



**FENTON VE KOAGÜLASYON-FENTON YÖNTEMLERİ  
İLE KİMYA ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ ARITIMI**

**SEDA METİN**

**Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Danışman: Doç. Dr. Deniz İzlen ÇİFÇİ**

**2022**

**T.C.**  
**TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**FENTON VE KOAGÜLASYON-FENTON YÖNTEMLERİ İLE KİMYA**  
**ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ ARITIMI**

**SEDA METİN**

**ORCID: 0000-0002-9628-4831**

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

**Danışman: Doç. Dr. Deniz İzlen ÇİFÇİ**

**EKİM - 2022**

**Her hakkı saklıdır.**

## ÖZET

### FENTON VE KOAGÜLASYON-FENTON YÖNTEMLERİ İLE KİMYA ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ ARITIMI

Seda METİN

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Deniz İzlen ÇİFÇİ

Tüm dünyada kimya endüstrisi çevreyi kirleten en önemli sanayi dallarından birisi olup, önlem alınması gereken sektörlerin başında yer almaktadır. Kimya endüstrisi atıksuları genel olarak yüksek KOİ konsantrasyonuna sahiptir. Bu çalışmada Fenton ve Koagülasyon - Fenton oksidasyon prosesleri kullanılarak kimya endüstrisi atıksuyunun arıtımı araştırılmış ve her iki proseste de işletmeye etki eden parametrelerin etkisi ve en iyi giderim elde edildiği koşullar belirlenmiştir. Koagülasyon prosesinde PAK,  $FeCl_3$  ve PAKS koagülantları ile farklı koagülant dozları ve pH değerlerinde arıtım çalışmaları yapılmış olup, en iyi arıtım sağlanan koagülantın PAK olduğu ve 500 mg/l PAK dozunda ve pH 8 değerinde en yüksek giderim verimine ulaşıldığı görülmüştür. Bu şartlar altında kimya endüstrisi atıksuyunun koagülasyonu sonunda %62,6 KOİ, %44,3 TOK, %89,5 AKM ve %87,6 Bulanıklık giderimi elde edilmiştir. Koagülasyon sonrası Fenton oksidasyonu ( $Fe^{+2}$ : 3750 mg/l,  $H_2O_2$ : 4250 mg/l, pH: 3, süre: 60 dak) ile atıksuda %79,3 KOİ, %63,5 TOK, %76,1 AKM ve %99,8 Bulanıklık giderimi gözlenmektedir. Koagülasyon sonrasında Fenton oksidasyon prosesi ile arıtılmış atıksuda, toplam KOİ giderimi %92,4, TOK giderimi %79,7, AKM giderimi %96,6 ve Bulanıklık giderimi %99,8 olarak elde edilmiştir. Kimya endüstrisi atıksuyunun sadece Fenton oksidasyonu ( $Fe^{+2}$ : 2000 mg/l,  $H_2O_2$ : 5000 mg/l, pH: 3) ile arıtımında ise %70,5 KOİ, %52,7 TOK, %82,0 AKM ve %98,6 Bulanıklık giderimi elde edilmiştir. Sonuç olarak, kimya endüstrisi atıksuyunun Fenton ve Koagülasyon-Fenton prosesleri ile arıtımı karşılaştırıldığında, Koagülasyon sonrası Fenton oksidasyonu ile arıtım sonunda daha yüksek KOİ, AKM ve Bulanıklık giderim verimlerine ulaşılabilmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Kimya Endüstrisi, Arıtma Yöntemleri, İleri Oksidasyon Prosesleri, Fenton Prosesi, Koagülasyon

## ABSTRACT

### TREATMENT OF CHEMICAL INDUSTRY WASTEWATER BY FENTON AND COAGULATION-FENTON METHODS

Seda METİN

Department of Environmental Engineering

MSc. Thesis

Supervisor: Assoc. Dr. Deniz İzlen ÇİFÇİ

All over the world, the chemical industry is one of the most important industrial branches that pollute the environment, and it is one of the sectors that need to be taken precautions. Chemical industry wastewater generally has high COD concentration. In this study, the treatment of chemical industry wastewater was investigated using Fenton and Coagulation - Fenton oxidation processes, and the effects of the parameters affecting the operation in both processes and the conditions in which the best removal was obtained were determined. In the coagulation process, treatment studies were carried out with PAC, FeCl<sub>3</sub> and PACS coagulants at different coagulant doses and pH values, and it was observed that the best treatment was PAC and the highest removal efficiency was achieved at 500 mg/l PAC dose and pH 8. Under these conditions, at the end of the coagulation of the chemical industry wastewater, 62.6% COD, 44.3% TOC, 89.5% TSS and 87.6% Turbidity removal were obtained. After coagulation, Fenton oxidation (Fe<sup>+2</sup>: 3750 mg/l, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: 4250 mg/l, pH: 3, time: 60 min) in wastewater with 79.3% COD, 63.5% TOC, 76.1% TSS and 99.8% Turbidity removal is observed. In wastewater treated with Fenton oxidation process after coagulation, total COD removal was 92.4%, TOC removal 79.7%, TSS removal 96.6% and Turbidity removal 99.8%. In the treatment of chemical industry wastewater only with Fenton oxidation (Fe<sup>+2</sup>: 2000 mg/l, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: 5000 mg/l, pH: 3) 70.5% COD, 52.7% TOC, 82.0% TSS and 98.6% turbidity removal were obtained. As a result, when the treatment of chemical industry wastewater is compared with Fenton and Coagulation-Fenton processes, higher COD, TSS and Turbidity removal efficiencies can be achieved at the end of treatment with Fenton oxidation after coagulation.

**Keywords:** Chemical Industry, Treatment Methods, Advanced Oxidation Processes, Fenton Process, Coagulation

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER DİZİNİ .....	ix
KISALTMALAR DİZİNİ.....	x
TEŞEKKÜR.....	xi
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1.Literatür Özeti .....	1
1.2.Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	2
<b>2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....</b>	<b>3</b>
2.1.Kimya Endüstrisi ve Kimya Endüstrisi Atıksuyunun Özellikleri.....	3
2.2.Fenton Oksidasyon Prosesi .....	4
2.2.1. Fenton Oksidasyon Prosesine Etki Eden Faktörler .....	5
2.2.1.1.pH etkisi .....	5
2.2.1.2.Demir iyonu ( $Fe^{+2}$ ) etkisi.....	5
2.2.1.3.Hidrojen peroksit ( $H_2O_2$ ) etkisi .....	6
2.2.1.4.Fe/ $H_2O_2$ oranının etkisi .....	6
2.2.1.5.Sıcaklığın Etkisi .....	6
2.2.1.6.Atıksu içerisindeki iyon etkisi .....	7
2.3.Koagülasyon Prosesi.....	7
2.3.1. Koagülant Maddeler .....	8
2.4.Atıksuların Fenton Oksidasyon Prosesi ile Arıtımı .....	10
2.5.Atıksuların Koagülasyon Prosesi ile Arıtımı .....	15
<b>3. MATERYAL VE METOD .....</b>	<b>19</b>
3.1.Çalışmada Kullanılan Kimya Endüstrisi Atıksuyu .....	19
3.2.Koagülasyon Prosesi Çalışmaları .....	20
3.3.Koagülasyon sonrası Fenton Oksidasyon Prosesi Çalışmaları .....	22

3.4.Fenton Oksidasyon Prosesi Çalışmaları .....	22
3.5.Analizler.....	23
<b>4. DENEYSEL BULGULAR .....</b>	<b>27</b>
4.1.Kimya Endüstrisi Atıksuyunda Yapılan Koagülasyon Çalışmaları.....	27
4.1.1. Koagülasyon Çalışmalarında Koagülant Dozu Etkisi .....	27
4.1.2. Koagülasyon Çalışmalarında pH Etkisi.....	31
4.2.Koagülasyon Sonrası Fenton Oksidasyon Prosesi Çalışmaları .....	36
4.2.1. H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Konsantrasyonu Etkisi.....	36
4.2.2. Fe <sup>+2</sup> Konsantrasyonu Etkisi .....	39
4.2.3. pH Etkisi .....	42
4.2.4. Fenton Oksidasyon Süresi Etkisi.....	45
4.3.Kimya Endüstrisi Atıksuyunda Fenton Oksidasyon Prosesi Çalışmaları .....	47
4.3.1. Fe <sup>+2</sup> Konsantrasyonu Etkisi .....	47
4.3.2. H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Konsantrasyonu Etkisi.....	50
4.3.3. pH Etkisi .....	52
4.3.4. Fenton Oksidasyonu Süresi Etkisi .....	54
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>57</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>59</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Atıksu arıtımında fenton oksidasyon prosesi ile yapılan çalışmalar .....	11
Çizelge 2.2. Atıksu arıtımında koagülasyon prosesi ile yapılan çalışmalar .....	16
Çizelge 3.1. Kimya endüstrisi atıksuyu giriş parametre değerleri.....	20
Çizelge 4.1. Farklı koagülantlar ile elde edilen giderim verimleri.....	35
Çizelge 4.2. PAK koagülantı kullanılarak yapılan koagülasyon sonrasında kimya endüstrisi atıksuyunun özellikleri .....	36



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Koagülasyon düzeneği .....	21
Şekil 3.2. KOI tüpleri .....	24
Şekil 3.3 KOI titronic cihazı.....	24
Şekil 3.4. AKM süzme seti.....	25
Şekil 3.5. Süzme düzeneğinden geçirilmiş filtre kağıtları.....	25
Şekil 3.6. Hassas terazi .....	26
Şekil 3.7. Bulanıklık ölçüm cihazı (Türbidimetre).....	26
Şekil 4.1. Farklı koagülant konsantrasyonlarında elde edilen KOİ giderim verimleri (pH: 8, süre: 30 dak.) .....	28
Şekil 4.2. Farklı koagülant konsantrasyonlarında elde edilen TOK giderim verimleri (pH: 8, süre: 30 dak.) .....	29
Şekil 4.3. Farklı koagülant konsantrasyonlarında elde edilen AKM giderim verimleri (pH: 8, süre: 30 dak.) .....	30
Şekil 4.4. Farklı koagülant konsantrasyonlarında elde edilen bulanıklık giderim verimleri (pH: 8, süre: 30 dak.) .....	31
Şekil 4.5. Farklı pH değerlerinde elde edilen KOİ giderim verimleri (PAKS: 700 mg/l, FeCl <sub>3</sub> : 500 mg/l, PAK: 500 mg/l, süre: 30 dak.) .....	32
Şekil 4.6. Farklı pH değerlerinde elde edilen TOK giderim verimleri (PAKS: 700 mg/l, FeCl <sub>3</sub> : 500 mg/l, PAK: 500 mg/l, süre: 30 dak.) .....	33
Şekil 4.7. Farklı pH değerlerinde elde edilen AKM giderim verimleri (PAKS: 700 mg/l, FeCl <sub>3</sub> : 500 mg/l, PAK: 500 mg/l, süre: 30 dak.) .....	33
Şekil 4.8. Farklı pH değerlerinde elde edilen bulanıklık giderim verimleri (PAKS: 700 mg/l, FeCl <sub>3</sub> : 500 mg/l, PAK: 500 mg/l, süre: 30 dak.) .....	34
Şekil 4.9. Farklı H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> konsantrasyonlarında elde edilen KOİ ve TOK giderim verimleri (Fe <sup>+2</sup> : 3000 mg/l, pH: 3, süre: 60 dak.).....	37
Şekil 4.10. Farklı H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> konsantrasyonlarında elde edilen AKM giderim verimleri (Fe <sup>+2</sup> : 3000 mg/l, pH: 3, süre: 60 dak.).....	38
Şekil 4.11. Farklı H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> konsantrasyonlarında elde edilen bulanıklık giderim verimleri (Fe <sup>+2</sup> : 3000 mg/l, pH: 3, süre: 60 dak.).....	39
Şekil 4.12. Farklı Fe <sup>+2</sup> konsantrasyonlarında elde edilen KOİ ve TOK giderim verimleri (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : 4250 mg/l, pH: 3, süre: 60 dak.).....	40



Şekil 4.13. Farklı $Fe^{+2}$ konsantrasyonlarında elde edilen AKM giderim verimleri ( $H_2O_2$ : 4250 mg/l, pH: 3, süre: 60 dak.).....	41
Şekil 4.14. Farklı $Fe^{+2}$ konsantrasyonlarında elde edilen bulanıklık giderim verimleri ( $H_2O_2$ : 4250 mg/l, pH: 3, süre: 60 dak.).....	42
Şekil 4.15. Farklı pH değerlerinde elde edilen KOİ giderim verimleri ( $H_2O_2$ : 4250 mg/l, $Fe^{+2}$ : 3750 mg/l, süre: 60 dak.).....	43
Şekil 4.16. Farklı pH değerlerinde elde edilen AKM giderim verimleri ( $H_2O_2$ : 4250 mg/l, $Fe^{+2}$ : 3750 mg/l, süre: 60 dak.).....	44
Şekil 4.17. Farklı pH değerlerinde elde edilen bulanıklık giderim verimleri ( $H_2O_2$ : 4250 mg/l, $Fe^{+2}$ : 3750 mg/l, süre: 60 dak.).....	44
Şekil 4.18. Farklı oksidasyon sürelerinde elde edilen KOİ ve TOK giderim verimleri ( $H_2O_2$ : 4250 mg/l, $Fe^{+2}$ : 3750 mg/l, pH: 3).....	45
Şekil 4.19. Farklı oksidasyon sürelerinde elde edilen AKM giderim verimleri ( $H_2O_2$ : 4250 mg/l, $Fe^{+2}$ : 3750 mg/l, pH: 3).....	46
Şekil 4.20. Farklı oksidasyon sürelerinde elde edilen bulanıklık giderim verimleri ( $H_2O_2$ : 4250 mg/l, $Fe^{+2}$ : 3750 mg/l, pH: 3).....	46
Şekil 4.21. Farklı $Fe^{+2}$ konsantrasyonlarında elde edilen KOİ ve TOK giderim verimleri ( $H_2O_2$ : 5000 mg/l, pH: 3, süre: 60 dak.).....	48
Şekil 4.22. Farklı $Fe^{+2}$ konsantrasyonlarında elde edilen AKM giderim verimleri ( $H_2O_2$ : 5000 mg/l, pH: 3, süre: 60 dak.).....	49
Şekil 4.23. Farklı $Fe^{+2}$ konsantrasyonlarında elde edilen bulanıklık giderim verimleri ( $H_2O_2$ : 5000 mg/l, pH: 3, süre: 60 dak.).....	49
Şekil 4.24. Farklı $H_2O_2$ konsantrasyonlarında elde edilen KOİ ve TOK giderim verimleri ( $Fe^{+2}$ : 2000 mg/l, pH: 3, süre: 60 dak.).....	50
Şekil 4.25. Farklı $H_2O_2$ konsantrasyonlarında elde edilen AKM giderim verimleri ( $Fe^{+2}$ : 2000 mg/l, pH: 3, süre: 60 dak.).....	51
Şekil 4.26. Farklı $H_2O_2$ konsantrasyonlarında elde edilen bulanıklık giderim verimleri ( $Fe^{+2}$ : 2000 mg/l, pH: 3, süre: 60 dak.).....	52
Şekil 4.27. Farklı pH değerlerinde elde edilen KOİ giderim verimleri ( $H_2O_2$ : 2000 mg/l, $Fe^{+2}$ : 5000 mg/l, süre: 60 dak.).....	53
Şekil 4.28. Farklı pH değerlerinde elde edilen AKM giderim verimleri ( $H_2O_2$ : 2000 mg/l, $Fe^{+2}$ : 5000 mg/l, süre: 60 dak.).....	53
Şekil 4.29. Farklı pH değerlerinde elde edilen bulanıklık giderim verimleri ( $H_2O_2$ : 2000 mg/l, $Fe^{+2}$ : 5000 mg/l, süre: 60 dak.).....	54

Şekil 4.30. Farklı oksidasyon sürelerinde elde edilen KOİ ve TOK giderim verimleri ( $H_2O_2$ : 2000 mg/l, $Fe^{+2}$ : 5000 mg/l, pH: 3) .....	55
Şekil 4.31. Farklı oksidasyon sürelerinde elde edilen akm giderim verimleri ( $H_2O_2$ : 2000 mg/l, $Fe^{+2}$ : 5000 mg/l, pH: 3).....	55
Şekil 4.32. Farklı oksidasyon sürelerinde elde edilen bulanıklık giderim verimleri ( $H_2O_2$ : 2000 mg/l, $Fe^{+2}$ : 5000 mg/l, pH: 3) .....	56



## SİMGELER DİZİNİ

$\text{CO}_3$  Kalsiyum karbonat

$\text{FeCl}_3$  Demir (3) Klorür

$\text{H}_2\text{O}_2$  Hidrojen peroksit

$\text{NH}_3$  Amonyak

$\text{OH}$  Hidroksil radikali

$\text{SO}_4$  Sülfat

$\text{TiO}_2$  Titanyum dioksit

## KISALTMALAR DİZİNİ

AKM	Askıda katı madde
BOİ	Biyokimyasal oksijen ihtiyacı
KOİ	Kimyasal oksijen ihtiyacı
PAK	Polialüminyum klorür
PAKS	Polialüminyum klorür hidroksit sülfat
TOK	Toplam organik karbon
UV	Ultraviyole

## TEŞEKKÜR

Desteklerini esirgemeyerek her zaman rehberlik yapan hocam, danıŐmanım Doç. Dr. Deniz İzlen ÇİFÇİ'ye, eğitim hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen değerli ailem Hüsniye METİN ve Haydar METİN'e, tez çalışmam boyunca her türlü desteği sağlayan ve hayatımın her evresinde desteğini esirgemeyen değerli meslektaşım Caner ERAT'a sonsuz saygı, sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Seda METİN

Çevre Mühendisi

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Literatür Özeti

Nüfusun artması ile birlikte ihtiyaçların artması da endüstriyel artışı ve beraberinde getirmiştir. Sanayinin ve endüstri faaliyetlerinin gelişmesi ve üretimin artmasıyla birlikte çevreye zararlı endüstriyel nitelikli atıksularda artış görülmüştür. Oluşan atık sular da deşarj edilen alıcı sularda toksik ve kanserojen etkilere neden olabilmektedir.

Çevre sorunlarının azaltılması ve endüstriyel nitelikli atıksu kirliliğinin azaltılması için yapılması gereken işlerin başında alıcı su ortamlarının veya bunların kirlenmesine neden olan atık suların kimyasal özelliklerinin bilinmesi gelmektedir.

Alıcı ortamlarda atıksu değerlerinin belirlenmesinde en hızlı sonuca organik madde parametre değerinin belirlenmesinden başlamaktadır. Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), sulardaki organik madde miktarının ve su kalite sınıflarının belirlenmesinde en çok kullanılan parametrelerin başında gelmekte olup, bu açıdan ileri oksidasyon süreci atık su deşarj limitlerine uymak için çok uygundur. Fenton işlemi kolay bir işlemdir ve etkili bir yöntemdir, ancak ana dezavantajı, büyük miktarda demir çamuru üretmesidir. Fenton-benzeri Oksidasyon kullanılarak yenilikçi bir proses ile yüksek verim elde edilmeye çalışılmıştır.

Kimya Endüstrisinde hammaddelerden ürün elde edilmesi için kimyasal reaksiyonlarını araşıran ve farklı yeni ürünler elde edilen endüstridir. Kimya Endüstrisi kağıt, çimento, tekstil, plastik, boya, kozmatik vb. sektörlerde de gelişmiştir. Endüstrinin öncüsü kimya olup, herşeyin temelinde kimya endüstrisinden sağlanmaktadır. Endüstrinin gelişimine büyük katkı sağlamıştır.

Kimya sektöründe üretme ve işleme olarak iki bölümden oluşmaktadır. Sektörde petrokimya, plastik tozları, asitler, sentetik tutakallar sayılmaktadır. Üretim sonucunda oluşan mamuller boya, lastik, yiyecek, ilaç ve kozmatik ürünleridir. Ülkemiz için kimya sektörü son zamanlarda yüksek artış göstermektedir. Sektörde daha çok ihraç söz konusu olmasından dolayı ülke ekonomisine katkısı büyüktür.

Kimyasal madde ve petrol türevli bileşikler içeren kimya endüstrisi atıksularının arıtımında kullanılan prosesler organik madde ve renk gideriminde genel olarak yetersiz kalabilmektedir. Bu sebep ile renk içeriğine sahip olan arıtılmış kimya endüstrileri atıksuları alıcı ortama deşarj edilmektedir. Ancak deşarj edilen renkli atıksular ışık geçirgenliğini alıcı

ortamda azaltarak canlıların aktivitelerini etkilemektedir. Gerek renk giderimi gerekse organik madde giderimi için İleri Oksidasyon Prosesleri giderim verimi açısından iyi sonuçlar vermektedir. Bu çalışmada da İleri oksidasyon Proseslerinden biri olan Fenton oksidasyonu kullanılacaktır. Çalışmada kimya endüstrisi atıksuyunun Fenton ve Koagülasyon - Fenton oksidasyon prosesleri kullanılarak kimya endüstrisi atıksuyunun KOİ, AKM, Bulanıklık ve TOK açısından giderimi araştırılmış ve karşılaştırılmıştır.

Fabrikalardan kaynaklanan atıksuların doğrudan yüzey sularına, yeraltı sularına ve toprağa verilmesi ekolojik bozulmaları beraberinde getirmektedir. Türkiye’de kimya endüstrisi üretimi seneden seneye artmakta olup, üretimin artması ile beraber oluşan atıksu miktarlarına da yansımaktadır. Bu nedenle kimya endüstrileri, Türkiye’deki endüstriyel kirlenme açısından üzerinde durulması gereken sanayi dallarından birini oluşturmaktadır. Bu kapsamda Kimya endüstrileri çevreyi kirleten en önemli sanayi dallarından birisi olup, fiziksel ve organik kirleticiler açısından, önlem alınması gereken sektörlerin başında yer almaktadır. Kimya endüstrisi atıksuları genel olarak yüksek KOİ konsantrasyonuna sahip olup, Kimya endüstrisinden kaynaklanan atıksular, endüstride üretilen ürüne bağlı olarak benzen, fenol gibi oldukça kompleks ve toksik birçok kimyasalı bünyesinde barındırmaktadır (Odokuma ve Oliwe, 2003).

## **1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı**

Kimya endüstrisinde oluşan bu atıksuların arıtımı çevre açısından önemlidir. Bu sebepten dolayı yapacağımız çalışmada organik madde ve renk içeren kimya endüstrisi atıksularının ileri oksidasyon proses ile giderimi araştırılması yapılmıştır. Bu çalışmada Fenton ve Koagülasyon - Fenton oksidasyon prosesleri kullanılarak kimya endüstrisi atıksuyunun KOİ, AKM, Bulanıklık ve TOK açısından giderim verimi araştırılmıştır. Her iki proste de atıksuya etki eden parametreler ile çalışmalar yapılarak, bu parametrelerin etkisi ve en iyi giderim elde edildiği değerler belirlenmiştir.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

### 2.1. Kimya Endüstrisi ve Kimya Endüstrisi Atıksuyunun Özellikleri

Türkiye’de kimya sanayisini ürünlerinin yaklaşık üçte biri son kullanıcı için üretilmekte, kalanı ise imalat sanayi ve hizmet sektörüne hammadde veya ara malı olarak piyasaya verilmektedir. Türk kimya endüstrisi petrol, ilaç, sabun, gübre gibi çeşitli kimyasal hammaddelerin ve tüketilen ürünlerinin üretildiği işletmelerden oluşmakta ve %70'e yakını ithal, yaklaşık %30'u iç piyasa üretimden karşılanmaktadır.

Yaklaşık 3000’e yakın kimyasal ve türevlerini üreten kimya sanayisi, lojistik imkânlar nedeniyle yoğunlukla Türkiyenin sahil bölgelerinde kurulmuş olup, petrol ve petrol ürünleri, sabunlar, deterjanlar, boyalar ve farmasötik kimyasallar üreten kimya şirketlerinin çoğu Ege Bölgesi'nde üç büyük sanayi kenti İstanbul, Kocaeli ve Sakarya ile İzmir bölgelerinde faaliyet gösterirken, petrol, gübre ürünleri şirketlerinin fazla bölümü Akdeniz Bölgesinde yoğunlaşmıştır. Türkiye'nin en büyük petrokimya şirketi olan ve 2007 yılında özelleştirilen Petkim, özellikle anılması gereken şirketlerden biridir.

Kimya sanayinde boya üretim tesislerinde, çoğunlukla doldur-boş yöntemiyle çalışan aralıklı kimyasal koagülasyon prosesleri kullanılarak arıtma yapılmaktadır. Arıtma sistemlerinden olan koagülasyon işleminde suya kimyasal ürünler ilave edilir ve AKM çökebilir kümelere dönüştürülür. Alıcı su ortamındaki katı madde miktarının fazla olması yağışlara ve aşırı çamur oluşumuna neden olur (Liang ve ark., 2014).

Koagülasyon işlemi ile, boya moleküllerinin %90'ı boya atık suyundan uzaklaştırılır, bu da gereken büyük hacimlerde arıtılmış olan su uygun maliyetlidir (Albuquerque et al., 2013).

En uygun koagülant “demir klorür, demir sülfat, sülfat” gibi koagülantlardır. Alüminyum format, alüminyum ve alüminyum sülfat ile bileşim, yüksek koagülanta sahiptir ve anyonlara karşı az korozif etki göstermektedir (Hellsten ve ark., 2005).

Eremektar ve ark. 2300 mg/l'nin değerinin üzerinde KOİ içeriğine sahip su bazlı boya atık sularının alüm ( $Al_2SO_4$ )<sub>3</sub>, FeSO<sub>4</sub>, FeCl<sub>3</sub>, sodyum bentonit, vb. koagülantlar kullanılarak koagülasyon işleminde fizibilitesinin çalışmasını yapmışlardır. Kullanılan koagülantlar ile KOİ giderim verimlerinin deşarj standartlarına indirilmesi için giderim verimi elde edilmemiştir. Atık suyun pH'ında (5.9) 50 mg/L FeCl<sub>3</sub> kullanıldığında optimum giderim verimine ulaşılmıştır (Eremektar ve ark., 2006).



Bu çalışmada boya üretim faaliyeti yapan tesisin koagülasyon yöntemi ile atıksuyunun arıtılması amaçlanmış olup, demir sülfat, alum, demir klorür'ün PAK koagülant ve konsantrasyonlarında deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışması yapılan atıksu için KOİ giderimi için demir klorür (500 mg/l) koagülantında en iyi giderim verimi elde edilmiştir (Ömer-Yasin, B., 2013).

