



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



**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**CEVHER HAZIRLAMADA ELEKTROKOAGÜLASYON  
PROSESİNİN UYGULANABİLİRLİĞİNİN  
ARAŞTIRILMASI**

**Mehmet Furkan ÖZKAN**

**Maden Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Maden Mühendisliği Programı**

**Danışman**

**Yard. Doç. Dr. M. Faruk ESKİBALCI**

**Ocak 2014**

**İSTANBUL**



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



**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**CEVHER HAZIRLAMADA ELEKTROKOAGÜLASYON  
PROSESİNİN UYGULANABİLİRLİĞİNİN  
ARAŞTIRILMASI**

**Mehmet Furkan ÖZKAN**

**Maden Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Maden Mühendisliği Programı**

**Danışman**


**Yard. Doç. Dr. M. Faruk ESKİBALCI**


**Ocak 2014**


**İSTANBUL**


Bu çalışma 02/01/2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Maden Mühendisliğı Anabilim Dalı Maden Mühendisliğı programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.


**Tez Jürisi**

  
Yard Doç Dr. M. Faruk ESKİBALCI (Danışman)  
İstanbul Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi

  
Prof. Dr. Ataç BAŞÇETİN  
İstanbul Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi

  
Prof. Dr. Şafak G. ÖZKAN  
İstanbul Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi

  
Prof. Dr. Alaettin KILIÇ  
İstanbul Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi

  
Prof. Dr. İsmail BOZ  
İstanbul Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi  
Kimya Müh Bölümü

Bu alışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin **25981** numaralı projesi ile desteklenmiştir.

## ÖNSÖZ

Yüksek Lisans tezimin hazırlanması süresince her türlü yardım ve fedakarlığı gösteren, değerli fikirleriyle beni her zaman destekleyen, bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım saygıdeğer hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet Faruk ESKİBALCI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, Lisans ve Yüksek Lisans eğitimlerim sırasında bilgilerini bizden esirgemeyen, bizlere yakın ilgi ve alaka gösteren, İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü' nün kıymetli hocalarına teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında bana yardımcı olan, laboratuvar imkanlarından yararlanmamı sağlayan, bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım Sayın Yrd. Doç. Dr. Kenan ÇİNKU'ya, Sayın Yrd. Doç. Dr. Orhan ÖZDEMİR'e ve Araştırma Görevlisi Sayın Dilek ŞENOL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Proje çalışması gerçekleştirilirken maddi destek sağlayan İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Fonuna sağladıkları destekten dolayı teşekkür ederim.

Yüksek Lisans çalışmam süresince, maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen, bana çalışma hırısı aşıl原因an aileme da ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Ocak, 2014

Mehmet Furkan ÖZKAN

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
TABLO LİSTESİ.....	x
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ .....	xii
ÖZET.....	xiii
SUMMARY .....	xv
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. GENEL KISIMLAR .....</b>	<b>3</b>
2.1.    SUSUZLANDIRMA-FLOKÜLASYON.....	3
2.1.1. Susuzlandırmanın Tanımı .....	3
2.1.2. Çökme .....	3
2.1.3. Engelli Çökme.....	5
2.1.4. Kync Sedimentasyon Teorisi .....	7
2.1.5. Mineral Süspansiyonlarında Denge .....	8
2.2.    FLOKÜLASYONUN GENEL MEKANİZMASI.....	12
2.2.1. Partiküller Arası Çarpışmalar.....	12
2.2.2. Elektriksel Şarjların Azaltılması .....	12
2.2.3. Polimer Molekül Köprüsü ile Flokülasyon .....	13
2.2.4. Polimer Flokülantların Çalışma Mekanizmaları .....	14
2.2.5. Doğal Polimer Molekül Köprüsü ile Flokülasyon .....	16
2.2.6. Sentetik Polimer Flokülantlarla Yapıları ve Flokülasyonu Etkileyen Faktörler .....	17
2.2.6.1. Polimer Dozajının Etkisi .....	17
2.2.6.2. Karıştırma ve Kesme Kuvvetlerinin Etkisi.....	17
2.2.6.3. Partikül Ebadının Etkisi .....	17
2.2.6.4. Pülp Yoğunluğunun Etkisi .....	17

2.2.6.5.	<i>Flokülantın Molekül Ağırlığının Etkisi</i> .....	17
2.2.6.6.	<i>pH'in Etkisi</i> .....	18
2.2.6.7.	<i>Sıcaklığın Etkisi</i> .....	18
2.2.6.8.	<i>Flokülantın Besleme Metodununun Etkisi</i> .....	18
2.2.7.	Gravite Çökmesi ve Tikinerler .....	19
2.3.	ELEKTROKOAGÜLASYON PROSESİ.....	21
2.3.1.	Genel Tanım.....	21
2.3.2.	Elektrokoagülasyon Reaksiyonları (Anot-Katot Reaksiyonları).....	23
2.3.3.	Elektrokoagülasyon Proseslerinde Elektrot Bağlama Tipleri .....	27
2.3.3.1.	<i>Paralel Bağlı Monopolar Elektrotlar (MP-P)</i> .....	27
2.3.3.2.	<i>Seri Bağlı Monopolar Elektrotlar (MP-S)</i> .....	27
2.3.3.3.	<i>Seri Bağlı Bipolar Elektrotlar (BP-S)</i> .....	27
2.3.4.	Elektrokoagülasyon (EC) Prosesi Akım Türleri .....	28
2.3.5.	Elektrokoagülasyonun (EC) Avantaj ve Dezavantajları .....	28
2.3.5.1.	<i>Elektrokoagülasyonun Avantajları</i> .....	29
2.3.5.2.	<i>Elektrokoagülasyonun Dezavantajları</i> .....	29
2.3.6.	Elektrokoagülasyon Prosesi ve Uygulamaları.....	30
2.4.	KÖMÜR VE LİNYİT YATAKLARI, TRAKYA BÖLGESİ KÖMÜRLERİ.....	31
2.4.1.	Dünyada Enerji Üretimi, Linyit ve Taşkömürü .....	31
2.4.2.	Türkiye’de Enerji Üretimi, Linyit ve Taşkömürü Yatakları .....	33
2.4.3.	Türkiye’deki Önemli Kömür Rezervleri .....	34
2.4.4.	Marmara ve Trakya Bölgesi Kömürleri .....	37
2.4.5.	Trakya Bölgesi Kömürleri.....	38
2.5.	ELEKTROKOAGÜLASYON PROSESİ KAPSAMINDA GERÇEKLEŞTİRİLEN ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....	39
<b>3.</b>	<b>MALZEME VE YÖNTEM .....</b>	<b>49</b>
3.1.	DENEYLERDE KULLANILAN KÖMÜR HAZIRLAMA TESİS ARTIĞI İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER .....	49
3.1.1.	Genel Bilgiler .....	49
3.1.2.	Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Deneylerde Ölçüm İçin Numune Alım Tekniği .....	50
3.1.3.	Ön Tanımlama Analizleri.....	51
3.1.3.1.	<i>Pülpte Katı Oranı Tayini</i> .....	51
3.1.3.2.	<i>Kızdırma Kaybı Analizi</i> .....	51

3.1.3.3.	<i>Isıl Değer Analizi (Kalori Analizi)</i>	52
3.1.3.4.	<i>XRD ve XRF Analizleri</i>	53
3.1.3.5.	<i>Tane Boyut Dağılımı Analizi</i>	55
3.1.3.6.	<i>Sıvı Fazda Bulunan Anyon ve Katyonların Tayini</i>	56
3.1.3.7.	<i>Zeta Potansiyeli Ölçümleri</i>	59
3.1.3.8.	<i>Serbest Çökme Performansı</i>	62
3.1.4.	Deneylerde Kullanılan Diğer Cihaz ve Kimyasallar	65
3.1.4.1.	<i>Koagülasyon ve Elektrokoagülasyon Deney Düzenekleri</i>	65
3.1.5.	Deneylerde Kullanılan Diğer Cihazlar	67
3.1.5.1.	<i>Türbidimetre</i>	67
3.1.5.2.	<i>Teraziler</i>	67
3.1.5.3.	<i>Karıştırıcılar</i>	68
3.1.5.4.	<i>Ayarlanabilir DC Kaynağı</i>	68
3.1.5.5.	<i>pH ve Sıcaklık Ölçüm İşlemleri</i>	69
3.1.5.6.	<i>Kullanılan Koagülantlar</i>	69
3.1.5.7.	<i>Kullanılan Kimyasallar</i>	69
3.2.	KİMYASAL KOAGÜLASYON DENEYLERİ	70
3.2.1.	Deneyin Amacı-Teorisi	70
3.2.2.	Deney Düzenekleri	70
3.3.	ELEKTROKOAGÜLASYON PERFORMANS DENEYLERİ	71
3.3.1.	Elektrokoagülasyon Mekanizması	71
3.3.2.	Deneylerde Kullanılan Çeşitli Bağıntılar	73
3.3.2.1.	<i>Akım Yoğunluğu Hesabı</i>	73
3.3.2.2.	<i>Akım Verimi</i>	74
3.3.2.3.	<i>Diğer Bağıntılar</i>	75
<b>4.</b>	<b>BULGULAR</b>	<b>77</b>
4.1.	KİMYASAL KOAGÜLASYON DENEYLERİ	77
4.1.1.	Demir Sülfat ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) Koagülasyon Deneyleri	77
4.1.1.1.	<i>Tanımı ve Özellikleri</i>	77
4.1.1.2.	<i>Kondisyon Zamanında Optimum Karıştırma Süresi</i>	77
4.1.1.3.	<i>Kondisyon Zamanında Optimum Karıştırma Hızı</i>	80
4.1.1.4.	<i>Optimum Reaktif Miktarı</i>	82
4.1.1.5.	<i>Optimum pH'ın Belirlenmesi</i>	85
4.1.2.	Alüminyum Sülfat ( $\text{Al}_2\text{SO}_4)_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$ ) Koagülasyon Deneyleri	88



4.1.2.1.	Tanımı ve Özellikleri .....	88
4.1.2.2.	Kondisyon Zamanında Optimum Karıştırma Süresi .....	88
4.1.2.3.	Kondisyon Zamanında Optimum Karıştırma Hızı.....	90
4.1.2.4.	Optimum Reaktif Miktarı .....	92
4.1.2.5.	Optimum pH'ın Belirlenmesi.....	94
4.1.3.	Demir Klorür ( $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ ) Koagülasyon Deneyleri .....	97
4.1.3.1.	Tanımı ve Özellikleri .....	97
4.1.3.2.	Kondisyon Zamanında Optimum Karıştırma Süresi .....	97
4.1.3.3.	Kondisyon Zamanında Optimum Karıştırma Hızı.....	100
4.1.3.4.	Optimum Reaktif Miktarı .....	102
4.1.3.5.	Optimum pH'ın Belirlenmesi.....	104
4.1.4.	Tüm Sonuçların Karşılaştırılması.....	106
4.2.	ELEKTROKOAGÜLASYON DENEYLERİ .....	108
4.2.1.	Alüminyum Elektrot İle Gerçekleştirilen Elektrokoagülasyon Deneyleri .	108
4.2.1.1.	Optimum Akım Yoğunluğunun Bulunması.....	108
4.2.1.2.	Optimum Elektrokoagülasyon Süresinin Bulunması .....	111
4.2.1.3.	Optimum pH'ın Bulunması.....	114
4.2.1.4.	Optimum Ön Kondisyon Karıştırma Hızı .....	121
4.2.1.5.	Optimum Ön Kondisyon Karıştırma Süresi.....	124
4.2.2.	Alüminyum Elektrot Kullanımında Optimum Şartlar.....	127
4.2.3.	Demir Elektrot İle Gerçekleştirilen Elektrokoagülasyon Deneyleri .....	128
4.2.3.1.	Optimum Akım Yoğunluğunun Bulunması.....	128
4.2.3.2.	Optimum Elektrokoagülasyon Süresinin Bulunması .....	131
4.2.3.3.	Optimum pH'ın Bulunması.....	134
4.2.3.4.	Optimum Ön Kondisyon Karıştırma Hızı .....	141
4.2.3.5.	Optimum Ön Kondisyon Karıştırma Süresi.....	144
4.2.4.	Demir Elektrot Kullanımında Optimum Şartlar .....	147
4.2.5.	Alüminyum ve Demir Elektrotlar ile Elde Edilen Verilerin Karşılaştırılması .....	148
4.2.6.	Amper Artışına Karşın Verim Analizi .....	149
4.2.6.1.	Optimum Elektrokoagülasyon Süresinin Bulunması .....	149
4.2.6.2.	Optimum pH'ın Bulunması.....	153
4.2.7.	Elektrokoagülasyonda Alüminyum Elektrotta Tuz etkisi .....	157
4.2.8.	Çelik Elektrot İle Gerçekleştirilen Elektrokoagülasyon Deneyleri.....	159
4.3.	MALİYET ANALİZİ.....	163

4.3.1. Kimyasal Koagülasyon Maliyet Analizi .....	163
4.3.2. Elektrokoagülasyon Maliyet Analizi.....	164
<b>5. TARTIŞMA VE SONUÇ .....</b>	<b>166</b>
5.1. ÖNERİLER .....	177
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>179</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>183</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1	: Engelli çökmede oluşan değişken konsantrasyon zonları .....	5
Şekil 2.2	: Kync sedimantasyon teorisinin grafiksel gösterimi.....	8
Şekil 2.3	: Çökme işleminin grafik olarak gösterimi .....	8
Şekil 2.4	: Sıvı faz içerisine atılan atomlar üzerinde oluşan yük hareketleri .....	9
Şekil 2.5	: Su molekülleri arasında oluşan Wan Der Wals çekim kuvvetleri .....	10
Şekil 2.6	: Mineralin yüzeyinde oluşan yükler ve Zeta potansiyeli .....	11
Şekil 2.7	: Dengede ve floküle olmuş süspansiyon.....	13
Şekil 2.8	: Flokülanların süspansiyon içerisinde taneleri bağlaması .....	15
Şekil 2.9	: Flokülanın tane yüzeyine yapışarak floküle etmesi.....	15
Şekil 2.10	: Bir cevher zenginleştirme tesisinde tikiner tankları .....	20
Şekil 2.11	: Elektrokoagülasyon prosesinde meydana gelen olaylar .....	22
Şekil 2.12	: Elektrokoagülasyon proseslerinde elektrot bağlama şekilleri .....	28
Şekil 2.13	: Ülkelere göre dünya kömür yatakları dağılımı.....	32
Şekil 2.14	: Enerji kaynaklarına göre dünya rezerv oranları .....	32
Şekil 2.15	: Dünya elektrik üretimi hammadde dağılımı .....	33
Şekil 2.16	: Türkiye elektrik üretiminde hammadde dağılımı .....	34
Şekil 2.17	: Türkiye’de bulunan linyit yataklarının ısıl değerleri (kcal/kg).....	36
Şekil 3.1	: Lavvar tesisi tikiner .....	50
Şekil 3.2	: Numunelerin alındığı tikiner besleme boğazı.....	50
Şekil 3.3	: Kızdırma kaybı deneyinde kullanılan metalürjik fırın .....	52
Şekil 3.4	: Isıl değer analizi deneylerinin gerçekleştirildiği kalorimetre cihazı.....	53
Şekil 3.5	: XRD ve XRF analizlerinin gerçekleştirildiği cihazlar.....	53
Şekil 3.6	: Kömür hazırlama tesis atığı XRD analizi sonuçları .....	54
Şekil 3.7	: Kömür hazırlama tesis atığı tane boyut dağılım analiz grafiği.....	56
Şekil 3.8	: Değişik ortamlarda zeta potansiyeli ölçüm sonuçları.....	61
Şekil 3.9	: Zeta potansiyeli ölçümlerinde kullanılan zeta metre cihazı .....	62
Şekil 3.10	: Zamana göre serbest çökme eğrisi.....	63
Şekil 3.11	: Mezurda gerçekleştirilen çökme arayüzey yükseklikleri ile bulanıklılık değerlerinin karşılaştırılması .....	63
Şekil 3.12	: Serbest çökmede zamana bağlı zon değişimi .....	66
Şekil 3.13	: Kimyasal koagülasyon deney düzeneği.....	66
Şekil 3.14	: Elektrokoagülasyon deney düzeneği .....	67
Şekil 3.15	: Deneylerde kullanılan Thermo marka Türbitemetre .....	67
Şekil 3.16	: Deneylerde numune hazırlamada kullanılan hassa teraziler.....	68
Şekil 3.17	: Deneylerde kullanılan Topo marka ayarlanabilir karıştırıcı .....	68
Şekil 3.18	: Deneylerde kullanılan ayarlanabilir doğrusal akım kaynağı .....	69
Şekil 3.19	: Elektrokoagülasyon meydana gelirken hücre içerisindeki olaylar .....	73
Şekil 4.1	: 2 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği .....	79
Şekil 4.2	: 5 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği .....	79
Şekil 4.3	: 2 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği .....	81
Şekil 4.4	: 5 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği .....	82
Şekil 4.5	: 2 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği .....	84
Şekil 4.6	: 5 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği .....	84
Şekil 4.7	: 2 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği .....	87

<b>Şekil 4.8</b>	: 5 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği .....	87
<b>Şekil 4.9</b>	: 2 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği .....	89
<b>Şekil 4.10</b>	: 5 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği .....	90
<b>Şekil 4.11</b>	: 2 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği .....	91
<b>Şekil 4.12</b>	: 5 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği .....	92
<b>Şekil 4.13</b>	: 2 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği .....	93
<b>Şekil 4.14</b>	: 5 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği .....	94
<b>Şekil 4.15</b>	: 2 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği .....	96
<b>Şekil 4.16</b>	: 5 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği .....	96
<b>Şekil 4.17</b>	: 2 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği .....	99
<b>Şekil 4.18</b>	: 5 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği .....	99
<b>Şekil 4.19</b>	: 2 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği .....	101
<b>Şekil 4.20</b>	: 5 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği .....	101
<b>Şekil 4.21</b>	: 5 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği .....	103
<b>Şekil 4.22</b>	: 5 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği .....	103
<b>Şekil 4.23</b>	: 2 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği .....	105
<b>Şekil 4.24</b>	: 5 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği .....	106
<b>Şekil 4.25</b>	: Üç farklı koagülantın optimum değerlerinin çökme grafiği .....	107
<b>Şekil 4.26</b>	: Alüminyum elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik akım yoğunluklarında çökme grafiği .....	110
<b>Şekil 4.27</b>	: Alüminyum elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik akım yoğunluklarında çökme-verim grafiği .....	110
<b>Şekil 4.28</b>	: Alüminyum elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik şarj sürelerinde çökme grafiği .....	113
<b>Şekil 4.29</b>	: Alüminyum elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik şarj sürelerinde çökme-verim grafiği .....	113
<b>Şekil 4.30</b>	: Alüminyum elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik başlangıç pH'larında çökme grafiği .....	116
<b>Şekil 4.31</b>	: Alüminyum elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik başlangıç pH'larında çökme-verim grafiği .....	116
<b>Şekil 4.32</b>	: Alüminyumun değişik konsantrasyonlarda ve pH'larda oluşturduğu hidroksit tipleri .....	119
<b>Şekil 4.33</b>	: Alüminyum elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik karıştırma hızlarında çökme grafiği .....	123
<b>Şekil 4.34</b>	: Alüminyum elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik karıştırma hızlarında çökme-verim grafiği .....	123
<b>Şekil 4.35</b>	: Alüminyum elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik karıştırma sürelerinde çökme grafiği .....	126
<b>Şekil 4.36</b>	: Alüminyum elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik karıştırma sürelerinde çökme-verim grafiği .....	126
<b>Şekil 4.37</b>	: Demir elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik akım yoğunluklarında çökme grafiği .....	130
<b>Şekil 4.38</b>	: Demir elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik akım yoğunluklarında çökme-verim grafiği .....	130
<b>Şekil 4.39</b>	: Demir elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik elektrokoagülasyon sürelerinde çökme grafiği .....	133
<b>Şekil 4.40</b>	: Demir elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik elektrokoagülasyon sürelerinde çökme-verim grafiği .....	133
<b>Şekil 4.41</b>	: Demir elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik başlangıç pH'ında çökme grafiği .....	136
<b>Şekil 4.42</b>	: Demir elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik başlangıç pH'ında çökme-verim grafiği .....	136
<b>Şekil 4.43</b>	: Değişik pH ve iyon konsantrasyonlarında oluşan demir hidroksit türleri .....	138

<b>Şekil 4.44</b> : Demir elektrot kullanılarak gerçekleştirilen optimum ön kondisyon karıştırma hızı deneyi çökme grafiği .....	143
<b>Şekil 4.45</b> : Demir elektrot kullanılarak gerçekleştirilen optimum ön kondisyon karıştırma hızı çökme-verim grafiği .....	143
<b>Şekil 4.46</b> : Demir elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik karıştırma sürelerinde çökme grafiği.....	146
<b>Şekil 4.47</b> : Demir elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik karıştırma sürelerinde çökme-verim grafiği .....	146
<b>Şekil 4.48</b> : 4 amper-107,2 A/m <sup>2</sup> altında gerçekleştirilen değişik elektrokoagülasyon sürelerinde çökme grafiği .....	151
<b>Şekil 4.49</b> : 4 amper-107,2 A/m <sup>2</sup> altında gerçekleştirilen değişik elektrokoagülasyon sürelerinde çökme-verim grafiği .....	151
<b>Şekil 4.50</b> : 3 Amper-Amper/m <sup>2</sup> ile 4 amper-107,2 A/m <sup>2</sup> akım yoğunluklarında değişik elektrokoagülasyon sürelerinde elde edilen türbitide değerleri .....	152
<b>Şekil 4.51</b> : 3 Amper-Amper/m <sup>2</sup> ile 4 amper-107,2 A/m <sup>2</sup> akım yoğunluklarında elektrokoagülasyon maliyetleri karşılaştırması .....	152
<b>Şekil 4.52</b> : 4 Amper-107,2 A/m <sup>2</sup> altında gerçekleştirilen değişik başlangıç pH değerlerinde çökme-verim grafiği .....	155
<b>Şekil 4.53</b> : 4 Amper-107,2 A/m <sup>2</sup> altında gerçekleştirilen değişik başlangıç pH değerlerinde çökme-verim grafiği.....	155
<b>Şekil 4.54</b> : 3 Amper-Amper/m <sup>2</sup> ile 4 amper-107,2 A/m <sup>2</sup> akım yoğunluklarında değişik başlangıç pH değerlerinde elde edilen türbitide değerleri .....	156
<b>Şekil 4.55</b> : Değişik NaCl iyon konsantrasyonlarında gerçekleştirilen elektrokoagülasyon deney türbitide grafiği .....	159
<b>Şekil 4.56</b> : Çelik elektrotlar kullanılarak değişik amper ve elektrokoagülasyon sürelerinde elde edilen türbitide grafiği .....	162
<b>Şekil 4.57</b> : Tüm susuzlandırma yöntemlerinin maliyet karşılaştırması.....	164

## TABLO LİSTESİ

Sayfa No

<b>Tablo 2.1</b>	: Türkiye'deki önemli taş kömürü yatakları.....	34
<b>Tablo 2.2</b>	: Türkiye'nin bölgesel olarak mevcut linyit rezervleri ve potansiyel sahaları .....	35
<b>Tablo 2.3</b>	: Türkiye'de sahalara göre rezerv miktarları .....	36
<b>Tablo 3.1</b>	: XRF sonuçların göre kömür hazırlama tesis atığının ihtiva ettiği bileşikler.....	54
<b>Tablo 3.2</b>	: Kömür hazırlama tesisinde ve deneylerde kullanılan suyun anyon ve katyon analizi.....	57
<b>Tablo 3.3</b>	: Değişik ortamlarda kömür hazırlama tesis atığının zeta potansiyeli değerleri .....	60
<b>Tablo 3.4</b>	: Zamana göre serbest çökme türbitide değerleri .....	63
<b>Tablo 3.5</b>	: Kimyasal koagülasyon deneylerinde kullanılan koagülantlar ve özellikleri.....	69
<b>Tablo 3.6</b>	: Alüminyum elektrotta temel anot ve katot reaksiyonları .....	71
<b>Tablo 3.7</b>	: Demir elektrotta temel anot ve katot reaksiyonları .....	73
<b>Tablo 4.1</b>	: $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ kullanılarak gerçekleştirilen optimum kondisyon süresi deney sonuçları .....	78
<b>Tablo 4.2</b>	: $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ kullanılarak gerçekleştirilen optimum karıştırma hızı deney sonuçları .....	82
<b>Tablo 4.3</b>	: $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ kullanılarak gerçekleştirilen optimum reaktif miktarı deney sonuçları .....	83
<b>Tablo 4.4</b>	: Değişik pH'larda gerçekleştirilen deney sonuçları .....	86
<b>Tablo 4.5</b>	: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$ kullanılarak gerçekleştirilen optimum kondisyon süresi deney sonuçları .....	89
<b>Tablo 4.6</b>	: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$ kullanılarak gerçekleştirilen optimum karıştırma hızı deney sonuçları .....	91
<b>Tablo 4.7</b>	: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$ kullanılarak gerçekleştirilen optimum reaktif miktarı deney sonuçları .....	93
<b>Tablo 4.8</b>	: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$ kullanılarak gerçekleştirilen optimum pH deney sonuçları .....	95
<b>Tablo 4.9</b>	: $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ kullanılarak gerçekleştirilen optimum karıştırma süresi deney sonuçları .....	98
<b>Tablo 4.10</b>	: $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ kullanılarak gerçekleştirilen optimum karıştırma hızı deney sonuçları .....	100
<b>Tablo 4.11</b>	: $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ kullanılarak gerçekleştirilen optimum reaktif miktarı deney sonuçları .....	102
<b>Tablo 4.12</b>	: $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ kullanılarak gerçekleştirilen optimum pH deney sonuçları .....	105
<b>Tablo 4.13</b>	: 3 farklı koagülantın optimum verilerinin çökme performansları .....	107
<b>Tablo 4.14</b>	: Alüminyum elektrot kullanılarak gerçekleştirilen optimum akım yoğunluğu deney sonuçları .....	109
<b>Tablo 4.15</b>	: Alüminyum elektrot kullanılarak gerçekleştirilen optimum şarj süresi deney sonuçları .....	112
<b>Tablo 4.16</b>	: Alüminyum elektrot kullanılarak gerçekleştirilen optimum başlangıç pH deney sonuçları .....	115
<b>Tablo 4.17</b>	: Başlangıç pH ayarlaması sırasında sisteme dışarıdan şarj edilen $\text{H}^+$ ve $\text{OH}^-$ iyon mol miktarları .....	117

