}^3$  iken aynı pH değeri için 20 Amperlik akım şiddetinde enerji tüketimi değeri  $315 \text{ kW-sa/m}^3$  değerine ulaşmaktadır. Aynı elektriksel iletkenlik değerine sahip olan atıksuda, hem akım şiddetinin artması hem de akım şiddetine bağlı olarak sisteme uygulanan potansiyel fark değerlerinin artması enerji tüketimi değerlerinin üstel olarak artmasına sebep olmaktadır.

Hem giderim verimleri hem de enerji tüketimi değerleri birlikte incelendiğinde akım şiddetinin artması hem KOİ giderim verimi değerlerinin hem de enerji tüketimi değerlerinin artmasına sebep olduğu görülmektedir. Bununla birlikte uygun bir arıtma prosesinin oluşturulabilmesi için kirletici giderim verimlerinin yüksek enerji tüketimi değerlerinin oldukça düşük olması gerektiği gerçeği göz ardı edilmemelidir. Bu durumda arıtım verimlerinin yüksek olmasına karşın enerji tüketimi değerleri de çok yüksek olduğu için yüksek akım şiddetlerinde elektrokoagülasyon prosesinin işletilmesi uygun olmayacağı sonucuna varılmıştır.

#### **4.3. Destek Elektrolit Türünün ve Konsantrasyonun Giderim Verimine Etkisi**

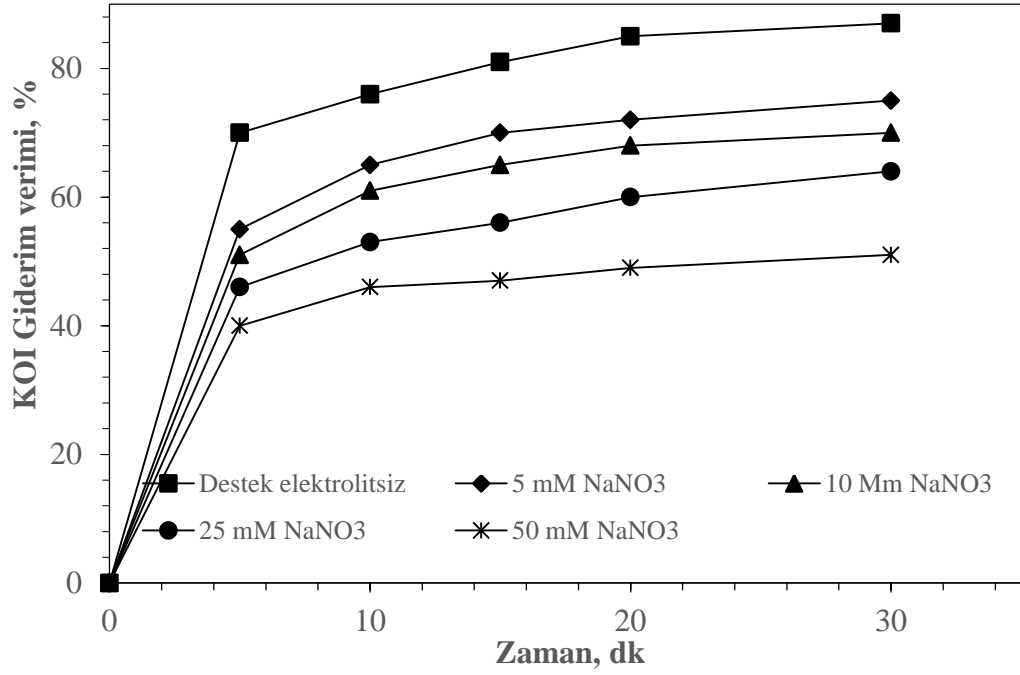
Erzurum Atatürk Üniversitesi Yerleşkesi kanalizasyon sisteminin, şehir kanalizasyon sistemi ile birleştiği yere yakın bir rögar noktasından temin edilen atıksuyun elektriksel iletkenlik değeri yaklaşık olarak  $1000\text{-}1050 \mu\text{S/cm}$  civarındadır. Elektrokoagülasyon prosesinde destek elektrolit kullanılmasının temel sebebi, düşük elektriksel iletkenlik değerine sahip atıksuların elektriksel iletkenlik değerlerinin yükseltilerek sistemde oluşabilecek direnç değerinin azaltılmasını sağlamak ve dolayısı ile sabit akım şiddeti altında uygulanan potansiyel fark değerinin azalmasına yardımcı olmaktır. Evsel atık suların arıtma veriminin artırılması çalışmalarında alüminyum anot ile yapılan denemelerde destek elektrolit türünün etkisi incelenirken NaCl (Sodyum klorür),

$\text{Na}_2\text{SO}_4$  (Sodyum sülfat) ve  $\text{NaNO}_3$  (Sodyum nitrat) gibi tuz türlerinin etkisi 5, 10, 25, ve 50 mM konsantrasyonlarında atıksuyun doğal başlangıç pH değerinde, oda sıcaklığında ve 10 Amper akım şiddetinde incelenmiş ve KOİ giderim verimi için elde edilen sonuçlar NaCl için Şekil 4.21,  $\text{NaNO}_3$  için Şekil 4.22 ve  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  için Şekil 4.23'de grafiksel olarak gösterilmiştir. İncelenen her bir destek elektrolit türü için hazırlanan grafiksel sonuçlarda mukayese yapılabilmesi için aynı deneysel şartlarda gerçekleştirilen destek elektrolit kullanılmadığı zaman elde edilen deneylerin sonuçları da gösterilmiştir.

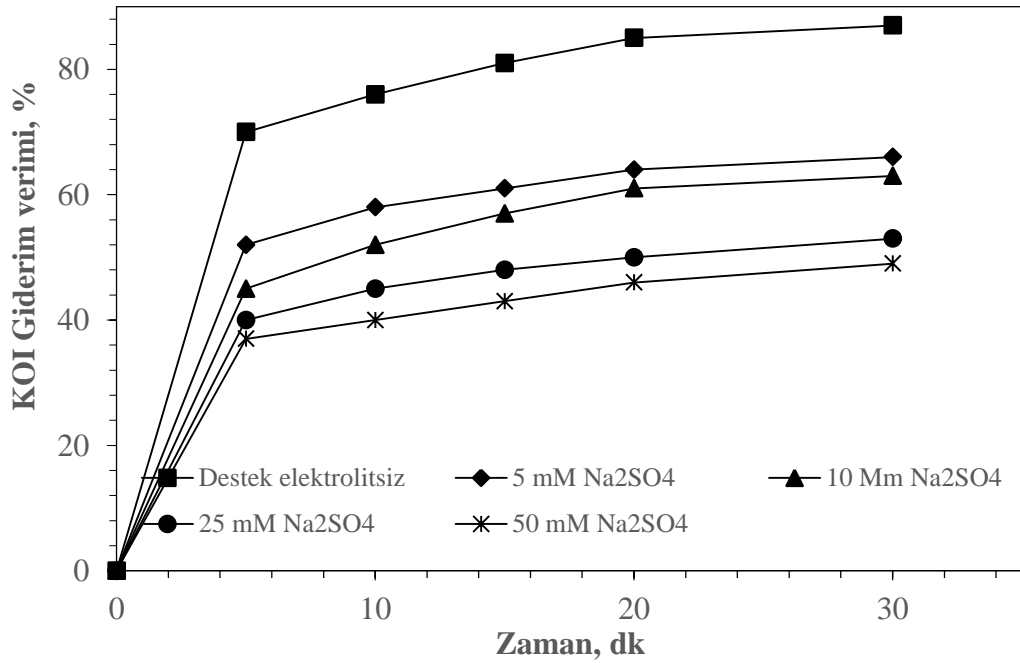


**Şekil 4.21.** KOİ giderim verimi üzerine NaCl destek elektrolit türünün etkisi  
\*pH: Tabii, Akım şiddeti: 10 A, Reaksiyon süresi: 30 dakika