## 2.2. Fenton Oksidasyon Prosesi

Endüstri sanayisinin gelişmesiyle artan endüstri faaliyetlerinin gelişmesiyle çevre üzerindeki olumsuz etkisi artmıştır. Ayrıca günümüzde su kıtlığının yaşandığı ülkemizde temiz su kaynaklarının verimli şekilde kullanılması ihtiyacı, endüstrilerde alternatif su kullanımlarının aranmasına sebep olmuş olup, bu nedenle, endüstriyel faaliyetler sonucunda atık suların çevreye zararı olmayacak düzeyde arıtılması, geri kazanılarak sanayide yeniden kullanılması araştırmanın ana sebebidir. Endüstriyel faaliyetler sonunca oluşan atıksuların arıtılmasından kaynaklanan geri kazanılan suyun yeniden kazanılması, güvenilir ek su kaynakları için temiz su kaynaklarının artırılması, atıksu maliyetlerinin düşürülmesi için sanayiye önemli fayda sağlamaktadır. Dünyada geri dönüştürülmüş atık suların %25'i yaklaşık yeniden kullanılmaktadır (Metcalf & Eddy 1991; Lens vd., 2002).

Atıksulardaki kirliliği deşarj standartlarına getirmek için biyolojik arıtma ve kimyasal arıtma yöntemlerinin yetersizliği ve nitelikli su temini ve endüstriyel atıksuların uzaklaştırılmasının artan maliyetleri, endüstrileri daha etkin su yönetimi yaklaşımları aramaya yöneltmiştir.

Yapılan araştırmalar sonucunda atık suların arıtılması ve endüstriyel tesislerde ve geri dönüşüm sistemlerinde yeniden kullanımını sağlamak için ileri arıtma yöntemlerine ihtiyaç olduğu ortaya konmuştur. Ancak ileri arıtma yöntemleri içinde, diğer ileri arıtma yöntemlerine göre daha az işletme sorunu olan ve daha yüksek arıtma verimi sağlayan ileri oksidasyon işlemleri son yıllarda endüstriyel atıksuların arıtımında kullanılan yöntemler arasında öne çıkmıştır (Gogate ve Pandit, 2004a).

Biyolojik arıtma ve kimyasal arıtma yöntemlerinin su fazından katı faza geçme ve çamur oluşturma gibi dezavantajları vardır.

Demir ve hidrojen peroksitin reaksiyonları asidik koşullarda daha etkilidir. Organik madde içeren bir su sistemine  $H_2O_2$  ve  $Fe^{+2}$  iyonları eklenirse, kuvvetli asidik ortam da kompleks redoks reaksiyonları yaratacaktır.



Demir iyonu ( $Fe^{+2}$ ), hidroksil radikali ile reaksiyon sonucunda  $Fe^{+3}$ 'e yükseltgenmektedir.



Hidroksil radikallerinin organik maddeleri önce ara ürünlere daha sonra  $CO_2$  ve  $H_2O$ 'ya parçalamasını sağlayan güçlü bir oksidandır.



Fenton oksidasyon prosesi yüksek renk giderimi ve KOİ giderimi elde edilmesi ve atık su toksisitesinin azaltılması için önemli bir prosestir.

## 2.2.1. Fenton Oksidasyon Prosesine Etki Eden Faktörler

### 2.2.1.1. pH etkisi

İşletmelerde pH'ı, kirleticilerin Fenton benzeri süreçle bozunmasında en etkili parametredir (Lin ve Lo, 1997; Kang ve Hwang, 2000). Fenton prosesi ile gerçekleştirilen çalışmalarda optimum pH değeri 3 olarak belirlenmiştir (Neyens ve Baeyens, 2003).

$[Fe^{+2}(H_2O)]^{+2}$  oluşumu daha düşük pH'larda gerçekleştiği için daha az hidroksil radikali üretilir.



### 2.2.1.2. Demir iyonu ( $Fe^{+2}$ ) etkisi

Demir iyonu konsantrasyonu orantılı olarak artmasıyla bozunma hızında artması bilinmektedir. Ancak belirli bir konsantrasyonun üzerinde bozunma hızı çok düşüktür ve fazla demir kullanımı nedeniyle çıkıştaki çözülmüş veya askıda demir miktarı artar.

Fenton reaksiyonunda  $Fe^{+2}$  iyonu doğrudan  $H_2O_2$  ile reaksiyona girerek  $OH\cdot$  radikalleri oluşturur ve Fenton reaksiyonunda  $Fe^{+2}$  iyonu hızla  $Fe^{+3}$  iyonuna dönüşerek  $H_2O_2$ 'yi azaltır. Bu nedenle Fenton oksidasyonunda  $Fe^{+3}$  iyonları ile  $H_2O_2$ 'nin ayrışması yavaşlar.  $Fe^{+3}$  iyonunun azalması  $Fe^{+2}$  iyonunun azalmasından daha düşüktür ve oksidasyon sürecini tanımlanır.

#### 2.2.1.3. Hidrojen peroksit ( $H_2O_2$ ) etkisi

Hidrojen peroksit konsantrasyonu arttıkça, atık sudaki bozunma genellikle hızla artar. (Kang ve Hwang, 2000). Ancak hidrojen peroksit konsantrasyonunun fazla olması durumunda hidroksil radikali ile reaksiyona girecek ve aşırı hidrojen peroksit konsantrasyonu KOİ artışına sebep olacaktır.

#### 2.2.1.4. $Fe/H_2O_2$ oranının etkisi

Fenton işleminin etkin bir şekilde gerçekleşmesi için optimum koşullar sağlanmalıdır. pH'ın yanı sıra  $Fe^{+2}$  ve  $H_2O_2$  oranları da çok fazla önemlidir. Aksi durumda organik maddelerin parçalanmasında fazla rol oynayan  $OH\cdot$  radikallerinin reaksiyon eğiliminde azalma olabilir (Kaplan, 2007).

$H_2O_2$  miktarı başlangıçtaki demir miktarından düşük ise reaksiyon çabuk girer ve reaksiyon süresi kısalmaya başlar ve buna bağlı olarak oksidasyon hızı artar. Çünkü reaksiyon erken gerçekleştiği için oluşan  $OH\cdot$  radikalleri  $Fe^{+2}$  ile reaksiyona girmektedir.  $H_2O_2$  miktarı başlangıçtaki demir iyonunda fazla ise reaksiyon yavaş ve fazla oksidasyon süresine ihtiyaç duyulur, dolayısıyla oksidasyon hızı da düşer.  $Fe^{+2}$  iyonu hızla  $Fe^{+3}$ 'ye indirgenince,  $Fe^{+3}$  iyonunun reaksiyonları ile  $H_2O_2$ 'nin ayrışma hızını yavaşlatır (Solmaz vd., 2010).

#### 2.2.1.5. Sıcaklığın Etkisi

Fenton proseslerinde etkili diğer bir parametrelerden birisi de sıcaklıktır. Çalışmada, 30 °C sıcaklığın optimum olduğu elde edilmiştir (Lin ve Lo, 1997). 10 °C'den, 40 °C'ye kadar sıcaklık artışı ile bozunma veriminin değişmediği, hidrojen peroksitin su ve oksijene ayrışmasının 40 °C'nin üzerine çıkması nedeniyle soğutma sürecinin yapılmasının gerekliliği öne sürülmüştür (Rivas vd., 2001).

### 2.2.1.6. Atıksu içerisindeki iyon etkisi

Atıksuda karbonatlar, klorürler, sülfat vb. inorganik iyonların atıksudaki varlığı, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 'da optimum konsantrasyonunun değişmesine ya da oksidasyon hızında değişikliğe neden olur. Örneğin, atık sudaki klor (Cl<sub>2</sub>, Cl<sup>-</sup>) vb. inorganik iyonlarının yüksek konsantrasyonu, klor radikali ile H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> reaksiyonu ya da klorun hidroksil radikaliyle reaksiyona girmesi nedeniyle organik maddenin oksidasyonunun etkinliğini azaltır (Sirtori vd., 2011).

Oluşan reaksiyonlar aşağıda verilmiştir:



Aynı zamanda atıksudaki karbonat konsantrasyonu, karbonat hidroksil radikalleri ile reaksiyona girdiği ve onu kullandığı için optimum seviyedeki H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> önemli derecede etki etmektedir (Andreozzi vd., 1999).



### 2.3. Koagülasyon Prosesi

Koagülasyon ve flokülasyon, atık suyundaki en eski arıtma yöntemlerinden biri olup, aynı zamanda stabilize atıksuların arıtılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Koagülasyon ve flokülasyon uygulaması, biyolojik olarak parçalanamayan organik maddelerin ve ağır metallerin gideriminde ön arıtma işlemi olarak kullanılabilir.

Koagülasyon sürecinde, bir koagülant ilavesi ile kolloidal partiküller kararsızlaştırılır ve bu aşamayı, kararsızlaştırılmış partiküllerin, daha iyi çökebilmesi için birleşerek flok olarak isimlendirilen iri yapılara dönüştürülmesi amacıyla birbirleri ile temas ettirilme aşaması olan flokülasyon aşaması takip etmektedir. Alüminyum sülfat, demir sülfat, kireç, alüm, demir

klorür ve demir kloro-sülfat, yaygın olarak kullanılan koagülantlar olup, son zamanlarda, konvansiyonel pıhtılaştırıcılara kıyasla, yüksek koagülasyon etkinliği ve düşük maliyeti ile hidrolize metal tuzu koagülantlarından polialüminyum klorüre ilgi artmaktadır. Yüksek konsantrasyonlarda organik ve inorganik madde içeren stabilize sızıntı suyundan ağır metallerin giderilmesi ile ilgili yapılan bir çalışmada koagülant olarak  $FeCl_3$  kullanılmış ve pH'ın bazik olduğu koşullarda metal giderim performansının daha etkili olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, koagülantların kombinasyonu işlem performansını (%50'ye kadar KOİ giderimi) artırabilmektedir. Koagülantların/ flokülantların türü ve dozu, pH, karıştırma hızı ve karıştırma süresi gibi pek çok faktör koagülasyon-flokülasyon verimliliğini etkilemektedir. Ayrıca proseste çamur oluşumu dolayısıyla çamurun bertarafı ve sıvı fazda alüminyum veya demir konsantrasyonunda bir artış gözlemlenebilmesi koagülasyon-flokülasyon prosesinin kısıtlarındandır.

Koagülasyon prosesi ile orta seviyede KOİ, düşük oranda  $NH_3$  ve yüksek oranda AKM giderimleri elde edilebilmektedir. Ön arıtma olarak uygulanan koagülasyon prosesi dirençli 18 kirleticilerin giderimi ve deşarj standartlarının sağlanması amacıyla ileri arıtma yöntemleri ile desteklenmelidir.

Suyun kimyasal koagülasyonu birçok amaç için yapılmaktadır. Bunlar:

- Atıksuda KOİ, BOİ, AKM, Metal parametrelerinin giderimi
- Atıksuda organik ve inorganik bulanıklık giderimi
- Atıksuda bakteri ve alg giderimi
- Atıksuda renk, koku ve fosfat giderimi

Koagülasyon ve flokülasyon gibi fizikokimyasal proseslerin yalnızca kısmi çözüm sunan ve yasal gereksinimlerin sağlanması için ikinci bir arıtım prosesine gereksinim duyan prosesler olduğu unutulmamalıdır.

### **2.3.1. Koagülant Maddeler**

Koagülasyon süreçlerinde kullanılan bazı koagülant maddeler;

**PAKS (Polialüminyum Klorür Hidroksit Sülfat);**

Alüminyum klorür içerisinde r oranı “0” iken, alüminyum hidroksit ( $Al(OH)_3$ ) içinde r oranı 3’tür. Polialüminyum klorürlerde r oranı 0,5 ve 2,5 aralığındadır. r oranı en fazla büyük olanda üründe kararlı ve üründeki polimerik molekül sayısı yüksek olur. Bu durumda r oranı yüksek (yüksek baziklik) ürünler maksimum verimle koagülasyon oluşumunu sağlamaktadır. Polialüminyum Klorür asidik olup, r oranına göre asit oranı düşebilir. Toplam alüminyum miktarı  $Al_2O_3$  (Aluminyum oksit) olarak ifade edilir ve ürün bileşimi ve hakkında bilgi verir. Polialüminyum Klorür ürünlerinin ( $Al_2O_3$  olarak) alüminyum içeriği %7 ile %24 aralığında değişmektedir. İnorganik türlere göre kalitesi ve etkisi değişmekte olup,  $SO_4$  ilavesiyle ürün, Polialüminyum klorür hidroksit sülfat (PAKS) haline gelmektedir.

### **PAK (Polialüminyum Klorür);**

$Al_2O_3$  ile temsil edilen polialüminyum klorür, sanayi atık su veya içme suyu arıtımında yüksek oranda kullanılmakta olan koagülanttır. Polialüminyum klorür toz ve sıvı formda mevcuttur. Sıvı form %10 ve %17 çözeltilerdir. Katı formu sarı PAK ve beyaz PAK olarak bilinir. PAK, yüksek absorpsiyon verimi ve suda kolay çözünür kimyasal yapısı nedeniyle oldukça tercih edilen bir kimyasal maddedir.

### **FeCl<sub>3</sub> (Demir (III) Klorür);**

FeCl<sub>3</sub> piyasada saf, katı ve sulu çözelti olarak bulunabilir. FeCl<sub>3</sub> demir bazlı bir tuz olup, kimyasal formülü FeCl<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O’dur. FeCl<sub>3</sub> birçok alanda yaygın olarak kullanılan bir kimyasal maddedir. Günümüzde su arıtma ve elektronik endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. FeCl<sub>3</sub> suya eklendiğinde, ideal topaklaştırıcı olan demir hidroksit Fe(OH)<sub>3</sub>’ü oluşturmak üzere hızla hidrolize olur ve suda asılı kalan katı parçacıkların çökmesine neden olur.

Koagülasyon proseslerinde genellikle aktif koagülant madde olarak metal tuzları kullanılmaktadır. Atık suların koagülant maddeler arıtımı (Demir 2015). Atıksuların koagülant proses yardımı ile yapılan bazı çalışmalar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Alüminyum sülfat dodekahidrat (alüm), atık su arıtım süreçlerinde yaygın olarak kullanılan koagülant olmaktadır. Alumun suda hidrolizi sonucu oluşan ve hem asit hem de baz görevi gören alüminyum hidroksit genellikle amfoteriktir ve  $Al_2O_3.xH_2O$  kimyasal 9 formundadır. Şap floklarının en az çözünür olduğu bilinmektedir. pH 7. Bu maddeler için, flok yükü pH 8.2’nin üzerinde düşük ve flok yükü pH 7.6’nın altındadır (Eckenfelder, 1989).

## 2.4. Atıksuların Fenton Oksidasyon Prosesi ile Arıtımı

Farklı atıksuların Fenton oksidasyon prosesiyle arıtımıyla ilgili yapılan bazı çalışmalar Çizelge 2.1' de kısaca özetlenmiştir.

Dogruel vd., (2009) yaptığı zeytinyağı fabrikasının atık sularını incelemiştir. Arıtılması zor karakterde olan atıksuyun giriş konsantrasyon değeri çok yüksektir. pH 3 değerinde belirlenmiştir. Sıcaklık ve oksidasyon çalışmalarının önemli etken olmadığı düşünülerek sabit bir değer tespiti yapılmamış ve her ne kadar bu çalışma için sabit bir değer tespiti yapılmamıştır.  $Fe^{+2}$ 'nin 10 katı olan bir  $H_2O_2$  konsantrasyonu uygulanmış, %47'lik düşük bir KOİ giderme verimliliği elde edilmiştir.



Çizelge 2.1. Atıksu arıtımında fenton oksidasyon prosesi ile yapılan çalışmalar

Atıksu	Proses Koşulları	Giderim (%)	Kaynaklar
Zeytinyağı Fabrikası Atıksuyu	Fe <sup>+2</sup> : 12 mM, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : 120 mM, pH: 3	KOİ: %47	Doğruel vd., 2009
Deri Atıksuyu	Fe <sup>+2</sup> : 1 g/L, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : 15 g/L, pH: 2,5, süre 2 saat	KOİ: %83	Dantas vd., 2003
Kimya Endüstrisi	Fe <sup>+2</sup> : 0,275 g/L, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : 3,3 g/L, pH: 6, süre: 3 saat	KOİ: %30	Lopez vd., 2004
Kimya Endüstrisi (organik peroksit üretimi)	Fe <sup>+2</sup> : 5 g/L, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : 100 g/L, pH: 3, süre: 1 saat	KOİ:%77,4, TOK:%52,9	Dinçer vd., 2021
Kimya Endüstrisi (Akrilik fiber üretimi)	Fe <sup>+2</sup> : 20 mM, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : 20 mM, pH: 3, süre: 2 saat	KOİ: %47	Wei vd., 2013
Sızıntı Suyu	Fe <sup>+2</sup> :16,755 g/L, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> :20,409 g/L, pH: 7, süre: 1,5 saat	KOİ: %85	Chen vd., 2014



Çizelge 2.2. Atıksu arıtımında fenton oksidasyon prosesi ile yapılan çalışmalar (Devamı)

<b>Tekstil Atıksuyu</b>	Fe <sup>+2</sup> : 0,2 g/L, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : 0,3 g/L, pH: 3, süre: 1 saat	COD:%88,9, TOK: 84,2	Çalık ve Çifçi, 2022
<b>Kumaş Boyaması Yapan Tekstil Atıksuyu</b>	Fe <sup>+2</sup> :0,2 g/L, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> :0,222 g/L, pH: 3, süre: 1,5 saat	KOİ: %89	Giray, 2014
<b>Kompleks Endüstriyel Atıksu</b>	KOİ/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : 0.58, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /Fe <sup>+2</sup> : 12, pH: 3, süre: 1 saat	KOİ: %80	Bianco vd., 2011
<b>Tekstil Endüstrisi Atıksuyu</b>	Fe <sup>+2</sup> : 0,025 mM, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : 0,50 mM, pH: 3,5, süre: 1 saat	KOİ: %99	Sun vd., 2007
<b>Geri Dönüşüm Endüstrisi Atıksuyu</b>	Fe <sup>+2</sup> : 2-5 g/L, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : 35-40 g/L, pH: 3	KOİ: %91- 97	Güneş vd., 2018
<b>Tekstil Endüstrisi Atıksuyu</b>	Fe <sup>+2</sup> : 60 mg/L, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : 8,53 mM, pH: 2, süre: 2 saat	KOİ: %85- 96	Hanay ve Hasar, 2007

Dantas ve arkadaşları (2003) Fenton prosesleri işlemi için deri sanayisi atıksuyunda incelemeler yapmıştır. Farklı çalışmalarında pH 2,5 olarak belirlendiğinden ve sıcaklık parametresi etkin kabul edilmediğinden sabit değer belirlenmemiştir. Yüksek konsantrasyon nedeniyle 180 dakikalık uzun oksidasyon süresi belirlenmiştir. Giderim verimi için yüksek konsantrasyonlarda ve  $Fe^{+2}$ 'nin 5 katı  $Fe^{+2}$ 'nin konsantrasyonu belirlenmiştir. Yüksek  $Fe^{+2}$  konsantrasyonu nedeniyle çamur oluşumunun yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu durumda KOİ giderim veriminin %83 değerinde olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Lopez ve arkadaşları (2004) yaptıkları çalışmada sızıntı suyunu incelemiştir. İncelenen sızıntı suyunun başlangıç konsantrasyonunda ve çok yüksek bir değere sahiptir. Bu su için pH 3 değerinde belirlenmiş ve sıcaklık parametresinin faktör oluşturmadığı ve bu parametre için sabit bir değer belirlenmediği görülmüştür. Başlangıç değeri yüksek olan bu suyun KOİ %30 giderim veriminde düşük sonucuna ulaşılmıştır.

Dinçer ve arkadaşları (2021) tarafından, organik peroksit üretimi yapılan bir kimya endüstrisi atıksuyunda Fenton oksidasyonu çalışmaları yapılmıştır. Kimya endüstrisi atıksuyu 10055 mg/L KOİ ve 2597 mg/L TOK konsantrasyonuna sahiptir. Çalışmada farklı  $H_2O_2$  ve  $Fe^{+2}$  konsantrasyonları ile çalışılarak en iyi KOİ ve TOK giderimi sağlanan koşullar belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmada en yüksek KOİ (%77,4) ve TOK (%52,9) giderimi 5 g/L  $Fe^{+2}$  ve 100 g/L  $H_2O_2$  konsantrasyonunda pH 3 değerinde 1 saat Fenton oksidasyonu sonucunda elde edilmiştir.

Çalık ve Çifçi (2022) tarafından tekstil endüstrisi atıksuyunda Fenton ve Foto-Fenton oksidasyon prosesi ile KOİ, TOK ve renk giderimi araştırılmıştır. Çalışmada  $Fe^{+2}$ ,  $H_2O_2$ , pH ve oksidasyon süresinin Fenton oksidasyonuna etkisi araştırılmıştır. En iyi atıksu arıtımı Fenton oksidasyonunda 200 mg/l  $Fe^{+2}$ , 300 mg/l  $H_2O_2$ , pH 3 ve 1 saat oksidasyon süresinde elde edilmiş ve bu koşullarda %88,9 KOİ, %84,2 TOK ve %97'nin üzerinde renk giderimi gözlenmiştir. Çalışmada aynı koşullarda foto-Fenton oksidasyonu ile ise %93,2 KOİ, %88,9 TOK ve %98 renk giderimi elde edilmiştir.

Chen ve arkadaşları (2014) yaptığı çalışmada sızıntı suyunu incelemiştir. Diğer gözden geçirilmiş çalışmalarla karşılaştırıldığında başlangıç konsantrasyonu göz önüne alındığında, çalışmada pH 7'de çalışılmıştır. Süre 90 dakika olarak belirlenmiştir. Yoğun konsantrasyonda çok yüksek konsantrasyonlarda  $Fe^{+2}$  konsantrasyonunun  $H_2O_2$  konsantrasyonunun yaklaşık 1.2 katı uygulanmıştır. %85'lik bir KOİ giderme verimi sonucuna ulaşılmıştır.

Wei ve arkadaşları (2013) tarafından kimya endüstrisi atıksuyunun Fenton oksidasyonu ile arıtımı araştırılmıştır. Kimya endüstrisi akrilik fiber üretimi yapmakta olup, atıksu 1091 mg/L KOİ konsantrasyonuna sahiptir. Farklı koşullar ile yapılan arıtım çalışmalarında 90 mM H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve 20 mM Fe<sup>+2</sup> dozlarında pH 3 değerinde 2 saat Fenton oksidasyonu sonunda %47 KOİ giderimine ulaşılmıştır.

Hanay ve Hasar (2007) Fenton oksidasyon işlemini tekstil endüstrisi atık suyuna uygulamış ve optimum Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonunun 60 mg/l olduğunu ve optimum H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonunun 8.53 mM, pH 2, 10 °C reaksiyon sıcaklığı ve 10 °C olduğunu bulmuşlardır. %85-96 KOİ giderme verimi sonucuna ulaşılmıştır.

Güneş ve arkadaşları (2018) tarafından IBC, tank gibi malzemelerin yıkamasını yapan geri dönüşüm endüstrisi atıksuyunun Fenton oksidasyonu ile arıtımı araştırılmıştır. Çalışmada 3 farklı zamanda alınan atıksu için Fenton oksidasyonu farklı Fe<sup>+2</sup> ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonları denenerek en iyi KOİ arıtımı yapılan koşullar belirlenmiştir. 1. atıksu 11300 mg/L KOİ konsantrasyonuna sahip olup, en iyi KOİ giderimi %91 olarak 2 g/L Fe<sup>+2</sup> ve 40 g/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonunda elde edilmiştir. 2. Alınan atıksu ise 14200 mg/L KOİ konsantrasyonuna sahip iken, 3 g/L Fe<sup>+2</sup> ve 35 g/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonunda %97 KOİ giderimi elde edilmiştir. 3. Atıksuda en yüksek KOİ giderimine (%95) 5 g/L Fe<sup>+2</sup> ve 40 g/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonunda ulaşılmıştır.

Giray (2014) boyama faaliyeti yapılan tekstil endüstrisi atık sularının arıtılması için bir Fenton oksidasyonu uygulanmıştır. Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonu 200 mg/L, optimum H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonu 222 mg/L, optimum pH 3 ve oksidasyon süresi 60 dakika olarak bulunmuştur. Çalışma sonucunda giderim verimi %88.97 ulaşılmıştır.

Bianco ve arkadaşları (2011) tarafından çeşitli kimyasallar içeren kompleks endüstriyel atıksuda Fenton oksidasyonu ile arıtma çalışması yapılmıştır. Çalışmada kullanılan atıksu 32000 mg/L KOİ konsantrasyonuna sahip olup, farklı kirleticiler içermektedir. Yapılan çalışma sonucunda 0,58 KOİ/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oranı ve 15 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Fe<sup>+2</sup> oranında 1 saat Fenton oksidasyonu ile kompleks endüstriyel atıksuda %80 KOİ giderimi elde edilmiştir.

Çalışmada, Bursa'da bulunan iki farklı tekstil arıtma tesisinden çıkan atıksulara ileri oksidasyon teknikleri kullanılarak arıtılabilirlik durumları uygulanarak değerlendirilmiş olup, atıksular için koagülasyon, Fenton, Fenton benzeri ve ozonlama prosesleri kullanılmış ve her iki sistem de KOİ ve renk parametreleri açısından giderimi incelenmiş ve değerlendirilmiştir.

Koagülasyon deneyinde 250 mg/l FeSO<sub>4</sub> koagülant dozunda %97 renk ve %48 KOİ giderim verimi elde edilmiş; 250 mg/l FeCl<sub>3</sub> dozunda atıksu 1 için %88 renk ve %56 KOİ giderimi sağlanmıştır. Atıksu 2 için optimum koagülant dozları 150 mg/l FeCl<sub>3</sub>, 150 mg/l FeSO<sub>4</sub> dozunda atıksu KOİ ve renk giderme verimleri sırasıyla %71 ve %94' dir. Fenton prosesinin atık su 1 için optimum koşulları pH 3, FeSO<sub>4</sub>=200 mg/l ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>=200 mg/l koşullarında renk ve KOİ giderme verimleri sırasıyla %58 ve %97'dir. Benzer şekilde FeCl<sub>3</sub> ile yapılan Fenton benzeri deneylerde optimum koşullar pH 3, FeCl<sub>3</sub>=200 mg/l ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>=100 mg/l idi. KOİ ve renk giderme verimleri sırasıyla %54 ve %92'dir. Fenton prosesi için atıksu 2 üzerinde optimum operasyonel parametreler pH=3, FeSO<sub>4</sub>=150 mg/l ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>=150 mg/l iken, Fenton benzeri proses için FeCl<sub>3</sub>=200 mg/l ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>=200 mg/l'dir. Fenton prosesi için renk ve KOİ giderme verimleri %49, %94; Fenton benzeri süreç için sırasıyla %45, %94'dir. Atık su 1 için optimum ozonlama koşulları pH 9 ve CO<sub>3</sub>=23 mg/l-dak ve 15 dakikalık temas süresinde olup, optimum koşullarda giderim verimleri sırasıyla %34 renk ve %90 KOİ giderim verimidir. Atıksu 2 için %44 renk ve %90 KOİ olmuştur. Uygulanan çalışmada arıtma alternatifleri karşılaştırıldığında diğer ileri oksidasyon tekniklerine göre daha uygun olduğu görülmüştür (Aşkın B., 2006).