<b>Tablo 4.18</b> : Değişik pH değerlerinde elektrokoagülasyon verimi ve deney sonu pH değerleri.....	120
<b>Tablo 4.19</b> : Alüminyum elektrot kullanılarak gerçekleştirilen optimum karıştırma hızı deney sonuçları.....	122
<b>Tablo 4.20</b> : Alüminyum elektrot kullanılarak gerçekleştirilen optimum karıştırma süresi deney sonuçları.....	125
<b>Tablo 4.21</b> : Alüminyum Elektrotta optimum şartlar .....	127
<b>Tablo 4.22</b> : Demir elektrot kullanılarak gerçekleştirilen optimum akım yoğunluğu deney sonuçları .....	129
<b>Tablo 4.23</b> : Demir elektrot kullanılarak gerçekleştirilen optimum elektrokoagülasyon süresi deney sonuçları.....	132
<b>Tablo 4.24</b> : Demir elektrot kullanılarak gerçekleştirilen optimum başlangıç pH'ı deney sonuçları .....	135
<b>Tablo 4.25</b> : Başlangıç pH ayarlaması sırasında dışarıdan şarj edilen H <sup>+</sup> ve OH <sup>-</sup> iyon mol miktarları .....	137
<b>Tablo 4.26</b> : Değişik pH değerlerinde elektrokoagülasyon verimi ve deney sonu pH değerleri .....	140
<b>Tablo 4.27</b> : Demir elektrot kullanılarak gerçekleştirilen optimum ön kondisyon karıştırma hızı deney sonuçları .....	142
<b>Tablo 4.28</b> : Demir elektrot kullanılarak gerçekleştirilen optimum karıştırma süresi deney sonuçları .....	145
<b>Tablo 4.29</b> : Demir elektrot kullanımında optimum şartlar .....	147
<b>Tablo 4.30</b> : Alüminyum ve Demir elektrotlar kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde elde edilen en optimum şartlar.....	148
<b>Tablo 4.31</b> : 4 amper-107,2 A/m <sup>2</sup> altında optimum elektrokoagülasyon süresinin bulunması deney sonuçları .....	150
<b>Tablo 4.32</b> : 4 amper-107,2 A/m <sup>2</sup> altında gerçekleştirilen değişik başlangıç pH değerlerinde gerçekleştirilen deney sonuçları.....	154
<b>Tablo 4.33</b> : Değişik NaCl iyon konsantrasyonlarında gerçekleştirilen elektrokoagülasyon deney sonuçları .....	158
<b>Tablo 4.34</b> : Çelik elektrotlar kullanılarak değişik amper ve elektrokoagülasyon sürelerinde gerçekleştirilen deney sonuçları.....	161
<b>Tablo 4.35</b> : Değişik koagülantların kullanıldığı proseste tüketim miktarları .....	163
<b>Tablo 4.36</b> : Değişik koagülantların kullanıldığı proseste maliyetler .....	163
<b>Tablo 4.37</b> : Alüminyum ve demir elektrotların kullanıldığı proseste maliyetler .....	164

## SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
<b>A</b>	: Toplam Etkin Anot Elektrot Alanı
<b>Al</b>	: Alüminyum
<b>C<sub>0</sub></b>	: İlk Konsantrasyon
<b>F</b>	: Faraday sabiti 96485 C/mol
<b>Fe</b>	: Demir
<b>H<sub>0</sub></b>	: Ayrışma Zonu Yüksekliği
<b>I</b>	: Akım şiddeti
<b>J</b>	: Akım yoğunluğu
<b>M<sub>n</sub></b>	: Metal (katı)
<b>pH</b>	: Çözeltideki hidrojen iyonu konsantrasyonu
<b>T</b>	: Sıcaklık
<b>t</b>	: Zaman
<b>Tg</b>	: Tanjant

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
<b>AC</b>	: Alternatif Akım
<b>BP-S</b>	: Bipolar Bağlı
<b>DC</b>	: Doğrusal Akım
<b>EC</b>	: Elektrokoagülasyon
<b>MP-P</b>	: Monopolar Paralel Bağlı
<b>MP-S</b>	: Monopolar Seri Bağlı
<b>NTU</b>	: Türbidite
<b>PKO</b>	: Pülpte Katı Oranı



## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

## CEVHER HAZIRLAMADA ELEKTROKOAGÜLASYON PROSESİNİN UYGULANABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Mehmet Furkan ÖZKAN

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Yard. Doç Dr. M. Faruk ESKİBALCI

Gelişen teknoloji ve sanayi üretimi ile üretim proseslerinde ortaya çıkan sıvı atıklar gün geçtikçe toplum sağlığını ve doğal yaşamı daha fazla tehdit etmektedir. Özellikle son yüzyılda gelişen susuzlandırma teknolojileri ile en uygun ve ekonomik yöntemlerin belirlenmesi çalışmaları büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmalar arasında çeşitli kimyasalların kullanımının yanında elektrik kullanılarak gerçekleştirilen susuzlandırma faaliyetleri giderek öne çıkmaktadır. Bu çalışmada elektrokoagülasyon yöntemi kullanılarak kömür hazırlama tesis artığı numunesi üzerinde kısa süre içerisinde daha düşük maliyetler ile arıtılabilirliği araştırılmıştır.

Proje kapsamında, öncelikle alüminyum sülfat ( $Al_2(SO_4)_3$ ), Demir Sülfat ( $FeSO_4$ ) ve Demir Klorür ( $FeCl_3$ ) koagülantları ile alüminyum (Al) ve demir (Fe) elektrotların kullanıldığı elektrokoagülasyon prosesi kullanılarak kömür hazırlama tesis atıklarında bulanıklık giderim verimleri araştırılmıştır. Bu kirleticilerin giderilmesi için Fe ve Al elektrotlarının monopolar olarak bağlandığı bir EC reaktörü kullanılmıştır. Bulanıklılık giderimi üzerine akım yoğunluğu, pH ve işletim zamanı gibi optimizasyon parametreleri belirlenerek, elektrot materyali, enerji ihtiyacı ve işletme maliyeti gibi proses işletim parametreleri hesaplanmıştır.

Gerçekleştirilen deneyler sonucunda kimyasal koagülasyon deneylerinde %94 koagülasyon verimi ile, 0,1 Molar, 150 devir/dk karıştırma hızı, 2,5 dk kondisyon süresi, başlangıç pH'ı 9 ve 675 gr/ton şarj miktarı ile Demir Klorür'ün ( $FeCl_3$ ) en optimum koagülant olduğu, bununla beraber elektrokoagülasyon prosesinde 40 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğunda, 360 devir/dk karıştırma hızında, 120 sn ön kondisyon ve 300 sn

durgun elektrokoagülasyon olacak şekilde toplam 420 sn proses süresi, başlangıç pH'ı doğal pH ve %95 koagülasyon veriminin elde edildiği tespit edilmiştir. Maliyet açısından 21,86 TL/ton artık olan Demir Klorür ( $FeCl_3$ )'e karşın Alüminyum elektrotun kullanıldığı elektrokoagülasyon prosesi maliyeti 17 TL/ton artık olarak bulunmuştur. Bununla beraber proste 1,76 kg/ton NaCl kullanıldığı durumda maliyet 9,56 TL/ton artığa kadar düşmüştür.

Sonuçlar, kimyasal koagülasyona karşın elektrokoagülasyon prosessinin de, bulanıklık giderimin de etkin bir proses olduğunu, ve kimyasal koagülasyona kıyasla daha ekonomik olduğunu göstermiştir.

Ocak 2014, 183 Sayfa

**Anahtar Kelimeler:** Kömür Hazırlama Tesis Artığı, Elektrokoagülasyon, Kimyasal Koagülasyon, Alüminyum Elektrot, Demir Elektrot, İşletme Maliyeti, Bulanıklık.

## **SUMMARY**

**M. Sc. THESIS**

### **INVESTIGATION OF APPLICABILITY OF ELECTROCOAGULATION PROCESS IN MINERAL PROCESSING**

**Mehmet Furkan ÖZKAN**

**İstanbul University**

**Graduate School of Science and Engineering**

**Department of Mining Engineering**

**Supervisor : Assoc. Prof. Dr. M. Faruk ESKİBALCI**

By developing technology and production processes, industrial production occurs more and more waste water every day and threaten public health and wildlife. Especially dewatering technologies that developed in the last century are very important for determining the most appropriate and economical methods. These studies are performed for using a variety of dewatering activities. In this study, by using the method of electrocoagulation on a sample of coal preparation plant waste waters was investigated for treatability and a short processing time with lower costs.

Scope of the project, primarily aluminum sulfate ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), Ferrous Sulphate ( $\text{FeSO}_4$ ) and ferric chloride ( $\text{FeCl}_3$ ) coagulants and aluminum (Al) and iron (Fe) electrodes used for some coagulation and electrocoagulation process tests for investigate efficiency removal turbidity in coal preparation plant waste waters. To eliminate these pollutants an Electrocoagulation reactor is used with Fe and Al electrodes which are connected monopolar type. For investigating the performance of removal of turbidity, current density, beginning pH and operating time parameters tested and calculated electrode material costs, process operating parameters, energy consumption and operating costs.

As a result of experiments carried out, by the chemical coagulation tests 94% coagulation efficiency obtained by 0.1 molar, 150 rpm stirring speed, endurance time of 2.5 min, initial pH 9 and the amount of 675 gr/ton iron chloride ( $\text{FeCl}_3$ ) charge is the optimum coagulant, however electrocoagulation process tests results showed that with 95% coagulation efficiency obtained by current density of  $40 \text{ A/m}^2$ , 360 rpm stirring

rate, 420 sec total process time and initial pH natural pH conditions are optimum application conditions. In terms of cost by using chemical coagulation iron chloride ( $\text{FeCl}_3$ ) costs calculated 21,86 TL/ton waste but other hand electrocoagulation process by using aluminum electrodes costs calculated only 17 TL/ton waste. At the same time, in the process if 1,76 kg/ton NaCl used, costs of operations will be decreased 9,56 TL/ton waste.

Test results shows that, the electrocoagulation processing in the turbidity removal performance is more performance and more economical than chemical coagulation.

January 2014, 183 Pages

**Key words:** Coal Preparation Plant Waste Waters, Electrocoagulation, Chemical Coagulation, Aluminum Electrode, Iron Electrode, Operating Cost, Turbidity.

## 1. GİRİŞ

Son yüzyılda insanlığı tehdit eder hale gelen kuraklık tehlikesine karşın son yıllarda özellikle atık su arıtım teknikleri üzerinde önemli çalışmalar yapılmıştır. Üretim prosesi süresince büyük hacimlerde suya ihtiyaç duyan madencilik sektöründe de susuzlandırma ile ilgili birçok yöntem denenmiştir. Özellikle cevher hazırlama faaliyetleri sonucu; zenginleştirme işleminin yanında elde edilen ürüne oranla azımsanmayacak miktarlarda atık veya artık olarak nitelendirilen ve mevcut teknolojik imkanlar ile ekonomik olarak kazanılması zor yan ürünler de ortaya çıkmaktadır. Yıllık üretimde milyonlarca tona kadar ortaya çıkabilen bu atıkların çevresel ve kanuni zorunlulukların yerine getirilmesi noktasında depolanmaları ve çevreye uyumlu hale getirilmeleri oldukça problemlidir. Atıklar ayrıca içerdikleri atıl durumdaki mineraller açısından da büyük öneme sahiptirler.

Ülkemizde önemli bir madencilik sektörü olan kömür sektöründe de en önemli çıktılardan birisi olan lavvar tesisi atıkları genel olarak basit ve yetersiz filtrasyon işlemlerinden geçirilerek doğaya salınmakta ve hem çevreyi hem de toplum sağlığını tehdit etmektedir.

Birçok sektörde kullanıldığı gibi madencilikte de geniş kullanım alanı olan susuzlandırma teknolojilerinden flokülasyon ve koagülasyon prosesleri zaman zaman yetersiz kalmakta ve özellikle ithal malzemelerin kullanımı ile milli ekonomiyi de etkilemektedir. Ayrıca atıklar yapısında kalan koagülant ve flokülantların depolanma sırasında ve sonrasında sızıntı ile doğaya karışması halinde meydana gelebilecek tehlikelerde bilinmemektedir.

Geleneksel çöktürme sistemlerine karşılık son yıllarda üzerinde çalışılan Elektrokoagülasyon prosesi elektrik akımı kullanarak atık sularda safsızlıkların hızla çöktürülmesini sağlamak, böylece hem su tasarrufu sağlanmakta hem de safsızlıkların uzaklaştırılarak çevrenin korunması sağlanmaktadır.

Genellikle tekstil ve ev atık sularında denenmiş olan ve madencilikte yeni yeni denenmeye başlanan bu yöntem kullanılarak bu proje kapsamında Malkara-Tekirdağ'da faaliyet gösteren bir maden işletmesinden alınmış olan kömür hazırlama tesis atık numuneleri, kurutma-susuzlandırma işlemine tabii tutularak öncelikle petrografik, mineralojik ve kimyasal analizleri yapılmıştır. Fiziksel ve kimyasal yapısı belirlenen numuneler üzerinde kimyasal ve elektrokoagülasyon performans denemeleri yapılarak madencilik sektöründe ortaya çıkan atıklarda bu yöntemin kullanılabilirliği belirlenmeye çalışılmıştır. Alüminyum ve demir içerikli koagülantlar ile değişik şartlarda deneyler gerçekleştirilerek, söz konusu numunelere uygun optimum koagülant tipi bulunduktan sonra alüminyum ve demir elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyon proses denemeleri gerçekleştirilmiştir. Değişik şartları kapsayan bir dizi deney sonrasında elde edilen veriler ile kimyasal ve elektro koagülasyon sonuçları verim, maliyet, işletilebilirlik gibi açılardan ele alınarak sistemin uygunluğu sorgulanmıştır.

Çalışmalar kapsamında elde edilen veriler sonucunda madencilik alanında da bu elektrokoagülasyon yönteminin kullanılabilirliğinin irdelenmesi ve sektörümüze daha az maliyetli olan bu yöntemin tanıtılması amaçlanmaktadır.

## 2. GENEL KISIMLAR

### 2.1. SUSUZLANDIRMA-FLOKÜLASYON

#### 2.1.1. Susuzlandırmanın Tanımı

Çeşitli sulu ortamlarda, endüstriyel işlemler sonucunda elde edilen ürün, ara ürün ya da atıkta bulunan ve istenmeyen sıvı fazın katı fazdan uzaklaştırılmasının genel adına susuzlandırma denilmektedir. Özellikle atıkta yüksek hacimde bulunan sıvı fazın –ki bu genellikle sudur - hem çevrenin korunması hem de üretim maliyetlerinin düşürülmesi amacı ile susuzlandırmanın önemi bir kat daha artmaktadır. Susuzlandırma prosesi 3 temel yolla gerçekleştirilebilir:

1. **Çökeltme Kıvamlaştırma:** En ucuz fakat en uzun süre alan işlem olan çökeltme işlemi genel olarak bir tank içerisinde zamana bağlı olarak safsızlıkların çökmesi ile gerçekleşir.
2. **Filtrasyon:** Katı-sıvı fazın genel anlamda çok ince bir elekten ya da bezden geçirilerek faz ayrımına dayalı olan yöntemdir.
3. **Termik Kurutma:** Sıvı fazın uzaklaştırılması için ısıtma yapılarak buharlaştırma yolu ile ayırım gerçekleştirilmektedir. En pahalı yöntemdir.

#### 2.1.2. Çökeltme

Bir süspansiyon içerisinde bulunan katı partiküllerin, yer çekimi etkisi ile bulunduğu kabın taban kısmında birikmesine **çökeltme** adı verilir. Genel anlamda tüm katı-sıvı fazları durağan hale geçince hemen çökmeye başlarlar. Zamanla pülpün yapısına göre sıvı faz çeşitli zonlara ayrılarak katı-sıvı ayırımı gerçekleşmiş olur. Çökeltme hiçbir zaman durmaz sadece hızı yavaşlayarak azalır (İpekoğlu, 1997).

Fizik kanunlarına göre bir cisim yerçekimi etkisi ile hareket ediyorsa sabit bir ivme ile hareket eder. Hızı, hacmi ya da yoğunluktan bağımsızdır. Ancak doğada bu tip bir hareket yoktur. Sıvı faz içinde bulunan katı parçacık, şekline ve viskoziteye bağlı olarak

sıvı fazdan bir direnç görür. Bu direnç kuvveti sonucunda her tanecik farklı ivmelenmelerle çökmeye başlar ve kısa zamanda hızı sabitlenerek ivmesi sıfıra iner. Bu nokta yerçekimi kuvvetinin, direnç kuvvetine eşit olduğu değerdir ve bu hıza **terminal hız** adı verilir. Ancak belirtilen sürtünmesiz ortam kuralları doğada geçerli olamayacağından taneler şekline, yoğunluğuna, yapısına vs gibi etkilerle farklı sürelerde çökülürler. Bir başka deyişle hafif tanelerin çökmesi zaman alırken iri taneler hızla çökelimlerini gerçekleştirirler. İşte bu sebeple normal şartlarda bulunan bir pülp çeşitli zonlara ayrılarak çökelimini gerçekleştirir. Bu çökemeye **engelli çökme** adı verilmektedir (İpekoğlu 1997).

Çökme durumunda partikülün yapısı da terminal hızı etkiler. Bunun için partiküller küresel ve küresel olmayan diye iki gruba ayrılmışlardır. Küresel cisimlerde 1851 yılında Stokes teorik olarak şu tanımlamayı yapmıştır:

*“Sonsuz bir ortamda hareket eden küresel bir cisme etki eden direnç kuvveti  $R=3\pi\mu d u$  olarak açıklanır”*. Burada R direnç,  $\mu$  akışkanın viskozitesi, d cismin çapı, u ise cismin relatif hızıdır. Stokes’in bu kabulü ancak 50 mikrondan küçük taneler için geçerliliğini korur (İpekoğlu, 1997).

Küresel olmayan cisimler içinse durum daha farklıdır. Çünkü küresel bir partikülde, cisim her yönden gelebilecek kuvvetlere aynı tepkiyi verir. Ancak küresel olmayan bir cisimde farklı tepkiler alınmaktadır. Bunun için partikülün çökülürken alacağı şekil son derece önemlidir (İpekoğlu, 1997).

Küresel olmayan cisimler için çökme hızları Heywood tarafından geliştirilmiş bir yöntem bulunmaktadır. Buna göre ortalama çap  $d_0$  ise akışa gösterilen alan  $\pi d_0^2/4$  ve partiküllerin  $k d_0^3$  olacaktır. k cismin şekline göre değişiklik gösterir. Sonuç olarak toplam direnç kuvveti:

$$\mathbf{R=kd_0^3(\rho k-\rho)g} \quad (2.1)$$

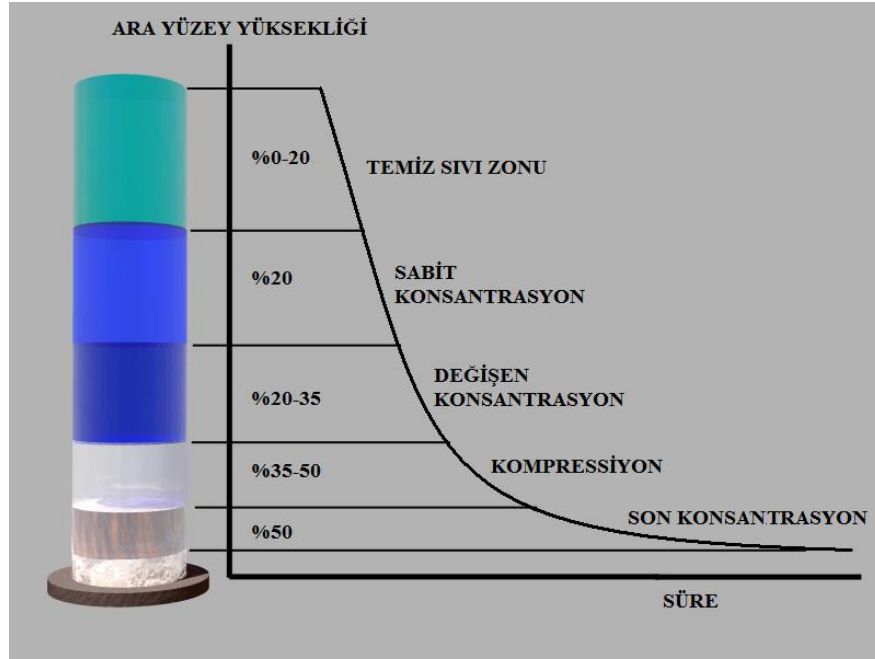
olarak belirlenir.



k burada küresel partiküller için  $\pi/6$ , yuvarlatılmış cisimler için 0,5, köşeli partiküller için 0,4 ve pek çok mineral içinde 0,2 ile 0,5 arasındadır (İpekoğlu, 1997).

### 2.1.3. Engelli Çökme

Şimdiye kadar çökme ortamları hakkında partiküllerin serbestçe çökme halleri incelendi. Ancak yüksek konsantrasyonlarda pek çok sayıda partikül bir arada çöklerken şartlar değişmektedir. Özellikle çökelen partiküllerle yer değiştiren sıvının yukarı doğru olan hızı çökme şartlarını etkilemektedir. Bu tür çökelmeler *Engelli Çökme* denilmektedir ve genellikle endüstrideki uygulamalarda bu tip çökme göz önüne alınarak tikiner ve klasifikatörler dizayn edilir. Şekil 2.1'de serbest çökme zonları gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Engelli çökmede oluşan değişken konsantrasyon zonları.

İnce tanelerden oluşan süspansiyonların çökmesi iki şekilde gerçekleşir:

İlk olarak çok kısa bir akselerasyon periodundan sonra temiz sıvı ile süspansiyon arasındaki ara yüzey aşağıya doğru sabit bir hızla hareket eder. Bu hız başlangıçta katı konsantrasyonun bir fonksiyonudur. Çökme devam ettikçe kabın ya da tankın tabanında bir sediment oluşur. Çökme hızı yükselen katı konsantrasyonu nedeniyle

azalmaya başladığında bir **Geçiş Zonu** veya **Değişen Konsantrasyon Zonu** meydana gelir. Yükselen tortu tabakası ara yüzey ile yaklaştıkça çökme hızı azalır ve bu hal temiz sıvı ile tortu arasında direkt bir hat oluşuncaya kadar sürer. Bu andan itibaren ise **Kompresiyon Zonu** oluşur. Çökelmenin bundan sonraki kısmı tortunun sıkıştırılması şeklinde olur (İpekoğlu, 1997).

İkinci tip çökme ise süspansiyon içindeki partiküllerin tane boyutları birbirinden çok farklı olduğunda meydana gelir. Bu halde sedimantasyon hızı çökme işlemi sırasında devamlı olarak azalmaktadır. Sabit konsantrasyon zonu oluşmamakta ve değişen konsantrasyon zonu ara yüzey kompresyon zonuna kadar devam etmektedir. Bir süspansiyonun çökme hızının tek bir partikülün çökme hızından farklı olmasının ana nedeni şu şekilde sıralanabilir:

1. Süspansiyon içindeki iri taneler daha hızlı çökerken ince tanelerin arasından geçerek akışkanın katı faza etkilediği vizkosite kuvvetlerini değiştirerek çökelmenin kaderini etkileyecektir.
2. Çöken katı malzeme aşağıya doğru giderken sıvı kısım yukarıya doğru hareket edecek ve konsantrasyonu fazla olan bir süspansiyon, iki fazın yer değiştirme hızı daha fazla olacak buda dolayısıyla süspansiyonun sıvıya göre olan izafi çökme hızı azaltacaktır.
3. Partiküller civarındaki sıvı içindeki hız dağılımı artmaktadır.
4. İnce taneler, iri tanelerin hızlı hareketi sebebi ile aşağıya doğru sürüklenecekler ve böylece ivmeleri artacaktır.
5. Katı konsantrasyonu fazla olan bir süspansiyon içinde taneler birbirine daha yakın olduklarından flokülasyon etkisi daha da artmaktadır ve küçük tanelerin etkin boyları büyümetedir.

Eğer bir süspansiyon içindeki partiküllerin tane dağılımı 6:1 oranından daha büyük değilse, böyle bir süspansiyon keskin bir ara yüzey ile çökler ve bütün tanelerin eşit hızda çökebileceği söylenebilir. Genel olarak serbest çökme şartlarında iri taneler daha hızlı çöklerler. Engelli çökmede ise iri tanelerin çökmesi yavaşlarken, ince tanelerin çökme hızı artmaktadır. Yani engelli çökmede tane boyutunun etkisi azalırken, tane yoğunluğunun etkisi artmaktadır.

#### 2.1.4. Kync Sedimentasyon Teorisi

Katı konsantrasyonun, süspansiyonunun her noktasında sabit kaldığı var sayılarak, bir süspansiyonun çökme hızı buraya kadar verilen formüller yardımı ile hesaplanabilir. Gerçekte ise çökme esnasında katı konsantrasyonun her tabakada artmakta ve buna bağlı olarak hız değişmektedir. Kync bir teori ortaya atarak “*Süspansiyon içindeki herhangi bir partikülün çökme hızı sadece o partikül etrafındaki lokal katı konsantrasyonuna bağlıdır*” görüşünü savunmuştur (İpekoğlu, 1997).