KOİ giderim verimleri sodyum klorür için sırasıyla; 5 mM için %76, 10 mM için %67, 25 mM için %55 ve 50 mM için %44 olarak bulunmuştur. 30 dakikalık reaksiyon süresi sonunda, sisteme uygulanan akım şiddetinin 10 A ve atıksu pH değerinin doğal pH değeri olduğu destek elektrolitsiz denemelerde KOİ giderim verimi %87 olarak gerçekleşmiştir.



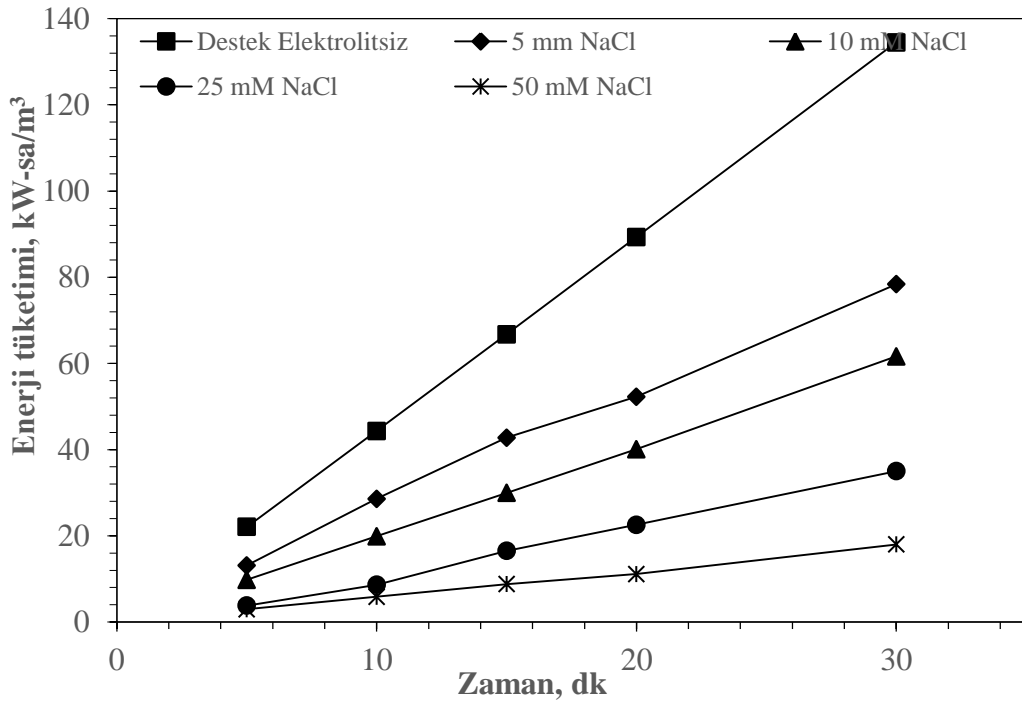
**Şekil 4.22.** KOİ giderim verimi üzerine NaNO<sub>3</sub> destek elektrolit türünün etkisi  
\*pH: Tabii, Akım şiddeti: 10 A, Reaksiyon süresi: 30 dakika



**Şekil 4.23.** KOİ giderim verimi üzerine Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> destek elektrolit türünün etkisi  
\*pH: Tabii, Akım şiddeti: 10 A, Reaksiyon süresi: 30 dakika

Destek elektrolit olarak sodyum nitrat ve sodyum sülfatın kullanıldığı denemelerde sodyum klorürün kullanıldığı denemelerde olduğu gibi artan destek elektrolit konsantrasyonu KOİ giderim veriminin azalmasına sebep olmuştur. Destek elektrolit olarak incelenen her üç tuz türünde de KOİ giderim verimi beklenenin aksine artan destek elektrolit tür konsantrasyonu ile ters orantılı olarak azalma eğilimi göstermiştir.

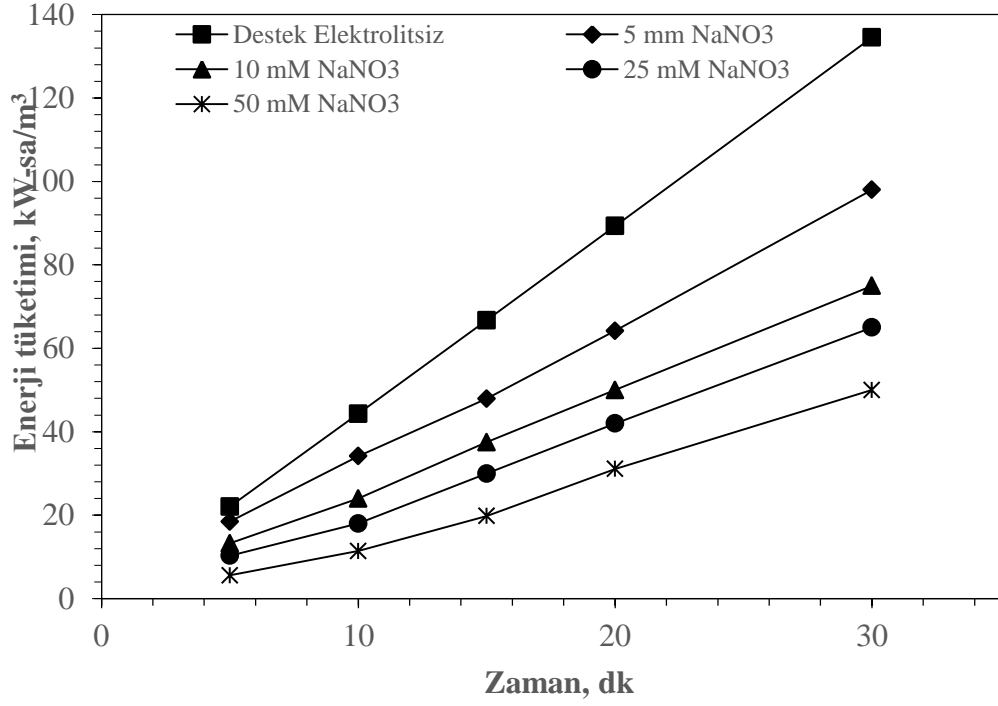
Destek elektrolit türünün incelendiği denemelerde sabit akım şiddeti altında sisteme uygulanan potansiyel fark değerleri yardımıyla sistemde meydana gelen enerji tüketim değerleri Eşitlik 3.2 yardımıyla hesaplanmış ve NaCl için Şekil 4.24, NaNO<sub>3</sub> için Şekil 4.25 ve Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> için Şekil 4.26'da grafiksel olarak gösterilmiştir.