## 2.5. Atıksuların Koagülasyon Prosesi ile Arıtımı

Atıksuların koagülasyon arıtımıyla ilgili yapılan bazı çalışmalar kısaca özetlenmiştir. Atıksularda koagülasyon prosesi ile arıtım çalışmaları Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Verma vd. (2010) tarafından petrokimya endüstrisi atıksuyunda PAK ve FeCl<sub>3</sub> koagülantları ile koagülasyon yapılmıştır. FeCl<sub>3</sub> koagülantı ile 3000 mg/l koagülant dozunda pH 5,6 değerinde en yüksek KOİ giderimi %75,5 olarak elde edilirken, PAK koagülantı ile 3500 mg/l koagülant dozu ve pH 5,6 değerinde %50 KOİ giderimine ulaşılabilmektedir.

Kushwaha ve arkadaşları odun işleme endüstrisi atıksuyunun PAK, FeSO<sub>4</sub> ve KAl(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.12H<sub>2</sub>O koagülantları ile farklı doz ve pH değerlerinde koagülasyon prosesi ile arıtımını araştırmışlardır. Çalışmada PAK ve FeSO<sub>4</sub> koagülantları ile en yüksek KOİ giderimi pH 8 değerinde elde edilmiştir. 300 mg/l PAK dozu ve pH 8 değerinde %69 KOİ giderimi elde edilirken, 800 mg/l FeSO<sub>4</sub> dozu ve pH 8 değerinde %67 KOİ giderimi gözlenmiştir.

Çizelge 2.3. Atıksu arıtımında koagülasyon prosesi ile yapılan çalışmalar

Atıksu	Koagülasyon Koşulları	Giderim	Kaynaklar
Petrokimya Atıksuyu	FeCl <sub>3</sub> : 3000 mg/L, pH: 5,6	KOI: %75,5	Verma vd., 2010
Petrokimya Atıksuyu	PAK: 3500 mg/L, pH: 5,6	KOI: %49,7	Verma vd., 2010
Tekstil Atıksuyu	PAK: 500 mg/L, pH: -	KOI: ~%40, AKM: ~%95	Tianzhi vd., 2021
Mandıra Atıksuyu	PAK: 300 mg/L, pH: 8	KOI: %69	Kushwaha vd., 2010
Sızıntı Suyu	PAK: 2000 mg/L, pH: 7,5	KOI: %43, Bulanıklık: %94, AKM: %92	Ghafari vd., 2009
Deri Atıksuyu	FeCl <sub>3</sub> : 800 mg/L, pH: 7,0-7,5	KOI: %35-36	Song vd., 2004
Odun İşleme Endüstrisi Atıksuyu	PAK: 500 mg/L, pH: 8	KOI: %90,2, Bulanıklık: %99,9	Bouchareb et al., 2020
Seramik Endüstrisi Atıksuyu	PAK: 400 mg/L, pH: 7	KOI: %47,5, AKM: %99,7, Bulanıklık: %99,6	Mahmudabadi vd., 2018
İçecek Endüstrisi Atıksuyu	FeCl <sub>3</sub> : 300 mg/L, pH: 9	KOI: %91, AKM: %99	Amuda ve Amoo, 2007

Çizelge 2.4. Atıksu arıtımında koagülasyon prosesi ile yapılan çalışmalar (Devamı)

---

<b>Polimerik Atıksu</b>	FeCl <sub>3</sub> : 200 mg/L, pH: 9	KOİ: %99,3, Bulanıklık: %99,6	Al-Malack vd., 1999
-------------------------	--	----------------------------------	------------------------

---

Bouchareb ve arkadaşları tarafından odun işleme endüstrisi atıksuyunun PAK ve FeCl<sub>3</sub> koagülantları ile koagülasyon prosesiyle arıtımı araştırılmıştır. Odun işleme atıksuyunun KOİ konsantrasyonu 6880 mg/l olarak bulunmuştur. PAK koagülantı ile en iyi Bulanıklık ve KOİ giderimi pH 8 ve FeCl<sub>3</sub> koagülantı ile en iyi Bulanıklık ve KOİ giderimi pH 6 değerinde bulunmuştur. Her iki koagülant içinde 500 mg/l koagülant dozunun en iyi Bulanıklık ve KOİ giderimi sağlandığı doz olduğu belirtilmiştir.

Kutluay ve arkadaşları, adsorpsiyon süreciyle atık suyun arıtılabilirliğini araştırmış ve en yüksek KOİ giderim veriminin sodyum bentonit olarak belirlenmiştir. Atıksuyun 500 mg/L koagülant dozu ile kendi pH değerinde renk ve KOİ giderim verimlerinin arttığı bulunmuştur (Kutluay ve ark., 2004).

Ghafari ve arkadaşları (2009) tarafından sızıntı suyunun PAK ve alun koagülantları ile koagülasyonu araştırılmıştır. Farklı koagülasyon dozu ve pH değerlerinde yapılan çalışmada cevap yüzey yöntemi kullanılarak optimizasyon yapılmıştır. Optimizasyon için KOİ, Bulanıklık, renk ve AKM giderimine bakılmıştır. Çalışmada PAK ile 2000 mg/l koagülant dozu ve pH 7,5 alum için ise 9500 mg/l koagülant dozu ve pH 7 en yüksek arıtım sağlanan koşul olarak belirlenmiştir. PAK ile optimum koşullarda yapılan koagülasyon sonunda KOİ, Bulanıklık, renk ve AKM giderimi sırasıyla %46,7, %94,4, %92,0 ve %92,6 olarak elde edilmiştir. Alum koagülantı ile optimum koşullarda yapılan koagülasyon sonunda KOİ, Bulanıklık, renk ve AKM giderimi sırasıyla %60,8, %88,9, %83,2 ve %92,5 olarak elde edilmiştir.

Dovletoglou ve arkadaşları, boya endüstrisi atık sularının koagülasyon yöntemiyle arıtılmasını araştırmıştır. Koagülant olarak FeSO<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> ve PAK kullanılarak pH ve koagülant dozu değerinin atık su kalitesi üzerindeki etkileri üzerinde çalışma yapılmıştır. FeSO<sub>4</sub> için optimum pH'ın 9.7 değeri ve PAK için optimum pH'ın 7 değeri olduğu bulunmuştur. Alum miktarı 2000 mg/l olarak kullanıldığında KOİ ve bulanıklık gideriminin sırasıyla %30-80 ve

%70-99 aralığında bulmuşlardır. PAK miktarı 4000 mg/l olarak alındığında ise %98 civarında KOİ ve bulanıklık giderimi elde edilmiştir.

Pestisit endüstrisi atıksuları toksik etmenler ve biyolojik birikimler ve yüksek kimyasal oksijen ihtiyacına (KOİ) neden olur ve askıya alınır. Bu atıksuların katı konsantrasyonları çevre sorunlarına neden olmaktadır. Ayrıca pestisitlerin neden olduğu atık sular endüstri, üretilen zirai kimyasalların türüne ve kullanımına bağlı olarak atık su özelliklerinde büyük değişiklik olduğunu gösterir. Manipüle edilen malzemelerdir. Bu çalışmada yaygın olarak bulunan ve ekonomik pıhtılaştırıcılar; demirli (III) klorür, şap, demirli (II) sülfat ve ayrıca bir fizikokimyasal arıtılabilirlik çalışması için bir polielektrolit magnaflok kullanılmış ve atık suyun yeniden kullanımı değerlendirilmiştir. SS koagülasyon ve flokülasyon işlemi ile KOİ giderimi sağlanmış ancak bu işlemin yeterli olmadığı görülmüştür (Katip, 2019).

### **3. MATERYAL VE METOD**

#### **3.1. Çalışmada Kullanılan Kimya Endüstrisi Atıksuyu**

Dünya genelinde geniş bir kitleye, özel kimyasal portföyü sunan lider bir boya, kimyasal ve tekstil endüstrisi için ürün geliştirme de bir asırdan fazla bir geçmişe sahip olan boya, kaplama, kağıt ve ambalaj endüstrileri de dahil olmak üzere birçok sektöre yardımcı kimyasallar üreterek hizmet vermektedir. Küresel varlığı, müşterilere 50'den fazla ülkeye yayılan ofisler, yetkinlik merkezleri, ajanslar ve üretim tesislerinden uzmanlara güvenilir erişim sağlamaktadır.

Ekolojik spesifikasyonları karşılamalarını, maliyetleri düşürmelerini ve teslim sürelerini kısaltmalarını sağlamak için tüm tedarik zinciri boyunca ilk ilhamlarından itibaren markalara, perakendecilere ve endüstri ortaklarına yardımcı olan bir endüstridir.

Kimya endüstrisinden alınan atık su numunesi dengeleme havuzundan alınmıştır. Kimya endüstrisi atıksuyunun özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Kimya endüstrisi atıksuyu 7515 mg/l KOİ konsantrasyonuna sahip olup, AKM, TOK ve Bulanıklık sırasıyla 627 mg/l, 1156 mg/l ve 626 NTU olarak ölçülmüştür.



Çizelge 3.1. Kimya endüstrisi atıksuyu giriş parametre değerleri

<b>Parametre</b>	<b>Birim</b>	<b>Kimya Endüstrisi Atıksuyu</b>
<b>pH</b>	-	7,85
<b>Toplam KOİ</b>	mg/l	7515
<b>AKM</b>	mg/l	627
<b>TOK</b>	mg/l	1156
<b>Bulanıklık</b>	NTU	626

### 3.2. Koagülasyon Prosesi Çalışmaları

Kimya endüstrisi atıksuyunun arıtım çalışmalarında Koagülasyon çalışmalarında Polialüminyum Klorür (**PAK**), Polialüminyum Klorür Hidroksit Sülfat (**PAKS**), Demir (3) Klorür (**FeCl<sub>3</sub>**) koagülantları kullanılmıştır. Her bir koagülant için farklı dozlarda ve farklı pH değerlerinde çalışmalar yapılarak en iyi KOİ, TOK, AKM ve Bulanıklık giderimi sağlanan koagülant dozu ve pH değeri belirlenmiştir.

Her bir koagülant maddesinden 5 gr alınıp tartılmıştır. Daha sonra 100 ml'lik erlen de üzerine saf su tamamlanmıştır.

Koagülasyon çalışmaları Jar Testinde yapılmıştır ve kullanılan Jar Test düzeneği Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Koagülasyon düzeneği

Deney çalışmaları Koagülasyon işlemi ile arıtım işlemi 600 ml erlen içerisinde 500 ml aktif hacimde atıksu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Arıtım çalışmalarında ilk olarak 500 ml atıksu içerisine gerekli koagülant eklenmiş ve seyreltme yapılmış olan  $H_2SO_4$  ve  $NaOH$  ile pH metre kullanılarak atıksuyun pH değeri 8'e ayarlanmasının ardından Jar Test düzeneğine konulmuş ve 45 rpm'de 30 dak Koagülasyon ile arıtım gerçekleştirilmiştir. Koagülasyon işleminin sonunda atıksu 30 dak çöktürülmüş ve üst fazdan alınan arıtılmış atıksuda KOİ, AKM, Bulanıklık ve TOK analizleri yapılmıştır.

Polialüminyum Klorür Hidroksit Sülfat (**PAKS**) koagülantı kullanılarak yapılan çalışmalarda PAKS konsantrasyonun belirlenmesi amacıyla 6 farklı PAKS konsantrasyonunda (400-500-600-700-800-900 mg/l) denemeler yapılmıştır. Demir (3) Klorür (**FeCl<sub>3</sub>**) koagülantı kullanılarak yapılan çalışmalarda  $FeCl_3$  konsantrasyonun belirlenmesi amacıyla 5 farklı  $FeCl_3$  konsantrasyonunda (400-500-600-700-800 mg/l) denemeler yapılmıştır. Polialüminyum Klorür (**PAK**) koagülantı kullanılarak yapılan çalışmalarda PAK konsantrasyonun belirlenmesi amacıyla 5 farklı PAK konsantrasyonunda (400-500-600-700-800 mg/l) denemeler yapılmıştır.

En iyi KOİ, AKM, Bulanıklık giderimi sağlanan koagülant dozları belirlendikten sonra PAKS,  $FeCl_3$  ve PAK koagülantları için en iyi giderim elde edilen pH değerini belirleme

çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalarda 6 farklı pH değeri (4-5-6-7-8-9) kullanılarak her bir koagülant için en iyi giderim sağlanan pH değeri belirlenmiştir.

### **3.3. Koagülasyon sonrası Fenton Oksidasyon Prosesi Çalışmaları**

Koagülasyon sonrası Fenton oksidasyon çalışmalarında kimya endüstrisi atıksuyu PAK ile koagülasyon prosesinde ön arıtm yapılarak kullanılmıştır. Kimya endüstrisi atıksuyu 500 mg/l PAK ve pH 8 değerinde koagülasyon yapılarak biriktirilmiş ve Fenton oksidasyon çalışmalarına başlanmıştır.

Fenton oksidasyonunda da Koagülasyon prosesinde kullanılan Jar Test kullanılmıştır. Fenton oksidasyon çalışmalarında 200 ml atıksu 600 ml erlen içerisine konulmuş ve içerisine gerekli olan  $Fe^{+2}$  konsantrasyonu için  $FeSO_4$  ilave edilmiştir. Daha sonra pH 3 değerine seyreltilmiş  $H_2SO_4$  ve NaOH ile pH metre kullanılarak ayarlanmış ve gerekli  $H_2O_2$  ilave edilmiştir. Erlenlerdeki atıksuda Jar Test sihazında 45 rpm hızda 60 dakika Fenton oksidasyonu yapıldıktan sonra pH 7-8 civarında 6 N NaOH kullanılarak pH metre ile ayarlanmış ve 30 dakika çöktürme işlemi gerçekleştirilmiştir. Son olarak üst fazdan arıtılmış su numuneleri alınarak KOİ, TOK, AKM ve Bulanıklık analizleri yapılmıştır.

Koagülasyon sonrası Fenton oksidasyonu ile kimya endüstrisi atıksuyunun arıtımında ilk olarak sabit 3000 mg/l  $Fe^{+2}$  konsantrasyonu ve pH 3 değerinde 9 farklı  $H_2O_2$  (3000-5000 mg/l  $H_2O_2$ ) konsantrasyonu ile çalışmalar yapılarak en iyi arıtım sağlanan  $H_2O_2$  konsantrasyonu belirlenmiştir. Daha sonra sabit 4250 mg/l  $H_2O_2$  konsantrasyonu ve pH 3 değerinde farklı  $Fe^{+2}$  konsantrasyonlarında (3000-4000 mg/l  $Fe^{+2}$ ) çalışmalar yapılarak en iyi arıtım sağlanan  $Fe^{+2}$  konsantrasyonu belirlenmiştir.  $H_2O_2$  ve  $Fe^{+2}$  konsantrasyonu belirlendikten sonra sabit 4250 mg/l  $H_2O_2$  ve 3750 mg/l  $Fe^{+2}$  konsantrasyonlarında farklı pH (3-7) değerlerinde çalışmalar yapılarak en iyi arıtımın sağlandığı pH değeri belirlenmiştir. Son olarak sabit 4250 mg/l  $H_2O_2$ , 3750 mg/l  $Fe^{+2}$  ve pH 3 değerinde farklı oksidasyon sürelerinde (30-240 dakika) arıtım çalışmaları yapılarak en iyi arıtımın sağlandığı oksidasyon süresi belirlenmiştir.

### **3.4. Fenton Oksidasyon Prosesi Çalışmaları**

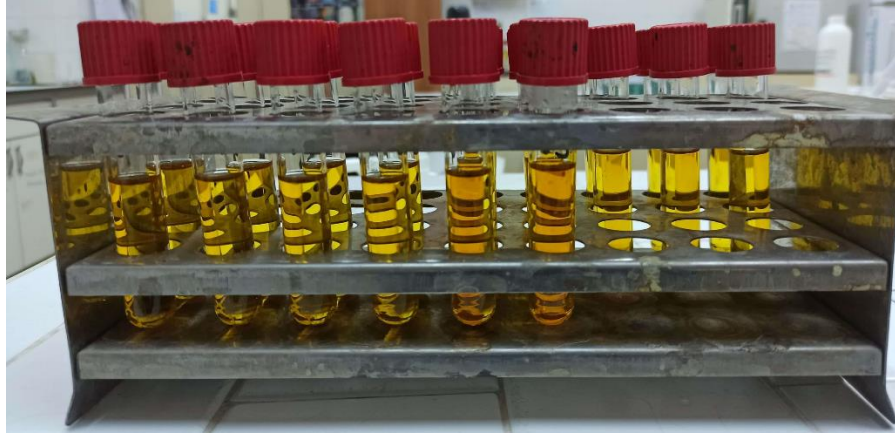
Kimya sanayisi atıksuyunun Fenton proses ile arıtım çalışmaları da koagülasyon sonrası yapılan Fenton oksidasyon çalışmalarındaki aynı proses uygulanmıştır. Fenton oksidasyonunda da Jar Test kullanılarak, 200 ml atıksu 600 ml erlen içerisine konulmuş ve  $Fe^{+2}$  konsantrasyonu için  $FeSO_4$  ilave edilmiştir. Daha sonra pH 3 değerine seyreltilmiş  $H_2SO_4$  ve NaOH ile pH

metre kullanılarak ayarlanmış ve gerekli H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ilave edilmiştir. Erlenlerdeki atıksuda Jar Test sihazında 45 rpm hızda 60 dakika Fenton oksidasyonu yapıldıktan sonra pH 7-8 civarında 6 N NaOH kullanılarak pH metre ile ayarlanmış ve 30 dakika çöktürme işlemi gerçekleştirilmiştir. Son olarak üst fazdan arıtılmış su numuneleri alınarak KOİ, TOK, AKM ve Bulanıklık analizleri yapılmıştır.

Giriş kimya tesisleri atıksuyunun Fenton oksidasyonu ile arıtımında ilk olarak sabit 5000 mg/l H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonu ve pH 3 değerinde 12 farklı Fe<sup>+2</sup> (750-3500 mg/l Fe<sup>+2</sup>) konsantrasyonu ile çalışmalar yapılarak en iyi arıtım sağlanan Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonu belirlenmiştir. Daha sonra sabit 2000 mg/l Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonu ve pH 3 değerinde 6 farklı H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonlarında (4250-5500 mg/l H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) çalışmalar yapılarak en iyi arıtım sağlanan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonu belirlenmiştir. Sonraki çalışmada ise sabit 5000 mg/l H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve 2000 mg/l Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonlarında farklı pH (3-7) değerlerinde çalışmalar yapılarak en iyi arıtımın sağlandığı pH değeri belirlenmiştir. Son olarak sabit 5000 mg/l H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 2000 mg/l Fe<sup>+2</sup> ve pH 3 değerinde farklı oksidasyon sürelerinde (30-240 dakika) arıtım çalışmaları yapılarak en iyi arıtımın sağlandığı oksidasyon süresi belirlenmiştir.

### 3.5. Analizler

Kimya sektörü atıksuyunda Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) giderim verimleri hesaplanmış ve denemeler yapılmıştır. KOİ atıksuda organik kirlilik derecesini ölçmede kullanılmakta olan bir parametredir. 10 ml'lik KOİ tüplerine arıtılmış atıksudan 2,5 ml çözelti tüp içerisine cam pipet ile alınarak, 1,5 ml potasyum dikromat eklenir ve ardından 3,5 ml sülfirik asit eklenir ve tüpün ağzı sıkıca kapatılır. Hazırlanan KOİ tüpleri 150 °C'de 2 saat ısınmaya bırakılır. Süre sonunda tüpler etüvden alınarak soğumaya bırakılır ve ardından 2-3 damla ferroin indikatörü ilave edilerek, standart demir amonyum çözeltisi ile renk mavi yeşilden kiremit rengine dönene kadar titre edilir ve KOİ hesaplaması yapılır.



Şekil 3.2. KOI tüpleri



Şekil 3.3 KOI titronic cihazı

TOK analizi NABİLTEM’de bulunan TOC-L CPH/CPN marka ve SSM 5000 A model TOK cihazında yapılmıştır.

Atıksularda AKM denemeleri yapılmıştır. Filtre kağıtları etüvde 30-40 dakika kadar 105 °C’de kurutulur ve kurutma işleminin sonunda filtre kağıdı, soğuyuncaya kadar (20-30 dakika) desikatör içeriisinde bekletilir. Daha sonra filte kağıdı hassas terazide ilk tartımı gerçekleştirilir ve tartılmış olan filte kağıdı süzme düzeneğindeki yerine yerleştirilir. Süzme hunisine 20 lt arıtılmış atıksu numunesi başaltılır ve vakum pompası süzme hunisinde bulunan numuneyi filte kağıdından geçirinceye işlemine kadar çalıştırılır. Filtre kağıdı süzme düzeneği işleminin bitmesinin ardından bir cımbız ile dikkatlice çıkartılır ve etüv içeriisine yerleştirilir. Etüvdeki filte kağıdı 60 dakika süresi boyunca kurutma işlemi uygulanır. Kurutma süresi sonunda filte kağıdı, soğuyuncaya kadar (20-30 dak) desikatörde bekletilir. Kurutulmuş olan filte kağıdı bir cımbız ile hassas teraziye yerleştirilmekte ve ikinci tartım gerçekleştirilmesinin ardından AKM konsantrasyonu hesaplanmıştır.



Şekil 3.4. AKM süzme seti

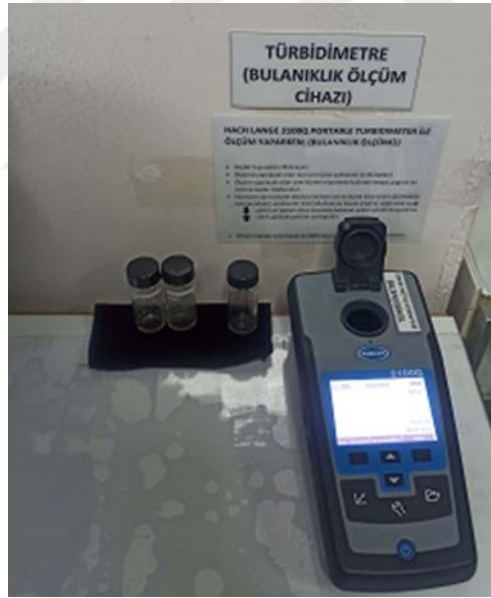


Şekil 3.5. Süzme düzeneğinden geçirilmiş filtre kağıtları



Şekil 3.6. Hassas terazi

Bulanıklık deneyleri HACH marka ve 2100Q model Bulanıklık Ölçüm Cihazında (Türbidimetre) yapılmıştır.



Şekil 3.7. Bulanıklık ölçüm cihazı (Türbidimetre)

## 4. DENEYSEL BULGULAR

Bu tez çalışmasında kimya endüstrisi atıksuyunun Fenton oksidasyonu ve Koagülasyon sonrası Fenton oksidasyonu prosesleri ile arıtımı araştırılmıştır.

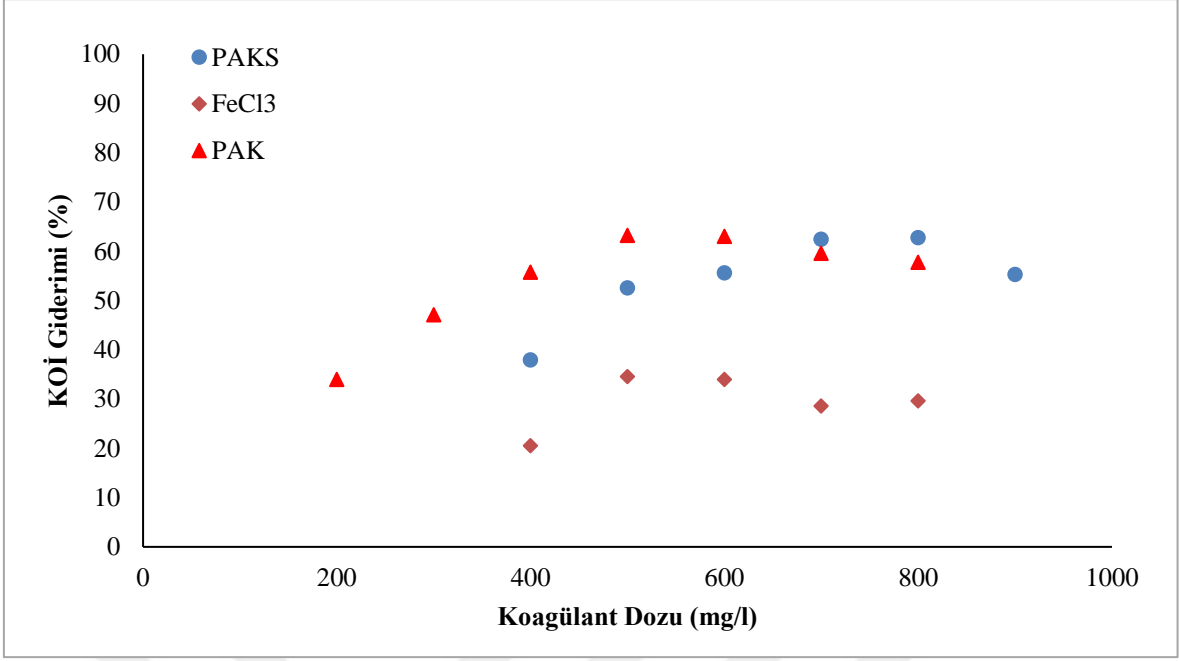
### 4.1. Kimya Endüstrisi Atıksuyunda Yapılan Koagülasyon Çalışmaları

Çalışmada Koagülasyon prosesinde PAK, PAKS ve  $FeCl_3$  olmak üzere 3 farklı koagülant kullanılmış ve bu koagülantlar ile farklı koagülant dozlarında ve farklı pH değerlerinde atıksu arıtımı yapılarak en iyi koagülant, koagülant dozu ve pH değeri belirlenmiştir. Daha sonra en iyi giderim sağlanan koagülant ile en iyi giderim sağlanan koagülant dozu ve pH değerinde koagülasyon yapılarak atıksu biriktirilmiş ve koagülasyon ile ön arıtım yapılan atıksuda Fenton oksidasyon prosesi ile arıtım çalışmaları yapılmıştır.