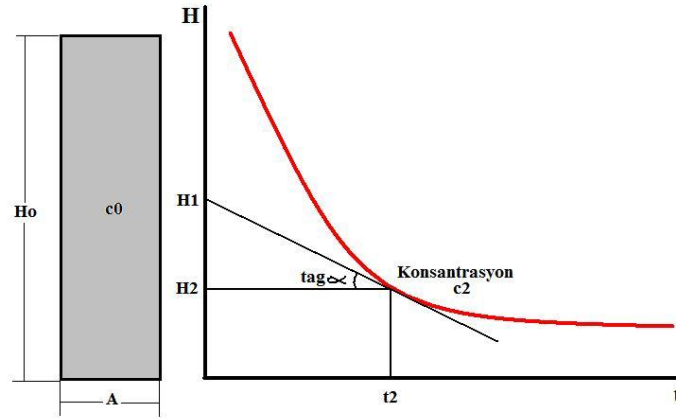
Böylece belirli bir üniform konsantrasyon ile başlayan bir çökmede bütün katılar,  $v=f(c)$  üniform hızı ile çökmeye başlayacak ve zamanla tüp içindeki başlangıçtan son çökelek konsantrasyonuna kadar bütün konsantrasyonlardan geçeceklerdir. Arada bulunan her hangi bir konsantrasyon zonun da katı partiküller girdikleri kadar kolaylıkla çökelemiyorsa burada yeni bir zon oluşmaya başlar. Kync bu şekilde oluşan herhangi bir sabit konsantrasyon zonunun yukarı doğru olan yayılma hızının da sabit olduğunu iddia etmiştir (İpekoğlu, 1997).

Kync yaptığı teorik çalışmalar sonucunda uygulama hız ve konsantrasyon arasındaki bağıntıyı bulmak için şöyle bir metot geliştirmiştir.

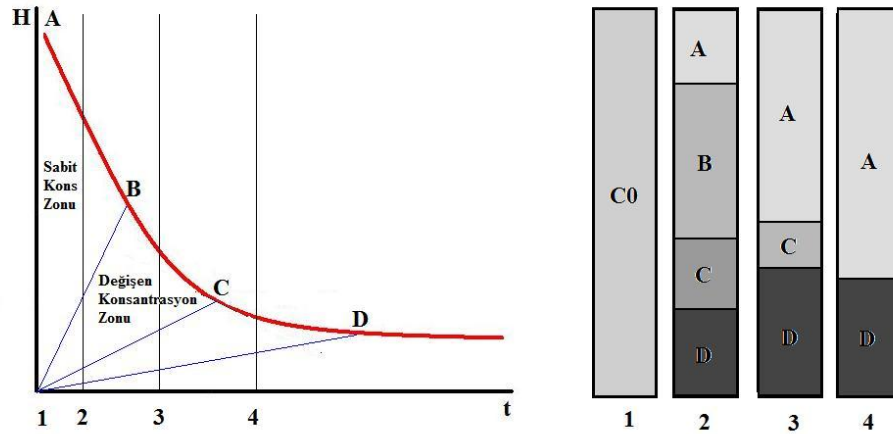
Süspansiyonların çökmesi sırasında sıvı ile meydana getirdiği ara fazın yükseklikleri zamanın fonksiyonu olarak bir eğri şeklinde gösterilebilir. Buna göre  $C_0$  ve  $H_0$ , süspansiyonun başlangıç anındaki konsantrasyonunu ve yüksekliğini gösteriyorsa bağıntı şu şekilde yazılabilir:

$$C_0 H_0 = C_2 H_1 = C_s H_s \quad (2.2)$$

Şekil 2.2’de çökme hızının hesaplamasında kullanılan Kync teorisini gösteren grafik, Şekil 2.3’te ise çökmede oluşan değişik zonlar grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 2.2: Kync sedimantasyon teorisinin grafiksel gösterimi (İpekoğlu, 1997).



Şekil 2.3: Çökelme işleminin grafik olarak gösterimi (İpekoğlu, 1997).

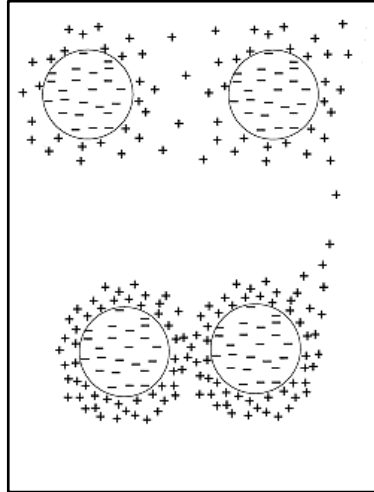
### 2.1.5. Mineral Süspansiyonlarında Denge

Üretim sonucunda üretilen ince öğütülmüş artık ya da konsantrenin su ile meydana getirdiği süspansiyonlarda taneler bazen tek başlarına ayrı ayrı bazen de birbirlerine yapışarak topluca bulunurlar. Birinci hale yani tanelerin ayrı ayrı bulunmalarına **dispersiyon**, ikinci hale yani beraberce bulunmalarına ise **flokülasyon** adı verilir. Bu iki hal süspansiyonlarda suni olarak yaratılabilir. Çünkü bazı cevher zenginleştirme işlemleri sonucunda ürünün tane tane, bazen de flokülle halinde üretilmesi istenir (İpekoğlu 1997).

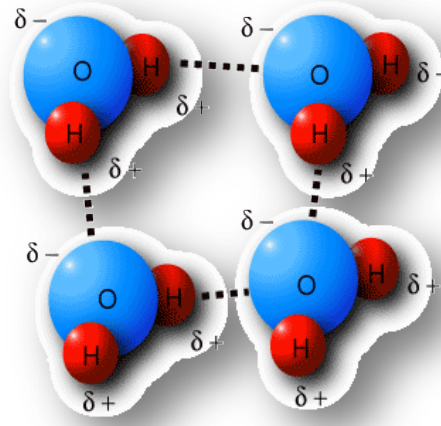
Mineral süspansiyonlarında dengeyi kontrol eden iki çeşit kuvvet vardır:

- 1.Çekim kuvvetleri
- 2.İtme kuvvetleri

Çekim kuvvetleri partiküllerin birbirlerine çok yaklaştıkları zaman devreye giren interatomik kuvvetlerdir. Bu kuvvetlerin en önemlileri ve en etkini *Wan-der Wals* kuvvetleridir. Bu kuvvet moleküller içindeki dipol şarjları yardımı ile oluşur. İki yüzey yaklaştığı zaman dipol kuvvetler devreye girer ve Wan-der Wals kuvvetleri kurularak kongülasyon oluşur. Şekil 2.4'te sıvı faz içerisine atılan atomlar üzerinde oluşan yük hareketleri, Şekil 2.5'te ise su molekülleri arasında oluşan Wan Der Wals çekim kuvvetleri temsili olarak verilmiştir.



**Şekil 2.4:** Sıvı faz içerisine atılan atomlar üzerinde oluşan yük hareketleri.



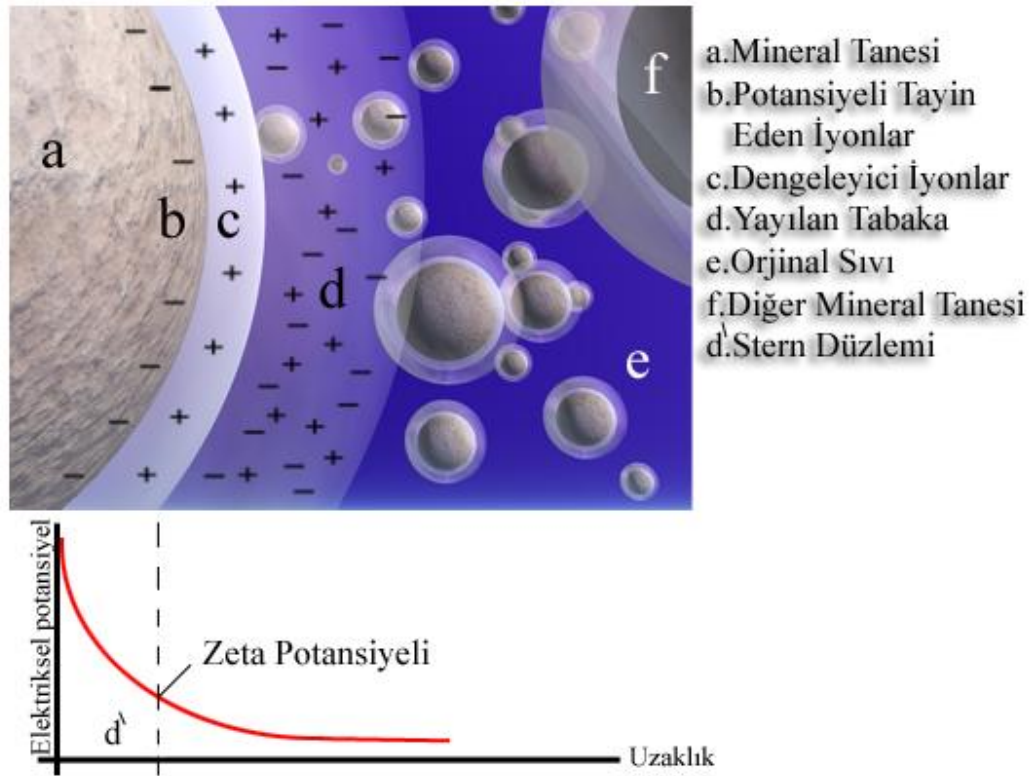
**Şekil 2.5:** Su molekülleri arasında oluşan Wan Der Wals çekim kuvvetleri.

İtme kuvvetleri ise iki ana kaynaktan oluşur:

Birinci sebep su moleküllerinin partikül yüzeylerine absorblanarak bir tabaka oluşturması ve bu tabakanın birbirlerini iterek dispersiyona neden olması ile oluşmaktadır.

İkinci sebep ise elektriksel şarjlar ve mineralin zeta potansiyeli olarak gösterilebilir. Olay şöyle gelişir: Bir mineral su içine konduğu zaman, katı yüzeyinde bazı iyonlar sıvı faza geçerek katı yüzeyin bir elektrik şarjı kazanmasına sebep olurlar. Genel olarak bu tip sistemlerde (+) iyonlar sıvı faza geçtiği için taneler (-) şarj taşırlar. Böylece çözücü sıvı hem  $H^+$  ve  $OH^-$  iyonları taşıırken birde mineralden sıvıya geçen iyonlar vasıtası ile bir tür iyon çözeltisi haline gelir. Bu tip bir kimyasal oluşumda çözelti yüzey enerjisi ile dengelenmeye çalışır. Mineralin yüzeyinde meydana gelen potansiyele **yüzey potansiyeli** denir ve bu potansiyele doğru çözeltiye geçmiş olan zıt yüklü iyonlar çekilerek katı yüzeyinde bir iyon tabakası oluştururlar. Bu durumda mineral yüzeyi ile sıvı arasında elektrik yükleri dengelenmiş olur. Katı ve sıvı arasındaki bu tabaka halindeki iyonlara **dengeleyici iyonlar** denir. Bu iyonlardan itibaren çözeltinin içine doğru yayılan başka bir iyon tabakası bulunmaktadır. İyonların yüzey civarında artan konsantrasyonu yüzeyden uzaklaştıkça azalarak sonunda çözeltinin normal konsantrasyonuna ulaşır. İşte bu noktada tane ile sıvı iyon kuvvetleri açısından dengelenmiş olmaktadır (İpekoğlu, 1997).

Katı ile sıvı arasında bir hareket olduğu zaman (Çökme veya akım gibi) mineralin dış kısmındaki iyonlar mineralle beraber yer değiştirirler. Bu hareket düzlemindeki katı yüzeyinin ölçülebilen potansiyeline **Zeta Potansiyeli** denir. Zeta potansiyeli partiküllerin arasındaki itme-çekme kuvvetlerini ve dolayısıyla mineral süspansiyonlarının dengesini etkileyen önemli bir faktördür. Zeta potansiyelinin azalması flokülasyona, artırılması ise dispersiyona sebep olur. Şekil 2.6'da tane yüzeyinde oluşan yükler ve zeta potansiyeli temsili olarak verilmiştir.



## 2.2. FLOKÜLASYONUN GENEL MEKANİZMASI

Bir süspansiyon içindeki katı mineral parçalarının flokülasyonu çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilebilir.

### 2.2.1. Partiküller Arası Çarpışmalar

Süspansiyon içindeki katı yüzeyleri birbirlerine yeterli derecede yaklaştıkları zaman Van der Waals çekim kuvvetleri itme kuvvetlerinden daha etkin duruma geçerler. Süspansiyonun karıştırılması, partiküllerin birbirlerine çok yakınlaşmasına ve hatta çarpışmasına neden olur Bunun sonucu doğal flokülasyon meydana gelir. Fazla karıştırma salkımlar arasındaki oldukça zayıf olan bağları koparabileceğinden zararlıdır. Karıştırmanın uygun bir hızda olması gereklidir. Bu şekilde meydana gelen flokülasyon sınırlı bir derecede gerçekleşmektedir (İpekoğlu, 1997).

### 2.2.2. Elektriksel Şarjların Azaltılması

Elektrik şarjlarının yani zeta potansiyelinin düşürülmesi itme kuvvetlerinin azaltılması ve dolayısıyla daha ileri derecede bir koagülasyonun gerçekleşmesine neden olur. Bu yöntemde süspansiyon içindeki minerallerin taşıdıkları elektriksel şarjlara zıt işaretli iyonlar ilave edilerek yüzey şarjları nötralize (0) edilmeye çalışılır. Bu görevde genellikle NaCl, CaCl<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> gibi inorganik tuzlar vasıtası ile yapılmaktadır. Bunların ilavesi, süspansiyon içinde Na<sup>+</sup> Ca<sup>+2</sup> Al<sup>+3</sup> gibi katyonların artmasına sebep olmaktadır. Bu katyonlar negatif elektrik yükü taşıyan partiküller üzerine absorbe olarak sistemin zeta potansiyelini sıfıra düşürmekte ve koagülasyona neden olmaktadır. Bu tip pozitif iyonların floküle etme özellikleri değerlilikleri ile orantılı olarak artmaktadır. Bunun nedeni yüksek değenlikli katyonların düşük konsantrasyonlarda dahi mineral yüzeylerine daha kolaylıkla adsorbe olabilmeleridir (İpekoğlu, 1997).

Süspansiyon içine ilave edilecek elektrolit miktarının optimum bir dozajda olması gerekir. Aksi takdirde fazla miktar pozitif şarj oluşması sistemin dengesini bozarak tersine çevirebilir. Bu tip koagülasyon çok ince öğütülmüş mineral partiküllerinin süspansiyonlar'ı için uygun olmaktadır. Elde edilen salkımlar küçük ve kompakt, sonuçta elde edilen sedimentasyon hızları düşük ve elde edilen çökelek filtrasyon işlemi için yeteri kadar poroz olmamaktadır. Aynı zamanda meydana gelen salkımlar zayıf ve kesme kuvvetleri etkisiyle kolayca parçalanabilir karakterde olmaktadır. Bu tür



flokülasyon işlemi için en çok kullanılan reaktifler inorganik elektrolitlerdir. İnorganik elektrolitler madencilik sektöründe de çok kullanılırlar (İpekoğlu, 1997).

### 2.2.3. Polimer Molekül Köprüsü ile Flokülasyon

Bu tip flokülasyon, suda çözülebilen çok yüksek molekül ağırlıklı sentetik organik polimerlerle yapılmaktadır. Bunların bir ucu bir partikül yüzeyine absorbe olur, diğer ucu ise başka bir partiküle bağlanarak bir köprü meydana getirir. Daha yüksek molekül ağırlıklı olanlar aynı anda birçok partikül yüzeyine absorbe olarak üç boyutlu bir matris meydana getirebilirler. Genel olarak bu tip flokülantların molekül ağırlıkları arttıkça floküle etme kabiliyetleri de artmaktadır (İpekoğlu 1997).



Şekil 2.7: Dengede ve floküle olmuş süspansiyon.

Poliakrilamid nötr pH değerlerinde hidrolize karşı oldukça stabildir. Moleküler köprü tipi flokülantların pek çoğu görüldüğü gibi ya negatif (Anyonik) yada pozitif (katyonik) şarj taşımaktadırlar. Bu elektriksel şarjlar iki gayeye hizmet etmektedir.

- a) Flokülantın elektrostatik çekim nedeniyle mineral yüzeyine absorbe edilmesini sağlar.
- b) Sıvı içinde polimer flokülantın uzunluğu boyunca itme kuvvetleri meydana getirerek uzun molekül zincirlerinin yumak haline gelmemesini ve böylece daha çok katı partikülü taşımalarını sağlar.

Pek çok endüstriyel pülp içindeki mineraller negatif elektrik şarjı taşıdıklarını daha önce söylemiştik. Bu negatif şarj taşıyan minerallere katyonik polielektrolitlerin daha uygun olacağı düşünülebilir. Gerçekten de polimerin partikül yüzeyine çekilmesi açısından bu doğrudur. Ancak köprü teşekkülü açısından bu düşünce geçerli olmayabilir. Köprüleşme için polimer, mineral yüzeyine kuvvetli bir şekilde absorbe olmalıdır ve bu olay amid gurupları gibi iyi absorpsiyon kabiliyeti olan kimyasal maddelerle artmaktadır. İster katyonik olsun isterse anyonik olsun, köprüleşme kabiliyeti molekül ağırlığının artması ile artmaktadır. Bu nedenle piyasada bulunan köprü yapıcı

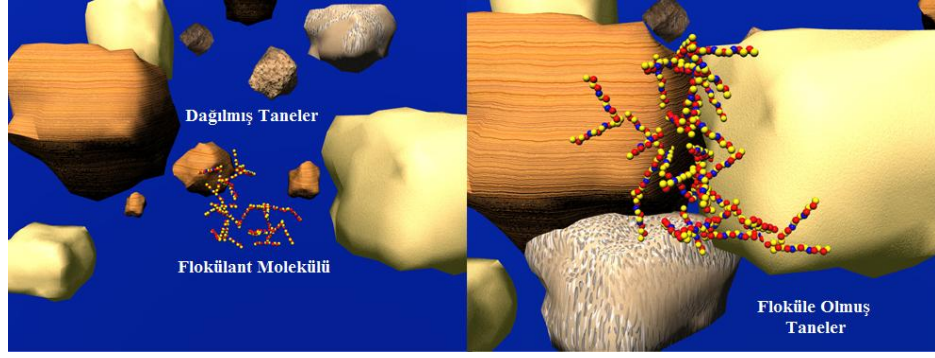
polietrolitlerin pek çoğu anyonik karakterli olanlardır. Bunlar aynı zamanda katyonik reaktiflerden daha ucuzdurlar. Poliakrilamidler genel olarak piyasada toz şeklinde bulunurlar, bazen solüsyon veya emülsiyon halinde de yapılmaktadırlar. Bunlar viskoziteleri yüksek, ağırlık olarak % 0.01-0,1 lik solüsyonlar halindedir (İpekoğlu, 1997).

Genel olarak sentetik polimer flokülantların molekül ağırlıkları, arttıkça daha iyi bir flokülasyon ve daha fazla çökelme hızları elde edilmektedir. Fakat filtrasyonda, özellikle döner tambur filtrelerde, molekül ağırlığı daha az olan flokülantların daha uygun olacağı söylenebilir. Bunun nedeni yüksek molekül ağırlığındaki polimer flokülantların büyük salkımlar meydana getirmesi, içlerine fazla miktarda sıvıyı hapsetmeleri ve sonuçta filtre kekinin nem miktarını arttırmalarıdır. Daha küçük mol. ağırlıklı polimer flokülantlar ise küçük ve kopmaya daha dayanıklı salkımlar oluşturmakta, filtrasyon sonunda arasından suyun daha kolaylıkla çıkabildiği üniform ve poroz strüktürde bir filtre keki elde edilmektedir (İpekoğlu, 1997).

#### **2.2.4. Polimer Flokülantların Çalışma Mekanizmaları**

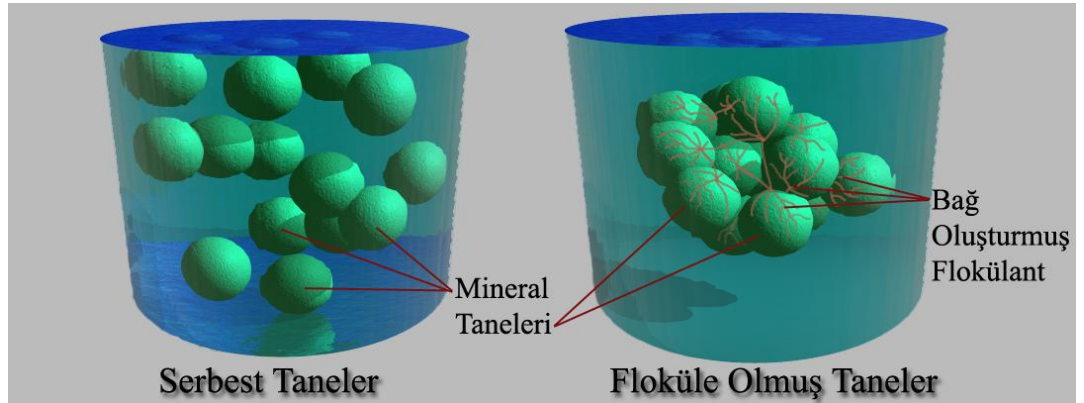
Polimer flokülantların çalışma mekanizmaları iki adımda incelenebilir:

Bunlarda birincisi Polimer flokülantın partikül yüzeylerine absorplanması; Bu konuda elektrostatik bir ilişki söz konusu edilmektedir. Partiküllerin yüzey şarjları veya zeta potansiyellerine göre uygun iyonik karakterdeki polimer flokülantların bu yüzeylere absorbe edildiği varsayılmaktadır. İyonik karakteri olmayan poliakrilamid gibi polimerlerin ise partikül yüzeylerine hidrojen bağları ile absorbe olduğu tahmin edilmektedir. Polimer flokülantın partikül yüzeylerine absorplanması mekanizması Şekil 2.8'de temsili olarak gösterilmiştir.



**Şekil 2.8:** Flokülantların süspansiyon içerisinde taneleri bağlaması.

İkinci mekanizma ise Salkımların formasyonudur. Bu konuda da çeşitli hipotezler ortaya atılmıştır. Bunların çoğu deneysel olarak kanıtlanmış değildir. Ancak bir hipoteze göre elektrik şarjı taşıyan polimer flokülantın katı yüzeylerine yapışarak yüzeyin zeta potansiyelini azaltması ve böylece çekim kuvvetlerinin etkin hale gelerek partiküllerin birbirine yaklaşarak salkımlar meydana getirmesidir. Bir dereceye kadar bunun gerçekleşmesi olasıdır. Salkımların formasyonu mekanizması temsili olarak Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



**Şekil 2.9:** Flokülantın tane yüzeyine yapışarak floküle etmesi.

### 2.2.5. Doğal Polimer Molekül Köprüsü ile Flokülasyon

Nişasta, reçine, tutkal, jelatin ve aljinat gibi doğal polimerler, köprü yapıcı sentetik flokülantlar gibi fonksiyon göstererek floküle etme özelliğindedirler. Ancak bu maddelerin molekül ağırlıkları sentetik polimer flokülantlara göre çok düşüktür ve floküle etme kabiliyetleri oldukça sınırlıdır (İpekoğlu, 1997).

Nişasta ve dekstrin gibi sebzelerden elde edilen kompleks polisakkaridler nötr ve hafifçe bazik ortamlarda etkili flokülantlar olarak uzun yıllar kullanılmışlardır. Kömür yıkama tesislerinde suyun temizlenmesi için günümüzde de hala uygulamaları bulunmaktadır. Kimyasal değişime uğramış nişastalar, içme suyu elde edilmesinde, sentetik flokülantların toksik etkileri olduğu hallerde kullanılmaktadır (İpekoğlu, 1997).

Sakız, reçine gibi suda çözülebilen polisakkaridler iyonik karakterleri olmadığından geniş bir pH spektrumunda etkili olabilen flokülantlardır. Tutkal ve jelatinler gibi hayvan dokularından türemiş proteinli maddelerin anyonik ve katyonik gurupları vardır ve bunlar hemen her çeşit katıyı floküle edebilmektedirler. Ancak pH ve iyonik kuvvetlerden çabuk etkilenirler. Sodyum Aljinat deniz yosunlarından türemiş bir polisakkaridtir ve içme sularının temizlenmesinde çok kullanılmaktadır. Ağır sulardaki yabancı maddelerin çöktürülmesi için ise Kalsiyum Aljinat etkili olmaktadır (İpekoğlu, 1997).

Kompleks polisakkaridlerden olan Tanin gurubu da endüstriyel artık ve lağım sularının temizlenmesinde uygulamaları olan bir doğal flokülanttır. Doğal polimer flokülantların başlıca dezavantajları, yüksek dozajlarda kullanılmaları, dengesiz solüsyonlar meydana getirmeleri, kalitelerinin çok değişik olması ve meydana getirdikleri salkımların kolay parçalanabilir olmasıdır. Bunlardan başka suların temizlenmesi sırasında içlerindeki organik maddelerin okside olarak mevcut O<sub>2</sub> yi harcamaları ve sonuçta elde edilen artık kısmın oksijen gereksiniminin düşük oluşu gibi problemlere neden olabilirler (İpekoğlu, 1997).

Genel olarak hepsi iyonik olmayan bir yapıdadır fakat bazı özel kimyasal önlemlerle bu flokülantlara anyonik veya katyonik özellikler kazandırılabilir (İpekoğlu, 1997).

## **2.2.6. Sentetik Polimer Flokülantlarla Yapıları ve Flokülasyonu Etkileyen Faktörler**

### **2.2.6.1. Polimer Dozajının Etkisi**

Herhangi bir süspansiyonun flokülasyon kabiliyeti belli bir optimum dozaj üzerinde polielektrolit ilavesi ile arttırılmaz ve bundan sonra ilave edilen miktar flokülasyon veriminin düşmesine neden olur. Optimum dozaj, maksimum çökelme hızı elde etmek için bir süspansiyona verilebilecek maksimum polimer miktarı olarak tarif edilebilir. Bu miktar genellikle ilgili süspansiyon ile yapılan laboratuvar çökelme testleri ile saptanır.

### **2.2.6.2. Karıştırma ve Kesme Kuvvetlerinin Etkisi**

Bir süspansiyon içinde sentetik veya doğal flokülantlar kullanılarak meydana getirilen bütün salkımlar fazla karıştırma sonucunda koparak parçalanabilirler ve bundan sonra tekrar floküle vaziyete geçemezler. Optimum dozajın üzerinde flokülant kullanarak meydana getirilmiş salkımlar karıştırmaya tabi tutulduğunda bunların daha kolaylıkla bozulup parçalandıkları bilinmektedir.