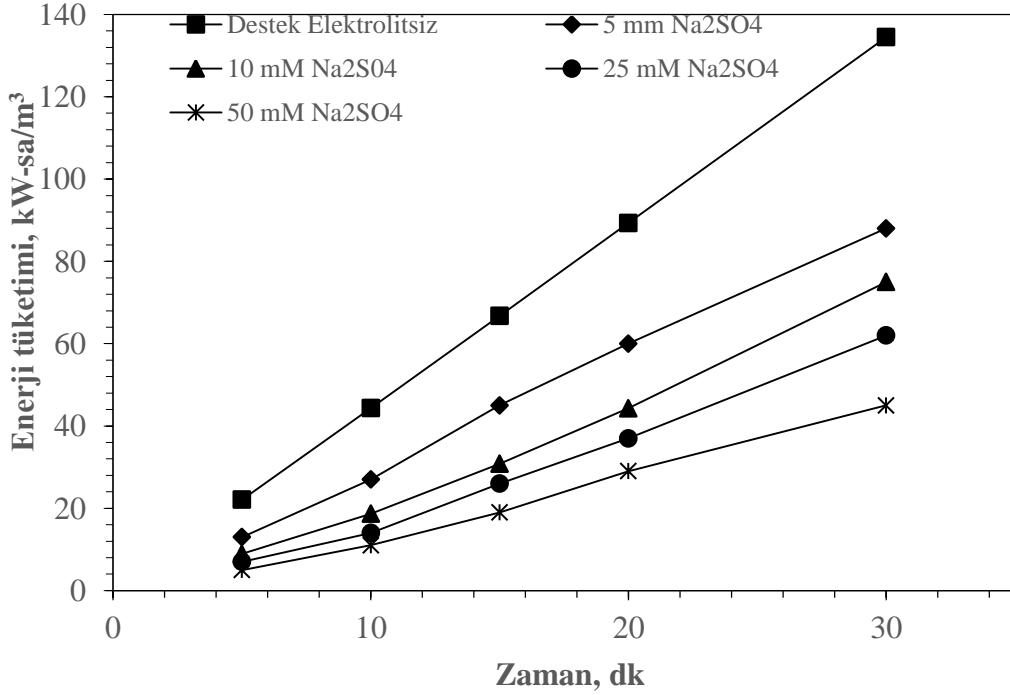
**Şekil 4.24.** Enerji tüketimi üzerine NaCl destek elektrolit türünün etkisi

\*pH: Tabii, Akım şiddeti: 10 A, Reaksiyon süresi: 30 dakika

Enerji tüketimi değerleri sodyum klorür için sırasıyla; 5 mM için 78.4, 10 mM için 61.6, 25 mM için 35 ve 50 mM için 18 kW-sa/m<sup>3</sup> olarak bulunmuştur. 30 dakikalık reaksiyon süresi sonunda, sisteme uygulanan akım şiddetinin 10 A ve atıksu pH değerinin doğal pH değeri olduğu destek elektrolitsiz denemelerde enerji tüketimi değeri 134.5 kW-sa/m<sup>3</sup> olarak gerçekleşmiştir.



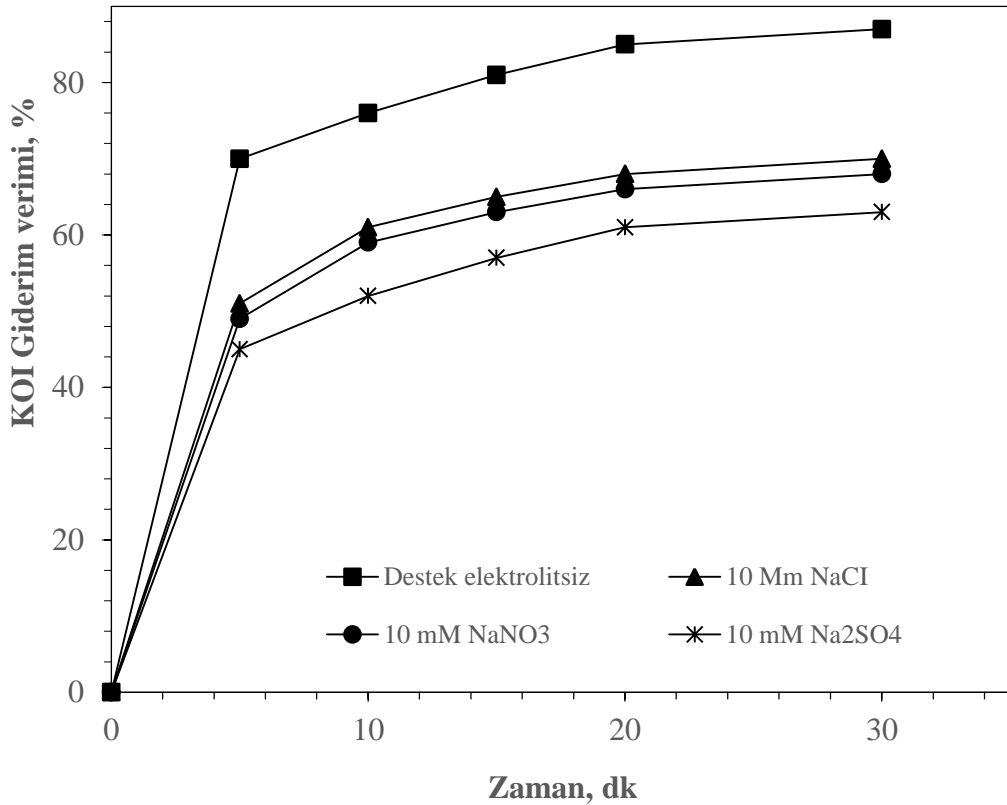
**Şekil 4.25.** Enerji tüketimi üzerine NaNO<sub>3</sub> destek elektrolit türünün etkisi  
\*pH: Tabii, Akım şiddeti: 10 A, Reaksiyon süresi: 30 dakika



**Şekil 4.26.** Enerji tüketimi üzerine Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> destek elektrolit türünün etkisi  
\*pH: Tabii, Akım şiddeti: 10 A, Reaksiyon süresi: 30 dakika

Şekil 4.24, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26 incelendiğinde çalışılan bütün destek elektrolit türleri için artan destek elektrolit konsantrasyonu, atıksuyun elektriksel iletkenlik değerini artırdığı için sabit akım şiddeti altında sistemde meydana gelecek direnç değerinin azalmasına sebep olmaktadır. Direnç değerlerinin azalması uygulanan potansiyel fark değerlerinin düşük değerlerde kalmasına ve Eşitlik 3.2 uyarınca sabit akım şiddeti altında enerji tüketimi değerlerinin azalmasına yol açmaktadır.