#### 4.1.1. Koagülasyon Çalışmalarında Koagülant Dozu Etkisi

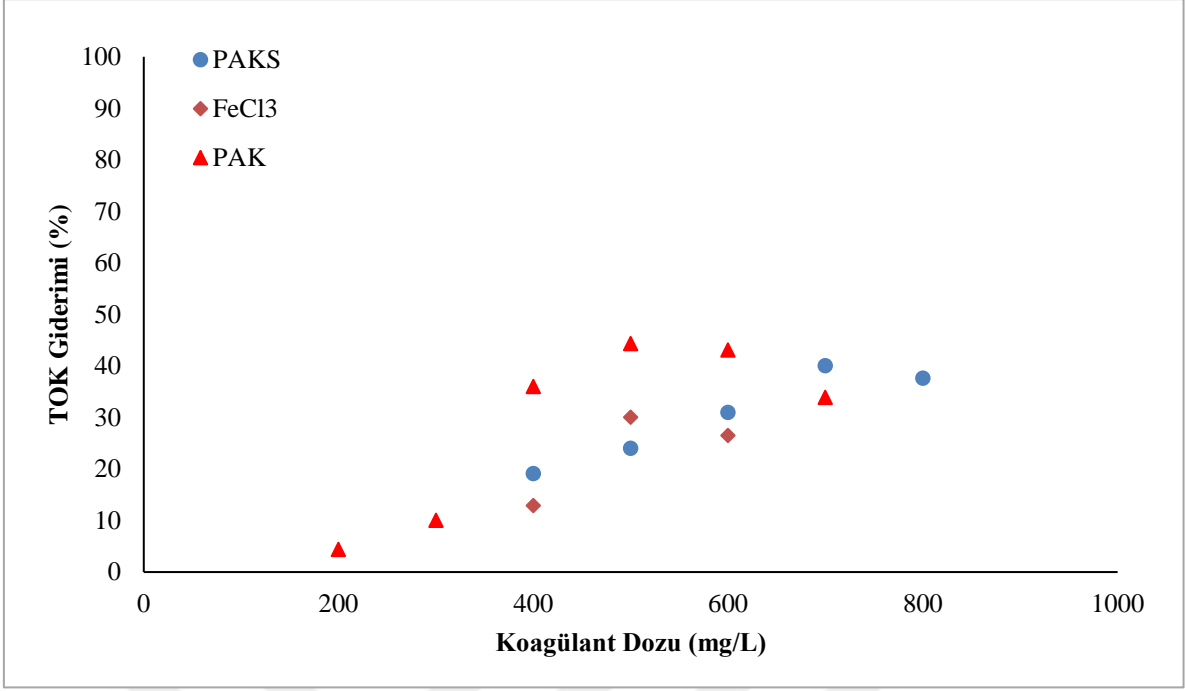
Kimya endüstrisi atıksuyunda PAKS,  $FeCl_3$  ve PAK koagülantları ile 200-800 mg/l koagülant dozu aralığında Koagülasyon çalışmaları yapılmıştır. Farklı koagülant dozlarında elde edilen KOİ giderim verimleri Şekil 4.1'de verilmiştir. En düşük KOİ giderimi  $FeCl_3$  koagülantı ile elde edilmiştir.  $FeCl_3$  koagülantı ile 400 mg/l koagülant dozunda %20,5 KOİ giderimi elde edilirken, koagülant dozu 500 mg/l değerine arttırıldığında KOİ giderimi %34,5 değerine artmıştır. Ancak 500 mg/l koagülant dozundan sonraki dozlarda KOİ gideriminde bir artış elde edilememiştir. PAKS koagülantı ile yapılan Koagülasyon çalışmalarında PAK dozu 400 mg/l değerinden 700 mg/l değerine kadar arttırıldığında KOİ giderim verimi de kademeli olarak artmıştır. PAKS dozu 400 mg/l iken %37,9 KOİ giderimi elde edilmiş ve PAKS konsantrasyonu 700 mg/l değerine arttırıldığında KOİ giderimi %62,4 değerine artmıştır. PAKS konsantrasyonu 800 mg/l değerinde ise KOİ gideriminde önemli bir değişim gözlenmemiştir. PAK koagülantı ile yapılan çalışmalarda ise PAK dozu 200 mg/l değerinden 500 mg/l değerine artması ile KOİ giderimi artmış ancak 500 mg/l PAK dozu sonrasında koagülant dozunun arttırılması KOİ gideriminde bir artışa sebep olmamıştır. PAK koagülantı ile yapılan çalışmalarda 200, 300, 400 mg/l PAK dozlarında sırasıyla %34,0, %47,1 ve %55,7 KOİ giderimi elde edilmiştir. En yüksek KOİ giderimi 500 mg/l PAK dozunda %63,2 olarak elde edilmiştir.





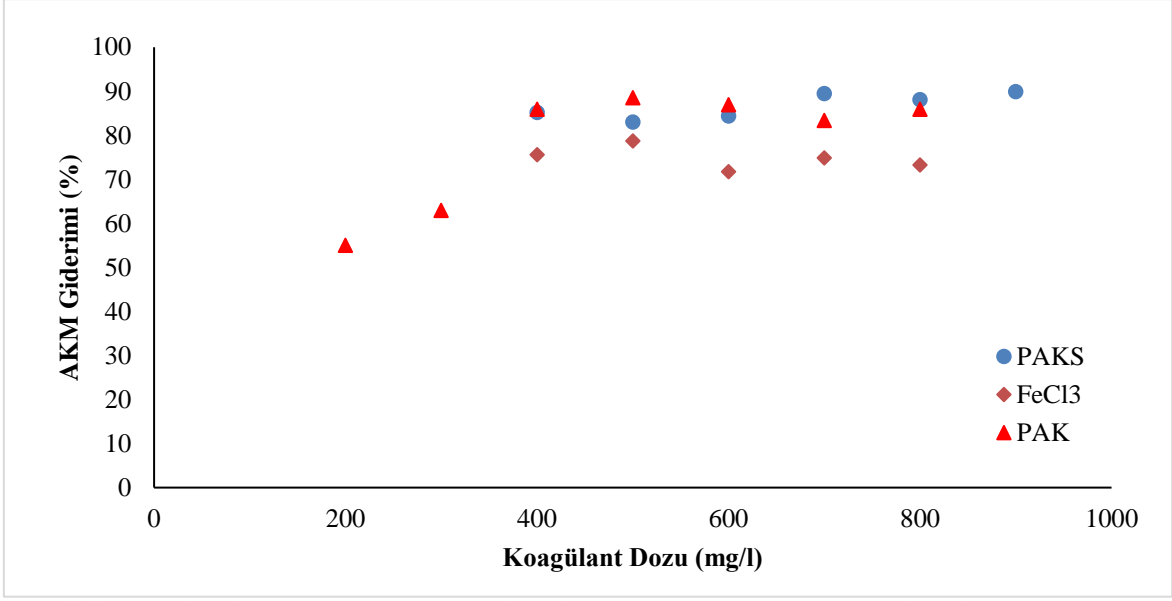
Şekil 4.1. Farklı koagülant konsantrasyonlarında elde edilen KOİ giderim verimleri (pH: 8, süre: 30 dak.)

PAKS, FeCl<sub>3</sub> ve PAK koagülantları ile 200-800 mg/l koagülant dozu aralığında yapılan koagülasyonda elde edilen TOK giderim verimleri Şekil 4.2’de verilmiştir. KOİ gideriminde olduğu gibi en düşük TOK giderimi de FeCl<sub>3</sub> koagülantı ile elde edilmiştir. 500 mg/l FeCl<sub>3</sub> koagülantı ile en yüksek TOK giderimi %30,1 olarak elde edilmiştir. PAKS koagülantında ise 700 mg/l koagülant dozuna kadar TOK gideriminde artış gözlenmiştir ve 700 mg/l koagülant dozunda %40,1 TOK giderimine ulaşılmıştır. 3 koagülant karşılaştırıldığında en yüksek TOK giderimi PAK koagülantı ile elde edilmiştir. PAK ile yapılan çalışmalarda 200 mg/l koagülant dozunda TOK giderimi oldukça düşük olup, PAK dozu arttıkça TOK giderimi artmaktadır. 500 mg/l PAK dozunda %44,3 TOK giderimi elde edilirken, 600 mg/l PAK dozunda TOK gideriminde artış gözlenmemiştir.



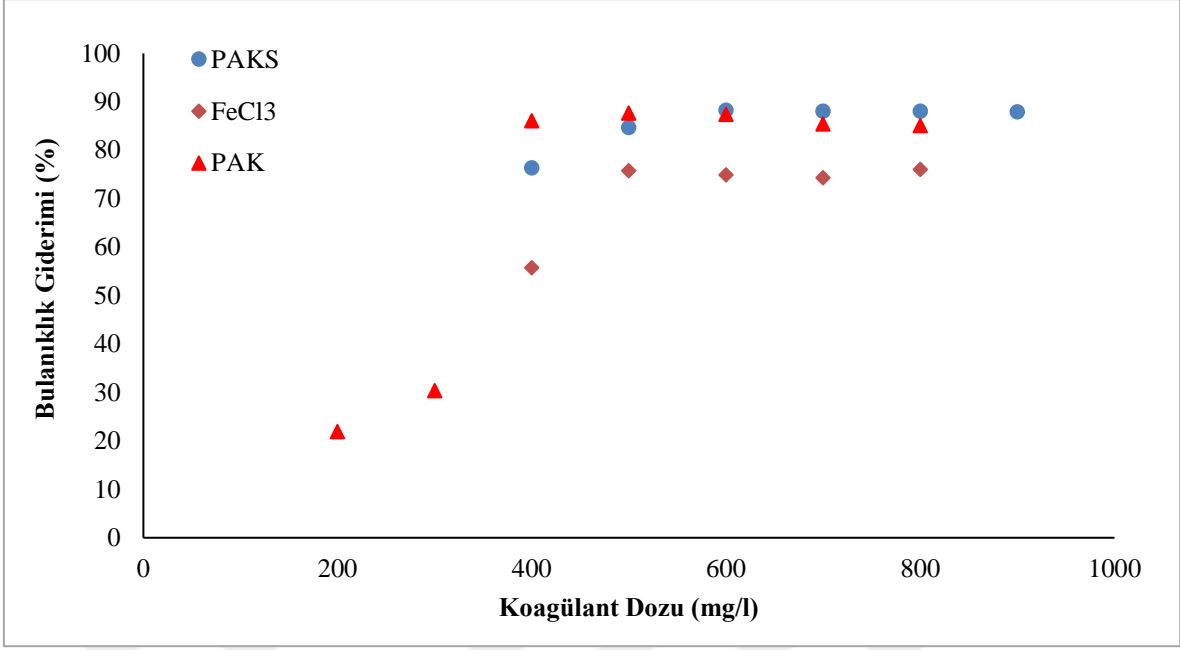
Şekil 4.2. Farklı koagülant konsantrasyonlarında elde edilen TOK giderim verimleri (pH: 8, süre: 30 dak.)

Kimya endüstrisi atıksuyunda PAKS, FeCl<sub>3</sub> ve PAK koagülantları ile 200-900 mg/l koagülant dozu aralığında yapılan Koagülasyon çalışmalarında farklı koagülant dozlarında alınan AKM giderim verimleri Şekil 4.3’de verilmiştir. En düşük AKM giderimi FeCl<sub>3</sub> koagülantında elde edilmiş olup, 500 mg/l FeCl<sub>3</sub> dozunda %78,7 olarak görülmüştür. PAKS koagülantı ile yapılan çalışmalarda 400 mg/l koagülant dozunda %85,2 AKM giderimine ulaşılırken, en yüksek KOİ verimi elde edilen 700 mg/l koagülant dozunda ise AKM giderimi %89,5 olarak hesaplanmıştır. PAK koagülantı ile yapılan çalışmalarda 200 mg/l koagülant dozunda %55,0 AKM giderimi gözlenirken, 300 ve 400 mg/l koagülant dozlarında AKM giderimi sırasıyla %62,9 ve %85,9 olarak hesaplanmıştır. En yüksek KOİ giderimi elde edilen 500 mg/l PAK dozunda ise AKM giderimi %88,5 olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.3. Farklı koagülant konsantrasyonlarında elde edilen AKM giderim verimleri (pH: 8, süre: 30 dak.)

Kimya endüstrisi atıksuyunda PAKS, FeCl<sub>3</sub> ve PAK koagülantları ile 200-900 mg/l koagülant dozu aralığında yapılan Koagülasyon çalışmalarında farklı koagülant dozlarındaki bulanıklık giderim verimleri Şekil 4.4'de verilmiştir. En düşük bulanıklık giderimi FeCl<sub>3</sub> koagülantında gözlenirken, PAK ve PAKS koagülantlarında birbirine yakın bulanıklık değerleri elde edilmiştir. FeCl<sub>3</sub> koagülantı ile 500-800 mg/l koagülant dozu aralığında %75-76 bulanıklık giderimi belirlenmiştir. PAKS koagülantı ile yapılan çalışmalarda koagülant dozu 600 mg/l'ye kadar arttırıldığında Bulanıklık giderimide artmıştır. PAKS koagülantı ile 700 mg/l koagülant dozunda %88,0 ve PAK koagülantı ile 500 mg/l koagülant dozunda ise %87,7 Bulanıklık giderimi elde edilmiştir. PAK koagülantı ile 200 mg/l ve 300 mg/l koagülant dozlarında %21,9 ve %30,4 bulanıklık giderimi varken, 400 mg/l koagülant dozunda bulanıklık giderimi %86,1 değerine çıkmıştır.



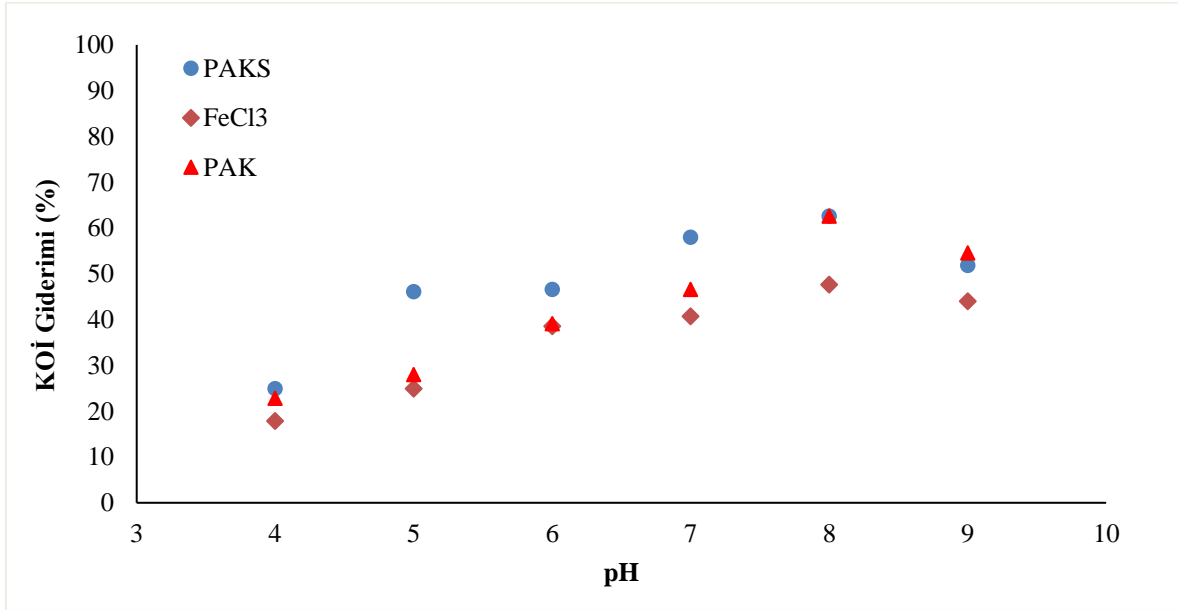
Şekil 4.4. Farklı koagülant konsantrasyonlarında elde edilen bulanıklık giderim verimleri (pH: 8, süre: 30 dak.)

#### 4.1.2. Koagülasyon Çalışmalarında pH Etkisi

Kimya endüstrisi atıksuyunda PAKS, FeCl<sub>3</sub> ve PAK koagülantları farklı dozlar ile yapılan çalışmada en iyi KOİ, AKM ve Bulanıklık giderimi sağlanan koagülant dozu sırasıyla 700 mg/l, 500 mg/l ve 500 mg/l olarak elde edilmiştir. Bu çalışmada ise en iyi giderim sağlanan koagülant dozunda farklı pH değerlerinde KOİ, AKM ve Bulanıklık giderimi araştırılmıştır. Değişik pH değerlerinde elde edilen KOİ giderim verimleri Şekil 4.5’de verilmiştir. Tüm koagülantlarda pH 4 değerinde en düşük KOİ giderimi gözlenirken, pH değeri 8’e kadar artırılması ile KOİ gideriminin de arttığı görülmektedir. pH 9 değerinde ise KOİ gideriminde düşüş gözlenmektedir. En yüksek KOİ giderimi pH 8 değerinde PAKS, FeCl<sub>3</sub> ve PAK koagülantları için sırasıyla %62,4, %34,5 ve %63,2 olarak belirlenmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde ise benzer şekilde pH 8 civarında en iyi KOİ giderimi elde edildiği görülmektedir. PAK, FeSO<sub>4</sub> ve KAl(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.12H<sub>2</sub>O gibi koagülantlar kullanılarak yapılan mandıra atıksuyundaki koagülasyon çalışmalarında en yüksek KOİ gideriminin pH 8’de olduğu ve pH 8 değerinden sonra KOİ gideriminin azaldığı belirtilmiştir (Kuswaha vd., 2010). Çalışmada pH 8’de PAK ve FeSO<sub>4</sub> ile mandıra atıksuyundaki koagülasyon ile sırasıyla %69,2 ve %65,3 KOİ giderimi elde edilmiştir. Bouchareb ve arkadaşları (2020) tarafında odun işleme atıksuyunda PAK kullanılarak yapılan koagülasyon

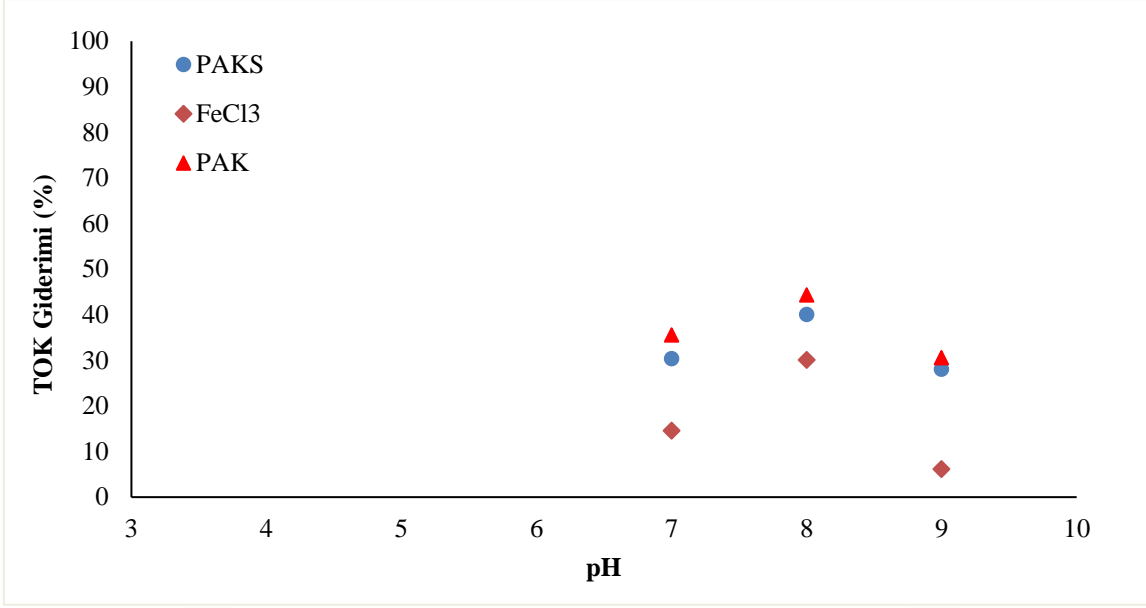
çalışmalarında en yüksek KOİ giderimine pH 8'de ulaşılmış olup, %90,2 KOİ ve %99,9 Bulanıklık giderimi elde edilmiştir.



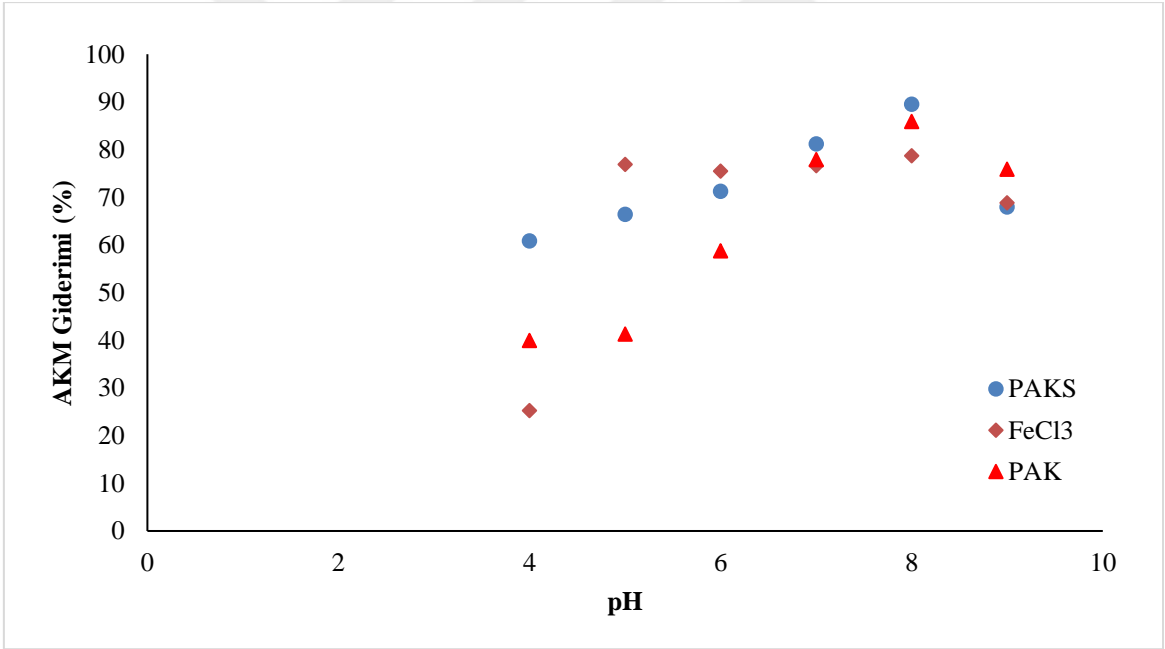
Şekil 4.5. Farklı pH değerlerinde elde edilen KOİ giderim verimleri (PAKS: 700 mg/l, FeCl<sub>3</sub>: 500 mg/l, PAK: 500 mg/l, süre: 30 dak.)

En iyi giderim sağlanan koagülan dozlarında PAKS, FeCl<sub>3</sub> ve PAK koagülanları ile farklı pH değerlerinde elde edilen TOK giderim verimleri Şekil 4.6'da verilmiştir. KOİ deneylerinde en yüksek KOİ giderimi pH 8 değerinde elde edildiğinden TOK analizleri pH 7, 8 ve 9 değerlerinde yapılmıştır. KOİ giderim verimide olduğu gibi PAKS, FeCl<sub>3</sub> ve PAK koagülanları ile en yüksek TOK giderimi pH 8 değerinde elde edilmiştir. FeCl<sub>3</sub> koagülanında pH 7'de %14,6 TOK giderimi elde edilirken, pH 8'de TOK giderimi %30,1'e artmıştır ancak pH 9 değerinde TOK giderimi %6,1'e düşmüştür. PAKS koagülanında da benzer eğilim gözlenmiş ve pH 7'den 8'e artması ile TOK giderimi de %30,4'den %40,1'e artmıştır ve pH 9'da ise %28,1'e düşmüştür. PAK koagülanında ise pH 7, 8 ve 9 değerlerinde TOK giderimi sırasıyla %35,5, %44,3 ve %30,5 olarak elde edilmiştir.

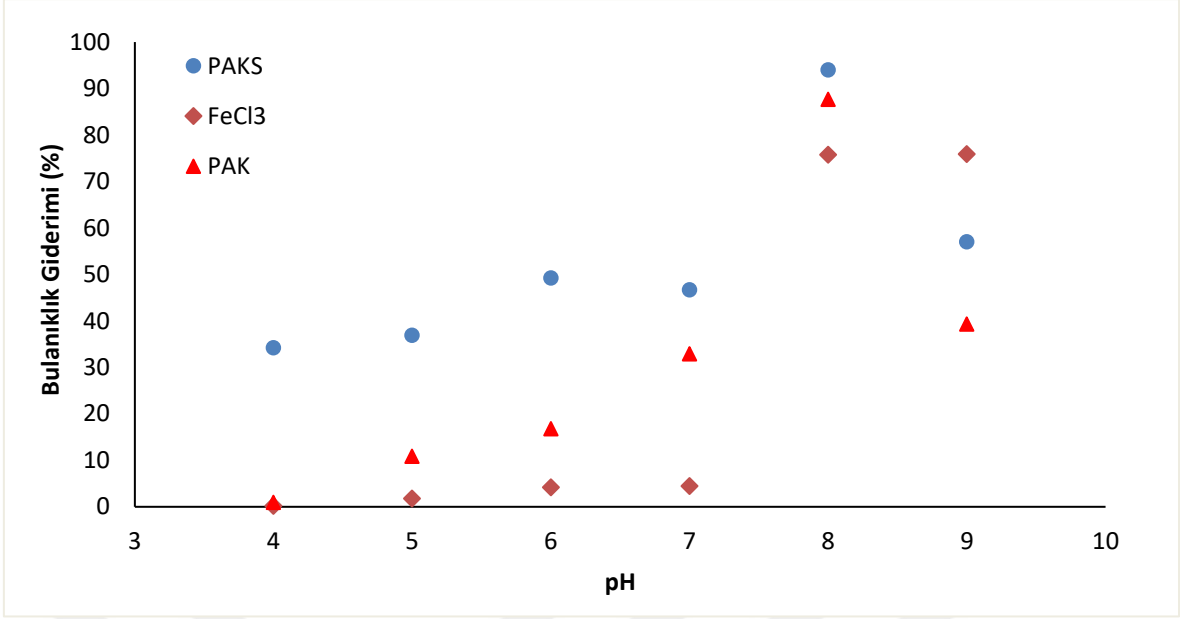
pH çalışmalarında elde edilen AKM giderim verimleri Şekil 4.7'de ve Bulanıklık giderimi de Şekil 4.8'de verilmiştir. KOİ giderimine benzer olarak pH 4 değerinde AKM ve Bulanıklık giderimi de düşük elde edilmiş ve en yüksek AKM ve Bulanıklık giderimi pH 8 değerinde gözlenmiştir. PAKS, FeCl<sub>3</sub> ve PAK koagülanları için pH 8 değerinde AKM giderim verimleri sırasıyla %89,5, %78,7 ve %85,9 olarak gözlenirken, Bulanıklık giderimi ise sırasıyla %88,0, %75,7 ve %87,6 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.6. Farklı pH değerlerinde elde edilen TOK giderim verimleri (PAKS: 700 mg/l, FeCl<sub>3</sub>: 500 mg/l, PAK: 500 mg/l, süre: 30 dak.)