### **2.2.6.3. Partikül Ebadının Etkisi**

Çeşitli mineral süspansiyonları ile yapılan deneyler sonucunda partikül tane ebadının azalması (katı yüzey alanının artması) ile kullanılan optimum flokülant miktarının arttığı saptanmıştır.

### **2.2.6.4. Pülp Yoğunluğunun Etkisi**

Pülp yoğunluğu arttıkça, tanelerin birbirlerine yapışma ihtimali de artar. Bu nedenle daha kolaylıkla ve süratle flokülasyon meydana gelmesi doğaldır. Salkımların meydana gelme hızı partikül konsantrasyonunun karesiyle doğru, koagülasyon süresi ise başlangıç konsantrasyonu ile ters orantılıdır. Salkımların karıştırmaya karşı gösterdikleri denge de pülp yoğunluğu ile artmaktadır. Karıştırma sonunda parçalanmış bir salkımın tekrar meydana gelmesi bir partikülün diğer bir partiküle değmesi için geçen süreye bağlı olmaktadır. Düşük pülp yoğunluğunda bu, süre uzun olmakta ve polimer flokülant tekrar aynı partikül üzerine yapışmaya çalışmakta ve böylece sistem içinde köprü sayısı eksilerek flokülasyon kabiliyeti azalmaktadır.

### **2.2.6.5. Flokülantın Molekül Ağırlığının Etkisi**

Kullanılan flokülantın molekül ağırlığı arttıkça süspansiyon içindeki partiküller üzerine absorplanan miktar artmakta ve salkımların meydana gelmesi hızlanmaktadır. Mol ağırlığının artması hem optimum flokülant dozajı ve hem de çökelme hızının artmasına

neden olmaktadır. Ayrıca filtrasyon uygulamalarında daha düşük mol ağırlıklı flokülantlar daha uygun olmaktadır. Genel olarak molekül ağırlığı etkin bir flokülasyon için tek başına bir kriter değildir. Aynı mol ağırlığında iki ürün farklı moleküler ağırlık dağılımına sahip ve dolayısı ile farklı performans da olabilir.

#### **2.2.6.6. pH'ın Etkisi**

Pülpün pH'ı mineralin yüzey şarjlarını tayin etmektedir. Bir pülp içinde hemen her mineralin yüzey şarjını **sıfır** yapan bir pH derecesi vardır. Buna kısaca **z.p.c** denmektedir. Z.p.c nin altındaki pH'larda katı yüzeyi (+) işaretli, üzerinde ise (-) işaretlidir.

Sıfır şarj noktasının her iki tarafındaki çok yüksek ve çok alçak pH değerlerinde flokülasyonun meydana gelmesi güçtür. Bunun nedeni partiküller arasındaki itme kuvvetlerinin artması ve dolayısıyla partiküllerin süspansiyon içinde birbirlerinden uzaklaşmaları ve polimer flokülantın pek çok partikül üzerine yapışarak köprü kurma olasılığının azalmasıdır. Ayrıca pH polimerin iyonize olabilme derecesini etkilemekte ve polimer zincirindeki elektrik şarjını kontrol ederek polimer zincirinin pülp içinde uzayıp veya yumak halinde bulunuşunu tayin etmektedir. Bu da sonuç olarak pülp içindeki köprüleşme derecesini etkilemektedir. Böylece flokülantların tiplerine göre sadece belirli pH derecelerinde fonksiyon gösterdikleri söylenebilir.

#### **2.2.6.7. Sıcaklığın Etkisi**

Genel olarak sıcaklığın artmasının flokülasyonu olumlu yönde etkileyeceği düşünülürse de bunun her zaman doğru olduğu söylenemez. Çünkü sıcaklıktaki değişimler çeşitli sistemleri farklı şekilde etkilemektedir. Flokülantın süspansiyon içinde yayılma hızı ve partiküllerin çarpışma hızları artan sıcaklıkla artmaktadır. Fakat flokülantın mineral yüzeylerine adsorplanması ekzotermik bir reaksiyon olduğu için artan sıcaklıkla olumsuz yönde etkilenmektedir. Ayrıca polimer molekülün içinde bulunduğu sıvıya bağlı olarak lineer uzaması sıcaklık farkı ile değişebilir. Belirli bir sistem için sıcaklığın flokülasyona etkisini doğru olarak tayin etmek oldukça güç bir konudur.

#### **2.2.6.8. Flokülantın Besleme Metodunun Etkisi**

Besleme noktaları hafif türbülans olan yerlerde seçilmelidir. Flokülant solüsyonları seyreltik olduğu sürece daha üniform bir dağılıma söz konusudur. Beslemenin çökelme işleminin yapılacağı yere mümkün olduğu kadar yakın olması istenir. Besleme

noktalarının belirli aralıklarla seçilmesi daima daha iyi bir köprüleşme ve daha kuvvetli salkımlar meydana gelmesine yardımcı olur.

Karıştırma flokülantın beslenmesi sırasında ve sonrasında çok önemlidir. Flokülasyonun gerçekleşmesi sırasında sürekli fakat hafifçe bir karıştırma köprü oluşumunu faydalı yönde etkilemektedir. Düzensiz karıştırma bazı bölgelerde flokülant konsantrasyonunun artmasına ve süspansiyonun geri kalan kısmının disperse durumda kalmasına neden olur. Salkımların formasyonu tamamlandıktan sonra karıştırma ise parçalanmalara yol açabilir. Şiddetli karıştırma tekrar dispersiyon hali yaratabilir.

### 2.2.7. Gravite Çökmesi ve Tikinerler

Gravite çökmesi veya kıvamaştırma cevher hazırlamada en yaygın olarak kullanılan susuzlandırma tekniğidir. Yüksek kapasite temin eden, oldukça ucuz ve çökme sırasında ortaya çıkan kesme kuvvetlerinin düşük olması nedeniyle ince partiküllerin flokülasyonuna en müsait yöntemdir.

Çökeltmenin amacı katı-sıvı karışımı halindeki besleme malının katı konsantrasyonunu arttırmak ve aynı zamanda üst kısımda katılardan arınmış bir temiz sıvı elde etmektir. Bu işlemlerin gerçekleştirildiği endüstriyel cihaza “tikiner” adı verilmektedir.

Tikinerler aralıklı veya sürekli olarak çalışabilir. Madencilik endüstrisinde ilk olarak aralıklı çalışan tikinerler kullanılmıştır. Bu halde, besleme malı bir tank içine pompalanır ve bir süre bırakıldıktan sonra, katı kısım dibe çöker ve yukarıda kalan temiz su dekante edilir. Çamur halindeki katı kısım ise tankın dibinden alınır. Bu sistem az miktarda malzeme için hala kullanılmaktadır. Bunu takiben çökeltme konileri geliştirilmiştir. Bunlarda sürekli bir çökme işlemi olmakta, tortu kısım ise yüzeyden veya çevreden taşmaktadır. Çökelen kısmını kendiliğinden akabilmesi için konik kısmın bir hayli dik yapılması gerekmektedir. Bu ise çökme konisinin boyutlarının sınırlı olmasına yol açmaktadır.

Gravitasyonel çökeltmenin verimliliği kullanılan çökeltme tankı alanı ile yakından ilgili olduğundan ve geniş bir alana yayılan tortunun çıkış noktasına doğru sürekli hareketinin arzu edilmesi düşüncesi günümüzde kullanılan tikinerlerin geliştirilmesine neden

olmuştur. Sürekli çalışan tikinerler, madencilik endüstrisinden kimya, çevre mühendisliği gibi endüstri dallarına kaymış ve endüstriyel sular, çevre sularının temizlenmesi gibi proseslerde yaygın olarak uygulanmaya başlanmıştır. Madencilikte kullanılan tikinerler diğerlerine nazaran çok daha büyük ve sağlam yapıda olmak zorundadır. Bunun nedeni metalurjik pülplerin büyük tonajlarda ve çoğunlukla yüksek özgül ağırlıklarda olmaları ve %60-75 gibi yüksek konsantrasyonlarda çökelmeleridir.

Sürekli çalışan tikiner, çapı 2 m den 200 m ye, yükseklikleri ise 1 ila 7 m arasında değişen, silindirik bir tanktan ibarettir. Pülp, tikinere yüzeyin yaklaşık 1 m kadar altında bulunan merkezi bir besleme havuzundan yapılır. Böylece sakin ve uygun derinlikte bir besleme temin edilir. Temiz sıvı çevre boyunca yerleştirilmiş bir taşma kanalından tikineri terk eder, çökelen kısım ise taraklı bir karıştırıcı yardımıyla hafifçe meyilli alan tank tabanı ortasındaki bir çıkış noktasından tikineri terk eder. Taraklı karıştırıcı çökelen malzemenin belirli bir derecede akışkan kalmasını ve dolayısıyla kolay hareketini sağlamak dışında kompresyon zonunda tortu içerisinde kanallar meydana getirerek suyun kaçmasını ve bu sayede katı konsantrasyonunun artmasını da temin eder. Şekil 2.10'da faal haldeki bir tesiste kullanılan tikiner verilmiştir.



**Şekil 2.10:** Bir cevher zenginleştirme tesisinde tikiner tankları.



## 2.3. ELEKTROKOAGÜLASYON PROSESİ

### 2.3.1. Genel Tanım

Elektrokimyasal tepkimeler, elektrolitten göç eden iyonik bileşiklerin anotta ve katotta yükseltgendiği veya indirgendiği heterojen iyon transferi tepkimeleridir. Anot ve katotta genellikle metal, karbon veya bir yarı iletken elektrot kullanılmaktadır (Şanlı,2006)

Bir elektrokoagülasyon hücresinin anot ve katotta gerçekleşen reaksiyonlar aşağıdaki şekilde sıralanabilir. (Eyvaz, 2005)

#### **Anot Reaksiyonları**

Anot elektron verir.

Anotta yükseltgenme

Anodik çözünme ( $Al \rightarrow Al^{+3} + 3e^{-}$ )

Anyonlar anotta toplanır.

Anolit bölge oluşur.

Anotta oksijen:

$2H_2O - 4e^{-} \rightarrow O_2 + 4H^{+}$

Klor varsa anotta klor

$2Cl^{-} - 2e^{-} \rightarrow Cl_2$

#### **Katot Reaksiyonları**

Katot elektron alır.

Katotta indirgenme

Katodik çözünme ( $Cu^{+2} + 2e^{-} \rightarrow Cu$ )

Katotta katyonlar toplanır.

Katodik bölge oluşur.

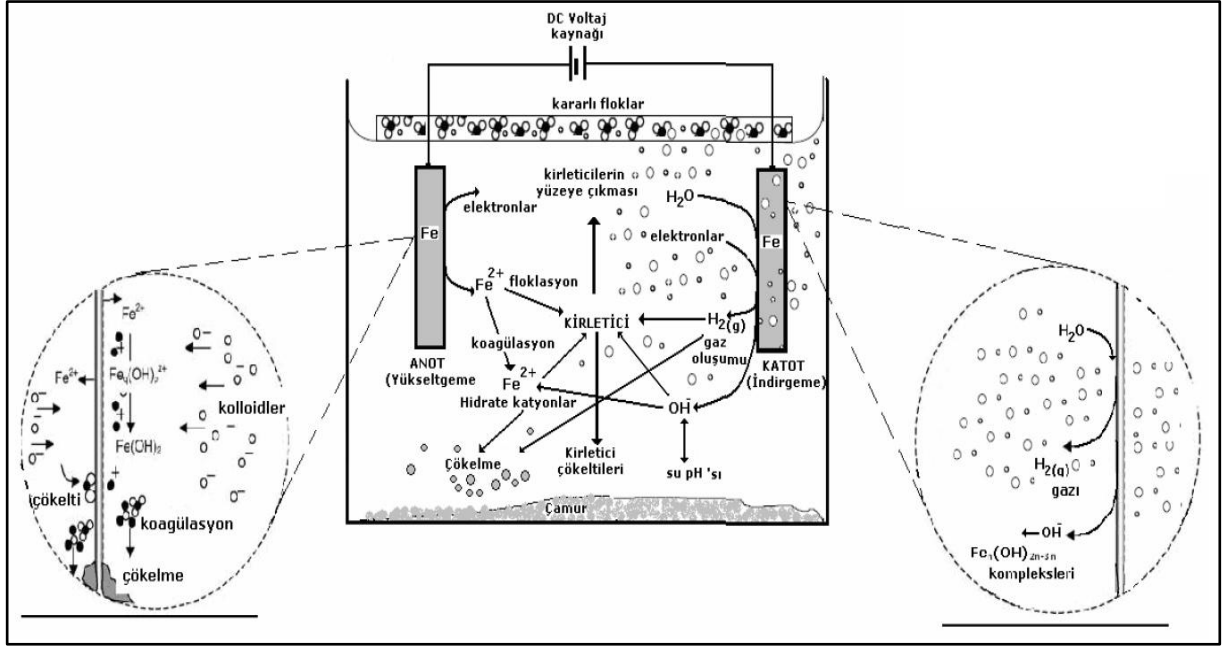
Katotta hidrojen:

$2H_2O + 2e^{-} \rightarrow H_2 + 2OH^{+}$

Gazın indirgenmesi

$O_2 + 4H^{+} + 4e^{-} \rightarrow 2H_2O$

Elektrokimyasal prosesinde gerçekleşen fiziksel ve kimyasal olaylar ile süspansiyonu oluşturan tanelerin toplu davranışı Şekil 2.11’de özetlenmiştir.



Şekil 2.11: Elektrokoagülasyon prosesinde meydana gelen olaylar (Canizares et al., 2005; Koby M., 2008).

Elektrokoagülasyon uygulamalarının sanayi üretiminde medya getirdiği operasyonel avantajlar şu başlıklar altında verilebilir:

- a. **Çok Yönlülük:** Elektrokimyasal prosesler birçok çevre probleminin çözümünde doğrudan veya dolaylı olarak kullanılabilir. Elektrokimyasal yükseltgenme ve indirgenme sonucu, çözeltilerin derişik hale getirilmesi veya seyreltilmesi yani faz ayırmaları gerçekleştirilir. Sonuç olarak birçok kirlenicinin ve maddenin çok düşük konsantrasyonlara kadar bile ayrılması söz konusudur (Şanlı, 2006).
- b. **Enerji Verimliliği:** Elektrokimyasal prosesler klasik proseslere göre daha düşük sıcaklıklara ihtiyaç duymaktadır (termal yanma gibi). Düşük elektriksel akım dağılımları, voltaj düşmeleri ve yan reaksiyonlardan dolayı oluşan güç kayıplarının minimize etmek için uygun elektrot ve hücre dizaynları ile enerji verimleri artırılabilir. Böylece klasik sistemlere göre daha az enerji tüketimi ortaya çıkmış olacaktır (Şanlı, 2006).

**c. Otomasyona Uyuma Kabiliyeti:** Elektrokimyasal proseslerde elektriksel değişkenler (voltaj ve akım gibi) genellikle veri elde etmeyi kolaylaştırma, proses kontrolü ve otomasyon için uygun özelliktedir (Şanlı, 2006).

**d. Çevreyle Uyumu:** Elektrokimyasal proseslerde ana reaktif elektrot olup, temiz bir reaktiftir. Proseste genellikle çok fazla ekstra reaktifler gerekmektedir. İlave olarak bu proseslerin bir çoğunun yüksek seçicilik özelliğinden dolayı ikincil ürünlerin oluşumu gözlenmemektedir (Şanlı, 2006).

**e. Maliyete etkinliği:** Elektrokimyasal ekipmanın üretimi, işletilmesi ve kontrolünün tasarlanması basit ve ucuzdur. Birçok ekipmana göre çok az bir alan işgal etmektedir (Şanlı, 2006).

### 2.3.2. Elektrokoagülasyon Reaksiyonları (Anot-Katot Reaksiyonları)

Daha önce susuzlandırmada sıvı içine atılmış tanenin yüzeyinden sıvı faza iyon transferi olduğunu ve bu sebeple yüzeyin yük kazandığı belirtilmişti. Buna mukabil sıvı faz içerisinde bulunan zıt iyonlarında tane yüzeyine yapışarak ölçülebilir bir potansiyel oluşturduğu ve bu değerin van der Waals kuvvetleri ile flokülasyon mekanizmasını harekete geçirdiği incelenmişti. Sıvı faz içerisinde bulunan katı tanenin iyon kaynağı sıvı içerisinde çözülmüş elementler olabileceği gibi sisteme dışarıdan eklenen bir iyon pompası ile de gerçekleştirilmektedir. Kimyasal madde şarjları dışında pülp içerisine konan elektrotlara uygulanan gerilim ile de sıvı faza iyon pompalanabilmektedir.

Elektrokoagülasyon; safsızlık içeren pülpte iyon oluşturmak üzere elektrotları kullanan, birçok kimyasal ve fiziksel prosesleri içeren karmaşık bir prosestir. Elektrokoagülasyon prosesinde koagülasyonu sağlayacak iyonlar yerinde üretilmektedir.

Bu proses;

- Elektrolitik oksidasyon esnasında çözünen elektrot ile koagülan türlerin oluşumu,
- Kirleticilerin destabilizasyonu, partikül süspansiyonu ve emülsiyonların parçalanması,
- Destabilize olmuş partiküllerin flokları oluşturmak üzere yumaklaşması

olmak üzere 3 adımı kapsamaktadır (Vardar, 2006).

Kirleticilerin destabilizasyonu, partikül süspansiyonu ve emülsiyonların parçalanması;

- Tüketilen anodun oksidasyonu sonucu oluşan iyonların etkileşimi ile çift tabakanın etrafındaki yüklü türler tarafından bastırılması sağlanmaktadır.
- Sudaki mevcut iyonik türlerin yük nötralizasyonu elektrokimyasal olarak çözünen elektrotlar tarafından üretilen zıt yüklü iyonlar ile sağlanmaktadır.
- Son olarak da flok oluşumu şeklinde gerçekleşmektedir.

Bunların dışında elektrokoagülasyon pilinde,

- Atık suda bulunan kirleticilerin katodik indirgenmesi,
- Kolloidal partiküllerin koagülasyonu,
- Çözültideki iyonların elektroforetik göçü,
- Elektrotlarda oluşan  $O_2$  ve  $H_2$  kabarcıkları ile koagüle olmuş partiküllerin elektroflotasyonu,
- Metal iyonlarının katotta indirgenmesi,
- Diğer elektrokimyasal ve kimyasal prosesler,

gibi fiziko-kimyasal prosesler de meydana gelebilmektedir (Mollah ve *dig.*, 2004).

Basit bir elektrokoagülasyon pili, bir elektrolit içine daldırılmış bir anot ve bir katottan oluşmaktadır. Dış bir güç kaynağından bir güç uygulandığı zaman anot oksidasyona, katot redüksiyona uğramaktadır. Bu durumda anot elektrokimyasal olarak çözünecek ve katot ise pasivasyona maruz kalacaktır. Metal elektrotların yeterli miktarda çözünmesi için kullanılan elektrotların geniş yüzey alanına sahip olmaları gerekmektedir. M metali ile anot ve katottaki elektrokimyasal reaksiyonlar;

**Anotta:**



**Katotta:**

şeklinde özetlenebilmektedir (Mollah ve *dig.*, 2004).

Alüminyum elektrot kullanıldığında,  $Al^{3+}$  iyonları hidroliz ile  $Al(H_2O)_6^{3+}$ ,  $Al(H_2O)_5OH^{2+}$ ,  $Al(H_2O)_4(OH)^{2+}$  oluşturmakta ve hidroliz ürünleri geniş bir pH aralığında  $Al(OH)^{2+}$ ,  $Al(OH)_2^+$ ,  $Al_2(OH)_2^{4+}$ ,  $Al(OH)^4$ ,  $Al_6(OH)_{15}^{3+}$ ,  $Al_7(OH)_{17}^{4+}$ ,  $Al_8(OH)_{20}^{4+}$ ,  $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$ ,  $Al_{13}(OH)_{34}^{5+}$  gibi birçok monomerik ve polimerik hidrokso kompleks türleri oluşturmaktadır. (Mollah, vd., 2004)

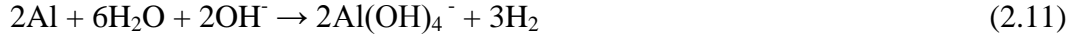
Alüminyum anodun elektrolitik çözeltideki ürünleri düşük pH'da  $Al^{3+}$  ve  $Al(OH)^{2+}$  gibi türlerdir. Bunlar uygun pH değerlerinde önce  $Al(OH)_3$ 'e ve sonuçta  $Al_n(OH)_{3n}$ 'e polimerleşmektedir (Vardar, 2006).

Alüminyum elektrot kullanıldığında;

**Anotta:****Katotta:**

reaksiyonları meydana gelmektedir (Mollah ve *diğ.*, 2001). Bununla birlikte sulu ortamın pH değerine bağlı olarak  $Al(OH)^{2+}$ ,  $Al_2(OH)_2^{4+}$  ve  $Al(OH)_4^-$  gibi diğer iyonik

türler sistemde mevcut olabilmektedir.  $\text{Al(OH)}_4^-$ , katodun kimyasal olarak  $\text{H}_2$  ile birlikte yüksek pH'larda oluşan  $\text{OH}^-$  iyonları tarafından kuşatılması sonucu,



reaksiyonu uyarınca oluşmaktadır (Mollah ve *dig.*, 2001).

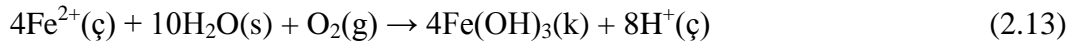
Demir elektrot kullanıldığında, ferrik iyonları (3 değerlikli demir iyonları) çözelti pH'ına bağlı olarak  $\text{Fe(OH)}_3$  gibi monomerik hidrokomples türleri ve  $\text{Fe(H}_2\text{O)}_6^{3+}$ ,  $\text{Fe(H}_2\text{O)}_5(\text{OH})^{2+}$ ,  $\text{Fe(H}_2\text{O)}_4(\text{OH})_2^+$ ,  $\text{Fe}_2(\text{H}_2\text{O)}_8(\text{OH})_2^{4+}$  ve  $\text{Fe}_2(\text{H}_2\text{O)}_6(\text{OH})_4^{4+}$  gibi polimerik hidroksi kompleksleri oluşturmaktadır. (Vardar, 2006).

Demir anodun elektrolitik çözeltideki ürünleri düşük pH'da  $\text{Fe(OH)}_4^-$  gibi türlerdir. Bunlar uygun pH değerlerinde önce  $\text{Fe(OH)}_3^-$ 'e, sonuçta ise aşağıdaki mekanizmalardaki reaksiyonlara göre  $\text{Fe}_n(\text{OH})_{2n-3n}$ 'e polimerleşmektedir. (Vardar, 2006)

Demir için reaksiyon mekanizmaları;

### **Mekanizma I**

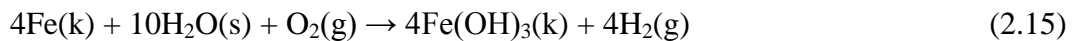
#### **Anotta:**



#### **Katotta:**



#### **Toplamda:**



## Mekanizma II

### Anotta:



### Katotta:



### Toplamda:



şeklindedir (Mollah ve *dig.*, 2001).

### 2.3.3. Elektrokoagülasyon Proseslerinde Elektrot Bağlama Tipleri

#### 2.3.3.1. Paralel Bağlı Monopolar Elektrotlar (MP-P)

Anot ve katotların paralel bağlantı düzeneğinde akım her bir hücrenin direncine göre bölünür. Böylece, seri bağlantıya oranla daha düşük potansiyel fark gereklidir (Şanlı, 2006).

#### 2.3.3.2. Seri Bağlı Monopolar Elektrotlar (MP-S)

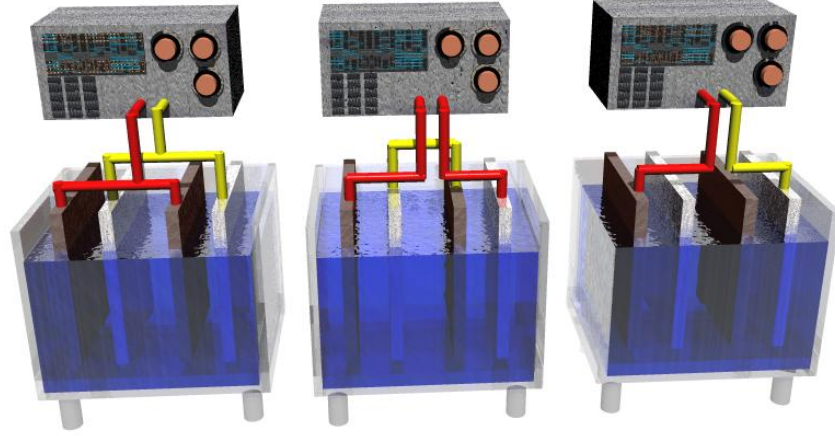
Bu düzenekte her bir elektrot çifti dahili olarak birbirine bağlanmıştır. Seri bağlantıda her bir hücre voltajı toplanacağından verilen akım için yüksek potansiyel fark gereklidir (Şanlı, 2006).

#### 2.3.3.3. Seri Bağlı Bipolar Elektrotlar (BP-S)

Burada iç kısımdaki iki elektrotta elektrik bağlantısı yoktur, sadece dış elektrotlar güç kaynağına bağlanmıştır. Dış kısımdaki elektrotlar monopolar ve iç kısımdakiler de bipolardır (Şanlı, 2006).

Bu bağlantı, şekli, kolay kurulumu ve proses süresince bakımı kolay olduğu için avantajlıdır.

Elektrokoagülasyon proseslerinde elektrot bağlama şekilleri Şekil 2.12’de verilmiştir.



Şekil 2.12: Elektrokoagülasyon proseslerinde elektrot bağlama şekilleri.