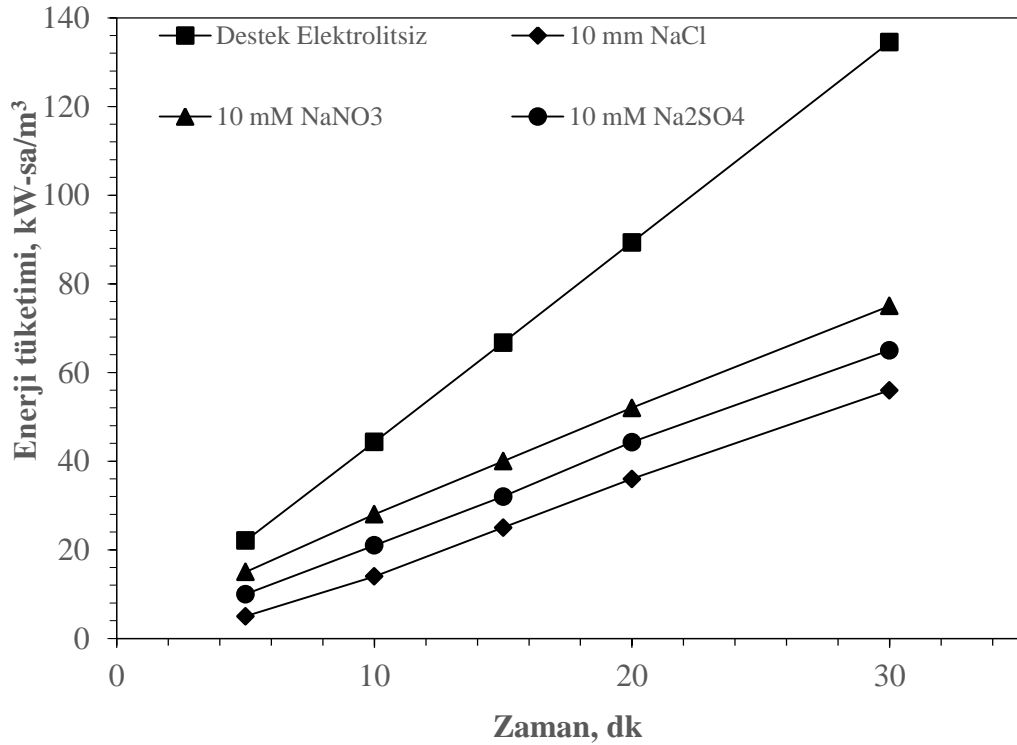
Destek elektrolitin türünün KOİ giderim verimine etkisi her bir destek elektrolit türü için 10Amperlik akım şiddetlerinde, 10 mM'lık destek elektrolit konsantrasyonlarında ayrı ayrı incelenmiştir. Gerçekleştirilen denemelerden elde edilen sonuçlar Şekil 4.27'de grafiksel olarak gösterilmiştir.



**Şekil 4.27.** Üç farklı destek elektrolit türünün KOİ giderim verimine etkisi  
\*pH: Tabii, Akım şiddeti: 10 A, Reaksiyon süresi: 30 dakika

Şekilden de görüldüğü gibi destek elektrolit kullanılmadan gerçekleştirilen denemede %87'lik bir KOİ giderme verimi ulaşılmışken, destek elektrolit olarak sodyum klorürün kullanılması sonucu KOİ giderim verimi %70'e, destek elektrolit olarak sodyum nitratın kullanılması sonucu KOİ giderim verimi %67'ye ve destek elektrolit olarak sodyum sülfatın kullanılması sonucu KOİ giderim verimi %63'e kadar gerilemiştir. Destek elektrolit olarak kullanılan üç tuz türünün hiç biri KOİ giderim verimine olumlu etki göstermediği gibi farklı oranlarda KOİ giderim veriminin azalmasına sebep olmuşlardır.

Destek elektrolitin türünün enerji tüketimine etkisi her bir destek elektrolit türü için 10 Amperlik akım şiddetlerinde, 10 mM'lık destek elektrolit konsantrasyonlarında ayrı ayrı incelenmiştir. Gerçekleştirilen denemelerden elde edilen sonuçlar Şekil 4.28'de grafiksel olarak gösterilmiştir.



**Şekil 4.28.** Üç farklı destek elektrolit türünün enerji tüketimine etkisi

\*pH: Tabii, Akım şiddeti: 10 A, Reaksiyon süresi: 30 dakika

Şekil 4.28 incelendiğinde, destek elektrolitsiz gerçekleştirilen denemelerden ortaya çıkan potansiyel fark değerleri ile hesaplanan enerji tüketimi değerlerinin 30 dakikalık reaksiyon süresi sonunda  $134,5 \text{ kW-sa/m}^3$  gibi çok yüksek bir değere ulaştığı görülmektedir. 30 dakikalık reaksiyon süresi sonunda destek elektrolit olarak NaCl kullanıldığında enerji tüketimi değeri  $56 \text{ kW-sa/m}^3$ , destek elektrolit olarak  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  kullanıldığında enerji tüketimi değeri  $65 \text{ kW-sa/m}^3$ , destek elektrolit olarak  $\text{NaNO}_3$  kullanıldığında enerji tüketimi değeri  $77 \text{ kW-sa/m}^3$  değerlerine ulaşmıştır.

İncelenen üç farklı destek elektrolit türü de farklı oranlarda enerji tüketimi değerlerini azaltsa da KOİ giderim verimini olumsuz yönde etkilediklerinden dolayı elektrokoagülasyon prosesi ile evsel atıksu arıtımı için destek elektrolit kullanılmasının uygun olmayacağı sonucuna varılmıştır.



## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada, Erzurum Atatürk Üniversitesi Yerleşkesi kanalizasyon sisteminin, şehir kanalizasyon sistemi ile birleştiği yere yakın bir rögar noktasından temin edilen evsel atıksudan, organik kirleticilerin elektrokoagülasyon prosesi ile arıtımına etki eden parametreler incelenmiş ve sistem parametrelerinin giderim verimleri üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Sistem performansı KOİ parametresi ölçülerek belirlenmiştir. Bütün denemeler, kesikli modda gerçekleştirilmiştir.

Elektrokoagülasyon prosesinde KOİ giderim verimini ve enerji tüketimi değerlerini etkileyebileceği düşünülen; atıksuyun başlangıç pH'sı, uygulanan akım şiddeti ve destek elektrolit türü ile konsantrasyonu değişken parametre olarak seçilmiştir.