Şekil 4.7. Farklı pH değerlerinde elde edilen AKM giderim verimleri (PAKS: 700 mg/l, FeCl<sub>3</sub>: 500 mg/l, PAK: 500 mg/l, süre: 30 dak.)



Şekil 4.8. Farklı pH değerlerinde elde edilen bulanıklık giderim verimleri (PAKS: 700 mg/l, FeCl<sub>3</sub>: 500 mg/l, PAK: 500 mg/l, süre: 30 dak.)

Sonuç olarak, kimya endüstrisi atıksuyunda PAKS, FeCl<sub>3</sub> ve PAK koagülantları kullanılarak yapılan koagülasyon çalışmalarında, farklı koagülant dozlarında en yüksek KOİ giderimi PAKS için 700 mg/l koagülant dozunda elde edilmiştir. FeCl<sub>3</sub> ve PAK koagülantları için ise en yüksek KOİ giderimi 500 mg/l koagülant dozunda gözlenmiştir. Benzer şekilde TOK giderimi de incelendiğinde FeCl<sub>3</sub> ve PAK koagülantlarında 500 mg/l ve PAKS koagülantı ile 700 mg/l koagülant dozunda en yüksek TOK giderimi gözlenmiştir. FeCl<sub>3</sub> koagülantı ile daha düşük KOİ, TOK, AKM ve Bulanıklık giderimi elde edilirken, 500 mg/l PAK ve 700 mg/l PAKS dozlarında KOİ, AKM ve Bulanıklık giderimleri benzerdir. Ancak PAKS koagülant dozu kullanımı PAK'tan daha yüksek olduğundan bu da maliyeti arttıracaktır. Farklı pH değerlerinde yapılan çalışmalarda ise 3 koagülant için de pH 8 değerinin en iyi değer olduğu görülmektedir.

Çalışmada kullanılan 3 koagülant (PAKS, FeCl<sub>3</sub> ve PAK) karşılaştırıldığında PAK ile elde edilen koagülant dozununun PAKS'a daha düşük olmasından dolayı da en iyi KOİ, AKM ve Bulanıklık gideriminin PAK koagülantı ile elde edildiği görülmüştür. PAKS, FeCl<sub>3</sub> ve PAK koagülantları ile verimleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. FeCl<sub>3</sub> koagülantı ile koagülasyon çalışmasında 500 mg/l koagülant dozu ve pH 8 değerinde KOİ konsantrasyonu 7515 mg/l değerinden 4919 mg/l değerine ve TOK konsantrasyonu ise 1156 mg/l değerinden 809 mg/l değerine düşmektedir. PAKS ile koagülasyon çalışmasında 700 mg/l koagülant dozu ve pH 8 değerinde KOİ konsantrasyonu 7515 mg/l değerinden 2825 mg/l değerine ve TOK

konsantrasyonu ise 1156 mg/l değerinden 693 mg/l değerine düşmektedir. En iyi arıtım sağlanan PAK ile koagülasyon çalışmasında ise 500 mg/l koagülant dozu ve pH 8 değerinde KOİ konsantrasyonu 7515 mg/l değerinden 2763 mg/l değerine ve TOK konsantrasyonu ise 1156 mg/l değerinden 643 mg/l değerine düşmektedir.

Çizelge 4.1. Farklı koagülantlar ile elde edilen giderim verimleri

<b>Koagülant</b>	<b>Koşullar</b>	<b>KOİ giderimi (%)</b>	<b>TOK giderimi (%)</b>	<b>AKM giderimi (%)</b>	<b>Bulanıklık giderimi (%)</b>
<b>PAKS</b>	Koagülant dozu:700 mg/l, pH: 8	62,4	40,1	89,5	88,0
<b>FeCl<sub>3</sub></b>	Koagülant dozu:500 mg/l, pH: 8	34,5	30,1	78,7	75,7
<b>PAK</b>	Koagülant dozu:500 mg/l, pH: 8	63,2	44,3	85,9	87,6

Farklı koagülantlar ile yapılan çalışmalarda en iyi arıtım PAK koagülantı ile sağlanmış olup, PAK koagülantı içinde en iyi koagülant dozu 500 mg/l ve pH değeri de 8 olarak belirlenmiştir. Bu koşullarda PAK koagülantı ile yapılan koagülasyon çalışması sonunda kimya endüstrisi atıksuyunda elde edilen KOİ, TOK, AKM ve Bulanıklık değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Koagülasyon sonrası Fenton oksidasyonu çalışmaları için bu koşullarda kimya endüstrisi atıksuyu koagülasyon ile ön arıtımı sonrasında Fenton oksidasyonu çalışmaları yapılmıştır.



Çizelge 4.2. PAK koagülantı kullanılarak yapılan koagülasyon sonrasında kimya endüstrisi atıksuyunun özellikleri

Parametre	Birim	Konsantrasyon
KOİ	mg/l	2763
TOK	mg/l	643
AKM	mg/l	72
Bulanıklık	mg/l	77,30

#### 4.2. Koagülasyon Sonrası Fenton Oksidasyon Prosesi Çalışmaları

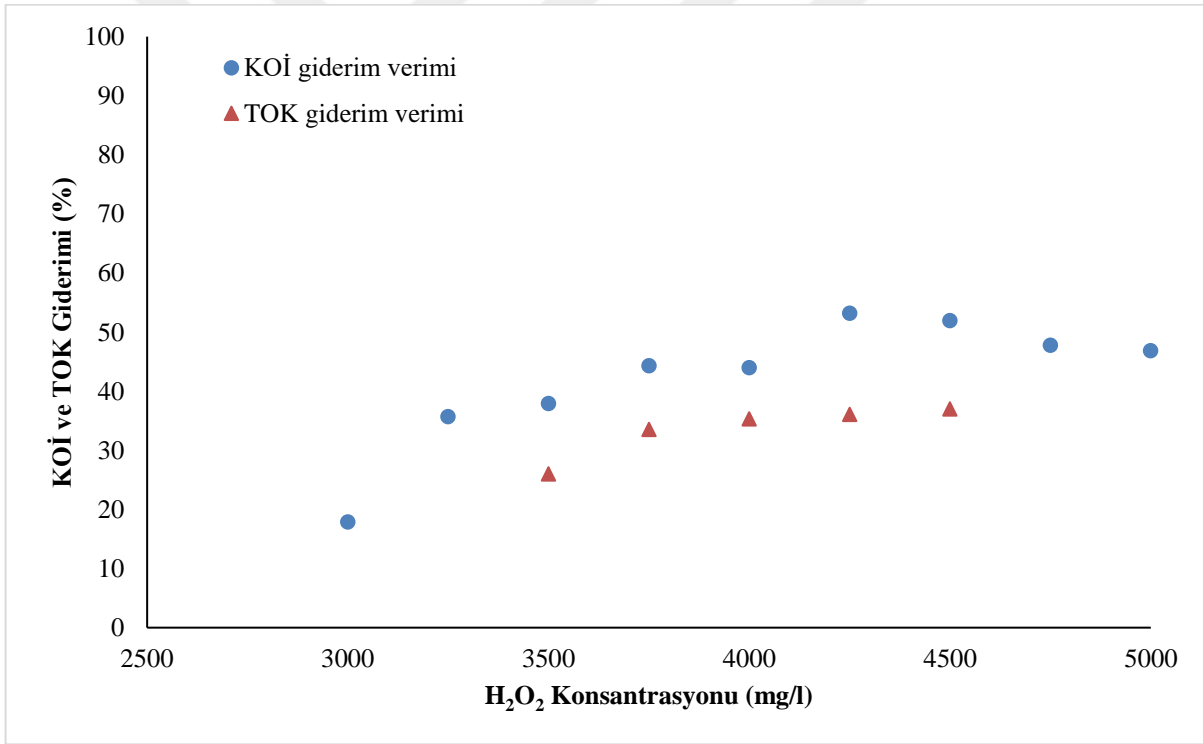
Koagülasyon çalışmalarında en verimli koagülant PAK seçilmiştir. PAK koagülantı ile yapılan çalışmalarda ise en iyi giderim sağlanan koşullar ise 500 mg/l PAK dozu ve pH 8 olarak belirlenmiştir. Bu bölümde bu koşullar ile kimya endüstrisi atıksuyu ön arıtımı yapılarak biriktirilmiş ve koagülasyon sonrasında Fenton oksidasyon prosesi ile arıtım çalışmaları yapılmıştır.

##### 4.2.1. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Konsantrasyonu Etkisi

Koagülasyon ile ön arıtım yapılmış olan atıksuda sabit 3000 mg/l Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonunda ve pH 3 değerinde farklı H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonları kullanılarak yapılan arıtım çalışmalarında edilen KOİ ve TOK giderim verimleri Şekil 4.9'da verilmiştir. Çalışmada 3000-5000 mg/l H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonu aralığında 9 farklı doz kullanılmıştır. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonu 3000 mg/l iken KOİ giderimi %17,8 olarak belirlenirken, 4250 mg/l H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonuna kadar H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dozunun artması KOİ giderimini arttırmıştır. En yüksek KOİ giderimi %53,2 olarak 4250 mg/l H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonunda elde edilmiş olup, 4500-5000 mg/l H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonu uygulamalarında KOİ gideriminde az miktarda azalış gözlenmiştir. TOK giderimi incelendiğinde de KOİ gideriminde olduğu gibi H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonu arttıkça artmaktadır. 3500 mg/l H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonunda %26,0 TOK giderimi gözlenirken, 4250 mg/l H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

konsantrasyonuna kadar H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonu artışı ile TOK giderimi %38,7'ye kadar artmıştır.

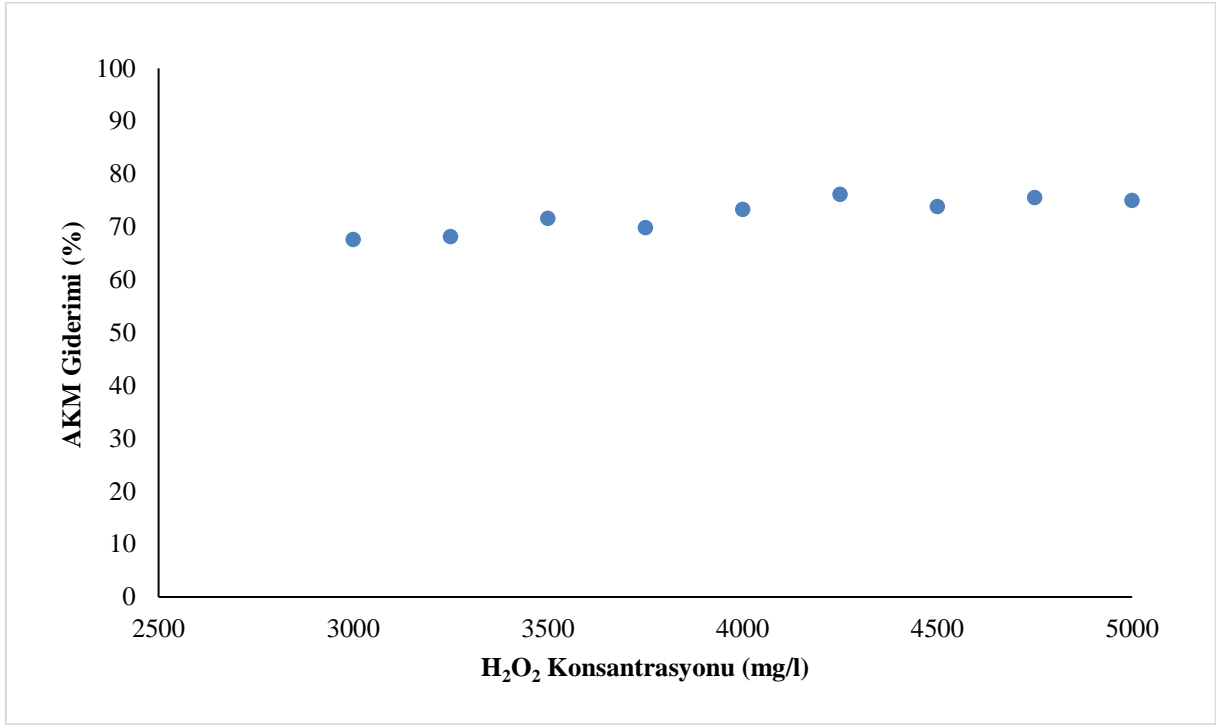
Fenton oksidasyon prosesinde hidroksil radikali (OH<sup>·</sup>) üretimi H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> varlığında ve Fe<sup>+2</sup> katalizörü etkisi ile oluşmaktadır. Bu yüzden atıksu içerisinde H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonu arttıkça hidroksil radikali üretimi de arttığı için atıksudaki KOİ ve TOK giderimi artmaktadır. Ancak atıksu içerisinde aşırı H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonu olması süpürme etkisi yaratarak aşağıda verilen reaksiyon (Eşitlik 4.1) oluşmaktadır ve hidroksil radikalleri H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ile reaksiyona girerek atıksu içerisinde azalmaktadır (Tufaner, 2020). Bu yüzden optimum H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonundan sonra H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonunun artması hidroksil radikali üretimini arttırmadığı için atıksudaki organik madde giderimini arttırmanın aksine azaltmıştır.



Şekil 4.9. Farklı H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonlarında elde edilen KOİ ve TOK giderim verimleri (Fe<sup>+2</sup>: 3000 mg/l, pH: 3, süre: 60 dak.)

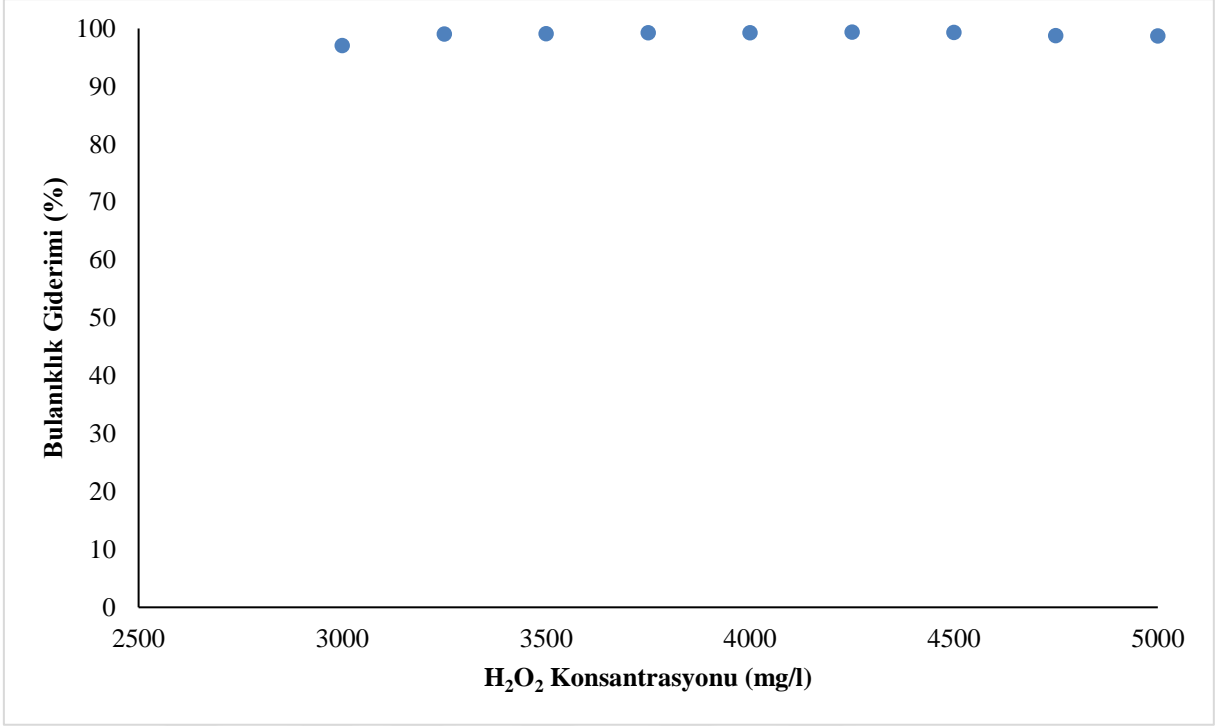
Farklı H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonları ile yapılan arıtım çalışmalarında AKM verimleri Şekil 4.10'da verilmiştir. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonu 3000-3250 mg/l aralığında %68 AKM giderimi elde edilirken, 3500 mg/l H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyon ve üzerinde %70'in üzerinde AKM giderimine

ulaşmıştır. En yüksek KOİ giderimi elde edilen 4250 mg/l H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonunda ise %76,1 AKM giderimine ulaşılmıştır.



Şekil 4.10. Farklı H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonlarında elde edilen AKM giderim verimleri (Fe<sup>+2</sup>: 3000 mg/l, pH: 3, süre: 60 dak.)

Farklı H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonu aralığında 9 farklı doz ile yapılan arıtım çalışmalarında bulanıklık giderim verimleri Şekil 4.11’de verilmiştir. Bulanıklık giderimi 3000 mg/l H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonunda %97,0 iken, 3250-4500 mg/l H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonu aralığında Bulanıklık giderimi %98,0-98,2 aralığında elde edilmiştir.



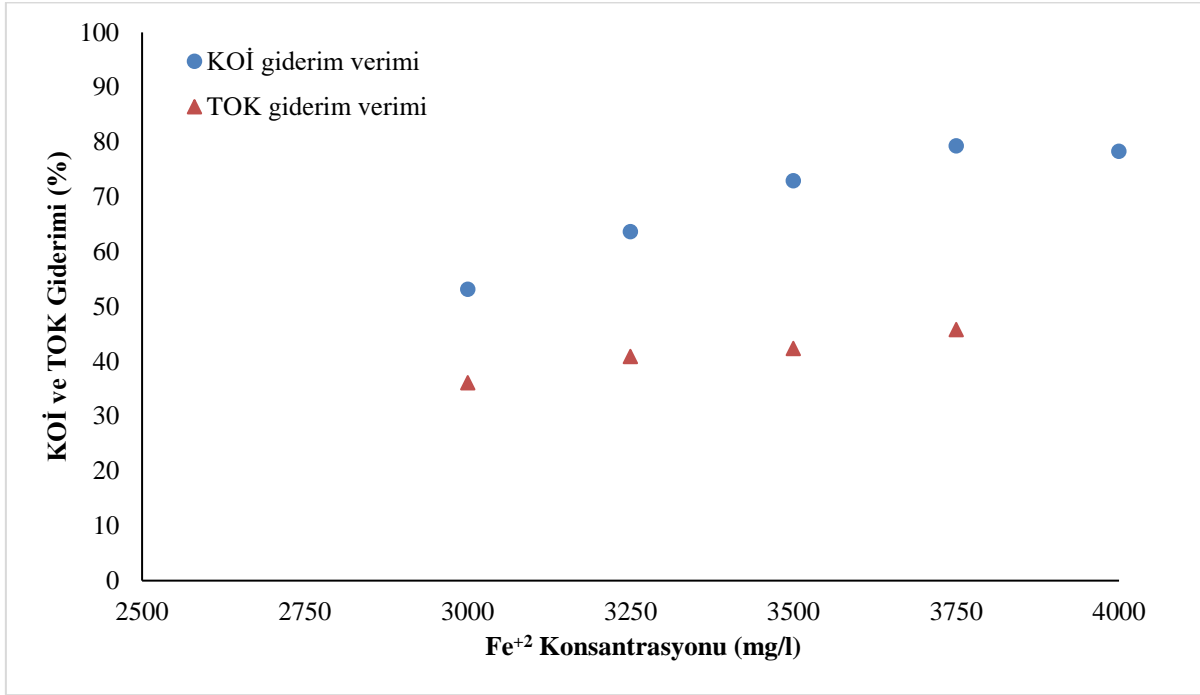
Şekil 4.11. Farklı H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonlarında elde edilen bulanıklık giderim verimleri (Fe<sup>+2</sup>: 3000 mg/l, pH: 3, süre: 60 dak.)

#### 4.2.2. Fe<sup>+2</sup> Konsantrasyonu Etkisi

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonu belirlendikten sonra, sabit 4250 mg/l H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonunda 5 farklı Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonlarında arıtım çalışmaları yapılmıştır ve bu çalışmalarda elde KOİ giderim verimleri Şekil 4.12’de verilmiştir. 3000 mg/l Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonunda %53,2 KOİ giderimi elde edilirken, 3250 mg/l, 3500 mg/l ve 3750 mg/l Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonlarında sırasıyla KOİ giderimi %63,7, %72,9 ve %79,3 değerlerine artmıştır. En yüksek KOİ giderimi 3750 mg/l Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonunda elde edilmiş olup, 4000 mg/l Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonunda KOİ gideriminde önemli bir değişim olmamıştır. Farklı Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonlarında TOK giderimi de Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonu 3750 mg/l değerine kadar artmasıyla artmıştır. 3000 mg/l Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonunda %36,1 TOK giderimi elde edilirken, 3750 mg/l Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonunda %45,8 değerine artmıştır.

Fenton oksidasyonunda H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonuna bağlı olarak Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonu bulunması ile Fe<sup>+2</sup> katalizör etkisi ile hidroksil radikali oluşmaktadır. Bu yüzden atıksu içerisinde yeterli H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> bulunduğunda Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonu arttıkça hidroksil radikali arttığından atıksudaki KOİ ve TOK giderimi de artmaktadır. Ancak optimum Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonundan sonra aşırı Fe<sup>+2</sup> ilave edilmesi Fenton çamuru (demir çamuru) oluşumunu

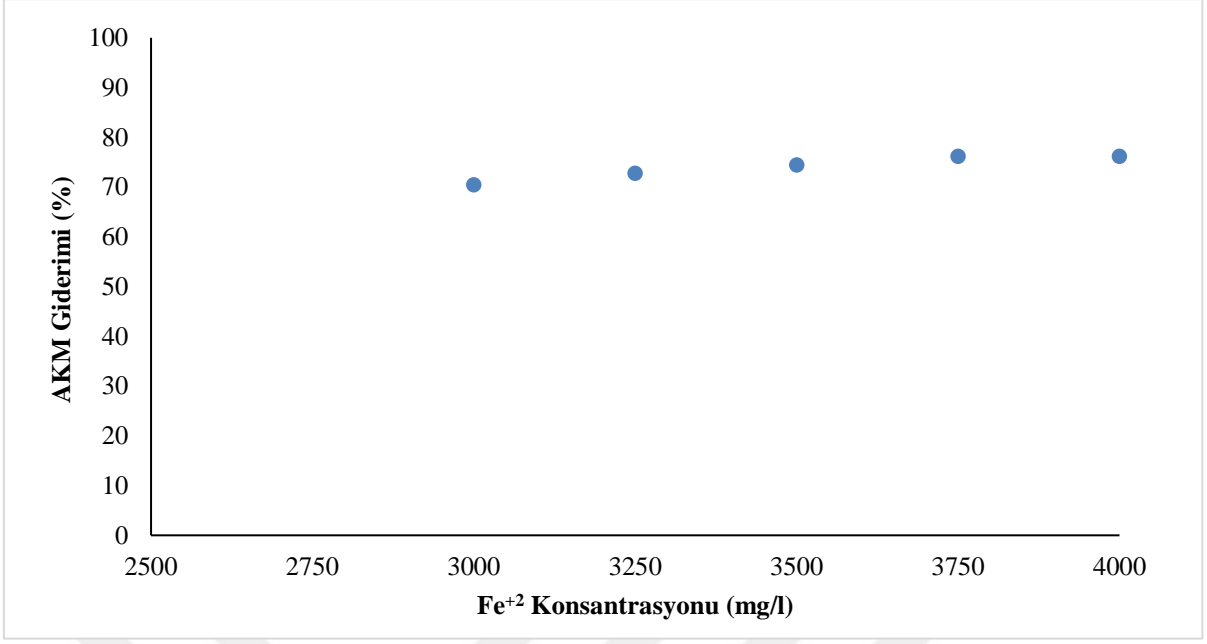
arttırmaktadır. Bu Eşitlik 4.2’de verilen reaksiyon ile açıklanmaktadır (Ribeiro ve Nunes, 2021). Atıksu içerisinde yeterli  $H_2O_2$  bulunmadığı için aşırı  $Fe^{+2}$  bulunması hidroksil radikalini arttırmadığından da atıksudaki KOİ ve TOK giderimi de artırmamaktadır.



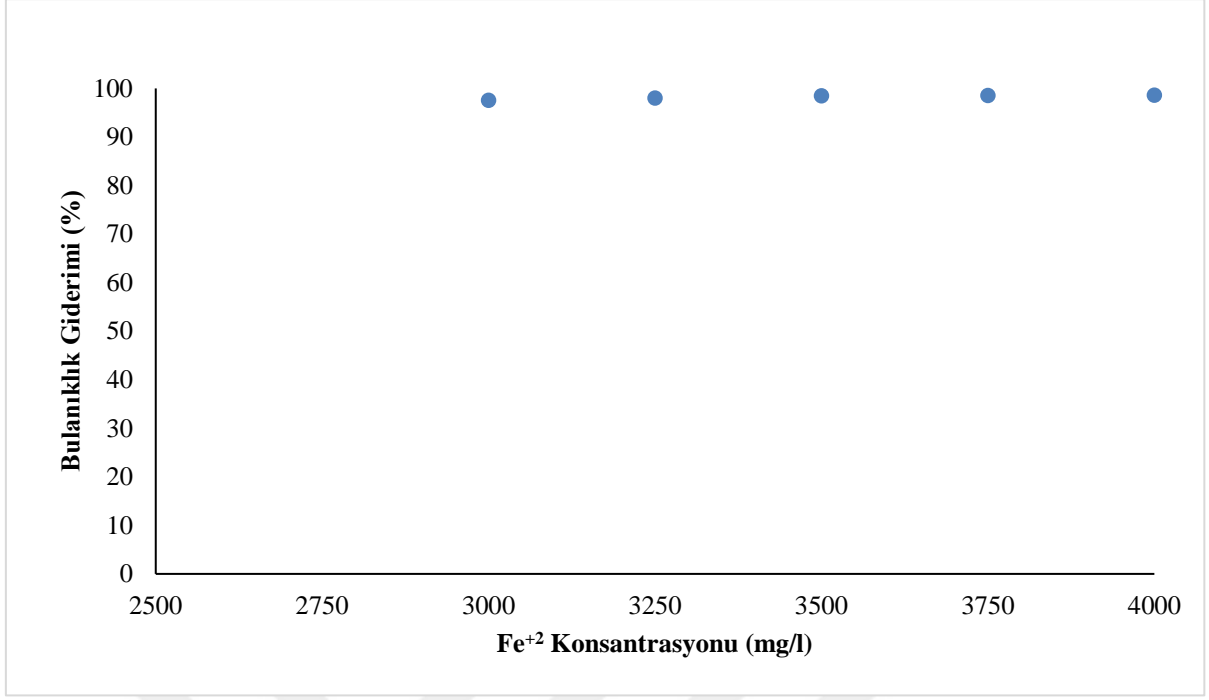
Şekil 4.12. Farklı  $Fe^{+2}$  konsantrasyonlarında elde edilen KOİ ve TOK giderim verimleri ( $H_2O_2$ : 4250 mg/l, pH: 3, süre: 60 dak.)