#### 2.3.4. Elektrokoagülasyon (EC) Prosesi Akım Türleri

EC reaktörlerinde doğru akım (DC) veya alternatif akım (AC) uygulanmaktadır. Doğru akım EC (DC) teknolojisinde; oksitlenmeden dolayı anot bozulmakta, diğer taraftan ise katotta su geçirmeyen bir oksit tabakası oluşmaktadır.

Bu olay EC’de verim kaybına sebep olmaktadır. EC reaktöründe çözünen paralel plaka elektrotlar eklenerek doğru akım kayıpları bir ölçüde küçültülür. Ancak birçok EC işleminde alternatif akım tercih edilmektedir (Şanlı, 2006).

#### 2.3.5. Elektrokoagülasyonun (EC) Avantaj ve Dezavantajları

EC’de koagüle edilen partiküller atık sularda bulunan mikro koloidal partikülleri ve iyonları kendilerine doğru çekerek absorbe etmektedir. Oluşan yumaklar hem çökelmekte hem de elektroflotasyonda oluşan gazlar yardımıyla su yüzeyine kaldırılabilir. Bu yöntem renk, askıda katı tane ve ağır metallerin atık sulardan giderilmesinde kullanılmaktadır. Diğer atık su arıtım işlemlerine göre EC prosesinin avantaj ve dezavantajları yıllarca gerçekleştirilen birçok bilimsel projede ortaya konulmuş olup, bu avantaj ve dezavantajlar aşağıda sıralanmıştır.



### 2.3.5.1. *Elektrokoagülasyonun Avantajları*

- ✚ Basit ekipmanlar ve işletme şartları gerektirir.
- ✚ Arıtım çıktısı renksiz, kokusuz ve berraktır.
- ✚ Oluşan çamur, metal oksit ve metal hidroksitlerden oluştuğu için kolaylıkla stabil hale getirilir ve susuzlaştırılabilir. Çamur miktarı azdır.
- ✚ Oluşan floklar kimyasal floklara benzemekle birlikte; daha büyük floklar olma eğiliminde ve daha az bağlı su içermektedirler. Asidik ortama dirençli ve stabil olup, filtrasyonla daha hızlı ayrılabilirler.
- ✚ Kimyasal arıtma ile karşılaştırıldığında elektrokoagülasyon çıkış suyu daha az toplam çözünmüş katılar içerir.
- ✚ Elektrokoagülasyon prosesler en küçük koloidal parçacıkları giderme avantajına sahiptirler. Çünkü cihazların uyguladığı elektrik alan onların daha hızlı hareket etmelerini sağlayarak koagülasyonu kolaylaştırır.
- ✚ Elektrokoagülasyonda kimyasal madde kullanımından kaçınılır ve böylece kimyasal koagülasyonda ilave edilen yüksek konsantrasyondaki kimyasal maddenin sebep olduğu ikincil kirlenme olasılığı ve aşırı kimyasalların nötralizasyonu problemi ortadan kaldırılmış olunur. Elektrokoagülasyon sırasında üretilen gaz kabarcıkları kirleticileri çözelti yüzeyine taşıyabilir, daha kolay ayrılmaları sağlar.
- ✚ Elektrokoagülasyon hücresi içindeki elektrotlar sabit konumda olup, elektriksel olarak kontrol edilir, böylece daha az bakım gerektirir.
- ✚ Elektrokoagülasyon prosesi için, kırsal alanlarda elektrik prosese ilave edilen güneş panellerinden temin edilebilir.

### 2.3.5.2. *Elektrokoagülasyonun Dezavantajları*

- ✚ Çözünen 'harcanan elektrot'ların düzenli olarak yenilenmesi gerekmektedir.
- ✚ Bazı yerlerde elektrik kullanımı pahalı olabilir.
- ✚ Katot üzerinde geçirimsiz bir film tabakası oluşumu prosesin verimliliğini düşürebilir
- ✚ Atık su çözeltilerininin yüksek iletkenliğe sahip olması gerekir.
- ✚ Bazı durumlarda jelatinli hidroksit çözünme yönüne meyledebilir.

### 2.3.6. Elektrokoagülasyon Prosesi ve Uygulamaları

EC ile atık su arıtımı ilk olarak 1889'da İngiltere'de önerilmiştir. Daha sonra ABD'de 1909'da demir ve alüminyum elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyon ile atık suların arıtımı ile ilgili bir patent alınmıştır. Büyük ölçekte elektrokoagülasyon ile içme sularının arıtımı 1946'da ABD'de ilk olarak uygulanmıştır. Bu metotla alüminyum anotlar kullanılarak elektrokimyasal hidroliz ile alüminyum hidroksit flokları oluşturulur. Elektrokoagülasyon ile oluşan flokların çökmesi veya sedimentasyonu hızlı olmaktadır. Aynı sistem ile demir elektrotlar kullanılarak 1956'da İngiltere'de nehir suları arıtılmıştır. 1946 ve 1956 yıllarında yapılan iki araştırmada renk ve türbidite gideriminin de yüksek kalitede arıtılmış suyun elde edilmesi sonuçların ümit verici olduğunu göstermiştir. Kimyasal koagülasyon ile karşılaştırıldığında yüksek başlangıç yatırım maliyetinden dolayı o yıllarda pek kabul görmemiştir. Son zamanlarda, atık su arıtım deşarj çıkışlarına getirilen sınırlamalardan dolayı elektrokoagülasyon yeniden gündeme gelmiştir.

1972'de elektrokoagülasyon ile gıda endüstrisi atık suları arıtma çalışmaları yapılmıştır. 1980'de Rus bilim adamları atık suların farklı metotlar ile arıtımını inceleyerek EC ile bu konudaki düşüncelere yeni bakış açıları getirmişler ve yağ-su karışımlarından yağı gidermişlerdir. Alüminyum elektrotlar kullanıldığında istenmeyen çökeltilerin oluşumu yukarıdaki çalışmaların ortak görüşüdür. Elektrokoagülasyon esnasında meydana gelen çökeltiler genellikle çok fazla metal hidroksit oluşumundan kaynaklanmaktadır. Bu hidroksitler çözünen elektrot malzemesinden ileri gelmektedir. Eğer alüminyum elektrotlar kullanılıyorsa, sonuçta oluşacak çökeltiler çöp sahalarına boşaltılacaktır. Elektrokoagülasyonda bundan dolayı demir elektrotlar daha fazla tercih edilmektedir. Çünkü alüminyum kullanımı çöp depo alanlarında ağır metal kirliliği ortaya çıkabilmektedir. Demir elektrot kullanması halinde Al elektrot kullanıldığı sistem kadar renk açısından bir şeffaflık sağlanamamaktadır. Çok az miktarda da olsa çözülmüş demir iyonları suda renk oluşumuna yol açmaktadır.

Elektrokoagülasyon proseslerinde genellikle doğru akım (DC) ve doğru akım güç sağlayıcıları kullanılmaktadır. 1980'li yılların başında alternatif akım kullanılan elektrokoagülasyon sistemleri üzerine çalışmalarının yapıldığı görülmektedir. Özellikle

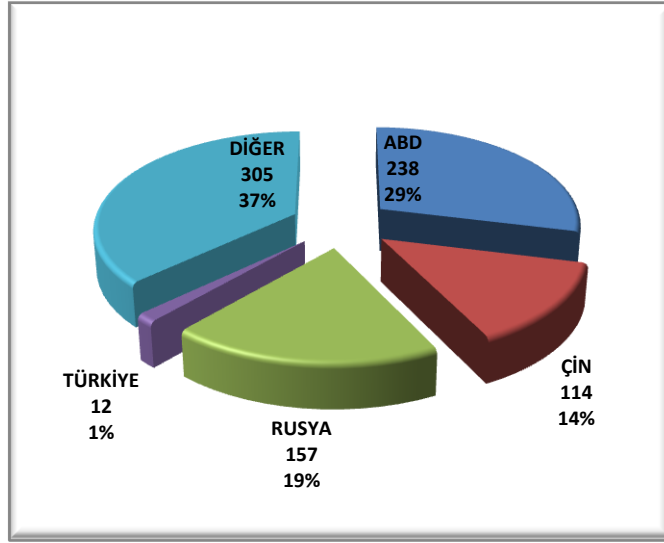
maden endüstrisinde oluşan kömür partikülleri ve süspansiyonların stabilitesi yani kararlılığının kırılmasında alternatif akımlı elektrokoagülasyon sistemi kullanılmıştır.

Elektrokoagülasyon prosesinin daha iyi anlaşılması amacıyla yapılan çalışmalarda voltaj ve diğer parametreler arasındaki ilişki araştırılmıştır. Model sabitleri tespit edilmiştir. Teorik ve deneysel sonuçlar; su pH 'sı ve akış hızının geniş bir ölçekte elektrokoagülasyon voltajı üzerine çok az etkisinin olduğu belirtilmiştir. Diğer taraftan elektrotlar arası mesafe, iletkenlik, akım yoğunluğu ve elektrot yüzeyinin durumuna birinci derecede bağlı olduğu sonucuna varılmıştır.

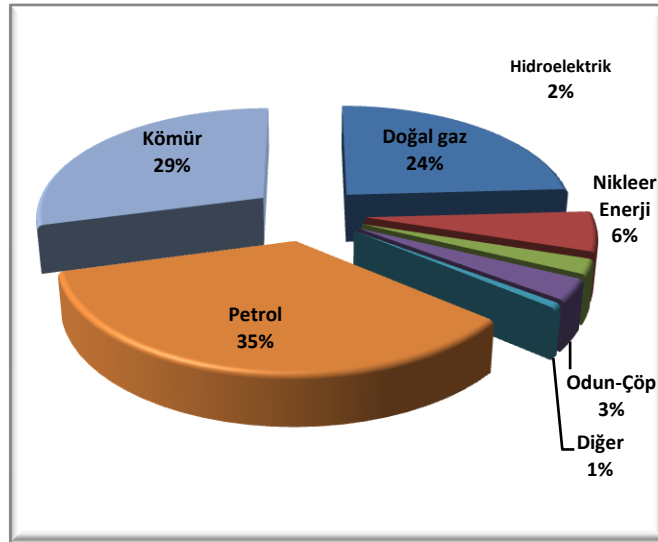
## **2.4. KÖMÜR VE LİNYİT YATAKLARI, TRAKYA BÖLGESİ KÖMÜRLERİ**

### **2.4.1. Dünyada Enerji Üretimi, Linyit ve Taşkömürü**

Son yapılan araştırmalara göre dünyada toplam kömür yatakları potansiyeli 826 milyar ton olarak kabul edilmektedir. İşletilebilir özellikteki bu yataklar, 70 ülkeye yayılmıştır. Yatak hacmi olarak 238 milyar tonla ABD başı çekerken, 157 milyar ton ile Rusya ve 114 milyar ton ile Çin üretimde önemli bir yere sahiptir. Bunun yanında 2008 rakamlarına göre dünya kömür üretimi toplam 6,8 milyar ton olmuş ve bu miktarın %80'i taşkömürü kalanı ise linyit olarak gerçekleştirilmiştir. 2008 yılında kömür potansiyeli yüksek ülkelerin üretim ve tüketim dağılımları Şekil 2.13 ve Şekil 2.14'te verilmiştir.

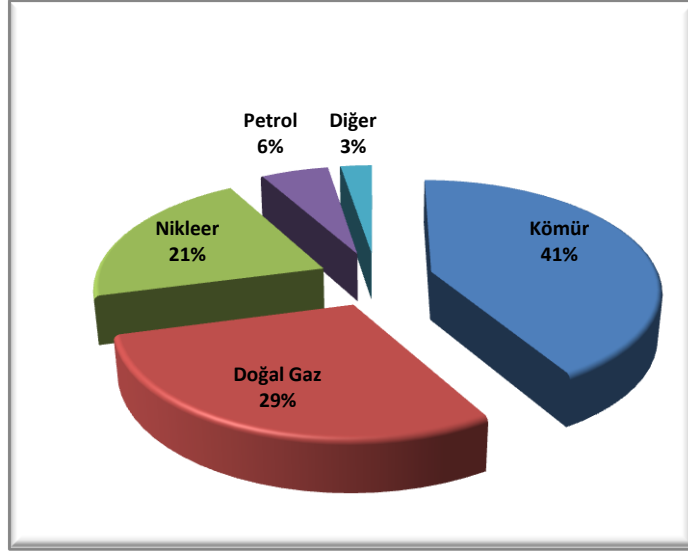


Şekil 2.13: Ükelere göre dünya kömür yatakları dağılımı.



Şekil 2.14: Enerji kaynaklarına göre dünya rezerv oranları.

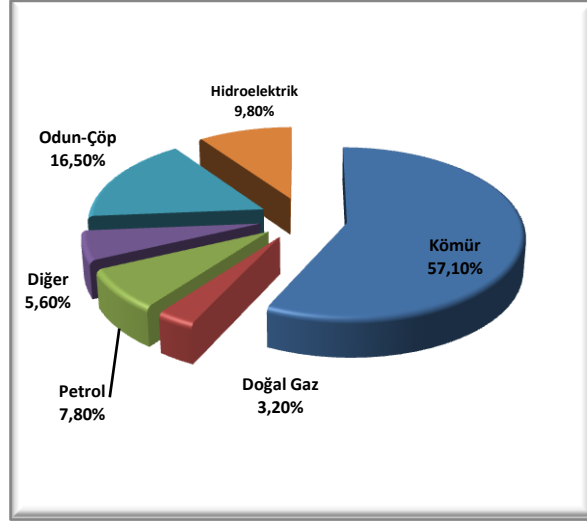
Dünya kömür üretiminin yaklaşık %70'i elektrik üretimi amacı ile kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar elektrik üretimi amaçlı kömür kullanımının 2030 yılında %80'ler düzeyine yükseleceği göstermektedir. İçinde bulunduğumuz 21. yüzyılda dünyada gerçekleştirilen elektrik üretiminin hammadde kaynakları açısından en büyük payı %41,5 ile kömür almaktadır. Bu payı %29,4 ile doğal gaz, %20,9 ile nükleer kaynaklar, %5,6 ile petrol ve %2,6 ile diğer kaynaklar izlemektedir. Dolayısıyla kömür, elektrik üretimi amacıyla kullanılan yakıtlar arasında eskiden olduğu gibi önemli bir yere sahiptir. Dünya elektrik üretimi hammadde dağılımı Şekil 2.15'te verilmiştir.



Şekil 2.15: Dünya elektrik üretimi hammadde dağılımı.

#### 2.4.2. Türkiye’de Enerji Üretimi, Linyit ve Taşkömürü Yatakları

Ülkemizde, 2008 yılında toplam enerji arzının %20’si yurtiçi kaynaklardan ve %80’i ise ithal kaynaklardan sağlanmıştır. Toplam 29,2 milyon ton petrol eşdeğeri tutarındaki yurtiçi birincil enerji üretimi içerisinde kömürün payı %57,1’dir. Üretilen diğer kaynaklar ise, sırasıyla, %16,5 odun, hayvan ve bitki artıkları, %9,8 hidrolik kaynaklar, %7,8 petrol, %3,2 doğal gaz ve %5,6 diğer kaynaklar şeklindedir. İthal edilen kaynakların dağılımında ilk sırayı %43,6 ile petrol almaktadır. Petrolü %37,9 ile doğalgaz ve %16,7 ile kömür izlemektedir. Türkiye elektrik üretiminde hammadde dağılımı Şekil 2.16’da verilmiştir (Türkyılmaz, 2011).



Şekil 2.16: Türkiye elektrik üretiminde hammadde dağılımı.

Enerji kaynakları bakımından net ithalatçı ülke konumunda olan Türkiye’de 2009 yılında ise enerji arzının petrolde ve doğalgazda %90’ların üzerinde, kömürde ise %20 oranında olmak üzere toplam %74’lük bölümü ithalat ile karşılanmıştır (Türkyılmaz, 2011).

#### 2.4.3. Türkiye’deki Önemli Kömür Rezervleri

Türkiye’de kömür genel olarak linyit ve taşkömürü başlıkları altında değerlendirilmektedir. Taşkömürü rezervlerinin büyük kısmı TTK tarafından, linyit rezervleri ise EÜAŞ, TKİ ve Özel Sektör tarafından işletilmektedir. Taşkömürü yataklarımız sadece Zonguldak bölgesinde yataklanmış olup ısıl değeri 6.200-7.200 kcal/kg arasında değişmektedir. Ülkemizdeki taş kömürü yatakları ve özellikleri genel olarak Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1: Türkiye’deki önemli taş kömürü yatakları.

Yeri	Rezervler (1.000 ton)					
	İl	İlçe	Görünür	Muhtemel	Mümkün	Toplam
Zonguldak		Ereğli	11.241	15.860	7.883	34.984
Zonguldak		Merkez	351.272	294.043	239.029	884.345
Bartın		Amasra	172.107	115.052	121.535	408.694
Bartın		Kurucaşile		1.000	1.000	
Kastamonu		Azdavay		5.593	5.593	
<b>Toplam</b>				<b>534.620</b>	<b>431.548</b>	

Ülkemizdeki linyit rezervlerinin büyük kısmı 1976–1990 yılları arasında bulunmuştur. 1990 sonrasında ise kapsamlı rezerv geliştirme etüt ve sondajları maalesef yapılamamıştır. Enerjide dışa bağımlılığımızın giderek artması yanında pahalı oluşu, yerli kaynaklara daha fazla yönelmemizi gerektirmiş ve bu anlayışla “Linyit Rezervlerimizin Geliştirilmesi ve Yeni Sahalarda Linyit Aranması” Projesi TKİ koordinatörlüğünde, teknik olarak MTA’nın öncülüğünde ve sorumluluğunda, ETİ Maden, TPAO, EÜAŞ, TTK ve DSİ’nin katılımı ile 2005 yılında başlatılmıştır. 2005 yılından günümüze kadar yürütülen proje kapsamında Trakya’da 495, Manisa-Soma-Eynez’de 170 ve Eskişehir-Alpu’da 275 milyon ton, Afşin-Elbistan’da 1,915 ve Konya-Karapınar’da 1,28 milyar ton olmak üzere toplam 4,135 milyar ton yeni linyit rezervi tespit edilmiştir. Uzun yıllardır 8,3 milyar ton olarak bilinen linyit rezervlerimizde bu vesile ile 12,4 milyar tona kadar ulaşmıştır. Ancak, işletme yapılan linyit sahalarında bugüne kadar yapılan kömür üretimini dikkate aldığımızda, bugün için ülkemiz linyit rezervlerinin yaklaşık 11,5 milyar ton civarında olduğu ortaya çıkmaktadır. Yapılan bu arama çalışmaları sonucunda bu araziler ruhsatlanarak ilgili kurumlara ve özel sektöre dağıtılmıştır. Buna göre tüm linyit rezervlerinin yaklaşık 4,82 milyar tonu EÜAŞ, 2,45 milyar tonu TKİ, 2,6 milyar tonu MTA Genel Müdürlüklerinde ve yaklaşık 1,55 milyar tonu ise özel sektör kontrolüne geçmiştir. Türkiye’nin bölgesel olarak mevcut linyit rezervleri ve potansiyel sahaları Tablo 2.2’de, sahalara göre rezerv miktarları ise Tablo 2.3’te verilmiştir.

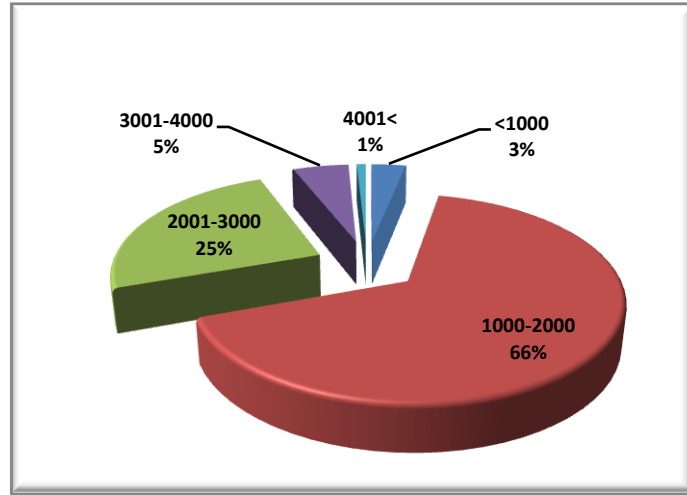
**Tablo 2.2:** Türkiye’nin bölgesel olarak mevcut linyit rezervleri ve potansiyel sahaları.

<b>Mevcut Önemli Linyit Yatakları</b>	<b>Toplam Rezerv (Milyon ton)</b>
Marmara Bölgesi	825
Karadeniz Bölgesi	215
İç Anadolu Bölgesi	1325
Güneydoğu Anadolu Bölgesi	53
Ege Bölgesi	2014
Doğu Anadolu Bölgesi	3580
Akdeniz Bölgesi	363
<b>Genel Toplam</b>	<b>8375</b>

**Tablo 2.3:** Türkiye’de sahalara göre rezerv miktarları.

Saha Adı	Rezerv (bin ton)	Kömür Tüketim Kapasitesi (bin ton/yıl)	Kurulu Güç (MW)
Çankırı-Orta	51.000	1.500	100
Bingöl-Karlıova	26.000	1.115	100
Tekirdağ-Saray	129.000	2.500	300
Adana-Tufanbeyli	214.000	7.200	600
Bursa-Keles-Davutlar	67.000	1.200	160
Bolu-Göynük	39.000	1.200	150
Şırnak-Silopi	50.000	300	100
Manisa-Eynez	100.000	3.350	600
Kütahya-Derin Sahalar	100.000	2.500	300
Çayırhan 5-6	75.000	2.500	320
Elbistan	2.818.000	86.400	6.300
Konya-İlgin	152.000	3.100	500
Adıyaman-Gölbaşı	49.000	1.400	125
<b>T O P L A M</b>	<b>3.870.000</b>	<b>114.265</b>	<b>9.655</b>

Kalite açısından da ülkemizdeki linyitler dünya standartlarında belirtilen üst ısıl değer in oldukça altında kalmaktadır. Ülkemiz linyit rezervleri kalorifik değeri 1.000 kcal /kg ile 4.200 kcal /kg arasında değişiklik göstermektedir. Mevcut linyit rezervlerimizin kalite oranları Şekil 2.17’de verilmiştir (Türkyılmaz, 2011).

**Şekil 2.17:** Türkiye’de bulunan linyit yataklarının ısıl değerleri (kcal/kg).

Kömür üretim miktarları açısından ülkemizde, 2009 yılı itibariyle kömür üretimi 66,7 milyon ton linyit ve 2,9 milyon ton taşkömürü olmak üzere toplam 69,6 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. 1980’li yıllardan itibaren sürekli bir azalış eğilimine giren



taşkömürü üretimleri 2004 yılında 1,9 milyon tona kadar gerilemişti. Bu tarihten sonra tekrar hareketlenen üretim 2009 yılında 2,9 milyon ton düzeyine kadar yükselmiştir.

Benzer bir azalış-artış çizgisi linyit üretimleri için de söz konusudur. Linyit üretimleri, özellikle 1970'li yılların başlarından itibaren, petrol krizlerine bağlı olarak elektrik üretimine yönelik linyit işletmeleri yatırımlarının başlaması ile hızlanmıştır. 1970 yılında yaklaşık 5,8 milyon ton olan linyit üretimi 1998'de yaklaşık 65 milyon tonu yakalamıştır. Ancak, bu tarihten itibaren popüler bir hal alan doğalgaz alım anlaşmaları nedeniyle, sürekli bir iniş yaşayan linyit üretimi 2004 yılında 43,7 milyon ton ile en düşük seviyesini görmüş, ancak bu tarihten sonra tekrar yükselmeye başlamış ve 2009 yılı üretimi 66,7 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Zaten ülkemizde doğalgaz santrallerinin kurulum grafiğine baktığımızda 2000'li yılların başında büyük bir atılım gerçekleştiği görülmektedir (Türkyılmaz, 2011).

#### **2.4.4. Marmara ve Trakya Bölgesi Kömürleri**

Ülkemiz kömürlerinin büyük bölümü linyit sınıflamasında yer alıp düşük ısıl değere sahiptir ve yüksek oranda kül, uçucu madde, nem, kükürt içermektedir. Linyitlerin yaklaşık % 80'i sanayi ve türevlerinde kullanıma uygun olmadığından termik santraller ülkemiz için ayrı bir önem taşımaktadır. Türkiye'de Zonguldak Taşkömürü Havzası dışında yer alan tüm kömürlerin linyit olarak tanımlanması gelenek haline gelmiştir. Ancak son çalışmalarda killi alt bitümlü kömür olarak değerlendirilen Tunçbilek ve Soma linyitleri yıkama tesislerinden geçerek piyasaya sunulmakta olup kalite açısından ithal kömürler ile rekabet edebilecek özelliklerdedir (Coşar, 1997)

Ayrıca ülkemizde genellikle Miyosen yaşlı linyit havzalarında, linyitin üzerinde yer alan bitümlü şeyller de önemli bir potansiyel oluşturmaktadır. Seyitömer havzasında kömür ile birlikte bulunan ve kömür işletilirken dekapaj malzemesi olarak atılan bitümlü kayaçların, akışkan yataklı yakma sistemine sahip santralde linyit ile birlikte değerlendirilmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiş olup belirli oranlarda karıştırılarak kullanılabilmesi ortaya konmuştur (Şengüler,2000)

#### 2.4.5. Trakya Bölgesi Kömürleri

Trakya Tersiyer havzasında kömür oluşumları Oligosen yaşlı Danişmen Formasyonu içerisinde yer alır. Trakya Tersiyer havzasını iki bölgeye ayırarak değerlendirmek mümkündür. Kuzey Trakya Bölgesi olarak adlandırılabilir alanda linyit oluşumları Istranca Masifi eteklerinde yer almaktadır. MTA Genel Müdürlüğü havzada 1950-1980 yılları arasında yoğun çalışmalar yapmış olup tüm havzada sondajlı aramalar sonucunda 520 milyon tondan fazla rezerv tespit etmiştir. İstanbul-Silivri-Sinekli sahasında, 114 milyon ton görünür, 76 milyon ton muhtemel olmak üzere toplam 190 milyon ton rezerv; Tekirdağ-Saray-Küçük Yoncalı sahasında, 42 milyon ton görünür (açık işletme), 32 milyon ton görünür (kapalı işletme) olmak üzere toplam 74 milyon ton görünür rezerv; Tekirdağ-Saray-Safaalan sahasında, 24 milyon ton görünür (açık işletme), 22,5 milyon ton görünür (kapalı işletme) olmak üzere toplam 46,5 milyon ton görünür rezerv; Tekirdağ-Saray-Edirköy sahasında, 16 milyon ton görünür (açık işletme), 5 milyon ton görünür (kapalı işletme) olmak üzere toplam 21 milyon ton görünür rezerv tespit edilmiştir. Kabul edilen kriterler çerçevesinde Tekirdağ-Saray havzasının işletilebilir kömür rezervi 65.588.929 ton olarak saptanmıştır (Şengüler,2000).