### 5.1. Atıksuyun Başlangıç pH Değerinin Etkisi

Evsel atıksularının elektrokoagülasyon prosesi ile arıtımına etki eden önemli parametrelerden biri atıksuyun başlangıç pH değeridir. Bu parametre atıksuyun doğal pH değeri olan 7.6 değerinde ve bu değer altındaki olan 5, 6 ve 7 gibi değerler ile incelenmiştir. Atıksuyun doğal pH değeri ile gerçekleştirilen denemelerde elde edilen KOİ giderim verimi sonuçları, bu pH değerinin altındaki pH değerleri ile gerçekleştirilen denemelerden elde edilen sonuçlardan çok daha yüksektir. Bu durumun anot elektrot olarak kullanılan alüminyumun elektrokimyasal olarak çözünmesi sonucu oluşturacağı alüminyum hidroksit / oksihidroksit türleri için en uygun pH aralığının olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 4.3, 4.12, 4.13 ve 4.14 dikkatli bir şekilde incelendiğinde, araştırmaya konu olan her bir pH değerinde 30 dakikalık reaksiyon süresinin ilk 5 dakikalık kısmında hızlı bir giderim verimi elde edilmekte ve kalan 25 dakikalık reaksiyon süresinde giderim verimi açısından azalan bir artış söz konusu olmaktadır. İlk beş dakikalık zaman diliminde, Şekil 4.1, 4.6, 4.7 ve 4.8'de görüldüğü gibi farklı başlangıç pH değerine karşılık gelen farklı pH değerleri oluşmakta ve  $Al(OH)_3$ 'ün çözünürlüğü göz önüne alındığında atıksuyun doğal pH değeri ile

gerçekleştirilen denemeler daha iyi sonuç vermektedir. Reaksiyon boyunca düşük başlangıç pH değerlerinde (pH: 5, 6 ve 7)  $Al(OH)_3$ 'ün çözünürlüğünün en düşük olduğu pH aralığının altında kaldığı görülmüştür. Belirtilen sebeplerden dolayı elektrokoagülasyon ile alüminyum anot elektrot kullanılarak gerçekleştirilen denemelerde atıksuyun başlangıç pH değerinin doğal pH değeri olan 7.6 olması gerektiği anlaşılmıştır.

## 5.2. Akım Yoğunluğunun Giderim Verimine Etkisi

Alüminyum anot ile gerçekleştirilen elektrokoagülasyon çalışmalarında akım şiddetinin KOİ giderim verimleri üzerine etkilerini incelemek için akım şiddeti değerleri 5, 10, 15, ve 20 A aralığında seçilmiştir. Destek elektrolit kullanılmamış, atıksuyun başlangıç Ph değeri doğal pH değeri olan 7.6'ya ve altındaki 5, 6 ve 7'ye ayarlanmış ve reaksiyon süresince atıksuyun sıcaklığına müdahale edilmeden denemeler gerçekleştirilmiştir. Elektrokoagülasyon prosesinde artan akım şiddeti Faraday Yasasına göre birim zamanda reaktörde daha fazla anot materyalinin çözünmesine yol açacaktır. Birim kirletici başına uygun pH aralığında ortamda fazla miktarda çözünen koagülant madde, kirletici giderimi için gerekli olan daha fazla metal hidroksit oluşumuna sebep olmaktadır. Artan akım şiddeti ile artış gösteren  $Al(OH)_3$  sabit kirletici miktarı ile birim zamanda daha fazla reaksiyona girerek kirleticilerin giderim verimini artıracaktır. Bu sebepten dolayı elektrokoagülasyon prosesinde uygun pH değerleri aralığında akım şiddetinin artması evsel atıksularından KOİ giderim verimini artırmıştır. Artan akım şiddeti giderim verimini yükseltmesine rağmen enerji tüketimi değerlerini de oldukça yükseltmektedir. Akım şiddetinin artması ile atıksuyun elektriksel iletkenlik değerinin sabit kalmasından dolayı sistemde uygulanan potansiyel fark artmaktadır. Hem akım yoğunluğunun artması hem de potansiyel farkın artması enerji tüketiminin üstel olarak artmasına neden olmaktadır. Bu yüzden maksimum akım şiddeti ile değil giderme verimi ve enerji tüketimi değerlerinin optimum olduğu akım şiddeti aralığında çalışılmalıdır.

### 5.3. Destek Elektrolit Türünün Giderme Verimine Etkisi

Destek elektrolit türünün KOİ giderim verimleri üzerine olan etkisi elektrokoagülasyon prosesinde atıksuyun doğal pH değerinde, reaksiyon süresince atıksuyun sıcaklığına müdahale edilmeyen durumlarda NaCl, NaNO<sub>3</sub> ve Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> destek elektrolit türleri kullanılarak incelenmiştir. Denemelerde NaCl, NaNO<sub>3</sub> ve Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> destek elektrolit türlerinin 5, 10, 25ve 50 mM başlangıç konsantrasyonlarında KOİ giderim verimleri için 10 A sabit akım şiddetinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlarda araştırılmış ve kullanılan bütün destek elektrolit türlerinin KOİ giderim verimini farklı oranlarda azalttığı görülmüştür. Giderim verimini en az etkileyen destek elektrolitin NaCl olduğu tespit edilmiştir. NaNO<sub>3</sub> ve Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> kullanımı KOİ giderim veriminin daha fazla azalmasına yol açmıştır. Bu durum NaCl tuzunun çözüldüğünde hem iletkenlik değerinin artmasına yardımcı olması hem de Cl<sup>-</sup> iyonunun ortamda bulunma miktarına bağlı olarak atıksudaki kirleticilerin dolaylı oksidasyona maruz kalmalarına sebep olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Atıksuyun elektriksel iletkenlik değerinin yeterince yüksek olmaması dolayısı ile sistemde destek elektrolitsiz şartlarda aşırı direnç oluşmaktadır. KOİ giderim verimini olumsuz etkileyen destek elektrolit kullanımı, atıksuyun elektriksel iletkenlik değerini artırdığından dolayı enerji tüketimi değerlerinin azalmasına sebep olmuştur.

### 5.4. Destek Elektrolit Konsantrasyonunun Etkisi

Destek elektrolit konsantrasyonunun KOİ giderim verimlerine etkisi elektrokoagülasyon prosesinde atıksuyun doğal pH değerinde, reaksiyon süresince atıksuyun sıcaklığına müdahale edilmemiş durumlarda, NaCl, NaNO<sub>3</sub> ve Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> destek elektrolit türleri kullanılarak için incelenmiştir. Denemelerde NaCl, NaNO<sub>3</sub> ve Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> destek elektrolit türlerinin 5, 10, 25ve 50 mM başlangıç konsantrasyonlarında KOİ giderim verimleri için 10 A akım şiddetinde gerçekleşen elektrokimyasal reaktörde araştırılmıştır. İncelenen bütün destek elektrolit türlerinin artan konsantrasyonları, KOİ giderim veriminin daha fazla azalmasına sebep olmuştur. Bu sebepten dolayı destek elektrolit kullanımının evsel atıksu arıtımı için uygun olmayacağı kanaatine ulaşılmıştır.