Farklı  $Fe^{+2}$  konsantrasyonlarında elde edilen AKM giderimi Şekil 4.13’de verilmiştir.  $Fe^{+2}$  konsantrasyonu 3000 mg/l değerinden 3750 mg/l değerine kadar arttırıldığında AKM giderim verimi de artmıştır. AKM giderimi verimi 3000 mg/l  $Fe^{+2}$  konsantrasyonunda %70,5 iken, 3750 mg/l  $Fe^{+2}$  konsantrasyonunda %76,1 olarak gözlenmiştir.

Farklı  $Fe^{+2}$  konsantrasyonlarından ulaşılan bulanıklık giderim verimleri Şekil 4.14’de verilmiştir. 3000-4000 mg/l  $Fe^{+2}$  konsantrasyonu aralığında Bulanıklık gideriminde önemli bir değişim olmamakla birlikte, 3750 mg/l  $Fe^{+2}$  konsantrasyonunda Bulanıklık giderimi %98,5 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.13. Farklı Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonlarında elde edilen AKM giderim verimleri (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: 4250 mg/l, pH: 3, süre: 60 dak.)

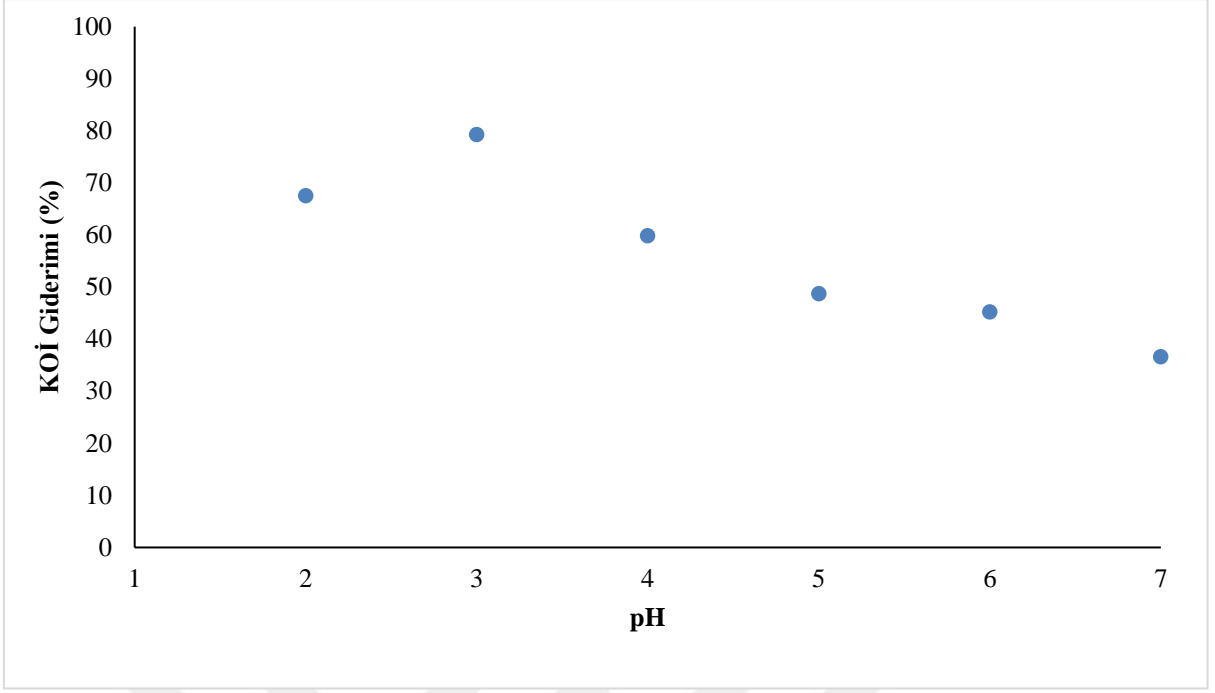


Şekil 4.14. Farklı Fe<sup>2+</sup> konsantrasyonlarında elde edilen bulanıklık giderim verimleri (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: 4250 mg/l, pH: 3, süre: 60 dak.)

#### 4.2.3. pH Etkisi

Fenton oksidasyon prosesinde pH önemli bir parametre olup, farklı pH değerlerinde elde edilen KOİ giderim verimleri Şekil 4.15’de verilmiştir. 3750 mg/l Fe<sup>2+</sup> konsantrasyonu ve 4250 mg/l H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonunda yapılan çalışmalarda pH 2 değerinden 3 değerine artması ile KOİ giderimi %67,5’den %79,3’e artarken, pH 4 ve 7 aralığında KOİ giderimine azalma gözlenmiştir. pH 4, 5, 6 ve 7 değerlerinde KOİ giderimi sırasıyla %59,9, %48,7, %45,2 ve %36,6 olarak elde edilmiştir.

Fenton oksidasyon prosesinde optimum pH değeri genel olarak 2,5 ile 3,5 arasındadır (Ribeiro ve Nunes, 2021). Daha düşük pH değerlerinde, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ile daha yavaş reaksiyona giren demir kompleksi türleri baskın olduğundan atıksu giderimi azalır (Bautista vd., 2008; Guo vd., 2018). Yüksek pH değerlerinde ise demirin Fe(OH)<sub>3</sub> olarak çökme durumu oluşmaktadır (Ribeiro ve Nunes, 2021).

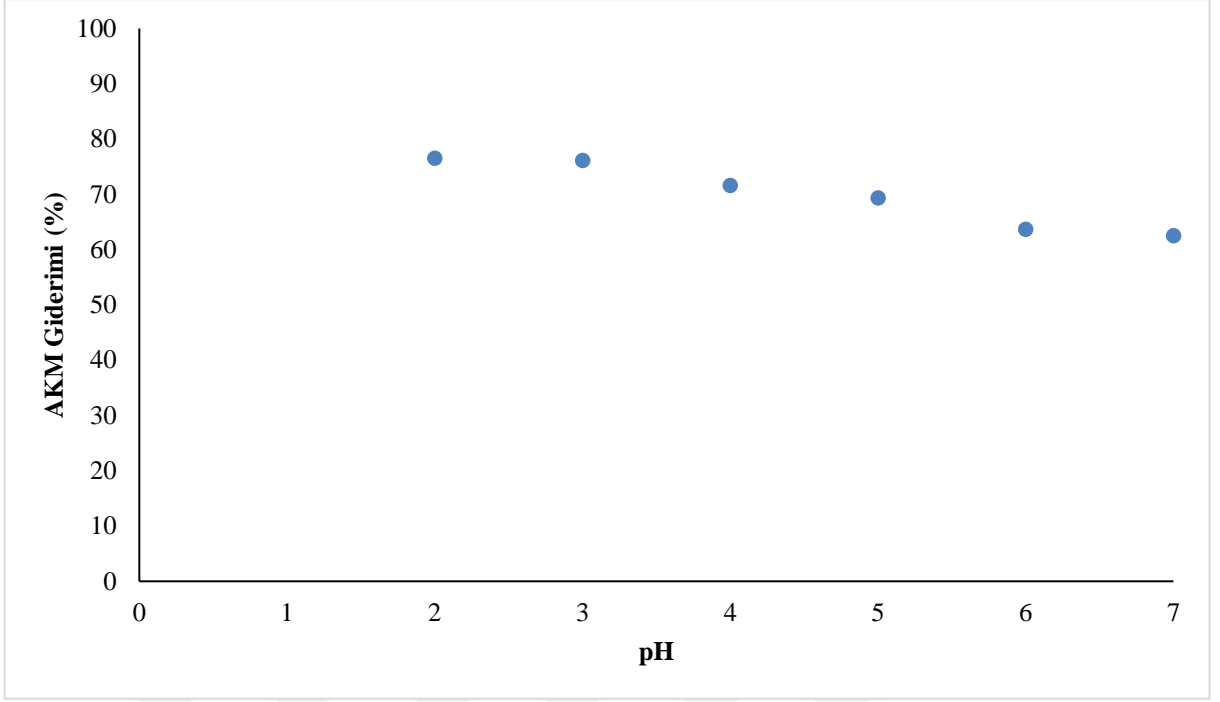


Şekil 4.15. Farklı pH değerlerinde elde edilen KOİ giderim verimleri ( $H_2O_2$ : 4250 mg/l,  $Fe^{+2}$ : 3750 mg/l, süre: 60 dak.)

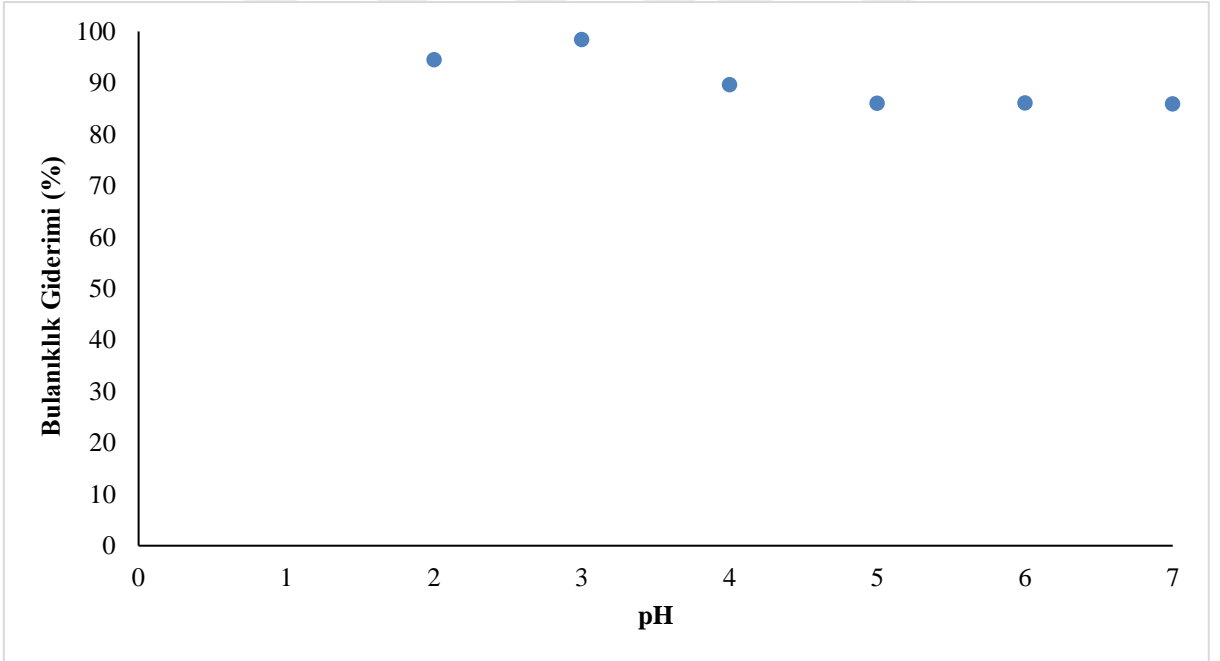
Farklı pH değerlerinde AKM giderimleri Şekil 4.16'da verilmiştir. pH 2 ve 3 değerinde yaklaşık %76 AKM giderimi elde edilirken, pH 4 ve 7 aralığında AKM giderimi azalmıştır. pH 4, 5, 6 ve 7 değerlerinde AKM giderimi sırasıyla %71,6, %69,3, %63,6 ve %62,5 olarak elde edilmiştir.

Farklı pH değerlerinde Bulanıklık giderimi Şekil 4.17'de verilmiştir. pH 2 ve 3 değerlerinde %94,5 ve %98,4 Bulanıklık giderimine ulaşılırken, pH 4 ve 7 aralığında Bulanıklık giderimi yaklaşık %86-89 aralığındadır.





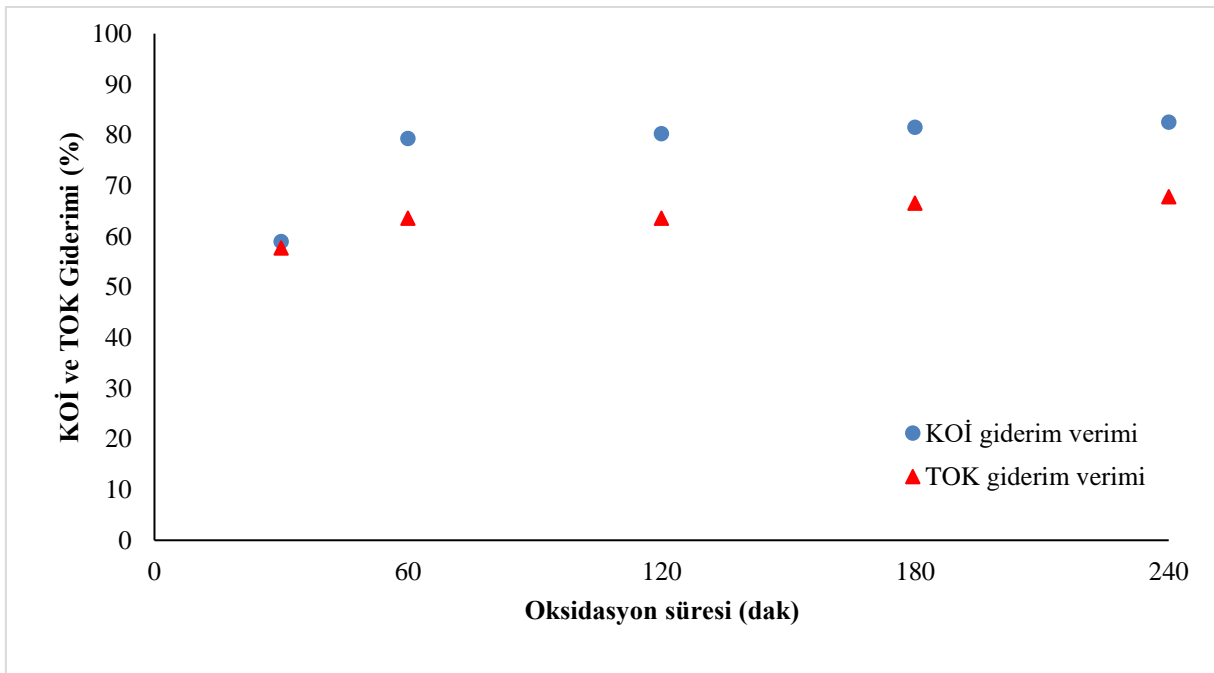
Şekil 4.16. Farklı pH değerlerinde elde edilen AKM giderim verimleri ( $H_2O_2$ : 4250 mg/l,  $Fe^{+2}$ : 3750 mg/l, süre: 60 dak.)



Şekil 4.17. Farklı pH değerlerinde elde edilen bulanıklık giderim verimleri ( $H_2O_2$ : 4250 mg/l,  $Fe^{+2}$ : 3750 mg/l, süre: 60 dak.)

#### 4.2.4. Fenton Oksidasyon Süresi Etkisi

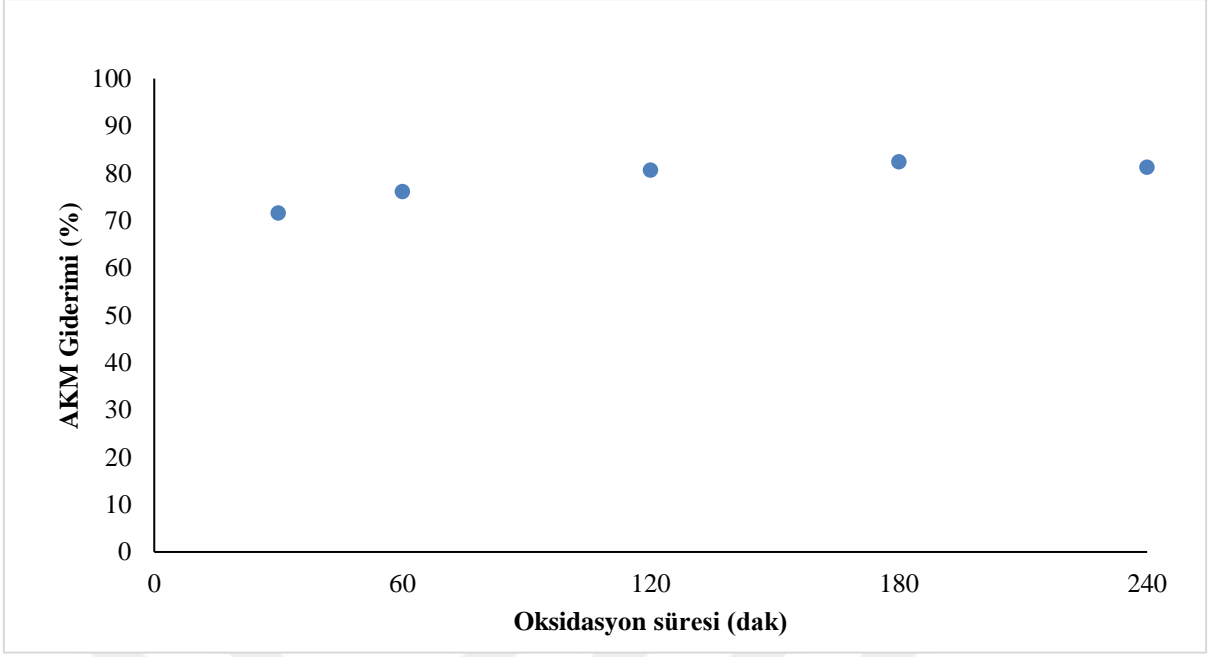
Fenton oksidasyon prosesinde atıksuyunun 30-240 dakika oksidasyon süresi aralığında KOİ giderim verimleri Şekil 4.18’de verilmiştir. Oksidasyon süresi 30 dakika uygulandığında %58,9 KOİ giderimi gözlenirken, %57,7 TOK giderimi gözlenmiştir. 60 dakika oksidasyon süresinde ise KOİ giderimi %79,3 değerine ve TOK giderimi ise %69,1 değerine ulaşmıştır. Oksidasyon süresinin 60 dakikadan sonra arttırılması KOİ giderimine önemli bir etki yapmamıştır. 240 dakika Fenton oksidasyonu sonunda KOİ ve TOK giderimi sırasıyla %82,5 ve %67,8 olarak elde edilmiştir.



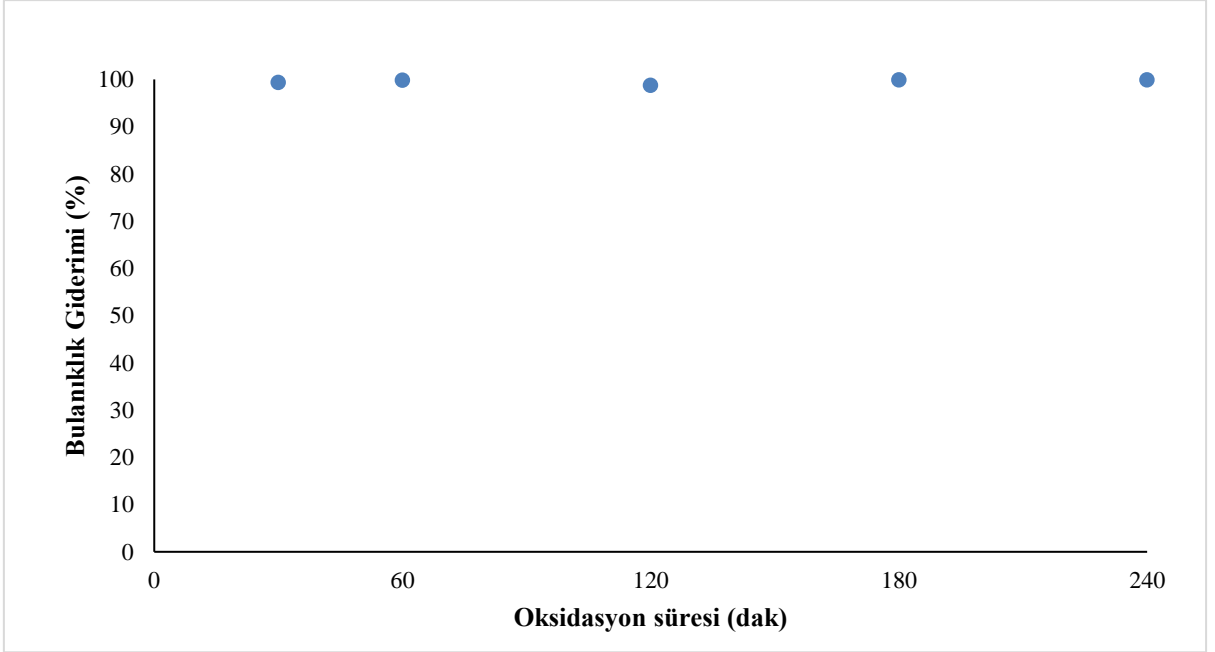
Şekil 4.18. Farklı oksidasyon sürelerinde elde edilen KOİ ve TOK giderim verimleri ( $H_2O_2$ : 4250 mg/l,  $Fe^{+2}$ : 3750 mg/l, pH: 3)

Farklı oksidasyon sürelerinde gözlenen AKM giderim verimleri Şekil 4.19’da verilmiştir. 30 ve 60 dakika oksidasyon sürelerinde AKM giderimi sırasıyla %71,6 ve %76,1 olarak elde edilmiştir. 240 dakika oksidasyon sonunda ise AKM giderimi %81 olarak elde edilmiştir.

Farklı oksidasyon sürelerinde bulanıklık giderim verimleri Şekil 4.20’de verilmiştir. KOİ ve AKM giderim verimlerine benzer olarak oksidasyon süresinin 30 dakikadan 60 dakikaya arttırılması Bulanıklık giderimini arttırırken, 60 dakikadan sonra Bulanıklık giderimlerinde önemli bir değişim görülmemiştir. 60 dakika oksidasyon süresinde %99,8 Bulanıklık giderimi elde edilmiştir.



Şekil 4.19. Farklı oksidasyon sürelerinde elde edilen AKM giderim verimleri ( $H_2O_2$ : 4250 mg/l,  $Fe^{+2}$ : 3750 mg/l, pH: 3)



Şekil 4.20. Farklı oksidasyon sürelerinde elde edilen bulanıklık giderim verimleri ( $H_2O_2$ : 4250 mg/l,  $Fe^{+2}$ : 3750 mg/l, pH: 3)

Sonuç olarak, koagülasyon sonrasında Fenton oksidasyon prosesi ile arttırılmış atıksuda farklı  $H_2O_2$  ve  $Fe^{+2}$  konsantrasyonları ile yapılan ileri arıtım çalışmalarında en yüksek KOİ giderim verimi  $H_2O_2$ : 4250 mg/l ve  $Fe^{+2}$ : 3750 mg/l konsantrasyon dozlarında elde edilmiştir. Farklı pH değerlerinde yapılan çalışmalarda ise pH 3 değerinin en iyi değer olduğu

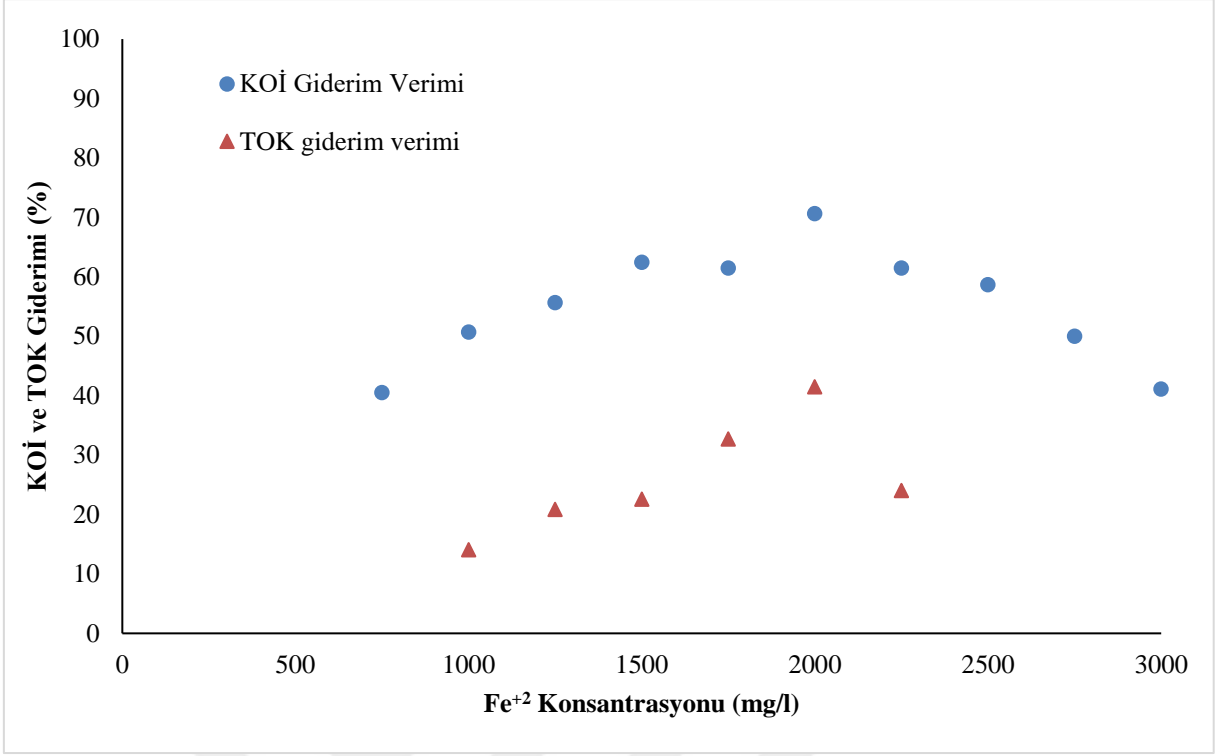
görülmektedir. Farklı oksidasyon sürelerinde yapılan çalışmalarda ise 60 dakikada en iyi KOİ, TOK, AKM ve Bulanıklık gideriminin elde edildiği görülmüştür.