Kuzey Trakya havzasında 2005 yılında 60 km<sup>2</sup> lik alanda 8 adet sondaj tamamlanarak yeni potansiyel alanlar belirlenmiştir. Bunlardan sadece 3 tanesi yardımıyla 8 milyon ton rezerv görünür hale getirilmiş olup çalışmalar devam etmektedir. 2005 yılından bu yana yürütülen sondajlı çalışmalar ile yeni ruhsat alanlarında 350-550 m ile 550-700 m derinliklerde, 0.50-4.00 m arasında değişen damar kalınlığına sahip, 2000-3000 kcal/kg arasında ısı değerlerinde kömürler belirlenmiştir. Etüt ve sondajlı çalışmalar sonucunda havzada önemli ölçüde rezerv artışları beklenmektedir. Güney Trakya havzasında kömür oluşumları Keşan, Malkara, Uzunköprü ve Meriç sahaları ile anılmaktadır (Şengüler, vd., 2000, Sütçü vd. ).

Trakya Havzasının kuzeyinde ve güneyinde yüzeyleyen linyitler, havzanın ortasına doğru tedrici olarak derinleşmekte ve havzanın orta kesimlerinde 10.000 m ye ulaşan çökel istif içerisinde, 700 m'yi aşan derinliklerde yer almaktadır. Ağaçlı linyit havzası İstanbul Boğazı'nın kuzeyinde bulunan Kilyos' tan başlayarak batıda Terkos Gölü' ne kadar uzanan yaklaşık 25 km<sup>2</sup> lik bir alanı kapsamaktadır. Havzada kömür varlığı 1909 yılından beri bilinmekte olup 1919 yılından bu yana işletilmektedir. Üst Oligosen-Alt

Miyosen yaşı Ağaçlı linyitleri 3400 kcal/kg ısı değere sahiptir. Bölgede Ağaçlı, Ağıldere, Ayazmadere, Ergeneçiftlik ve Kumtepe dolaylarında mostraları vardır. Limnik-flüvial çökeller içinde yer alan linyitin damar kalınlığı 3.00 m ye ulaşmakla beraber genellikle 1.70-2.00 m arasındadır. Günümüzde rezervin büyük bölümü tüketilmiştir (Şengüler, vd., 2000).

## **2.5. ELEKTROKOAGÜLASYON PROSESİ KAPSAMINDA GERÇEKLEŞTİRİLEN ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR**

20. yy.'da EC prosesi ile atık su arıtımı çok fazla bilinmemekteydi ve kısıtlı koşullar altında denemeleri yapılmıştı. Son on yılda, bu teknoloji, metal içeren endüstriyel atık su arıtımında Güney Amerika ve Avrupa'da giderek artan miktarlarda kullanılmaya başlanmıştır (Joffe ve Knieper, 2000; Mollah, vd., 2001).

Elektrokoagülasyonun mermer atıkları üzerinde yapılan bir çalışmada alüminyum (Al) ve demir (Fe) elektrotların kullanıldığı elektrokoagülasyon (EC) prosesi ile işleme atıksuyundan askıda katı madde (AKM) ve bulanıklık giderim verimleri araştırılmıştır. Yapılan çalışmada pH değerinin 9, akım yoğunluğunun yaklaşık 15 A/m<sup>2</sup>, elektroliz süresinin 2 dk olduğu optimum şartlarda paralel-seri bağlı monopolar alüminyum elektrotların kullanıldığı EC prosesi ile %100 AKM giderilmiştir. Paralel-Seri monopolar demir elektrotlarının kullanıldığı EC prosesinde giderim verimi sırasıyla %99.86, %99.94 olarak bulunmuştur. Her iki bağlantı türünde monopolar demir elektrotlar için optimum pH değeri 8, elektroliz süresi 2 dk ve akım yoğunluğu paralel-seri bağlantı türleri için sırasıyla 10, 20 A/m<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir (Solak, 2007)

İnce taneli kaolin ve kuvars minerallerinin elektrokoagülasyon performansının araştırıldığı bir çalışmada bir litre suda 0.20 g kaolinit ve yine 1 litre suda 0.32 gr kuvarsın kolloid olarak dağıtılmasıyla, sentetik olarak bulanık çözeltiler hazırlanmıştır. Hazırlanan çözeltilerdeki bulanıklık iki yolla giderilmeye çalışılmıştır. Birinde, alüminyum metali anot olarak kullanılıp alüminyum iyonları elde edilmiş ve bulanıklık yapan tanecikler koagüle edilmiş; diğesinde, alüminyum sülfat çözeltisi kullanılarak bulanıklık yaratan tanecikler koagüle edilmiştir. Çalışmada, süspansiyon pH'si, elektrik potansiyeli, akım yoğunluğu, elektrokoagülasyon zamanı ve alüminyum miktarları gibi

değişkenlerinin etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada aynı zamanda, çalışılan pH aralıkları ve uygulanan alüminyum miktarları göz önüne alınarak, elektrokoagülasyon ile konvansiyonel koagülasyon yöntemleri karşılaştırılmıştır. Elektrokoagülasyon ve koagülasyon arasındaki karşılaştırma sistemde çözünen alüminyum miktarına göre yapılmış ve aynı alüminyum miktarlarında, süspansiyonlardan ince taneli maddelerin giderilmesinde, elektrokoagülasyon ve koagülasyonun aynı derecede etkili olduğu bulunmuştur. Bulanıklığın giderilmesinde, koagülasyon geniş bir pH aralığında (pH 5-8) etkilidir. Elektrokoagülasyon yönteminde bulanıklığın en fazla giderilmesi pH 9'da sağlanmıştır. Her iki yöntemde, bulanıklığın en çok giderilmesini sağlayan pH'lerde kaolinit ve kuvars taneciklerinin zeta potansiyelinin sıfıra yaklaştığı bulunmuştur. Elektrokoagülasyon ve koagülasyon mekanizması, yüzey yükünün nötralizasyonu ve/veya alüminyum hidroksit çökeleğinin oluşması ile açıklanmıştır. Deneysel sonuçlar, elektrokoagülasyonda pH tamponlama olayının olduğu görülmüştür. Elektrokoagülasyon kinetiği, çok hızlı bulunmuş (<10 dk) ve ikinci derece hız denklemi ile modellenmiştir (Kılıç, 2009)

Dispers boya atıklarının elektrokoagülasyonu nu konu alan çalışmada, sentetik olarak hazırlanan dispers boya banyo atık sularının ( $KO_0 = 3300$  mg/L; renk olarak absorpsiyon değerleri  $A_{436,0} = 0.992$  cm<sup>-1</sup>;  $A_{525,0} = 0.910$  cm<sup>-1</sup>;  $A_{620,0} = 0.616$  cm<sup>-1</sup>; pH<sub>0</sub> = 3.0) alüminyum, paslanmaz çelik ve alüminyum-paslanmaz çelik (hibrit) elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyonu renk ve KOİ giderimi esas alınarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar alüm, demir(II) sülfat ve demir(III) klorür koagülantları ile yapılan koagülasyon deneyleri ile karşılaştırılmıştır. Elektrokoagülasyon için elektrolit (NaCl) konsantrasyonu, uygulanan akım yoğunluğu ve başlangıç pH'larının etkileri araştırılırken, koagülasyon deneylerinde koagülant dozunun etkisine bakılmıştır. Alüminyum elektrotlarla yürütülen elektrokoagülasyon deneylerinde, paslanmaz çelik ve alüminyum-paslanmaz çelik hibrit elektrotlarla yapılan deneylere göre daha kısa zamanda daha yüksek renk ve KOİ giderimi elde edilmiştir.. Bununla beraber KOİ ve renk giderimleri diğer elektrot malzemeleri ile yapılan elektrokoagülasyon deneylerine göre daha kısa zamanda tamamlandığından daha az çamur oluşmuştur . Aynı şekilde alüm ile koagülasyon deneylerinin sonucunda demir(II) sülfat ve demir(III) klorür kullanılarak yapılan koagülasyon deneylerine göre daha yüksek giderim verimleri elde edilmiştir (Türkoğlu, 2007)

İzmit evsel ve tehlikeli atık stok sahasından alınan sızıntı suyu numuneleri üzerinde elektrokoagülasyon yöntemi denenerek, sızıntı suyu arıtımı için uygunluğu araştırılmıştır. Bu amaçla öncelikle klasik kimyasal koagülasyon (pıhtılaştırma) yöntemi, elektrokoagülasyon yöntemi ile karşılaştırılarak değerlendirilmiş ve tüm parametreler için elektrokoagülasyon ile arıtmada daha yüksek verim alındığı görülmüştür. Ayrıca yöntemin kimyasal maddeye ihtiyaç duymaması ve daha az çamur oluşumu gibi avantajları sızıntı suyu arıtımında, alternatif bir arıtma yöntemi olarak düşünülmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Elektrokoagülasyon yöntemi diğer tüm elektrokimyasal yöntemlerde olduğu gibi, prosesin işleyişine müdahale edilerek verimin arttırılabileceği, gelişime açık sistemlerdir. Çalışmada yöntemin bu özelliğine dayanılarak, sistem deniz suyu ile zenginleştirilmiş ve deniz suyunun arıtma verimine etkisi araştırılmıştır. Farklı oranlarda kullanılan deniz suyunun, çoğu parametre için giderim verimini arttırdığı ancak daha etkin kullanılabilmesi için bu yöndeki çalışmaların geliştirilerek devam etmesine gerek duyulduğu belirtilmiştir (Öztürk, 2006)

Tekstil endüstrisi atıklarının artımının araştırıldığı çalışmada, elektrokoagülasyon ile tekstil boyası çözeltilerinden (Dispersol Red C-4G 150) boya giderimi araştırılmıştır. Bu amaçla monopolar paralel bağlı alüminyum elektrotların kullanıldığı bir elektrokimyasal reaktör tasarlanmıştır. Boya giderimi üzerine pH, iletkenlik, akım yoğunluğu, zaman, konsantrasyon gibi parametrelerin etkisi araştırılmıştır. Ayrıca enerji tüketimi ve çözülmüş elektrotun giderme kapasiteleri incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda elektrokoagülasyonun boya gideriminin de oldukça etkili olduğu görülmüştür (Gür, 2008)

GLI Tunçbilek-Ömerler lavvarı tikiner girişinden alınan numune üzerinde, 4 farklı tipte anyonik flokülant ve  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  elektrolitleri kullanarak katıların çökme davranışları incelenmiştir. Tikiner girişinden alınan malzeme kuru baza göre %17,1 karbon ve %70,2 kül içermekte olup, alt ısıl değeri 2245 kcal/kg'dır. Gerçekleştirilen çökme deneyleri sonucunda, elektrolitlerin uygun flokülantlarla beraber kullanılması durumunda çökme hızlarını arttırdığı tespit edilmiştir. 25 gr/t-katı flokülant ve 0,05 M  $\text{Ca}^{+2}$  ile flokların çökme hızlarında %38 oranında artma hesaplanmıştır. Çöktürme hızında sağlanmış olan artışın, elektrolitlerin kil yüzeyi ile flokülant arasında köprü

vazifesi görmesinin yanında, taneler arasındaki itme kuvvetlerini azaltması ile geliştiği tespit edilmiştir (Bentli, 2010)

Elektrokoagülasyon (EC) ve kimyasal koagülasyon (CC) prosesi ile içme suyundan bulanıklık giderimi araştırıldığı bir çalışmada, arıtma verimliliğinin ölçülmesinde bulanıklık giderme verimleri dikkate alınmıştır. Demir ve alüminyum elektrotların kullanıldığı EC prosesinde elektrotlar monopolar paralel bağlanarak, bulanıklık giderimi üzerine; elektrot türü, başlangıç pH'ı, akım yoğunluğu ve elektroliz süresinin etkisi araştırılmıştır. Her iki elektrot materyali için optimum işletme koşulları başlangıç pH 7,9, akım yoğunluğu 10 A/m<sup>2</sup> ve elektroliz süresi 3 dakika olarak bulunmuştur. Bu koşullarda, bulanıklık giderme verimleri ve işletme maliyetleri alüminyum ve demir elektrotları için sırasıyla % 99, % 96, 0,0234 \$/m<sup>3</sup> ve 0,0247 \$/m<sup>3</sup>'tür. CC prosesinde ise koagülan madde türü, başlangıç pH ve koagülan dozajı incelenmiştir. Ayrıca proseslerin doğrudan maliyetleri hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Alüminyum sülfat, demir sülfat ve demir klorürün kullanıldığı koagülasyon prosesinde optimum koşullar tüm koagülan maddeler için başlangıç pH 7,9 ve koagülan dozu 20 mgMe+/L olarak bulunmuştur (Özyonar, Karagözoğlu, 2011)

Elektrokimyasal proseslerden olan EC, elektroliz sonucu anodun çözünmesiyle temizlenecek atık su içerisinde metal hidroksit floklarının oluşturulmasından ibaret olan bir prosestir (Pouet ve Grasmick, 1995; Uğurlu, 2004). EC, çok küçük koloidal tanecikleri uzaklaştırabilme, nispeten daha az çamur üretme, biyolojik olarak bozunmayan organik maddeleri uzaklaştırabilme veya biyolojik arıtıma hazır hale getirme, koagülant dozajının kolayca kontrol edilebilmesi, hidroksitler şeklindeki çökelekler veya floklar üzerinde adsorpsiyonla ağır metal iyonlarını uzaklaştırabilme, sürekli pH kontrolü gerektirmeme, iyi dizayn edilmiş sistemlerde %90 civarında yüksek verim elde edilebilme, yaklaşık 10 dk gibi kısa temas süresi gerektirme ve nispeten düşük yatırım maliyeti gerektirme (Do ve Chen, 1994; Vik vd., 1984; Uğurlu, 2004), alışılmış koagülasyon-flokülasyon uygulamalarına kıyasla, elektriksel alanın varlığından dolayı en küçük koloidal parçacıkları uzaklaştırabilme (Pouet ve Grasmick, 1995; Uğurlu, 2004) gibi avantajlara sahiptir. Ancak bu proses, katotta üretilen H<sub>2</sub> gazının çökelmeyi engellemesi, arıtılan sudaki demir ve alüminyum iyonlarının konsantrasyonlarının nispeten yüksek olması, üretilmiş çözünmeyen hidroksitlerin

elektrotlar arasında birikmesi gibi dezavantajlara da sahiptir (Do ve Chen, 1994; Vik vd., 1984; Uğurlu, 2004, Solak, 2007). Bu dezavantajların çeşitli şekillerde giderilebileceği ve konvansiyonel atık su arıtım proseslerine alternatif olarak sunulabileceği düşünülmektedir.

Yine bir diğer çalışmada elektrokoagülasyon ve elektroredüksiyon yöntemleri kullanılarak atık sulardan nitrit ve nitratın belirgin oranda giderilebileceği belirtilmiştir. Sonuç olarak, kirliliği ortadan kaldırmak ve atık suları temizlemek için tasarlanan elektrokimyasal proseslerin ümit vaat etmekte olduğu, süre, enerji ve buna benzer diğer parametrelerin uygun şekilde kontrol edilmesi ile çevreye entegrasyon konusunda herhangi bir problemin yaşanmayacağı ileri sürülmektedir (Koparal ve Öğütveren, 2002; Uğurlu, 2004; Solak, 2007).

Kağıt üretim tesisi atık sularının koagülasyon-elektroflotasyon prosesi ile arıtımı üzerine yine birtakım çalışmalar gerçekleştirilmiştir. En iyi giderimin sağlandığı optimum şartlar belirlenmeye çalışılmıştır. Bunun için, ortogonal merkezi kompozit dizaynı ele alınmıştır. Kesikli ve sürekli çalışmalar yapılmıştır. Kesikli çalışmalar ile koagülant konsantrasyonunu, pH ve akım yoğunluğunu optimize edilmesi amaçlanmıştır. Akım yoğunluğu AKM (Askıda katı madde) giderimin de önemli parametredir. Teorik analizlerle, deneysel analizler arasında uyumlu bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Sürekli akışlı çalışmada ise temas süresinin optimize edilmesi amaçlanmıştır. AKM giderim veriminde %95'i aşılmıştır. Numunenin fizikokimyasal karakterizasyonu belirleme çalışmaları kesikli ve sürekli çalışmalardan önce ve sonra olmak üzere değerlendirilmiştir. Bu karakterizasyon, pH, iletkenlik, tuzluluk, BOİ, KOİ, AKM ve klorürü içermektedir (Mansour vd., 2007, Solak, 2007).

Araştırma sonuçları EC'nin atık suyun pH değerini nötralize edebildiğini ve birtakım mekanizmaların pH'ya bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir (Chen vd., 2000). EC prosesi ile Fe elektrotları kullanılarak atık sulardan fosfat giderimine pH'nın etkisi üzerine yapılan çalışmada pH 3-9 arasında çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. Fosfat giderim verimi ve enerji ihtiyacı üzerine başlangıç pH değerinin etkisi analiz edilmiştir. Edinilen sonuçlardan, optimum başlangıç pH değeri 3 olarak bulunmuştur. Bunun yanı sıra,

deneyler kontrollü sistem pH'sında gerçekleştirilmiştir. Sistem değişkenleri sabit pH'da analiz edilmiş, deneysel çalışmalar sonucunda optimum sistem pH'sının 7.0 olduğu tespit edilmiştir. Güvenilir olan ve ucuz maliyet sunan EC, gündemde ve ilgi çeken atık su arıtım prosesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu teknoloji, uygulanan potansiyele bağlı olarak tükenen anodun oksidasyonu ile yerinde koagülant üreten, eşzamanlı olarak da katotta hidrojen gazı oluşumunu mümkün kılarak flotasyon ile kirlilik giderim imkanı sağlayan bir teknolojidir (İrdemez vd., 2006).

Kil ile oluşan bulanıklık gideriminin kimyasal koagülasyon ve EC prosesi ile karşılaştırılması amacı ile yapılan başka bir çalışmada, kimyasal koagülasyon alümin kullanılarak jar testleriyle değerlendirilmiştir. Asidik koşullar altında (pH 4) ve düşük koagülant seviyelerinde (4 mg Al/l) kolloidal kil partiküllerini etkili bir şekilde destabilize etmiştir. İzoelektrik noktanın meydana geldiği pH 7.8'de, orta alümin dozaj seviyelerinde (4-20 mg Al/l) yüksek verimli koagülasyon gözlenmiştir. Kirletici giderim hızını belirleyen işletme akımı ile kesikli EC reaktöründe iki işletme aşaması (reaktif ve stabil) ortaya konmuştur. Reaktif aşaması sırasında meydana gelen izoelektrik noktada, sorpsiyon mekanizması ile agregasyon gözlenerek en büyük bulanıklık indirgenmesi gerçekleşir. Stabil aşama sırasında, alüminyum hidroksitin presipitasyonu devam eder ve bulanıklıktaki azalma süpürme koagülasyon mekanizması ile gerçekleştiğini göstermiştir. En yüksek akım (2A), kirletici seviyesini çok kısa sürede düşürmüştür, yüksek verime rağmen 30 dk sonrasında %1 artık bulanıklık en düşük akımda (0.25 A) giderilmiştir (Holt vd., 2002, Solak, 2007).

Bakır, kurşun ve kadmiyum giderimine EC prosesinin etkinliğini tespit etmek için kimyasal, elektrokimyasal ve akış şartları optimize edilmiş başka bir çalışmada, demir elektrotlarının kullanıldığı elektrokimyasal proses, 12 mg/l bakır, 4 mg/l kurşun, 4 mg/l kadmiyum içeren sentetik atık su çözeltisine uygulanmıştır. Proses için optimum şartlar pH 7.0, akış hızı, 6.3 cm<sup>3</sup>/dk, ve 31 A/m<sup>2</sup>-54 A/m<sup>2</sup> arasındaki akım yoğunluklarında belirlenmiştir. Elektrot geometrik alan ve elektroliz süresi kritik değerlere ulaştığında bakır giderimi maksimum seviye olan %80'e ulaşmıştır. Akım yoğunluğu ve oluşan çamurun kütlesi arasında lineer ilişki olduğu saptanmıştır. Ayrıca, spesifik enerji ihtiyacı ve akım yoğunluğu arasında yine lineer ilişki olduğu



belirlenmiştir. Araştırma sonuçları, endüstriyel ölçekli elektrolitik reaktörün gelişimi için önemli sonuçlar içermektedir (Escobara vd., 2006, Solak, 2007).

Patates cipsi fabrikası atık sularının EC prosesi ile arıtılması araştırıldığı bir başka çalışmada ise, deneylerde öncelikle optimum işletme şartlarının tespiti için elektrot türü, pH, akım yoğunluğu ve temas süresi gibi parametreler üzerinde durulmuştur. Çalışmada Al ve Fe elektrotlar kullanılmış, Al, Fe elektrotuna göre, daha hızlı KOİ, bulanıklık ve AKM giderimi sağlamıştır. KOİ giderim verimi 40 dk'dan az temas süresinde %60, bulanıklık giderim verimi 40 dk'dan az temas süresinde %98 olarak tespit edilmiştir. EC prosesinde KOİ giderim verimi kinetikleri makro-kinetik modeli ile tanımlanmıştır. Ayrıca, çalışmada EC' nin enerji maliyeti ve Al elektrotu ihtiyacına göre materyal maliyeti gibi işletme maliyetleri araştırılmıştır. İşletme maliyetleri 20- 300 A/m<sup>2</sup> ve 5-40 dk için sırasıyla 0.48-5.42 \$/m<sup>3</sup> ve 0.62-6.32 \$/m<sup>3</sup> bulunmuştur. Sistem enerji ihtiyacı 8 dk'nın altında tipik işletme koşulları altında 4 kWs/m<sup>3</sup>'tür (Kobyta, Solak, 2007).

Kombine elektrokoagülasyon ve elektroflotasyon prosesleri tasarlandığı bir çalışmada, tasarlanan reaktörle atık su çözeltisinden toplam krom giderimi araştırması yapılmıştır. İlk aşamada Cr<sup>6+</sup>'nin Cr<sup>3+</sup>'ya indirgenmesi, ikinci aşamada da toplam kromun 0.5 mg/l'tin altına düşürülmesi amaçlanmıştır. Cr<sup>6+</sup>'nin indirgenmesi aşamasında asidik şartlarda çalışılmıştır ve nötral pH değerlerinin, Cr(OH)<sub>3</sub> ve Fe(OH)<sub>3</sub>'ün presipitatlarının koagülasyonu için yararlı olabileceği bulunmuştur. Fe(OH)<sub>3</sub>'ün oluşumu koagülasyon ünitesine basınçlı hava verilerek sağlanmıştır. Hava sadece elektriksel olarak üretilen Fe<sup>2+</sup>'yi okside etmemiş aynı zamanda partiküllerin koagülasyonu için suyun iyi bir şekilde karışmasına yardımcı olmuştur. 2 aşamalı elektroflotasyon prosesi katıları 3 mg/l'ten daha aşağıya ve toplam kromu 0.5 mg/l'ten daha düşük değerlere indirilebilir. Çökelme süresi yaklaşık olarak 1-2 saat civarındadır. Arıtım için optimum şartlar şu şekilde belirlenmiştir; Yük yüklemesi yaklaşık olarak 2.5 F/m<sup>3</sup>, koagülasyon ünitesinde pH değeri ise 5-8, enerji ihtiyacı 1.5 mS/cm'lik iletkenlikte 1.0 kwsa/m<sup>3</sup>'ten daha azdır. Al tuzları sisteme ilave edilir veya koagülasyon ünitesinde elektrolizle üretildiğinde, arıtılmış atık su filtrasyon olmaksızın deşarj edilebilir (Gao vd., 2005).

EC prosesi ile atık su arıtımı üzerine yapılmış bir takım laboratuvar çalışmalarında bazı önemli parametreler için ortalama giderim verimleri şöyle bulunmuştur: BOİ giderim verimi  $> \%90$ , toplam askıda katı (kil, silt vb.) giderim verimi  $> \%99$ , yağ-gres giderim verimi  $\%93-99$ , ağır metal (arsenik, krom, kadmiyum, kurşun, nikel, bakır vb.) giderim verimi  $> \%95-99$ , fosfat giderim verimi  $> \%93$ , bakteri ve virüs giderim verimi  $> \%99.99$ 'dur. EC prosesi ile atık su arıtımı sonrasında üretilen çamurun pH değeri 6-7 arasında değişmektedir. Bu pH aralığındaki çamurda bulunan metaller, EPA'nın TCLP (Toxic Classification Leaching Procedure) standartlarına uyum sağlayan oksitler gibi tehlikeli olmayan yapılarda stabilize olurlar. Öte yandan kimyasal presipitasyon sonucu genellikle pH 10'un üzerinde kostik çamur oluşmaktadır. Hidroksitler gibi metal presipitatları, pH 7'ye yakın değerlerde tekrar suda çözünür hale gelecekleri için tehlikeli atık sınıfına giren çamur oluşma ihtimali yüksektir (Solak, 2007).

Tekstil atık suyunun Fe elektrotlarla arıtımında EC prosesi ile kesikli çalışmalar gerçekleştirilen başka bir çalışmada, elektroliz süresi, elektroliz potansiyeli gibi işletim parametrelerinin renk ve KOİ giderim verimi üzerine etkileri araştırılmıştır. 3 dk'lık elektroliz süresi ve 600 mV'luk potansiyel ile  $\%100$  renk,  $\%84$  KOİ giderim verimi elde edilmiştir. Çıkış suyu deşarj standartlarını sağlayacak kadar ve kalitelidir. EC mekanizması zeta potansiyeli ölçümleri ile ortaya konmuştur (Zaroual, 2006, Solak, 2007).