## KAYNAKLAR

- Aji, B. A., Yavuz, Y. and Koparal, A. S., 2012. Electrocoagulation of Heavy Metals Containing Model Wastewater Using Monopolar Iron Electrodes. *Separation and Purification Technology*, 86, 248–254.
- Akarsu, C., 2014. Elektrokogülasyon Prosesi ile Endüstriyel Atıksu Arıtımı. Akademik Platform, Karabük.
- Akbulut, H. Y., Karpuzcu, M., Cihan, F. ve Dimoglo, A., 2003. Petrol İçeren Atıksuların Elektrokimyasal Yöntemlerle Arıtılması. Pp. 164-177. 5. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Aquino, J. M., Pereira, G. F., Rocha-Filho, R. C., Bocchi, N., Biaggio, S. R., 2011. Electrochemical Degradation of a Real Textile Effluent Using Boron-Doped Diamond or -  $PbO_2$  As Anode. *Journal of Hazardous Materials*, 192, 1275–1282.
- Arslan, T., Kabdaşlı, I., Arslan, İ., Ölmez, T. ve Tünay, O., 2008. Kompleks Olarak Bağlı Metal İçeren Atıksuların Elektrokogülasyon Prosesi ile Arıtımı. *İtü Dergisi*, Cilt 18 (1), 42-52.
- Bakırcı, B., 2014. Kesme Sıvılarının Karakterizasyonu ve Elektrokogülasyon ile Atıksulardan Arıtımı. Yüksek Lisans Tezi, Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- Balasubramanian, N., Kojima, T., Basha, C.A. and Srinivasakannan, C., 2009. Removal of Arsenic from Aqueous Solution Using Electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 167, 966–969.
- Balasubramanian, N., Madhavan, K., 2001. Arsenic Removal from Industrial Effluent Through Electrocoagulation, *Chem. Eng. Technol.*, 24, 519-521.
- Bayar, S., 2014. Fenton ve Elektrokimyasal Yöntemlerle Fıstık İşleme Sanayi Atıksularının Arıtımının İncelenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Bukhari, A. A., 2008. Investigation of the Electro-Coagulation Treatment Process for the Removal of Total Suspended Solids and Turbidity from Municipal Wastewater, *Bioresource Technology*, 99, 914–921.
- Can, B. Z., 2010. Sulu Çözeltilerden Arsenik ve Borun Birlikte ve Seçimli Olarak Elektrokogülasyon Yöntemi ile Giderimi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi. Erzurum.
- Can, O., Bayramoğlu, M. ve Kobyay, M., 2002. Atıksulardan Tekstil Boyalarının Elektrokogülasyon ile Giderilmesi. I. Ulusal Çevre Sorunları Sempozyumu. Erzurum, Pp. 631-642.
- Can, O., Kobyay, M., Demirbas, E. and Bayramoglu, M., 2006. Treatment of the Textile Wastewater by Combined Electrocoagulation. *Chemosphere*, 62, 181–187.
- Chen, C., Chen, G., Yue, L., 2002. Investigation on the Electrolysis Voltage of Electrocoagulation, *Chemical Engineering Science*, 57, 2449-2455.
- Chen, G., 2004. Electrochemical Technologies in Wastewater Treatment. *Separation and Purification Technology*, 38, 11-41.
- Chen, G., Chen, X., Yue, P. L., 2000. Electrocoagulation and Electroflotation of Restaurant Wastewater. *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 126, No. 9.

- Chiang, L. C., Chang, J. E. and Wen, T. C., 1995. Electrochemical Treatability of Refractory Pollutants in Landfill Leachate. *Hazardous Wastes And Hazardous Materials*, 12 (1), 71-82.
- Cotillas, S., Llanos, J., Canizares, P., Mateo, S., Rodrigo, M. A., 2013. Optimization of an Integrated Electrodisinfection/Electrocoagulation Process With Al Bipolar Electrodes for Urban Wastewater Reclamation, *Water Research*, 47, 1741-1750.
- Daneshvar, N., Sorkhabi, H. A., Kasiri, M. B., 2004. Decolorization of Dye Solution Acid Red 14 by Electrocoagulation With a Comparative Investigation of Different Electrode Connections, *Journal of Hazardous Materials*, B112, 55–62.
- Delipinar, Ş., 2007. Maya Endüstrisi Atıksularının Elektrokogülasyon ve Kimyasal Koagülasyon ile Arıtımı, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Fen Bilimleri Enstitüsü, 3-81, Gebze.
- Díaz, C. B., Uribe, B. F., Bilyeu, B., 2014. Removal of Organic Pollutants in Industrial Wastewater With an Integrated System of Copper Electrocoagulation and Electrogenerated  $H_2O_2$  *Chemosphere* <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere>.
- Feng, J. W., Sun, Y. B., Zheng, Z., Zhang, J. B., Li, S., Tian, Y. C., 2007. Treatment of Tannery Wastewater by Electrocoagulation, *Journal of Environmental Sciences*, 19, 1409–1415.
- Feng, C., Sugiura, N., Shimada, S., Maekawa T., 2003. Development of a High Performance Electrochemical Wastewater Treatment System, *Journal of Hazardous Materials*, B103, 65-78.
- Fouad, Y.O., 2014. Separation of Cottonseed Oil From Oil–Water Emulsions Using Electrocoagulation Technique. *Alexandria Engineering Journal*, 53, 199–204.
- Gengec, E., Kobya, M., Demirbas, E., Akyol, A. and Oktor, K., 2012. Optimization of Baker's Yeast Wastewater Using Response Surface Methodology by Electrocoagulation. *Desalination*, 286, 200–209.
- Ghosh, D., Medhi, C. R., Purkait, M. K., 2008. Treatment of Fluoride Containing Drinking Water by Electrocoagulation Using Monopolar and Bipolar Electrode Connections, *Chemosphere*, 73, 1393–1400.
- Ghosh, D., Solanki, H., Purkait, M. K., 2008. Removal of Fe (II) from Tap Water by Electrocoagulation Technique *Journal of Hazardous Materials*, 155, 135–143.
- Güney, S., 2013. Elektrokogülasyon Prosesinin Çevre Mühendisliğindeki Uygulamaların Araştırılması, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Bursa.
- Hariz, I. B., Halleb, A., Adhoum, N., Monser, L., 2013. Treatment of Petroleum Refinery Sulfidic Spent Caustic Wastes by Electrocoagulation, *Separation and Purification Technology*, 107, 150–157.
- Hernandez, I. L., Díaz, C. B., Bilyeu, B., Rojas, P. J. G. and Medinac, E. C., 2010. A Combined Electrocoagulation–Electrooxidation Treatment for Industrial Wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 175, 688–694.
- Holt, P. K., Barton, G. W., Mitchell, C. A., 2005. The Future for Electrocoagulation As a Localised Water Treatment Technology. *Chemosphere*, 59, 355-367.
- Ihara I., Kanamura K., Shimada E., 2004. High Gradient Magnetic Separation Combined With Electrocoagulation and Electrochemical Oxidation for the Treatment of Landfill Leachate. *Ieee Transactions on Applied Superconductivity*, 14-2, 1558-1560.