### **4.3. Kimya Endüstrisi Atıksuyunda Fenton Oksidasyon Prosesi Çalışmaları**

Kimya endüstrisi atıksuyunun arıtımı için Fenton oksidasyon prosesi de kullanılmış olup, elde edilen sonuçlar bu bölümde verilmiştir.

#### **4.3.1. Fe<sup>+2</sup> Konsantrasyonu Etkisi**

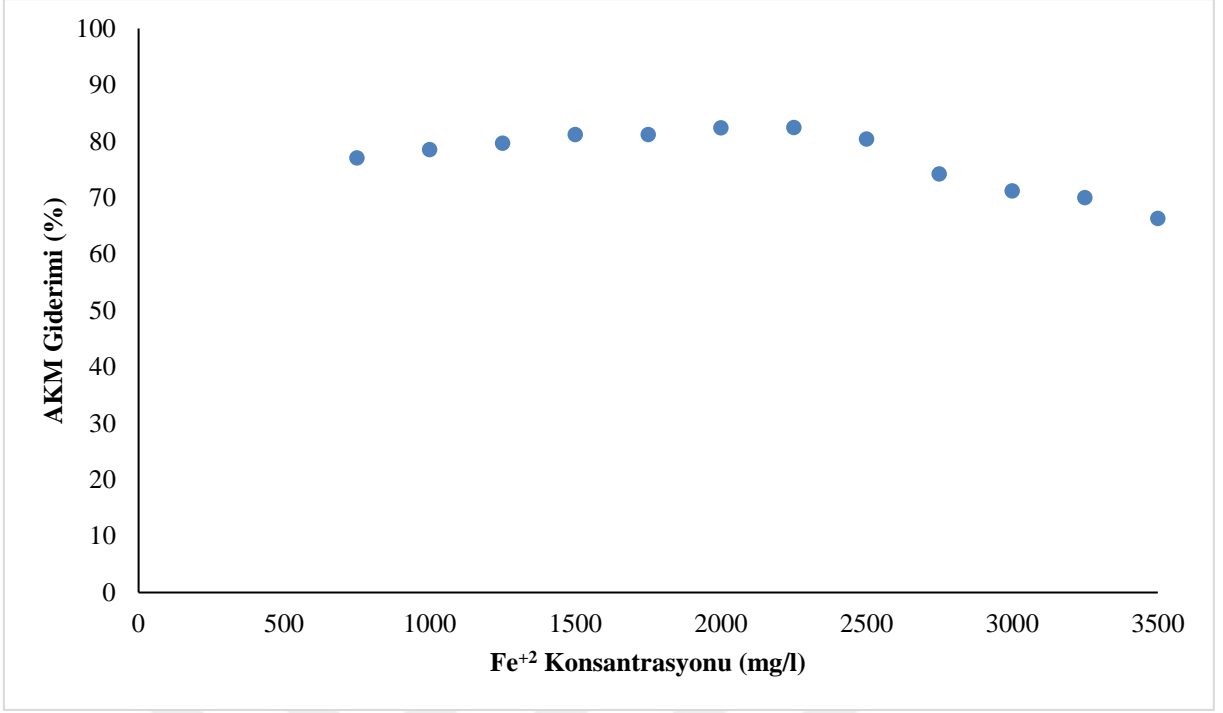
Kimya endüstrisi atıksuyunun Fenton oksidasyonu ile arıtımında öncelikle 5000 mg/l H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonu sabit tutularak 10 farklı Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonun çalışmalar yapılmıştır. 750-3500 mg/l Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonu aralığında yapılan çalışmalarda elde edilen KOİ giderim verimleri Şekil 4.21'de verilmiştir. Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonu 500 mg/l olduğunda KOİ giderim %40,5 iken, Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonu 2000 mg/l değerine arttıkça KOİ giderimi de artmıştır. En yüksek KOİ giderimi 2000 mg/l Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonunda %70,6 olarak elde edilmiştir. Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonu 2250-3500 mg/l aralığında yapılan çalışmalarda ise KOİ giderim verimi azalmıştır. TOK giderim verimi 1000 mg/l Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonunda %14,1 iken, Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonu arttıkça TOK giderimi de artmıştır. En yüksek TOK giderimi %41,5 olarak 2000 mg/l Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonunda elde edilmiştir.



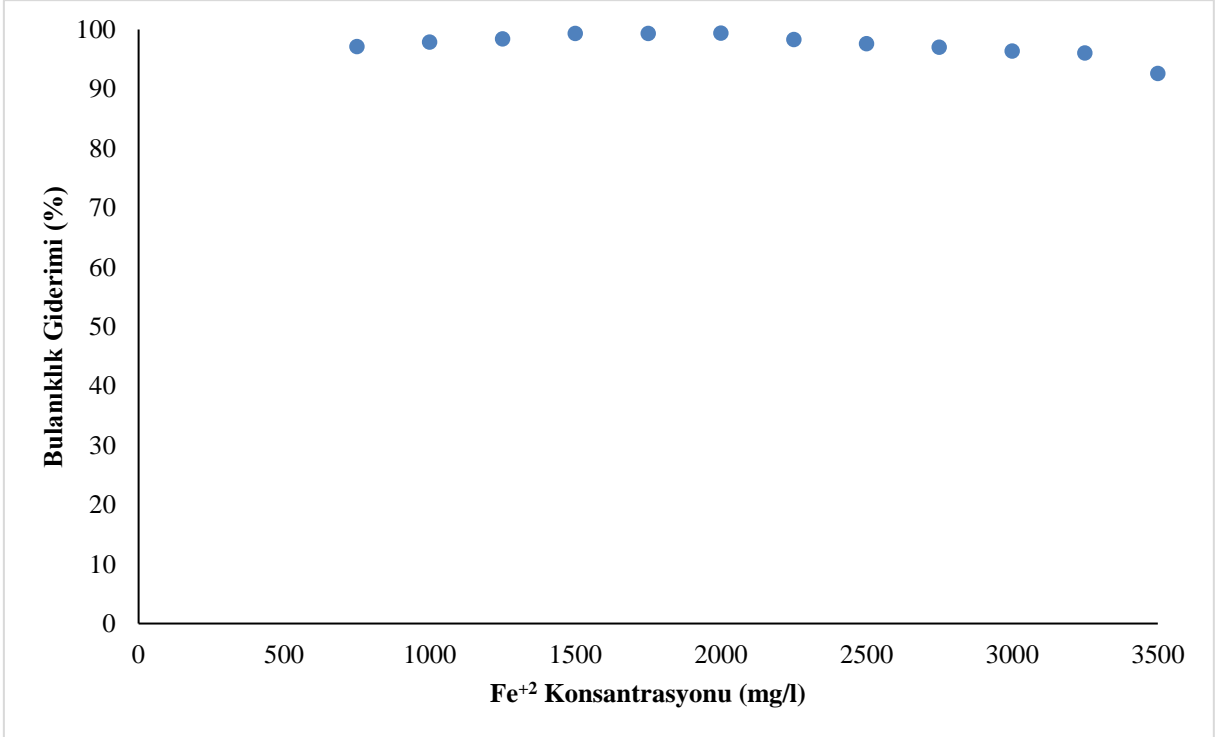
Şekil 4.21. Farklı Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonlarında elde edilen KOİ ve TOK giderim verimleri (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: 5000 mg/l, pH: 3, süre: 60 dak.)

Farklı Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonlarında AKM giderimi Şekil 4.22’de verilmiştir. Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonu 750 mg/l değerinden 2000 mg/l değerine artarken, AKM giderimi de %77,0 değerinden %82,4 değerine yükselmiştir. Ancak 2000 mg/l Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonundan sonra Fe<sup>+2</sup>’nin artışı ve KOİ gideriminin de azalması ile AKM giderimi azalmaya başlamıştır.

Farklı Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonlarında kimya endüstrisi atıksuyunun Fenton oksidasyonu ile arıtımında elde edilen Bulanıklık giderim verimleri Şekil 4.23’de verilmiştir. En düşük Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonu olan 500 mg/l değerinde %97,1 Bulanıklık giderimi elde edilirken, 2000 mg/l Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonunda Bulanıklık giderimi %99,4 olarak gözlenmiştir.



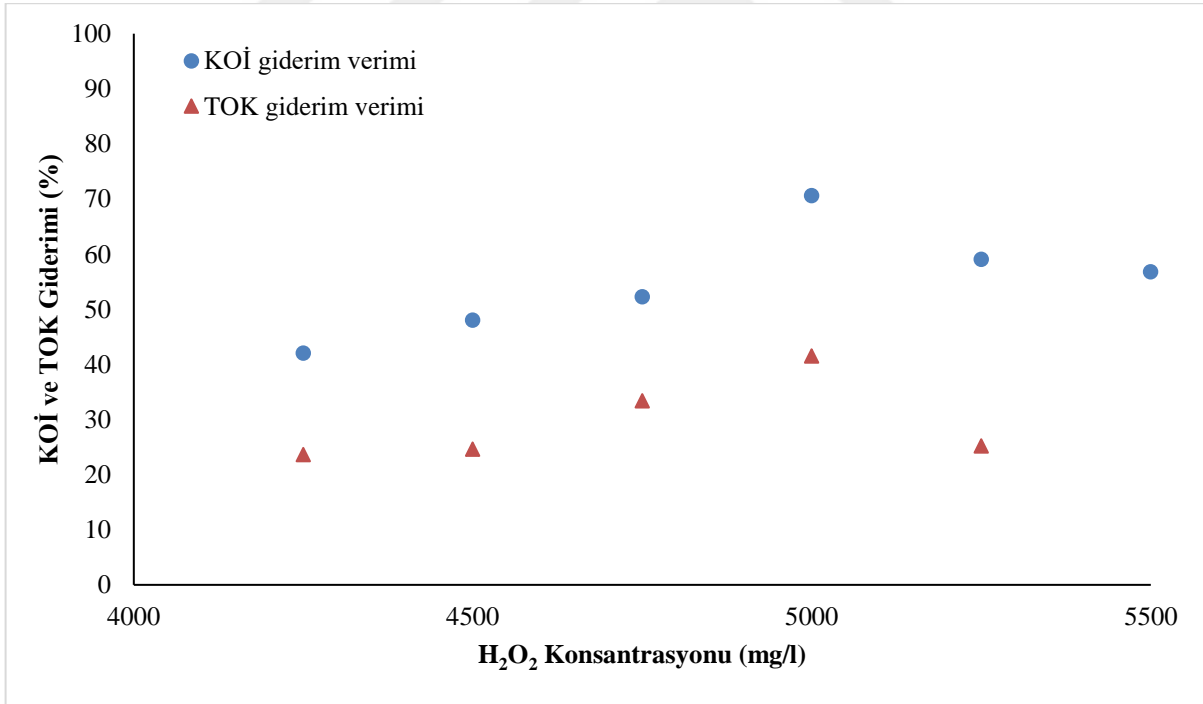
Şekil 4.22. Farklı Fe<sup>2+</sup> konsantrasyonlarında elde edilen AKM giderim verimleri (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: 5000 mg/l, pH: 3, süre: 60 dak.)



Şekil 4.23. Farklı Fe<sup>2+</sup> konsantrasyonlarında elde edilen bulanıklık giderim verimleri (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: 5000 mg/l, pH: 3, süre: 60 dak.)

#### 4.3.2. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Konsantrasyonu Etkisi

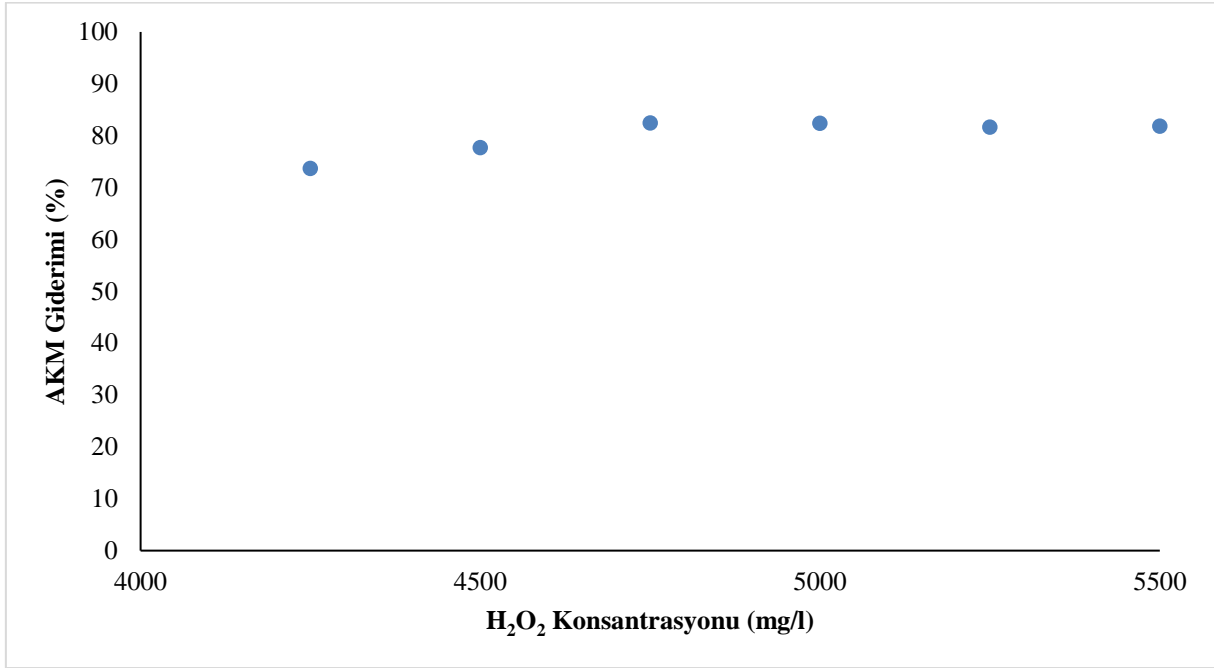
Farklı Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonlarında yapılan arıtım çalışmalarında en iyi atıksu arıtımı 2000 mg/l Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonunda elde edildiğinden, farklı H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonlarında Fenton oksidasyonu çalışmaları 5000 mg/l Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonu sabit tutularak yapılmıştır. Kimya endüstrisi atıksuyunun Fenton oksidasyonu ile arıtımında 4250-5500 mg/l H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyon aralığında 6 farklı arıtım çalışması yapılmış olup, elde edilen KOİ giderim verimleri Şekil 4.24'de verilmiştir. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonu 4250 mg/l değerinden 5000 mg/l değerine artması ile KOİ giderimi %42,0 değerinden %70,6 değerine artmaktadır. Ancak 5250 mg/l ve 5500 mg/l H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonu ile yapılan arıtım çalışmalarında KOİ gideriminde azalma görülmüştür. Farklı H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonlarında TOK giderimi incelendiğinde ise 4250 mg/l H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonunda %23,6 TOK giderimi elde edilirken, 5000 mg/l H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonuna TOK giderimi artmaktadır. 5000 mg/l H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonunda TOK giderimi %41,5 olarak elde edilmiştir ve 5250 mg/l H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonunda TOK giderimi azalmıştır.



Şekil 4.24. Farklı H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonlarında elde edilen KOİ ve TOK giderim verimleri (Fe<sup>+2</sup>: 2000 mg/l, pH: 3, süre: 60 dak.)

Farklı H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonlarında yapılan arıtım çalışmalarında elde edilen AKM giderim verimleri Şekil 4.25'de verilmiştir. 4250 mg/l H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonunda %73,7 AKM

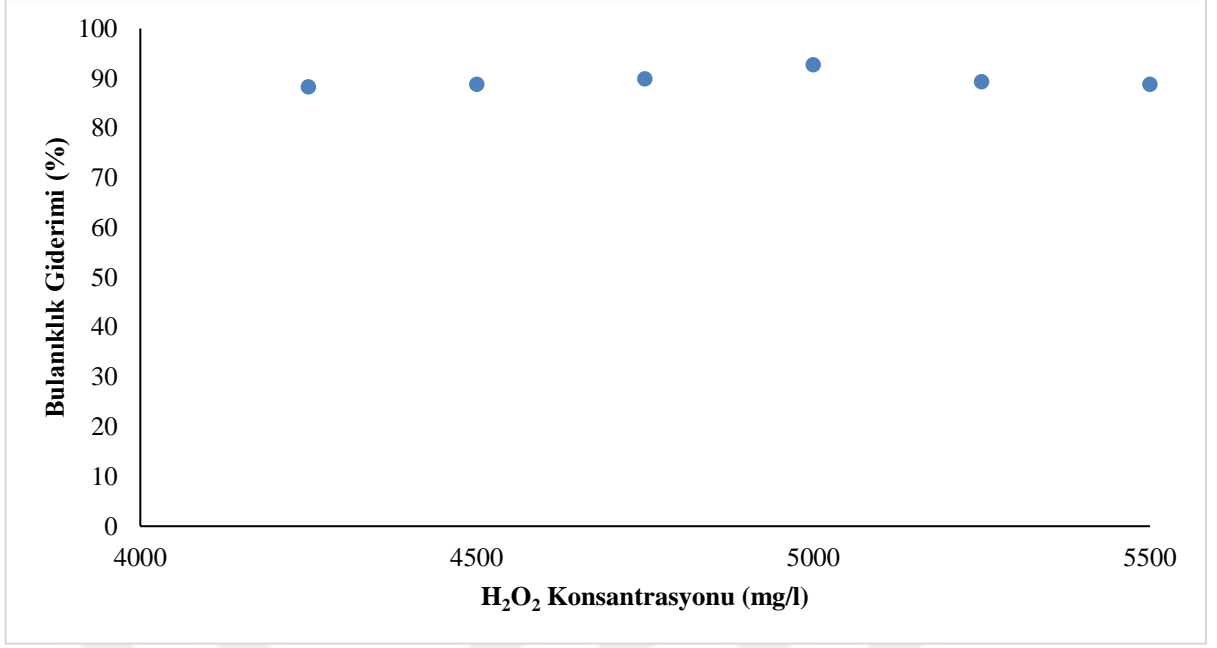
giderimi gözlenirken, 4750 ve 5000 mg/l H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonlarında %82,4 AKM giderimine ulaşılmıştır.



Şekil 4.25. Farklı H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonlarında elde edilen AKM giderim verimleri (Fe<sup>+2</sup>: 2000 mg/l, pH: 3, süre: 60 dak.)

Farklı H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonlarında Fenton oksidasyonu çalışmalarında Bulanıklık giderim verimleri Şekil 4.26'da verilmiştir. Tüm H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonlarında Bulanıklık giderimi %88'in üzerinde olup, 5000 mg/l H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonunda Bulanıklık giderimi %92,7 olarak elde edilmiştir.

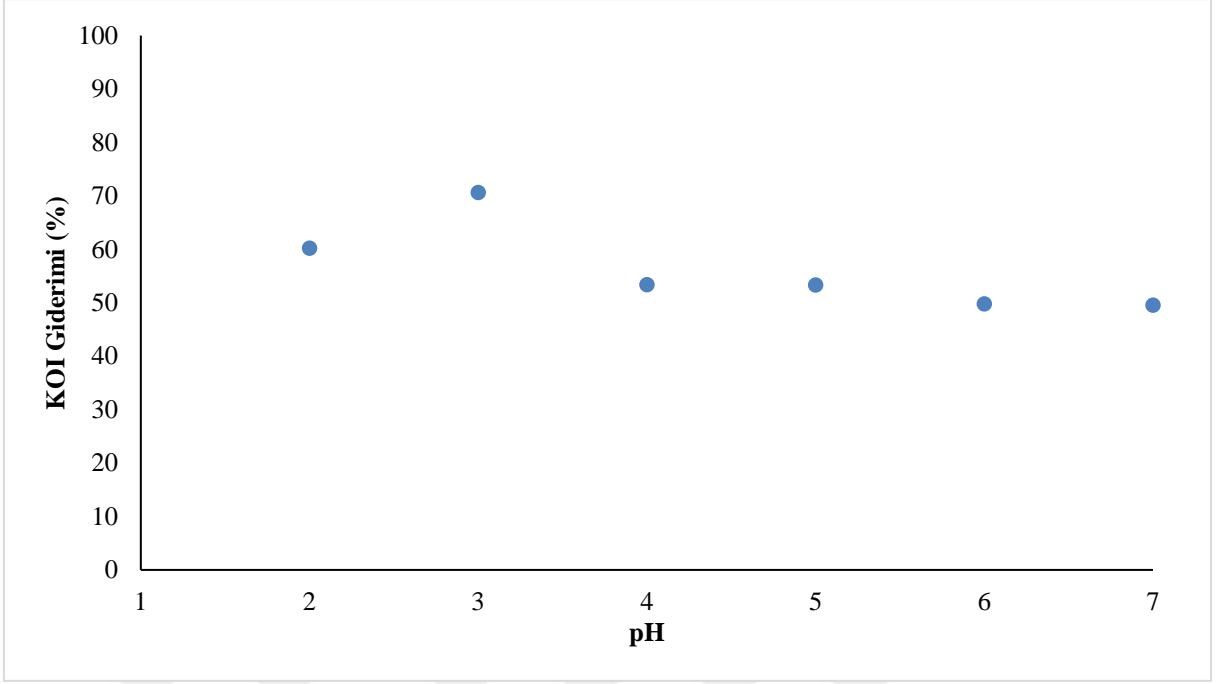




Şekil 4.26. Farklı H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonlarında elde edilen bulanıklık giderim verimleri (Fe<sup>+2</sup>: 2000 mg/l, pH: 3, süre: 60 dak.)

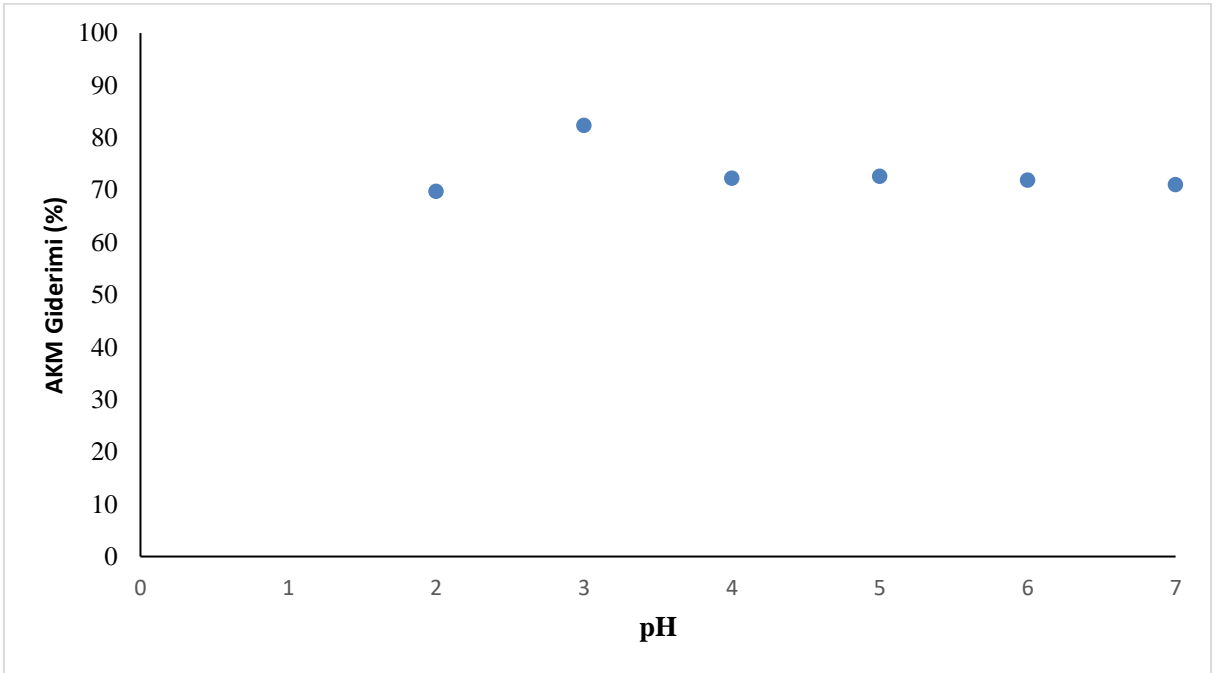
#### 4.3.3. pH Etkisi

Giriş kimya endüstrileri atıksuyunun Fenton oksidasyon prosesi ile arıtımında farklı pH değerlerinde elde edilen KOİ giderim verimleri Şekil 4.27’de verilmiştir. pH 2 değerinde %60,2 KOİ giderimi gözlenirken, pH 3 değerinde KOİ giderimi %70,6 değerine artmaktadır. pH 4 değerinden sonra KOİ giderimi azalmaya başlarken, pH 7 değerinde %49,5 değerine kadar düşmüştür.



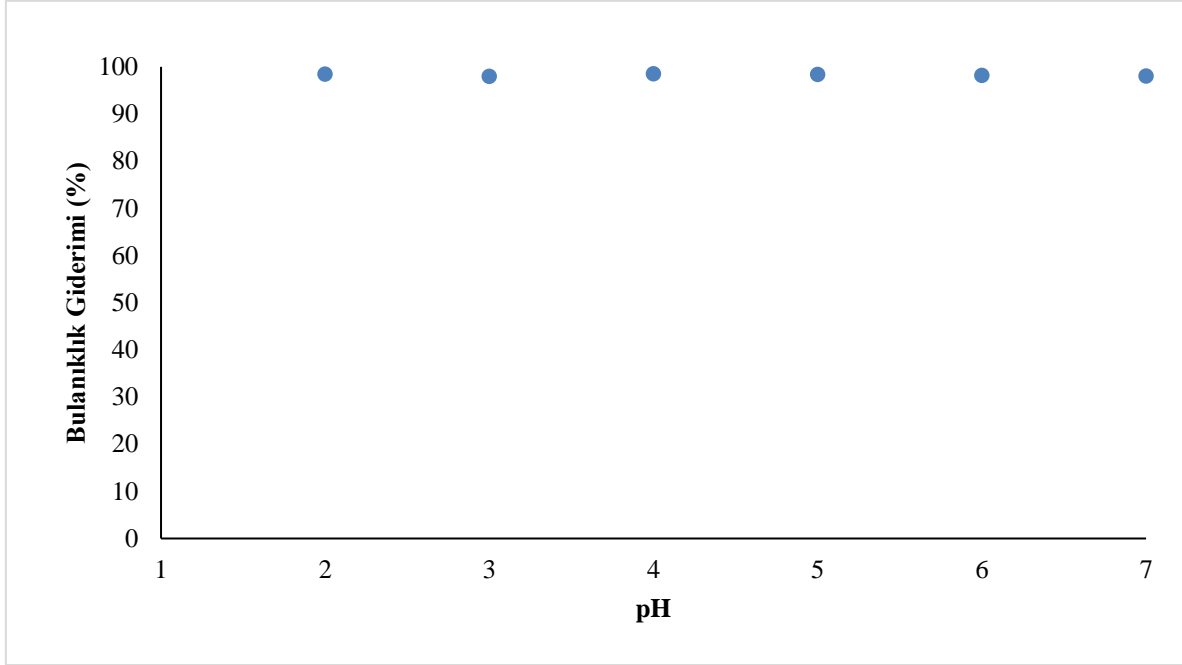
Şekil 4.27. Farklı pH değerlerinde elde edilen KOİ giderim verimleri ( $H_2O_2$ : 2000 mg/l,  $Fe^{+2}$ : 5000 mg/l, süre: 60 dak.)

pH değerlerinde alınan AKM giderim verimleri Şekil 4.28’de verilmiştir. pH 2 değerinden pH 3 değerine arttığında AKM giderimi %69,8 değerinden % 82,4 değerine artmıştır. pH 4 ve 7 aralığında AKM giderimi %71-73 aralığındadır.