Literatürde yapılan bir diğer çalışmada, Al ve Fe elektrotlarının kullanıldığı EC prosesi ile tekstil atık sularının arıtılmasında maliyet karşılaştırması yapılmıştır. Deneylede paralel ve seri bağlı Al ve Fe elektrotlar kullanılmıştır. Elektrik, tükenen elektrot, iş gücü, çamur taşıma, işletme, yıpranma payı gibi doğrudan ve dolaylı maliyet parametreleri  $1000 \text{ m}^3/\text{gün}$ 'lük kapasiteye sahip tekstil işletmesinden alınan  $1 \text{ m}^3$  atık su için toplam maliyetin hesaplanmasında göz önünde bulundurulmuştur. Sonuçlar, MP-P (Monopolar-Polar) sisteminin Al ve Fe için en çok maliyet sunan sistem olduğunu göstermiştir. Bu elektrotlar KOİ ve bulanıklık giderimin de benzer sonuçlar sergilemiştir, fakat Fe elektrotu için pH7, Al elektrotu için pH5 değerlerinde tekstil atık suyundan KOİ ve bulanıklık giderimi uygun olarak tespit edilmiştir.  $30 \text{ A}/\text{m}^2$ 'lik akım yoğunluğunda, 15 dk'lık işletme süresinin Al ve Fe elektrotlar için yeterli bulunmuştur. Sonuç olarak EC prosesi tekstil atık sularından KOİ ve bulanıklık giderimin de kimyasal

koagülasyona göre hızlı olması, daha az materyal harcanması, daha az çamur üretimi anlamında daha verimli olduğu belirlenmiştir. Optimum değerlerde EC prosesi kimyasal koagülasyon prosesine göre 3.2 kez daha ucuz olduğu tespit edilmiştir (Bayramoğlu, Solak, 2007 ).

Kil içeren çözeltilerden kil partiküllerinin giderimi, 7,1 litrelik bir reaktörde, 0,25-2 akım ve kirletici yükü 0,1-1,7 g/l yapılmıştır (Holt *et al.*, 2002). Kesikli bir elektrokoagülasyon reaktörün matematiksel olarak analizi gerçekleştirilmiştir. Al elektrotların kullanıldığı sistemde 0,25 A giderme verimi %86, 2 A ise %40 düzeyde, flotasyon ve koagülasyonun bir arada aynı sistemde gerçekleştiği belirtilmiştir. Giderme kinetiklerine birinci dereceden olduğu, ancak bir lag fazının olduğu bu durumda EC 'nın iki aşamalı bir kinetik model yaklaşımı sergilediği görülmüştür. EC 'de 21 adet elektrot ve yüzey alanı 0,15 m<sup>2</sup> olup, sistem 0-40 V ve 0-40 A işletilmiştir. KOİ (kimyasal oksijen ihtiyacı), AKM (askıda katı madde) ve türbidite giderim verimleri sırasıyla %75, %85 ve %90 olarak bulunmuştur.

EC ile reaktif tekstil boyası (Remazol Red RB 133) çözeltilerinden renk giderimi (Can *et al.*, 2002) ve tekstil atık sularından KOİ ve türbidite giderimi araştırılmıştır (Kobya *et al.*, 2003). Bu amaçla monopolar paralel bağlı alüminyum elektrotların kullanıldığı bir elektrokimyasal reaktör tasarlanmıştır. Renk giderimi, KOİ ve türbidite giderimi üzerine pH, iletkenlik, akım yoğunluğu, karıştırma hızı, zaman, konsantrasyon, polielektrolit ilavesi gibi parametrelerin etkisi araştırılmıştır. Ayrıca enerji tüketimi, çözünmüş alüminyumun renk giderme kapasitesi ve çözünmüş alüminyumun KOİ giderme kapasitesi incelenmiştir. Alüminyum elektrotların kullanıldığı elektrokoagülasyon proseslerinde kirleticilerin gideriminin de iki asıl etkileşme mekanizması mümkündür; pH: 4,0-6,5 aralığında monomerik ve polimerik alüminyum hidroksit türlerinin çökelme mekanizması, pH > 6,5 aralığında, ve polimerik alüminyum hidroksit türlerinin boyayı adsorbladığı ifade edilmiştir. Tekstil atık sularının EC'nin renk ve türbidite gideriminin de oldukça etkili olduğu, ancak tekstil atık sularından KOİ (kimyasal oksijen ihtiyacı) gideriminin de ise aynı düzeyde etkili olmadığı görülmüştür. Bu da Al türlerinin çözünmüş KOİ gidermede kısmen etkili olduğunu göstermektedir (Can, 2002).

Bir diğerk çalışmada, EC ile reaktif tekstil boyası çözeltilerinden (Levafix Orange E3 GA) boya giderimi, renk giderimi ve türbidite giderimi araştırılmıştır. Bu amaçla monopolar paralel bağılı alüminyum ve demir elektrotların kullanıldığı bir elektrokimyasal reaktör tasarlanmıştır. Boya giderimi, renk giderimi ve türbidite giderimi üzerine pH, iletkenlik, akım yoğunluğu, karıştırma hızı, zaman, konsantrasyon, polielektrolit ilavesi gibi parametrelerin etkisi araştırılmıştır. Ayrıca enerji tüketimi ve çözülmüş elektrotun giderme kapasiteleri incelenmiştir. Alüminyum elektrotların kullanıldığı elektrokoagülasyon proseslerinde kirleticilerin gideriminin de pH4,0-6,5 aralığında monomerik ve polimerik alüminyum hidroksit türlerinin çökelme mekanizması ve pH > 6,5 aralığında Al(OH)<sub>3</sub> ve polimerik alüminyum hidroksit türlerinin adsorpsiyon mekanizması etkili olmaktadır. Demir elektrotların kullanıldığı deneylerde flok oluşumunda ve boyarmaddeyi absorbe etmekte etkili olan tür Fe(OH)<sub>3</sub> olup, pH8-8,5 aralığında iyi giderme verimlerinin elde edildiği bilinmektedir. Çalışmada da bu aralıkta yüksek türbidite giderimi görülmüştür. Ayrıca boya giderimi için harcanan enerjinin azaldığı ve çözünen elektrotun giderme kapasitesinin de arttığı izlenmiştir. Yapılan çalışmalarda elektrokoagülasyonun boya, renk ve türbidite gideriminin de oldukça etkili olduğu görülmüştür. Özellikle demir elektrot kullanıldığında alüminyuma göre 4 kat yüksek başlangıç konsantrasyonlarında ve daha kısa deney sürelerinde aynı verimlere ulaşmak mümkün olmuştur (Uygun, 2003).

EC sistemleri üzerine alınan ilk patent çalışmasında, anot ve katot geometrileri (plakalar, çubuk, tüp, elek, bilye, akışkan yatak ve küre şeklinde) göz önüne alınmıştır (Dietrich, 1906).

### **3. MALZEME VE YÖNTEM**

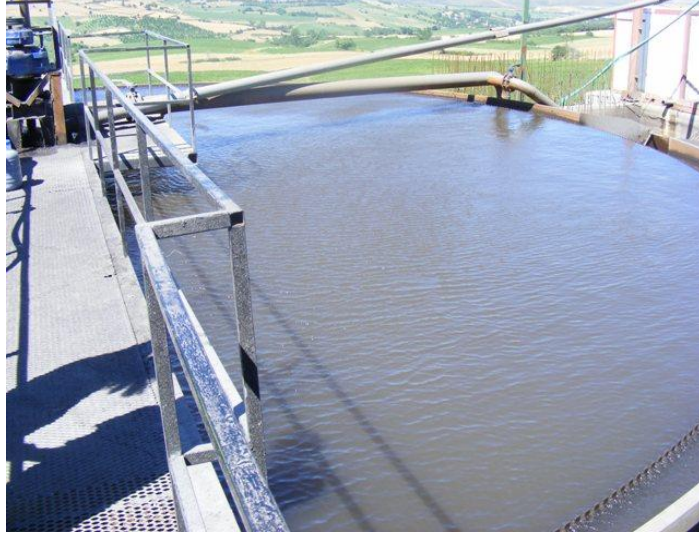
#### **3.1. DENEYLERDE KULLANILAN KÖMÜR HAZIRLAMA TESİS ARTIĞI İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER**

##### **3.1.1. Genel Bilgiler**

Çalışmalarda kullanılan kömür hazırlama tesis artığı Tekirdağ ilinde faaliyet gösteren özel bir kömür işletmesinin lavvar tesisinden elde edilmiştir. Lavvar tesisine bitişik sahadaki ocaktan üretilen maden kömürü oluşum özelliklerine bağlı ve kömür damarlarının ara kesmeli olması nedeniyle yıkama-zenginleştirme işlemleri amacı ile saatte yaklaşık 250 ton ve yılda 1.800.000 ton/yıl kapasiteli lavvar tesisinde (kırmaleme-yıkama-kurutma) zenginleştirilip torbalama işlemine tabii tutulduktan sonra satışa sunulmaktadır. İşletme açık ocak yöntemi ile çalışmaktadır. Zenginleştirme işlemi sırasında tesiste ortaya çıkan ve kömür ve gang mineral (şist) artığı ihtiva eden ince boyutlu atıklar bir tikinere toplanmakta, burada flokülant ilavesi ile susuzlandırma yapılarak temizlenen su tesise yeniden geri beslenmektedir. Özellikle yaz aylarında kuraklık yaşayan bölgede su kaynakları yetersiz olup işletmenin devamlılığı açısından suyun geri kazanılması önem arz etmektedir.

Deneye konu olacak olan numuneler tesisten tikinere gelen besleme boğazından yaklaşık 300 kg numune plastik bidonlara alınarak İstanbul Üniversitesi Maden Mühendisliği bölümü Yüzey Kimyası Analizi Laboratuvarına getirilmiştir.

Söz konusu işletmede çökeltme işleminin yapıldığı tikinere Şekil 3.1'de ve numunelerin alındığı nokta ise Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Lavvar tesisi tikiner.



Şekil 3.2: Numunelerin alındığı tikiner besleme boğazı.

### 3.1.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Deneylerde Ölçüm İçin Numune Alım Tekniği

İşletmeden alınan temsili numunelerin PKO'su %3 olarak tespit edilmiştir. Deney sayısının fazla olması sebebi ile çok fazla su ihtiva eden numuneler serbest çökelime tabii tutularak sıvı kısımları uzaklaştırılmış, kalan katı kısım ise doğal şartlarda kurumaya bırakılarak kurutulmuştur. Homojen hale gelinceye kadar el ile ufalanan numuneler karıştırılarak konileme dörtleme yöntemi ile 30'ar gram paketler halinde deneylere hazır hale getirilmiştir.

Deneyleer 6ncesi homojen halde gruplanmış numunelerden 30'ar gramlık numuneler hassas terazide tartılarak 1000 ml'lik tank içerisinde %3 PKO olacak Şekilde laboratuvar tipi karıştırıcı ile p6lp haline getirilmiştir.

Deneyleer gerçekleştirilirken y6zeyden 2 ve 5 cm derinliklerden parametrelere uygun numune alımları gerçekleştirilmiş, elde edilen numunelerin t6rbidimetrede 3'er kez bulanıklık değerleri 6l6lerek ortalama bulanıklık değeri kaydedilmiştir. Numune alım işleminin 2 farklı derinlikten gerçekleştirilmesinin sebebi hem hızla 6ken 6st zonun, hem de sıkışan alt zonun 6kelme eğrilerinin çizilmek istenmesidir.

### **3.1.3. 6n Tanımlama Analizleri**

Koag6lasyon ve elektrokoag6lasyon deneyleerine başlamadan 6nce deney parametrelerinin belirlenmesi ve deney sonuçlarının anlaşılmasına yardımcı olması amacı ile numuneler 6zerinde bir dizi karakterizasyon analizi yapılmıştır. Gerçekleştirilecek deneyleerden elde edilen sonuçların yorumlanabilmesi ve çalışmalara konu olan malzemenin davranış Őekillerinin tam manası ile anlaşılması açısından karakterizasyon analizleri ve bu analizler sonucunda elde edilen verilerin yorumlanması son derece 6nemlidir. Analiz sonuç ve yorumları aşağıda verilmiştir.

#### **3.1.3.1. P6lpte Katı Oranı Tayini**

P6lpte Katı Oranı tayinindeki temel amaç gerçekleştirilmesi planlanan deneyleerde tercih edilecek katı oranının belirlenmesidir. Bu analiz için işletmede tikiner besleme boğazından alınan 5 kg ağırlığındaki orijinal p6lp numunesi, serbest 6kelmeye tabii tutularak sıvı fazı dikkatlice ayrılmış ve doğal Şartlarda kurumaya bırakılmıştır. T6m numunenin kuruma işlemi bitince katı kısım tartılarak numunenin P6lpte Katı Oranı bulunmuştur. Yapılan PKO analizine g6re işletmenin hali hazırda 6rettiği orijinal k6m6r artığının PKO'sının %2,92 olduğu tespit edilmiştir.

#### **3.1.3.2. Kızdırma Kaybı Analizi**

Numunenin k6m6r hazırlama tesis artığı olması sebebi ile içerdiği organik maddelerin başka bir değişle k6m6r y6zdesinin belirlenmesi ve daha sonra yapılacak olan XRD, XRF ve Zeta potansiyeli 6l6mlerinde yardımcı veri olarak kullanabilmesi için numuneye kızdırma kaybı analizi uygulanmıştır.

Laboratuarda şahit numuneden elde edilen orijinal kömür artığı örneklerinden 1 gr numune, 4 haneli hassas terazide tartılarak daha önce 105 °C derecede 1 saat bekletilerek kurutma işlemine tabii tutulmuş seramik krozeye konularak, 750°C sıcaklığa ayarlanmış, metalürjik fırında 4 saat yakılmıştır. Bu süre sonunda kroze fırından çıkarılarak, 15 dakika desikatörde soğumaya bırakılmış ve sonra tekrardan 4 haneli hassas terazide tartılmıştır. Yöntemin sonunda, kömür örneklerinin havada kuru bazda organik madde miktarları belirlenmiştir. Analiz işlemleri Maden mühendisliği bölüm laboratuvarında bulunan Vecstar marka metalürjik fırında gerçekleştirilmiştir.

Yapılan analiz sonucunda Kızdırma kaybı **%30** olarak elde edilmiştir. Bu değere göre numune içerisinde göz ardı edilemeyecek miktarda karbonlu bileşik başka bir deyişle kömür bulunduğu anlaşılmıştır. Kızdırma kaybı deneyinde kullanılan metalürjik fırın Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3: Kızdırma kaybı deneyinde kullanılan metalürjik fırın.

### 3.1.3.3. *Isıl Değer Analizi (Kalori Analizi)*

Kızdırma kaybı analizinin sonuçlandırılmasından sonra numunenin ihtiva ettiği kömürün ısıl değerinin analizi amacı ile ASTM 5865 standartlarına uygun olarak maden mühendisliği laboratuvarında bulunan Leco Ac-500 marka kalori tayin cihazı ile kömür hazırlama tesis artığının üst ve alt ısıl değer tayin analizleri gerçekleştirilmiştir. Deneyde 1 gr olarak 4 haneli hassas terazide tartılan numune su içerisinde bulunan yakma hücreğine yerleştirilmekte ve cihaz çalıştırılmaktadır. Deney sırasında kömürün yanma enerjisinden faydalanarak numunenin ısıl değeri ölçülmektedir. Isıl değer analizi deneylerinin gerçekleştirildiği kalorimetre cihazı Şekil 3.4'te verilmiştir.





**Şekil 3.4:** Isıl değer analizi deneylerinin gerçekleştirildiği kalorimetre cihazı.

Yapılan analiz sonucunda üst ısıl değer **820 kcal/kg**, alt ısıl değer ise **802 kcal/kg** olduğu görülmüştür.

#### **3.1.3.4. XRD ve XRF Analizleri**

Numune içerisinde bulunan minerallerin tayininin yapılması ve daha sonra gerçekleştirilmesi planlanan koagülasyon-elektrokoagülasyon deneylerinde davranış karakterinin anlaşılabilmesi açısından kömür hazırlama tesis artığı numunesi XRD ve XRF analizlerine tabii tutulmuştur. Analizler İstanbul Üniversitesi İleri Analizler Laboratuvarında 200 Vac 3q 20 A/50 Hz güç kapasitesine sahip Rigaku D/Max-2200/PC XRD Cihazı ile XRD analizleri, axios SST-Max ile de XRF analizleri gerçekleştirilmiştir. XRD ve XRF cihazları Şekil 3.5'te verilmiştir.



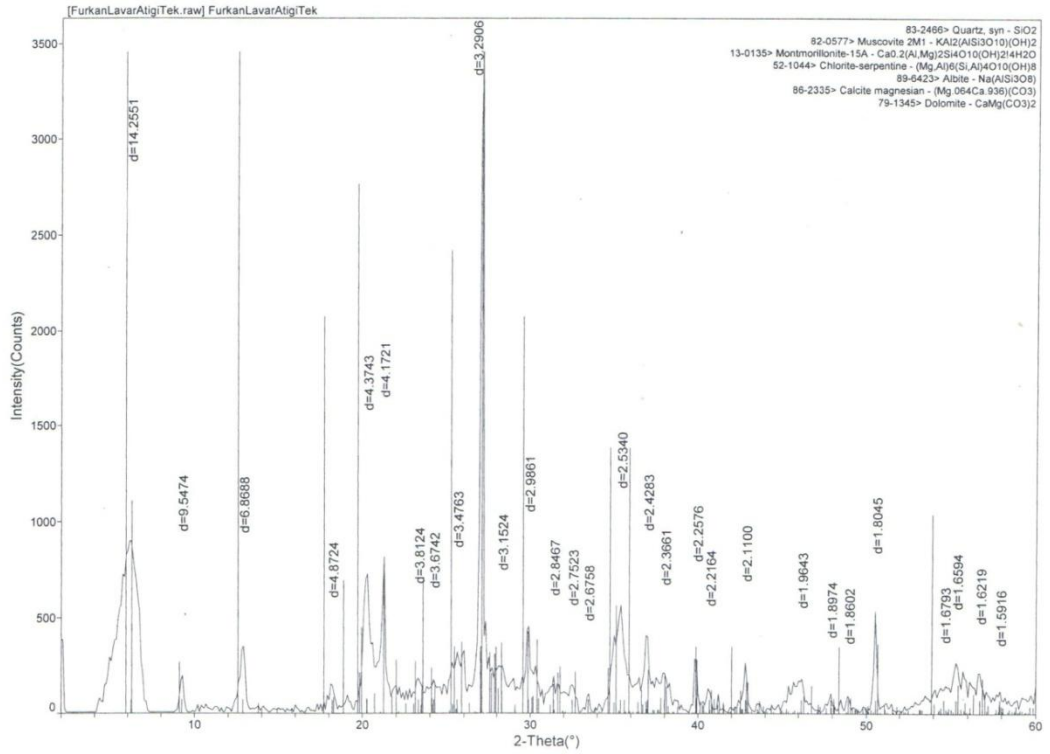
**Şekil 3.5:** XRD ve XRF analizlerinin gerçekleştirildiği cihazlar.

Gerçekleştirilen XRF analiz sonuçları Tablo 3.1’de verilmiştir.

**Tablo 3.1:** XRF sonuçların göre kömür hazırlama tesis artığının ihtiva ettiği bileşikler.

Molekül	% Miktar
SiO <sub>2</sub>	38,07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,23
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,63
MgO	3,02
CaO	2,85
K <sub>2</sub> O	2,11
TiO <sub>2</sub>	0,53
Na <sub>2</sub> O	0,20

Bu elde edilen sonuçlarla beraber XRD analizleri de yapılarak sonuçları Şekil 3.6’da verilmiştir.



**Şekil 3.6:** Kömür hazırlama tesis artığı XRD analizi sonuçları.

XRD ve XRF analizleri sonucu görülmüştür ki projeye konu olan numuneler kuvars (SiO<sub>2</sub>), muskovit (KAl<sub>2</sub>(Al<sub>2</sub> Si<sub>3</sub> O<sub>10</sub>) (OH)<sub>2</sub>), montmorillonit ((Na,Ca)<sub>0.33</sub>(Al,Mg)<sub>2</sub>(Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>)(OH)<sub>2</sub>·nH<sub>2</sub>O), klorit (NaClO<sub>2</sub> veya Mg(ClO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>), serpantin, albit (NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>), kalsit (MgCO<sub>3</sub>) ve dolomit (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) ihtiva etmektedir. Çoğu

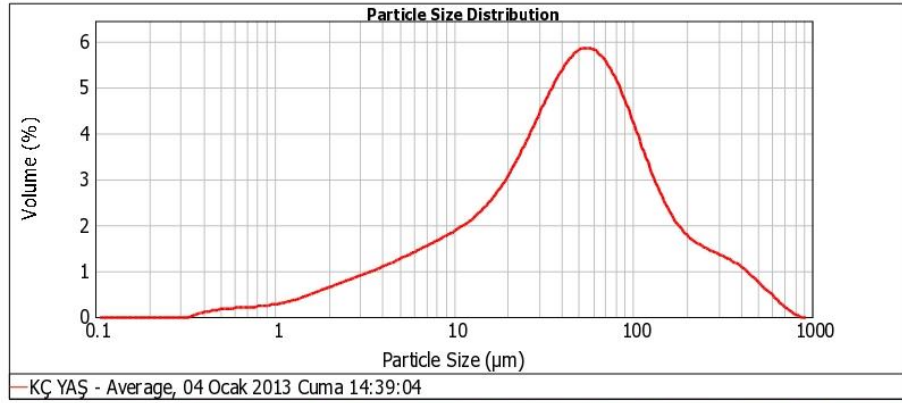
kil minerali olan bu yapının davranış karakterinin anlaşılmasında yapılan kimyasal analiz sonuçları ışık tutmuştur.

#### **3.1.3.5. Tane Boyut Dağılımı Analizi**

Susuzlandırma işlemlerinde boyut dağılımı önemli parametrelerden birisidir. Özellikle koagülasyon ve flokülasyon mekaniğinde tanenin yapısı, şekli ve boyutu susuzlandırma faaliyetleri davranışında belirleyici bir etkidir. İnce taneli, özellikle 50 mikron altı katı taneciklerin katı-sıvı ayırımında yüksek çökme hızı ve dolayısıyla yüksek katı oranı elde etme açısından normal sedimentasyon yöntemleri istenilen başarıyı göstermemektedir. Bunun nedenleri ise, % katı oranı, tane şekli, yüzey özellikleri ve yoğunluk gibi katının özellikleri ile sıvının viskozitesi ve yoğunluğudur. (Svarovsky, 1981; Mpofu, 2005, Ötekaya, vd., 2005).

Bu sebeple ileride gerçekleşecek olan deneylere konu olacak numunenin tane dağılımının anlaşılması için yaş ve kuru boyut dağılım analizi yapılmıştır. Analizler İTÜ Maden Fakültesinde bulunan Malvern Mastersize 2000 model tane boyut ölçer cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Boyut dağılım analiz sonuçları ve grafiği Şekil 3.7’de verilmiştir.

d(0.1): 5.767 um d(0.5): 45.247 um d(0.9): 184.751 um



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.30	11.482	1.89	120.226	2.80	1286.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.35	13.183	2.08	138.038	2.31	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.43	15.136	2.30	158.489	1.93	1659.557	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.50	17.378	2.59	181.970	1.65	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.58	19.953	2.94	208.930	1.47	2187.752	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.66	22.909	3.34	229.883	1.35	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.74	26.303	3.78	275.423	1.25	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.83	30.200	4.24	316.228	1.15	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.01	3.311	0.91	34.674	4.66	353.078	1.02	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.08	3.802	1.00	39.811	5.00	416.869	0.85	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.12	4.365	1.09	45.709	5.23	478.630	0.65	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.15	5.012	1.19	52.481	5.29	549.541	0.46	5754.389	0.00
0.052	0.00	0.550	0.17	5.754	1.29	60.256	5.19	630.957	0.24	6606.994	0.00
0.060	0.00	0.631	0.19	6.607	1.40	69.183	4.91	724.436	0.09	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.20	7.586	1.51	79.433	4.48	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.22	8.710	1.62	91.201	3.94	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.25	10.000	1.75	104.713	3.36	1036.478	0.00		
0.105		1.096		11.482		120.226		1286.925			

Şekil 3.7: Kömür hazırlama tesis artığı tane boyut dağılım analiz grafiği.

Şekil 3.7' de görüldüğü gibi  $d_{50}$  boyut değeri  $45 \mu\text{m}$ ,  $d_{90}$  tane boyutunun  $184 \mu\text{m}$  ve altı olduğu görülmektedir. Ayrıca gerçekleştirilen boyut dağılım analizinde cihazın verdiği verilere göre tane yüzey alanının  $0,486 \text{ m}^2/\text{gr}$  olduğu bununda %3 PKO için  $14,56 \text{ m}^2$  teorik toplam yüzey alanı oluşturduğu tespit edilmiştir.