- Isa, M. H., Ezechi, E. H., Ahmed, Z., Magram, S. F. and Kutty, S. R. M., 2014. Boron Removal by Electrocoagulation and Recovery. *Water Research*, 51, 113-123.
- İlhan, F., Kurt, U., Apaydın, Ö., Arslankaya, E. ve Gönüllü, M. T., 2007. Elektrokimyasal Arıtım ve Uygulamaları: Katı Atık Sızıntı Suyu Çalışması. AB Sürecinde Türkiye’de Katı Atık Yönetimi ve Çevre Sorunları Sempozyumu, İstanbul.
- Jiang, J. Q., Graham, N., André, C., Kelsall, G. H. and Brandon, N., 2002. Laboratory Study of Electro-Coagulation–Flotation for Water Treatment. *Water Research*, 36 (16), 4064-4078.
- Kabuk, H. A., 2010. Sızıntı Sularının Elektrodializ Öncesi Elektrokoagülasyonla Arıtımının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kobyay, M., Bayramoğlu, M., Can, O. T., Sözbir, M. ve Akyol, A., 2008. Endüstriyel Atıksuların Arıtılması İçin Elektrokimyasal Reaktör Geliştirilmesi. Tübitak Projesi, Kocaeli.
- Kobyay, M., Gebologlu, U., Ulu, F., Oncel, S. and Demirbas, E., 2011. Removal of Arsenic from Drinking Water by the Electrocoagulation Using Fe and Al Electrodes, *Electrochimica Acta*, 56, 5060–5070.
- Kobyay, M., Ulu, F., Gebologlu, U., Demirbas, E., Oncel, S., 2011. Treatment of Potable Water Containing Low Concentration of Arsenic With Electrocoagulation: Different Connection Modes and Fe–Al Electrodes, *Separation and Purification Technology*, 77, 283–293.
- Koparal, A. S., Ogutveren, Ü. B., 2002. Removal of Nitrate From Water by Electro Reduction and Electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 83-94.
- Koyuncu, A. G., 2006. Şeker Endüstrisi Atıksularının Elektrokimyasal Yöntemlerle Arıtımı. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Kumar, N. S., Goel, S., 2010. Factors Influencing Arsenic and Nitrate Removal From Drinking Water in a Continuous Flow Electrocoagulation (EC) Process. *Journal of Hazardous Materials*, 173, 528–533.
- Kurt, U., İlhan, F., Birben, N. C., Ulucan, K. ve Gönüllü, M. T., 2009. Sızıntı Sularının Eysel Atıksularla Birlikte Elektrokoagülasyon Prosesiyle Arıtılabilirliğinin İncelenmesi. Türkiye’de Katı Atık Yönetimi Sempozyumu, İstanbul.
- Kurt, U., 2007. Fenton ve Elektrokimyasal Yöntemlerle Eysel Atıksuların Arıtılabilirliğinin Araştırılması. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Lacasa, E., Canizares, P., Sáez, C., Fernández, F. J., Rodrigo, M. A., 2011. Removal of Nitrates from Groundwater by Electrocoagulation, *Chemical Engineering Journal*, 171, 1012– 1017.
- Lakshminathiraj, P., Prabhakar, S., Raju, G. B., 2010. Studies on the Electrochemical Decontamination of Wastewater Containing Arsenic. *Separation and Purification Technology*, 73, 114–121.
- Llanos, J., Cotillas, S., Canizares, P., Rodrigo, M. A., 2014. Effect of Bipolar Electrode Material on the Reclamation of Urban Wastewater by an Integrated Electrodisinfection/Electrocoagulation Process. *Water Research*, 53, 329-338.

- Mahvi, A. H., Ebrahimi, S. J. A., Mesdaghinia, A., Gharibi, H., Sowlat, M. H., 2011. Performance Evaluation of a Continuous Bipolar Electrocoagulation/Electrooxidation–Electroflotation (ECEO–EF) Reactor Designed for Simultaneous Removal of Ammonia and Phosphate from Wastewater Effluent, *Journal of Hazardous Materials*, 192, 1267–1274.
- Malakootian, M., Mansoorian, H. J., Moosazadeh, M., 2010. Performance Evaluation of Electrocoagulation Process Using Iron-Rod Electrodes for Removing Hardness From Drinking Water. *Desalination*, 255, 67–71.
- Melhem, K. B., Smith, E., 2012. Grey Water Treatment by a Continuous Process of an Electrocoagulation Unit and a Submerged Membrane Bioreactor System. *Chemical Engineering Journal*, 198–199, 201–210.
- Metcalf and Eddy, 2003. *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*, Tata McGraw-Hill, New Delhi.
- Mohora, E., Roncevi, S., Dalmacija, B., Agbaba, J., Watson, M., Karlovic, E., Dalmacija, M., 2012. Removal of Natural Organic Matter and Arsenic from Water by Electrocoagulation/Flotation Continuous Flow Reactor. *Journal of Hazardous Materials*, 235, 257–264.
- Mollah, M. Y., Schennach R., Parga, J. R., Cocke, D., 2001. Electrocoagulation Science and Applications, *Journal of Hazardous Materials*, B84, 29-41.
- Mollah, M. Y., Morkovsky, P., Gomes, J.A.G., Kesmez, M., Parga, J., Cocke, D.L., 2004. Fundamentals, Present and Future Perspectives of Electrocoagulation, *Journal of Hazardous Materials*, B114 199210.
- Özcan, S., 2013. Şeker Fabrikası Atıksuyunun Elektrokoagülasyon Yöntemi ile Arıtımı. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Özgür Ansiklopedi (Vikipedi) 2015, <https://tr.wikipedia.org> (27.05.2015).
- Özgürses, M. T., 2003. Elektrokoagülasyon ile Reaktif Tekstil Boya Çözeltilerinin Arıtımı, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, 39-75, Kocaeli.
- Öztürk, T., Veli, S., Dimoglo A., Öncel, S., Ayberk, S., 2005. İzaydaş Depo Alanı Sızıntı Suyunun Elektrokoagülasyon Yöntemiyle Arıtımı, 3. Ulusal Katı Atık Kongresi, İzmir, Türkiye.
- Özyonar, F. ve Karagözoğlu, B., 2012. Elektrokoagülasyon Prosesi ile Tekstil Sanayi Atıksuyunun Arıtımı. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28 (1), 29-37.
- Pajootan, E., Arami, M., Mahmoodi, N. M., 2012. Binary System Dye Removal by Electrocoagulation from Synthetic and Real Colored Wastewaters. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 43, 282–290.
- Parsa, J. B., Vahidian, H. R., Soleymani, A. R., Abbasi, M., 2011. Removal of Acid Brown 14 in Aqueous Media by Electrocoagulation: Optimization Parameters and Minimizing of Energy Consumption. *Desalination*, 278, 295–302.
- Pikaar, I., Rozendal, R. A., Yuan, Z., Keller, J., Rabaey, K. 2011. Electrochemical Sulfide Removal from Synthetic and Real Domestic Wastewater at High Current Densities. *Water Research*, 45, 2281-2289.
- Rajeshwar, K., Ibanez, J. G., Swain, G. M., 1994. Electrochemistry and the Environment. *Journal of Applied Electrochemistry*, 24, 1077-1091.