Şekil 4.28. Farklı pH değerlerinde elde edilen AKM giderim verimleri ( $H_2O_2$ : 2000 mg/l,  $Fe^{+2}$ : 5000 mg/l, süre: 60 dak.)

Farklı pH değerlerinde Bulanıklık giderim verimi Şekil 4.29'da verilmiştir. pH 2 ve 7 aralığında Bulanıklık giderim veriminde önemli bir değişim gözlenmemiş olup, yaklaşık %98 civarında Bulanıklık giderimine ulaşılmaktadır.

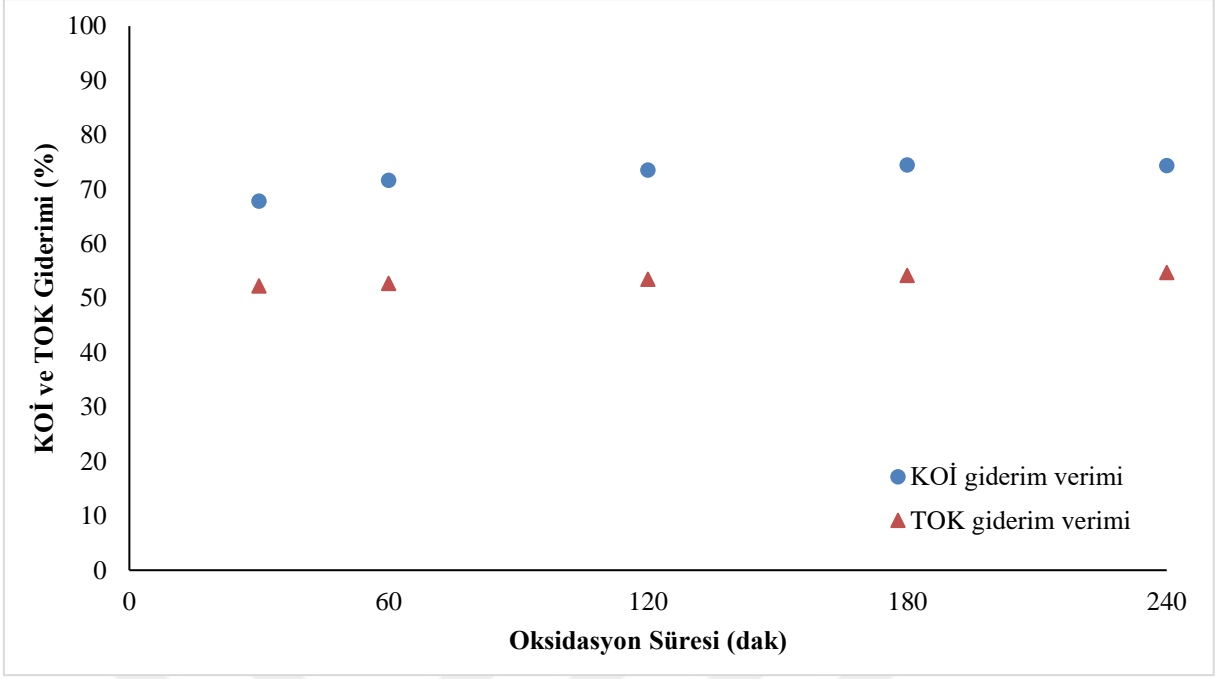


Şekil 4.29. Farklı pH değerlerinde elde edilen bulanıklık giderim verimleri ( $H_2O_2$ : 2000 mg/l,  $Fe^{+2}$ : 5000 mg/l, süre: 60 dak.)

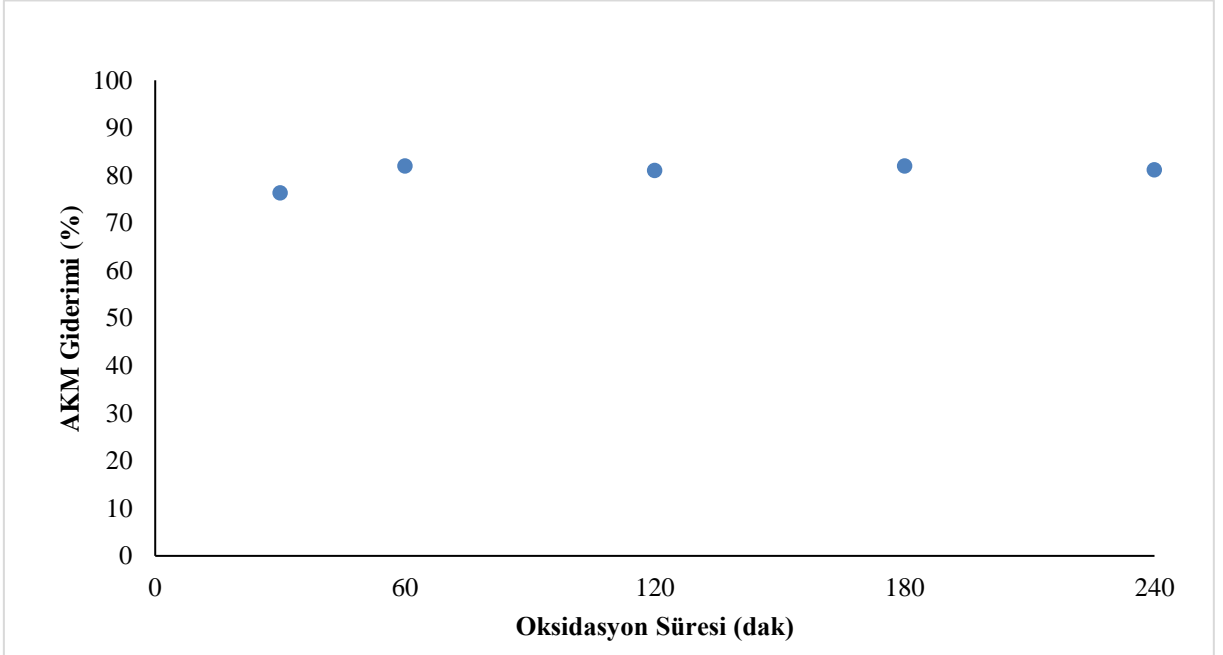
#### 4.3.4. Fenton Oksidasyonu Süresi Etkisi

Giriş kimya endüstrisi atıksuyununun 30-240 dakika oksidasyon süresi aralığında KOİ giderim verimleri Şekil 4.30'da verilmiştir. Oksidasyon süresi 30 dakika uygulandığında %67,8 KOİ giderimi gözlenirken, 60 dakika oksidasyon süresinde KOİ giderimi %71,7 değerine ulaşmıştır. Oksidasyon süresinin 60 dakikadan sonra arttırılması KOİ giderimine bir etki yapmamıştır. TOK giderimi ise 30 dakika oksidasyon süresinde %52,2 iken 60 dakika oksidasyon süresinde %52,7 olarak elde edilmiştir. 240 dakika oksidasyon süresi sonunda KOİ ve TOK giderimi ise sırasıyla %74,4 ve %54,7 olarak elde edilmiştir.

Farklı oksidasyon sürelerinde gözlenen AKM giderim verimleri Şekil 4.31'de verilmiştir. 30 ve 60 dakika oksidasyon sürelerinde AKM giderimi sırasıyla %76,3 ve %82,0 olarak elde edilmiştir. Oksidasyon süresinin 60 dakikadan sonra arttırılması AKM giderimini arttırmamıştır.



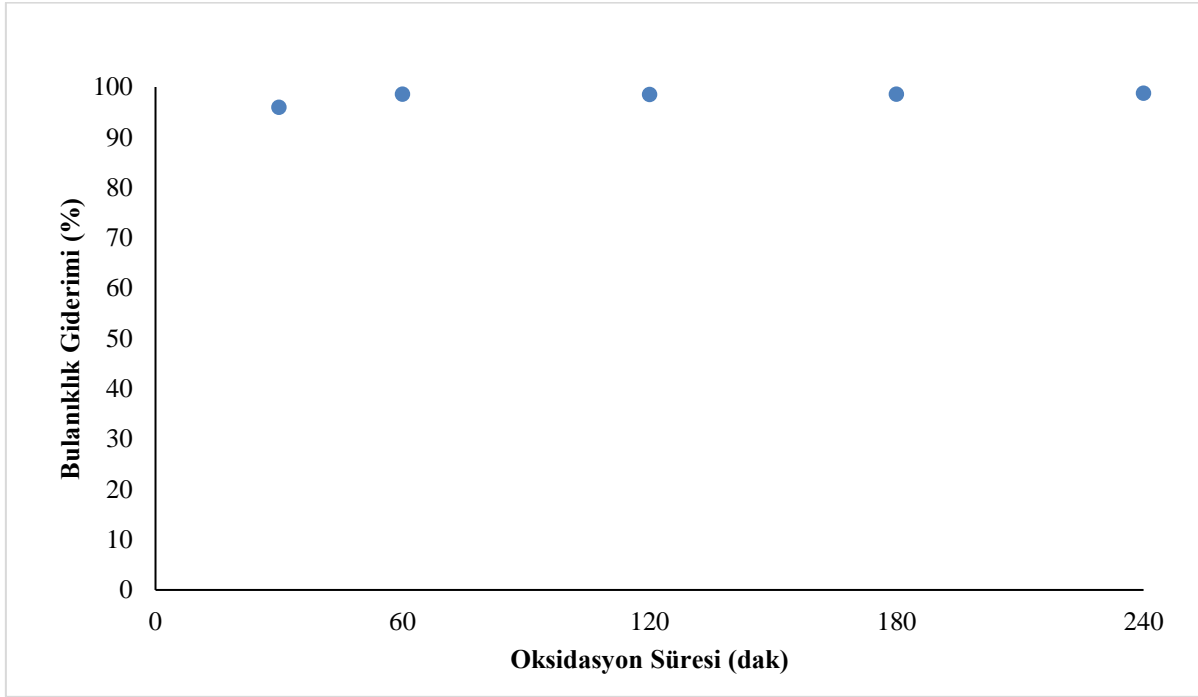
Şekil 4.30. Farklı oksidasyon sürelerinde elde edilen KOİ ve TOK giderim verimleri ( $H_2O_2$ : 2000 mg/l,  $Fe^{+2}$ : 5000 mg/l, pH: 3)



Şekil 4.31. Farklı oksidasyon sürelerinde elde edilen akm giderim verimleri ( $H_2O_2$ : 2000 mg/l,  $Fe^{+2}$ : 5000 mg/l, pH: 3)

Farklı oksidasyon sürelerinde bulanıklık giderim verimleri Şekil 4.32’de verilmiştir. KOİ ve AKM giderim verimlerine benzer olarak oksidasyon süresinin 30 dakikadan 60 dakikaya arttırılması Bulanıklık giderimini arttırırken, 60 dakikadan sonra Bulanıklık

giderimlerinde önemli bir değişim görülmemiştir. 60 dakika oksidasyon süresinde %98,6 Bulanıklık giderimi elde edilmiştir.



Şekil 4.32. Farklı oksidasyon sürelerinde elde edilen bulanıklık giderim verimleri ( $H_2O_2$ : 2000 mg/l,  $Fe^{+2}$ : 5000 mg/l, pH: 3)

Sonuç olarak, giriş kimya endüstrisi atıksuyunun farklı  $H_2O_2$  ve  $Fe^{+2}$  konsantrasyonları ile yapılan ileri arıtım çalışmalarında en yüksek KOİ giderim verimi  $H_2O_2$ : 2000 mg/l,  $Fe^{+2}$ : 5000 mg/l konsantrasyon dozlarında elde edilmiştir. Farklı pH değerlerinde yapılan çalışmalarda ise pH 3 değerinin en iyi değer olduğu görülmektedir. Farklı oksidasyon sürelerinde yapılan çalışmalarda ise 60 dk' da en iyi KOI, TOK, AKM ve Bulanıklık gideriminin elde edildiği görülmüştür.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Fenton ve Koagülasyon - Fenton oksidasyon prosesleri kullanılarak kimya endüstrisi atıksuyunun KOİ, TOK, AKM ve Bulanıklık açısından giderim verimi araştırılmıştır. Her iki proseste de atıksuya etki eden parametreler ile çalışmalar yapılarak, bu parametrelerin etkisi ve en iyi giderim elde edildiği değerler belirlenmiştir.

Kimya endüstrisi atıksuyunda PAKS, FeCl<sub>3</sub> ve PAK koagülantları kullanılarak yapılan koagülasyon çalışmalarında, farklı koagülant dozlarında en yüksek KOİ giderimi PAKS için 700 mg/l koagülant dozunda elde edilmiştir. FeCl<sub>3</sub> ve PAK koagülantları için ise en yüksek KOİ giderimi 500 mg/l koagülant dozunda gözlenmiştir. FeCl<sub>3</sub> koagülantı ile daha düşük KOİ, TOK, AKM ve Bulanıklık giderimi elde edilirken, 500 mg/l PAK ve 700 mg/l PAKS dozlarında KOİ, TOK, AKM ve Bulanıklık giderimleri benzerdir. Ancak PAKS koagülant dozu kullanımı PAK'tan daha yüksek olduğundan ve koagülant maliyetini arttıracığından dolayı PAK koagülantı ile Koagülasyon-Fenton oksidasyonu ile çalışmalar yapılmıştır. Farklı pH değerlerinde yapılan çalışmalarda ise 3 koagülant için de pH 8 değerinin en iyi değer olduğu görülmektedir. Çalışmada kullanılan 3 koagülant (PAKS, FeCl<sub>3</sub> ve PAK) karşılaştırıldığında PAK ile elde edilen koagülant dozunun PAKS'e daha düşük olmasından dolayı da en iyi KOİ, TOK, AKM ve Bulanıklık gideriminin PAK koagülantı ile elde edildiği görülmüştür. Çalışmada kullanılan kimya endüstrisi atıksuyunun koagülasyon prosesinde en yüksek giderim verimi 500 mg/l PAK dozunda KOİ giderimi %63,2, TOK giderimi %44,3, AKM giderimi %85,9 ve Bulanıklık giderimi %87,6'dır.

Koagülasyon sonrasında Fenton oksidasyon prosesi ile arıtılmış atıksuda farklı H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonları ile yapılan ileri arıtım çalışmalarında en yüksek KOİ giderim verimi H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: 4250 mg/l ve Fe<sup>+2</sup>: 3750 mg/l konsantrasyon dozlarında elde edilmiştir. Farklı pH değerlerinde yapılan çalışmalarda ise pH 3 değerinin en iyi değer olduğu görülmektedir. Farklı oksidasyon sürelerinde yapılan çalışmalarda ise 60 dk' da en iyi KOİ, TOK, AKM ve Bulanıklık gideriminin elde edildiği görülmüştür.

Koagülasyon sonrasında Fenton oksidasyon prosesi ile arıtılmış atıksuda farklı H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonları ile yapılan ileri arıtım çalışmalarında en yüksek giderim verimi H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: 4250 mg/l ve Fe<sup>+2</sup>: 3750 mg/l konsantrasyon dozlarında elde edilmiş olup, KOİ giderimi %79,3, TOK giderimi %69,1, AKM giderimi %76,1 ve Bulanıklık giderimi %99,8'dir. Koagülasyon-Fenton oksidasyon prosesleri ile toplam giderim verimleri hesaplandığında ise KOİ

konsantrasyonu 7515 mg/l değerinden 572 mg/l değerine azalarak %92,4 giderim verimi elde edilmiştir. Ayrıca toplam giderim TOK için %79,7, AKM için %96,6 ve Bulanıklık için %99,8 olarak gözlenmiştir.

Giriş kimya endüstrisi atıksuyunun farklı H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonları ile yapılan ileri arıtım çalışmalarında en yüksek KOİ giderim verimi H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: 2000 mg/l, Fe<sup>+2</sup>: 5000 mg/l konsantrasyon dozlarında elde edilmiştir. Farklı pH değerlerinde yapılan çalışmalarda ise pH 3 değerinin en iyi değer olduğu görölmektedir. Farklı oksidasyon sürelerinde yapılan çalışmalarda ise 60 dakikada en iyi KOİ, TOK, AKM ve Bulanıklık giderimi elde edildiği görölmüştür.

Giriş kimya endüstrisi atıksuyunun farklı H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonları ile yapılan ileri arıtım çalışmalarında en yüksek giderim verimi H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: 2000 mg/l, Fe<sup>+2</sup>: 5000 mg/l konsantrasyon dozlarında elde edilmiş olup, KOİ giderimi %71,7, TOK giderimi %52,7, AKM giderimi %82,0 ve Bulanıklık giderimi %98,6'dir. Giriş kimya endüstrisi atıksuyunda yapılan Fenton oksidasyonu ile KOİ konsantrasyonu 7515 mg/l değerinden 2130 mg/l değerine düşmüştür.

Sonuç olarak en iyi giderim verimi; Koagölasyon sonrasında Fenton oksidasyon prosesi ile arıtılmış atıksuda belirlenmiş olup, toplam KOİ giderimi %92,4, TOK giderimi %79,7, AKM giderimi %96,6 ve Bulanıklık giderimi %99,8 olarak elde edilmiştir.

## KAYNAKLAR

- Albuquerque, L.F., Salgueiro, A.A., Melo, J.L., Chiavone-Filho, O. (2013). Coagulation of indigo blue present in dyeing wastewater using a residual bittern. *Separation and Purification Technology*, 104, 246-249.
- Andreozzi, R., Caprio, V., Insola, A. ve Marotta, R. (1999). Advanced oxidation processes (AOP) for water purification and recovery. *Catalysis Today*, 53, 51-59.
- Aşkın, B. (2006). *Tekstil Endüstrisi Atıksu Arıtımında İleri Oksidasyon Proseslerinin Kullanımı*, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Endstitüsü, Yüksek Lisans Tezi
- Bianco B., Michelis, I. ve Vegliò, F. (2011). Fenton treatment of complex industrial wastewater: Optimization of process conditions by surface response method. *Journal of Hazardous Materials*, 186, 1733-1738.
- Bouchareb, R., Derbal, K., Özay, Y., Bilici, Z., Dizge, N. (2020). Combined natural/chemical coagulation and membrane filtration for wood processing wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 37, 101521, 1-12.
- Bouasla, C., Samar, M.E.H. ve Ismail, F. (2010). Degradation of methyl violet 6B dye by the Fenton process. *Desalination*, 254 (1-3), 35-41.
- Bautista, P., Mohedano, A.F., Casas, J.A., Zazo, J.A., Rodriguez, J.J. (2008). An overview of the application of Fenton oxidation to industrial wastewaters treatment. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 83, 1323-1338.
- Chen, Y., Liu, C., Nie J., Wu, S. ve Wang D. (2014). Removal of COD and decolorizing from landfill leachate by Fenton's reagent advanced oxidation. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 16, 189-193.
- Çalık, Ç., Çifçi, D.İ. (2022). Comparison of kinetics and costs of Fenton and photo-Fenton processes used for the treatment of a textile industry wastewater. *Journal of Environmental Management*, 304, 114234, 1-6.
- Dantas, T.L.P., Mendonca, V.P., Jose, H.J. Rodrigues, A.E. ve Moreira. R.E.P.M. (2003). Treatment of textile wastewater by heterogeneous Fenton process using a new composite Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/carbon. *Chemical Engineering Journal*, 118, 77-82.
- Demir, E. (2015). *Geri Dönüşüm Endüstrisi atıksularının Karakterizasyonu ve İleri Oksidasyon Yöntemleri İle Arıtım* (Yüksek Lisans Tezi), Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Dinçer, A.R., Çifçi, D.İ., Darcan-Cinkaya, D., Dülger, E., Karaca, F. (2021). Treatment of organic peroxide containing wastewater and water recovery by fenton-adsorption and fenton-nanofiltration processes, *Journal of Environmental Management*, 299, 113557, 1-9.
- Doğruel, S., Ölmez-Hancı, T., Kartal, Z., Arslan-Alaton, İ. ve Orhon, D. (2009). Effect of Fenton's oxidation on the particle size distribution of organic carbon in OMWW. *Water Research*, 43, 3874-3983.



- Dovletoglou, O., Philippopoulos, C., Grigoropoulou, H. (2002). Coagulation for Treatment of Paint Industry Wastewater, *Journal of Environmental Science and Health*, 37, 1361-1377.
- Eremektar, G., Goksen, S., Germirli-Babuna, F. , Dogruel, S. (2006). Coagulation flocculation of wastewater from a water based paint and allied products industry and its effect on inert COD, *Journal of Environmental Science and Health*, 41, 1843-1852.
- Ghafari, S., Aziz, H.A., Isa, M.H., Zinatizadeh, A.A. (2009). Application of response surface methodology (RSM) to optimize coagulation–flocculation treatment of leachate using poly-aluminum chloride (PAC) and alum. *Journal of Hazardous Materials*, 163, 650-656.
- Giray, S.N. (2014). *Kumaş boyaması yapan Kahramanmaraş tekstil fabrikaları atıksularının ultrases Fenton ve Fenton oksidasyonu ile arıtımının araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi), Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Guo, Y., Xue, Q., Zhang, H., Wang, N., Chang, S., Wang, H., Pang, H., Chen, H. (2018). Treatment of real benzene dye intermediates wastewater by the Fenton method: characteristics and multi-response optimization. *RSC Advances*, 8, 80-90.
- Güneş, E., Çifçi, D.İ., Çelik, S.O. (2018). Comparison of Fenton process and adsorption method for treatment of industrial container and drum cleaning industry wastewater, *Environmental Technology*, 39(7), 824-830.
- Hanay, Ö. ve Hasar, H. (2007). Fenton oksidasyon prosesi ile tekstil endüstrisi atıksuyunda renk giderimi. *Science and Engineering Journal of Fırat University*, 19 (4), 505-509.
- Hellsten, P., Salminen, J., Jorgensen, K., Nysten, T. (2005). Use of formate in road winter deicing can reduce groundwater deterioration. *Environmental Science and Technology*, 39, 5095-5100.
- Kang, Y.W. and Hwang, K. (2000). Effect of reaction conditions on the oxidation efficiency in the fenton process. *Water Research*. (10), 2786-2790.
- Kaplan, F. (2007). *Zeytin kara suyundaki toksik fenolik bileşiklerin, farklı karbon elektrotlar kullanılarak, elektro-Fenton yöntemi ile parçalanmaları* (Yüksek Lisans Tezi), Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Katip, A. (2019). Pestisit üretiminde atıksuların Koagülasyon/Flokülasyon prosesi ile geri kazanımının değerlendirilmesi, *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 5(1), 94-100.
- Kushwaha, J.P., Srivastava, V.C., Mall, I.D. (2010). Treatment of dairy wastewater by inorganic coagulants: parametric and disposal studies, *Water Research*, 44, 5867-5874.
- Kutluay, G., Germirli-Babuna, F., Eremektar, G., Orhon, D. (2004), Treatability of water-based paint industry effluents, *Fresenius Environmental Bulletin*, 13, 1057- 1060.
- Liang, C.Z., Sun, S.P., Li, F.Y., Ong, Y.-K., Chung, T.S. (2014). Treatment of highly concentrated wastewater containing multiple synthetic dyes by a combined process of coagulation/ flocculation and nanofiltration. *Journal of Membrane Science*, 469, 306-315.

- Lopez, A., Pagano, M., Volpe, A. ve Di-Pinto, A.C. (2004). Fenton's pre-treatment of mature landfill leachate. *Chemosphere*, 54, 1005-1010.
- Neyens, E., Baeyens, J., Weemaes, M. ve De-Heyder, B. (2003). Pilot-scale peroxidation ( $H_2O_2$ ) of sewage sludge. *Journal of Hazardous Materials*, B98, 91-106.
- Odokuma, L. ve Oliwe, O.S.I. (2003). Toxicity of substituted benzene derivatives to four chemolithotrophic bacteria isolated from the New Calabar River. *Global Journal of Environmental Science*, 2(2), 72-77.
- Ömer-Yasin, B., “Boya endüstrisi atıksuyunun koagülasyon ile ön arıtımı” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2013.
- Ribeiro, J.P., Nunes, M.I. (2021). Recent trends and developments in Fenton processes for industrial wastewater treatment – A critical review. *Environmental Research*, 197, 110957, 1-17.
- Rivas, F.J., Beltran, F.J., Gimeno, O. and Frades, J. (2001). Treatment of olive oil mill wastewater by Fenton's reagent. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. (4), 1873-1880
- Sirtori, C., Zapata, A., Gernjak, W., Malato, S., Lopez, A. ve Agüera A. (2011). Solar photo-Fenton degradation of nalidixic acid in waters and wastewaters of different composition. Analytical assessment by LC-TOF-MS, *Water Research*, 45(4), 1736-1744.
- Solmaz, S.K.A., Azak, H., Üstün, G.E. ve Morsünbül, T. (2010). Pestisit gideriminde Fenton proseslerinin kullanımına yönelik bir envanter çalışması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 15, 179-194.
- Tianzhi, W., Weijie, W., Hongying, H., Khu, S.T. (2021). Effect of coagulation on bio-treatment of textile wastewater: Quantitative evaluation and application. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127798, 1-11.
- Tufaner, F. (2020). Evaluation of COD and color removals of effluents from UASB reactor treating olive oil mill wastewater by Fenton process. *Separation Science and Technology*, 55(18), 3455-3466.
- Verma, S., Prasad, B., Mishra, I.M. (2010). Pretreatment of petrochemical wastewater by coagulation and flocculation and the sludge characteristics. *Journal of Hazardous Materials*, 178, 1055-1064.
- Wei, J., Song, Y., Tu, X., Zhao, L., Zhi, E. (2013). Pretreatment of dry-spun acrylic fiber manufacturing wastewater by Fenton process: Optimization, kinetics and mechanisms. *Chemical Engineering Journal*, 218, 319-326.