- Rodrigo, M. A., Canizares, P., Buitron, C., Saez, C., 2010. Electrochemical Technologies for the Regeneration of Urban Wastewaters. *Electrochimica Acta*, 55, 160–8164.
- Sarıkaya, Y., 1993. Elektrokoagülasyon. *Fizikokimya*, Gazi Büro Kitabevi, Ankara, 10-25.
- Sayiner, G., Kandemirli, F. and Dimoglo, A., 2008. Evaluation of Boron Removal by Electrocoagulation Using Iron and Aluminum Electrodes, *Desalination*, 230, 205–212.
- Sayiner, G., 2003. Borlu Atıksuların Elektrokoagülasyon Yöntemi ile Arıtılabilirliğinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Scott, K., 1995. *Electrochemical Process for Clean Technology*, The Royal Society of Chemistry, Cornwall.
- Solak, M., 2013. Kesikli ve Sürekli Elektrokoagülasyon Prosesleri ile Atıksulardan Fosfat Giderimi ve Prosesin Optimizasyonu. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Doktora Tezi. Isparta.
- Solak, M., 2007. Elektrokoagülasyon Prosesi ile Mermer Atıksularının Arıtılması, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Şengil, İ. A., Ozacar, M., 2006. Treatment of Dairy Wastewaters by Electrocoagulation Using Mild Steel Electrodes, *Journal of Hazardous Materials*, B137, 1197–1205.
- Şensoy, M. T., 2008. Sürekli Akış Elektrokoagülasyon Prosesi ile Tekstil Atıksularının Arıtımı. Su Tüketimi Arıtma Yeniden Kullanım Sempozyumu, İznik-Bursa.
- Şimşeker, M., 2009. Tekstil Endüstrisi İndigo Atıksularının Elektrokoagülasyon ve Diğer Fiziksel-Kimyasal Yöntemler ile Arıtımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tran, N., Drogui, P., Blais, J. F. and Mercier, G., 2012. Phosphorus Removal from Spiked Municipal Wastewater Using Either Electrochemical Coagulation or Chemical Coagulation as Tertiary Treatment, *Separation and Purification Technology*, 95, 16–25.
- Tsai, C. T., Lin, S. T., Shue, Y. C., 1997. Electrolysis of Soluble Organic Matter in Leachate From Landfills. *Water Research*, 31-12, 3073-3081.
- Un, U. T. and Ozel, E., 2013. Electrocoagulation of Yogurt Industry Wastewater and the Production of Ceramic Pigments from the Sludge, *Separation and Purification Technology*, 120, 386–391.
- Uygun, R., 2003. Demir ve Alüminyum Elektrotlar Kullanılarak Tekstil Boyalarının Elektrokoagülasyon ile Arıtımı, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.
- Üçgül, İ. ve İskender, K. A., 2013. Tekstil Endüstrisi Atık Suyunun Renk Giderimi İçin Elektrokoagülasyon Yöntemi Uygulaması. *Yekarum E-Dergi*, Cilt 2 (1), 1-12.
- Vasudevan, S., Lakshmi, J., Sozhan, G., 2013. Electrochemically Assisted Coagulation for the Removal of Boron From Water Using Zinc Anode. *Desalination*, 310, 122–129.
- Vepsäläinen, M., Pulliainen, M., Sillanpää, M., 2012. Effect of Electrochemical Cell Structure on Natural Organic Matter (NOM) Removal From Surface Water Through Electrocoagulation (EC). *Separation and Purification Technology*, 99, 20–27.



- Wana, W. T., Pepping, J., Banerji, T., Chaudhari, S., Giammar, D. E., 2011. Effects of Water Chemistry on Arsenic Removal from Drinking Water by Electrocoagulation. *Water Research*, 45, 384-392.
- Xu, X., and Zhu X., 2004. Treatment of Refractory Oily Wastewater by Electro-Coagulation Process, *Chemosphere*, 56, 889-894.
- Yıldız, Y. S., 2003. Humik Maddeler İçeren Atık Suların Elektrokoagülasyon Metodu ile Arıtımı. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Erzurum.
- Yıldız, Y. Ş., 2008. Optimization of Bomaplex Red CR-L Dye Removal from Aqueous Solution by Electrocoagulation Using Aluminum Electrodes, *Journal of Hazardous Materials*, 153, 194–200.
- Yılmaz, A. E., 2009. Endüstriyel Atıksulardan Elektrokoagülasyon Yöntemi ile Bor Giderimi. Fen Bilimleri Enstitüsü. Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Yılmaz, A. E., Boncukcuoglu, R., Kocakerim, M. M. and Kocadagistan, E., 2008. An Empirical Model for Kinetics of Boron Removal from Boron Containing Wastewaters by the Electrocoagulation Method in A Batch Reactor, *Desalination*, 230, 288–297.
- Zodi, S., Merzouk, B., Potier, O., Lopicque, F., Leclerc, J. P., 2013. Direct Red 81 Dye Removal by a Continuous Flow Electrocoagulation/Flotation Reactor. *Separation and Purification Technology*, 108, 215–222.
- Zodi, S., Potier, O., Lopicque, F., Leclerc, J. P., 2010. Treatment of the Industrial Wastewaters by Electrocoagulation: Optimization of Coupled Electrochemical and Sedimentation Processes. *Desalination*, 261, 186–190.
- Zuo, Q., Chen, X., Li, W., Chen, G., 2008. Combined Electrocoagulation and Electroflotation for Removal of Fluoride From Drinking Water. *Journal of Hazardous Materials*, 159, 452–457.

## ÖZGEÇMİŞ

11.10.1991 Ordu doğumludur. İlköğretime Şeyhler Köyü İlköğretim Okulunda başlamış 7. ve 8. Sınıfını Ordu Ulubey Kız Pansiyonlu İlköğretim Okulunda tamamlamıştır. Lise eğitimine ise Ulubey Anadolu Lisesinde devam etmiştir. Ardından 2009 yılında Atatürk Üniversitesi Çevre Mühendisliğini kazanarak lisans eğitimini burada tamamlamıştır. Yüksek lisans eğitimi için de aynı üniversiteyi tercih etmiştir.