### 3.1.3.6. Sıvı Fazda Bulunan Anyon ve Katyonların Tayini

Susuzlandırma da en önemli etkilerden birisi tanenin yüzey yükünün durumudur. Sıvı faz içerisinde çözülmüş halde bulunan iyonlar zaman zaman tane yüzey yükünü başka bir deyişle zeta potansiyelini baskılamakta ve tanelerin doğal flok oluşturmalarına ya da tam tersi olacak şekilde dağılma (dispersiyon) oluşumuna sebep olmaktadır. Koagülasyon mekanizmasının temelini de iyon ve molekül hareketleri teşkil ettiğinden tanelerin bulunduğu sıvı ortamın kimyasal iyon yük yapısı iyice anlaşılmıştır. Bu sebeple tesisten alınan numunelerden elde edilen ve katı kısımdan ayrılmış sıvı faz örneği; bununla beraber analizlerin gerçekleştirilmesi planlanan ve laboratuarda kullanılan şebeke suyu örnekleri üzerinde anyon ve katyon konsantrasyon analizleri yapılmıştır. Analizler İstanbul Üniversitesi Çevre Mühendisliği Laboratuvarında

gerçekleştirilmiştir. Elde edilen Anyon ve Katyon analiz sonuçları Tablo 3.2’de verilmiştir:

**Tablo 3.2:** Kömür hazırlama tesisinde ve deneylerde kullanılan suyun anyon ve kation analizi.

Anyon/Kasyon Tipi		Tesiste Kullanılan Su (ppm)	Laboratuvar Deneylerinde Kullanılan Su (ppm)
Anyonlar	Florür	0,1	0,1
	Klorür	93,5	29,1
	Bromür	0,1	0,1
	Nitrat	0,1	1,8
	Sülfat	1537,8	41,7
Kasyonlar	Sodyum	291,0	19,8
	Potasyum	17,6	2,5
	Magnezyum	209,4	6,4
	Kalsiyum	111,9	45,2

Burada sıvı faz içerisindeki iyonlar ile zeta potansiyeli bağı konusunda değinilmesi gereken birkaç nokta vardır. Yüksek iyonik güce sahip sularda taneciğin etrafındaki elektriksel çift tabaka net olarak sıkıştırılabilir. Böylece tanecik daha küçük bir hacim işgal eder. Aynı yüke sahip benzer kolloidal tanecikler birbirine yaklaştığında, elektriksel çift tabakaları etkileşim haline geçer ve sahip oldukları benzer yükler yaklaştıkça itme kuvvetinin etkisinde kalır. Ancak tanecikler birbirine daha da fazla yaklaştığında artan itme kuvvetine karşılık eğer enerji engelini aşacak kadar yeterince yakınlaşırsa van der waals kuvvetleri etkin duruma geçer. Böylece bu kimyasal çekim kuvvetinin etkisi ile partiküller bir arada olabilirler. Buna karşın enerji engelini yenemeyen kolloidler ise birleşemezler. Bu her iki mekanizmanın oluşumu daha önce bahsedildiği gibi yüksek iyon ihtiva eden sulardan doğal olarak gelişebilir. Tablo 3.2’yi incelediğimizde iyon yükleri verilen orijinal tesis suyu ve laboratuvar deneylerinde kullanılan suyun iyon yüklerinde farklılıklar arz etmekte ve tesisten gelen suda diğerine göre yüksek iyon yükü olduğu görülmektedir. Burada açıklanması gereken konu laboratuvar da kullanılacak olan şebeke suyunda gerçekleştirilecek olan deneylerde ortaya çıkan mekanizmaların, tesiste kullanılan orijinal suda farklı karakter sergileyip sergilemeyeceğidir.

Özellikle söz konusu su numuneleri içerisinde bulunan ve çok düşük iyon değiştirme özelliği gösteren ya da hiç göstermeyen minerallerde  $Cl^-$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$  ve  $Ca^{2+}$  gibi tek ve çift

değerlikli anyon ve katyonların elektriksel çift tabayı bastırdıkları yani yüzey yükünün mutlak değerini azalttıkları literatürden bilinmektedir. Ve yine çeşitli çalışmalar ortaya koymuştur ki değişik pH ve mineral tiplerinde (ister tekil olsun ister farklı tipteki minerallerin birleşiminde oluşsun) sıvı faz içerisindeki sodyum, potasyum, kalsiyum vb. iyonları farklı zeta etkileri oluşturmaktadır.

Susuzlandırmayı konu alan çeşitli çalışmalar incelendiğinde, literatürde, özellikle montmorillonitin koagülasyonun da kritik bir  $\text{Na}^+$  konsantrasyonun olduğu belirtilmektedir (Lagaly ve Ziesmer, 2003). Yine bazı çalışmalarda koagülant olarak  $\text{Ca}^{+2}$  iyonların kil yüzeyi ile flokülant arasında köprü vazifesi yanında,  $\text{pH}=8,5-9,5$  aralığında, ortamda bulunan  $\text{OH}^-$  ve  $\text{H}_3\text{O}^+$  iyonlarının da tanelerin itme kuvvetlerinin etkinliğinin azaltılmasına yardımcı olduğunu göstermektedir. (Sabah ve Erkan 2006, Foshee ve ark. 1982). Buna benzer etkiler  $\text{CaO}$  kullanıldığında çeşitli çöktürme analizlerinde gözlemlenmiştir ve çöktürme hızında %62'lik bir artış hesaplanmıştır. Sonuçlar  $\text{Ca}^{+2}$  iyonlarının literatürde belirtildiği gibi kil yüzeyine spesifik olarak adsorplandığını teyit edecek niteliktedir. (Mpofu ve ark., 2005, Akın ve Çelik 1995). Yine Kömür atıkları ile yapılan bir çalışmada, koagülant iyon etkinliği  $\text{Ca}^{+2}>\text{Na}^+>\text{K}^+$ , bulanıklılık etkinliği  $\text{Ca}^{+2}>\text{K}^+>\text{Na}^+$  sıralamasıyla gerçekleşmektedir. (Bentli, 2010) Çökme sonuçları  $\text{Ca}^{+2}$  iyonlarının literatürde belirtildiği gibi kil yüzeyine spesifik olarak adsorplandığını, tanelerin elektriksel yüklerinin ve ortam pH'ının çöktürmede etkin parametreler olduğunu ortaya koymaktadır. Buna paralel en ilginç bulgu, flokülant ile tane yüzeyi arasında belirli bir iyon ile kurulan köprü vazifesini, farklı bir flokülant farklı bir iyon ile de gerçekleştirebilmesidir. (Bentli, 2010)

Yukarıda sayılan iyon etkisi ispatına yönelik çalışmaların ışığında pülp haline gelen kömür artığında sıvı fazdan sisteme şarj olan doğal iyonların etkisi ile farklı su tiplerinde farklı koagülasyon mekanizması çalışabileceği düşünülmüş ve bu yönde şüpheleri ortadan kaldırmaya yönelik deneyler yapılmasına karar verilmiştir.

Bu sebeple deneylere tabii tuttuğumuz kömür hazırlama tesis artığı numunesi içerisinde sıvı fazdan gelen farklı iyonların etkilerinin şiddetinin tespiti için değişik su tiplerinde numunenin zeta potansiyeli ölçümleri yapılmıştır. Böylece Zeta değerlerindeki bir

değişimin koagülasyon mekanizmasında sıvı faz iyonlarının etkisinin olup olmayacağı görülecektir.

### **3.1.3.7. Zeta Potansiyeli Ölçümleri**

Zeta potansiyeli kısaca, tane yüzeyinin sıvı faz içerisindeki yükü olarak tanımlanabilir. Koagülasyon ve flokülasyon işlemlerinde oldukça büyük önem arz eden bu yük, susuzlandırma işleminde temel etkiyi yapmakta ve tane yüzey potansiyelinin durumuna göre taneler hareket etmektedir.

Ancak her ne kadar zeta potansiyeli ölçümü, genel olarak aslen tekil minerallerin yüzey yükü olarak tanımlansa da komplike, başka bir deyişle çok fazla farklı mineralin girift (karışık) bir yapı içerisinde birleşerek oluşturdukları karmaşık yapılar içinde ortalama yük karakterinin ortaya konması açısından değerlendirmeye alınabilir. Bu projede sözü geçen numunenin birçok farklı mineralin değişik oranlarda karışımından oluşan atık numunesi olduğu göz önüne alındığında, burada okunan zeta potansiyeli analiz değerinin numunenin tekil üyelerinin değil toplu kimyasal karakterinin ortalama bir yansıması olarak ortaya konmalıdır.

Zeta potansiyeli analizlerinde 3 farklı durum değerlendirmesi yapılmaya çalışılmıştır. Bunlardan birincisi saf su içerisinde yüzey yükü ölçümü, ikincisi tesisten elde edilmiş su numunesi içerisinde yüzey yükü durumu ve son olarak laboratuarda deneylerde kullanılan suyun içerisinde yüzey yükü ölçümü olarak gerçekleştirilmiştir. Farklı sıvı ortamlarda denemelerin yapılmasındaki temel amaç, farklı ortamlara farklı miktarlarda bulunan iyon konsantrasyonunun yüzey yükü üzerinde bir etkisinin olup olmadığının araştırılmasıdır. Çünkü her ne kadar bu çalışmadaki temel amacın karışık kömür artıkları üzerinden elektrokoagülasyon ile kimyasal koagülasyon etkilerinin araştırılması olsa da tesiste kullanılan su içerisinde genel susuzlandırma karakteri gözlenerek mekanizma anlaşılmasına çalışılarak ve deney sonuçlarının gerçek hayatta uygulanabilirliğinin incelenmek istenmesidir.

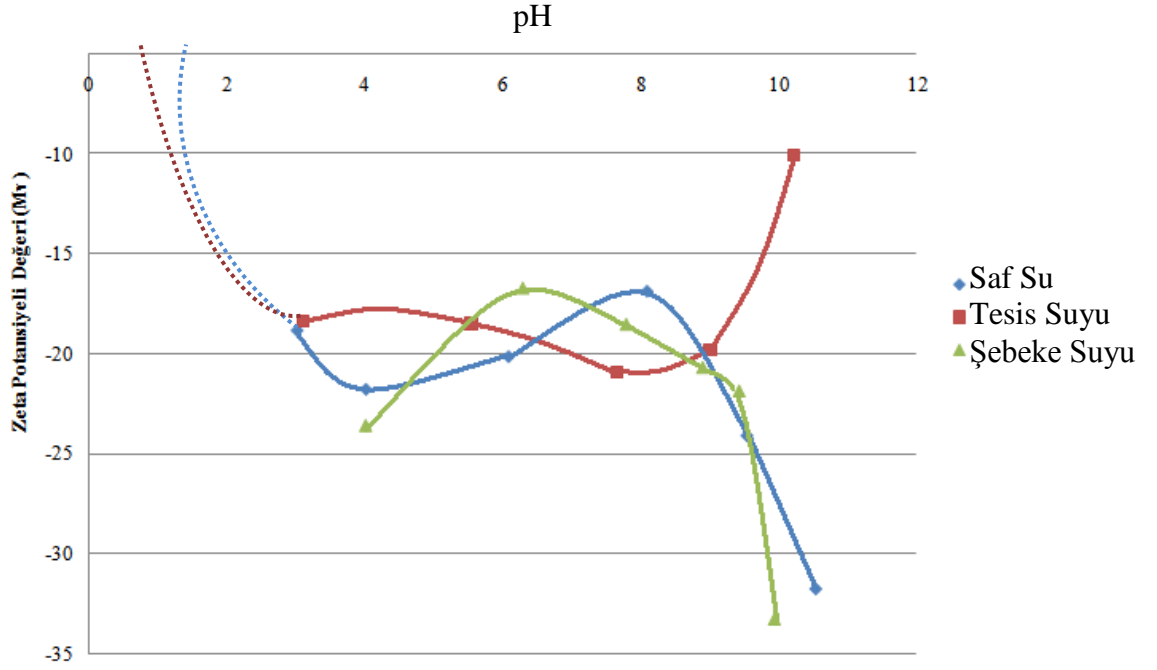
Teorik olarak projeye konu olan numunenin girift linyit ve çeşitli kil minerallerinden oluşmuş olmasına rağmen benzer yüzey karakterleri sergiledikleri belirtilmelidir. Kömür yüzeyi ana olarak asidik karakterdeki hidroksil ve karboksil grupları ile kaplıdır.

Bu gruplar suda negatif yük taşıdıklarından okside kömür yüzeyi de negatif zeta potansiyele sahiptir. Bununla beraber kristal yapısında oluşan izomorf yer değiştirmeler nedeniyle smektit grubu killerin yüzeyleri negatif yüklü, kenarlardaki kırık bağlar nedeniyle de kenar hatları pozitif yüklüdür ve birleşmeye dirençlidirler. Bu yüzden kil mineralleri çözelti içerisinde kolloidal özellik gösterirler. Yüzey alanları kenarlara oranla çok daha büyük olduğundan net yükleri negatif olmaktadır. Killerin yüksek adsorbsiyon yeteneklerinden dolayı ortamda doğal bulunan yada ilave edilen elektrolit, yüzey aktif gibi yüklü parçacıklar killerin elektrokinetik davranışlarını değiştirebilirler. Değişik pH değerlerinde zeta potansiyeli ölçüm değerleri Tablo 3.3'de, bu değerlerden elde edilen zeta potansiyeli grafiği Şekil 3.8'de verilmiştir.

**Tablo 3.3:** Değişik ortamlarda kömür hazırlama tesis artığının zeta potansiyeli değerleri.

Saf Su Ortamında			Tesis Suyu Ortamında			Deney Suyu Ortamında		
pH	Zeta Potansiyeli (mV)	İletkenlik (µS)	pH	Zeta Potansiyeli (mV)	İletkenlik (µS)	pH	Zeta Potansiyeli (mV)	İletkenlik (µS)
<b>3,02</b>	-18,79	813	<b>3,12</b>	-18,36	6550	<b>4,02</b>	-23,06	2466
<b>4,02</b>	-21,74	554	<b>5,55</b>	-18,49	6133	<b>6,3</b>	-16,74	1221
<b>6,09</b>	-20,11	468	<b>7,66</b>	-20,89	6224	<b>7,8</b>	-18,56	945
<b>8,1</b>	-16,84	388	<b>9,01</b>	-19,80	6162	<b>8,91</b>	-20,71	1004
<b>9,55</b>	-24,06	382	<b>10,22</b>	-10,11	6870	<b>9,37</b>	-20,69	1183
<b>10,55</b>	-31,18	598				<b>9,95</b>	-33,29	1216

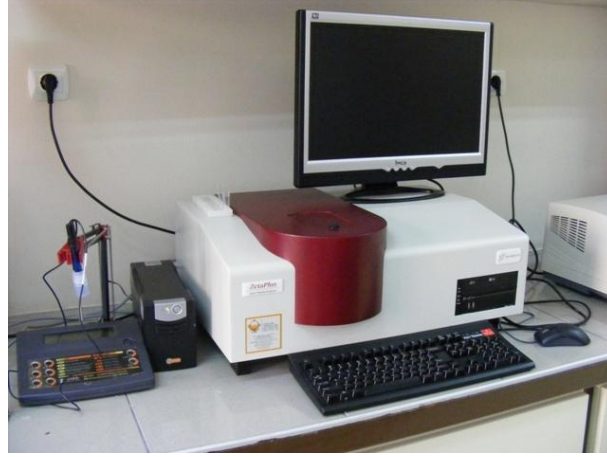




Şekil 3.8: Değişik ortamlarda zeta potansiyeli ölçüm sonuçları.

Yukarıdaki grafiklerde görüldüğü gibi her üç durumda da tüm pH profillerinde tane yüzey yükü negatif olarak ortaya çıkmaktadır. Her üç durumda da yüzey yükünün sıfırlanabildiği bir pH değeri yoktur. Bununla beraber her üç durumda da pH 4 ile pH 9 arasında yüzey yüklerinde önemli bir değişim yaşanmamaktadır ve yük değerleri -20 mV civarında dolanmaktadır. Buradan elde edilen sonuçlar daha önce sıvı faz iyon analizi sonuçları ile birleştirildiğinde koagülasyon ya da elektrokoagülasyon deneylerinde sıvı faz farklılığının başka bir değişle tesis suyu yerine şebeke suyu kullanmanın farklı bir etki yapmayacağıdır. Bununla birlikte yüksek ve düşük pH değerlerindeki (pH 9 üstü ve pH 6 altı) zeta potansiyeli değişimi, deneyler sırasında bu pH değerlerine inilememesi ya da çıkılamaması sebebi ile dikkate alınmamıştır.

Deneyleerde kullanılan Zeta Plus marka zeta metre Şekil 3.9’da görülebilir.



**Şekil 3.9:** Zeta potansiyeli ölçümlerinde kullanılan zeta metre cihazı.

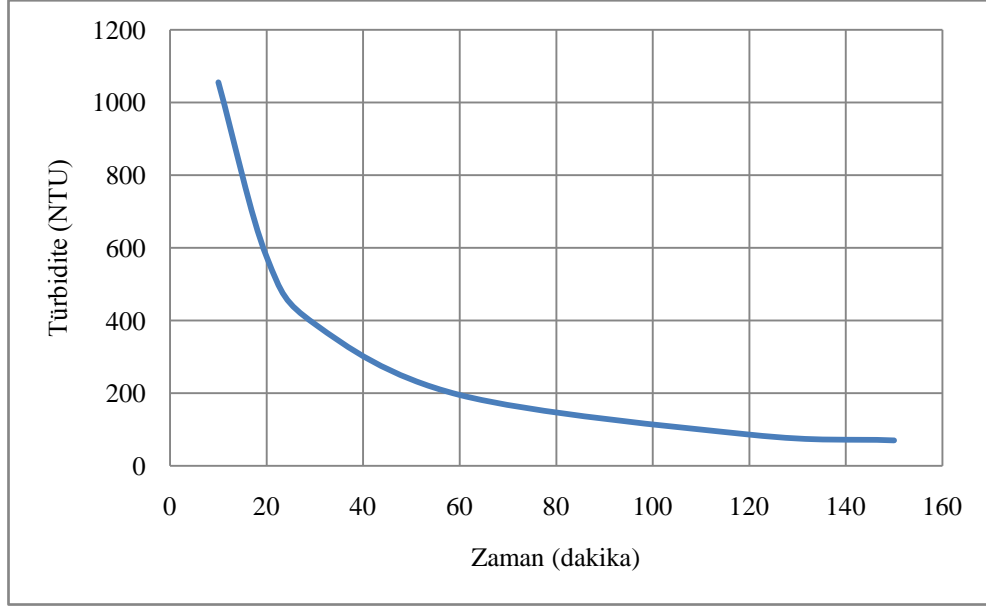
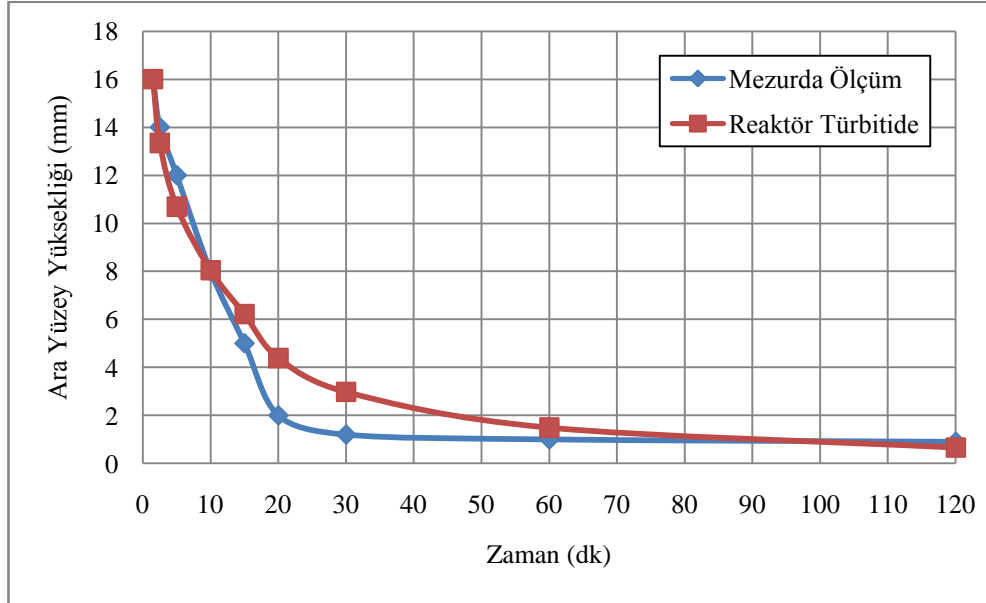
### 3.1.3.8. *Serbest Çökme Performansı*

Serbest çökme, süspansiyonda ilk hızlanma periyodundan sonra, alt kısımda çökme olayı başlar. Çökelen tabakanın üzerinde ise katı oranı yavaş olarak artan bir tabaka ve onun üzerinde de katı oranı azalan bir tabaka yer alır. En üstte ise temiz bir sıvı zonu oluşmaya başlar. Temiz sıvı ile çökelek arasındaki uzaklık, kritik çökme noktasının yavaşlama derecesini azaltır. Ayrıca çökeltme işleminin sonuna doğru parçaların yerini alan sıvının akış hızı azalır (Cosanay, 1989).

Koagülasyon deneylerinin gerçekleştirilmesinden önce numunenin serbest çökme performansı incelenmiştir. Deneyleer, 150dk’lık bir süre ile gerçekleştirilmiş ve belirli zaman aralıklarında numune alımı yapılarak türbiditemetrede NTU cinsinden bulanıklılık ölçümü yapılmıştır. Bununla birlikte 1000 ml’lik mezurda serbest çökme deneyi yapılarak arayüzey yüksekliği okunmuş ve okunan değerler değişen bulanıklılık değerlerine senkronize edilerek karşılaştırılmıştır. Çökme karakteristiğinin doğru olarak ortaya konması açısından deneyleer 3er kez tekrarlanmıştır. Serbest çökme deneyleerinde zamana bağlı ölçülen türbitide değerleri Tablo 3.4’te, bu sonuçların grafiksel gösterimi ise Şekil 3.10’da ve 1000 ml’lik mezurda gerçekleştirilen deneyleerden elde edilen arayüzey yüksekliği değerleri ile bulanıklılık değerlerinin karşılaştırılması Şekil 3.11’de verilmiştir.

**Tablo 3.4:** Zamana göre serbest çökelme türbitide değerleri.

Süre (dk)	Türbitide (NTU)
10	1055
20	575
30	390
60	195
120	86
150	70

**Şekil 3.10:** Zamana göre serbest çökelme eğrisi(Türbitide değerlerine göre).**Şekil 3.11:** Mezurda gerçekleştirilen çökme arayüzey yükseklikleri ile bulanıklılık değerlerinin karşılaştırılması.

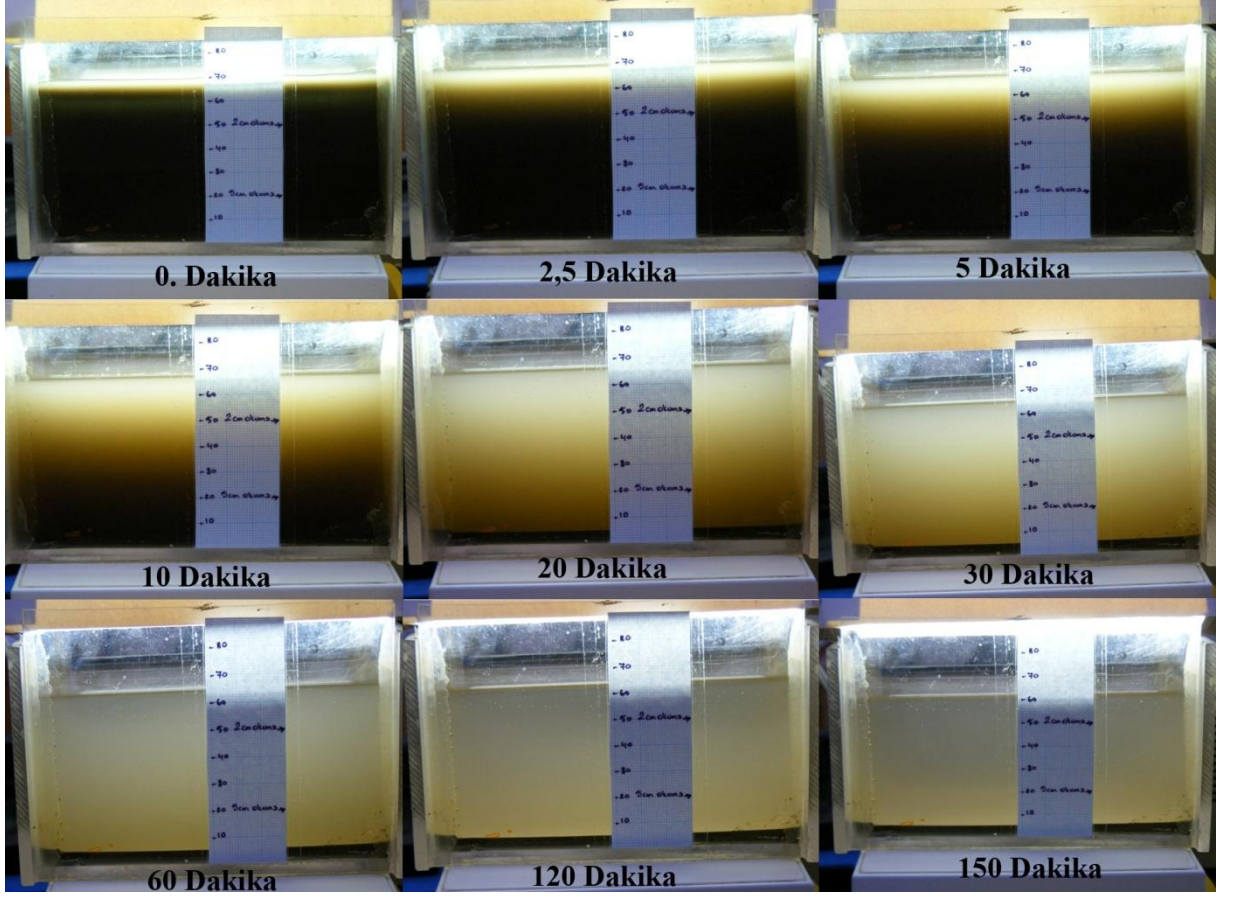
Doğal şartlarda çökelim işlemi 2 farklı tipte gerçekleşmektedir. Bunlardan birincisi genel olarak ince parçacıkların sedimentasyonunda görülen bir modeldir ve en üstte temiz zon olmakla birlikte değişen konsatrasyonlarda çökelim gerçekleşir. Genellikle bu tip serbest çökme sırasında, süspansiyonda ilk hızlanma periyodundan sonra, alt kısımda çökme-birikme olayı baslar. Çökelen tabakanın üzerinde ise katı oranı yavaş olarak artan bir tabaka ve onun üzerinde de katı oranı azalan bir tabaka yer alır. En üstte ise temiz bir sıvı zonu oluşmaya baslar. Temiz sıvı ile çökelek arasındaki uzaklık, kritik çökme noktasının yavaşlama derecesini azaltır. (Cosanay, 1989).

İkinci model çökme durumuna ise daha az sıklıkta rastlanır. Genellikle bu tip çökme parça-tane boyutları arasında büyük fark olduğu durumda karşılaşılır ve sistemde B zonu yoktur. Altta sıkışan bir çökelek zonu oluşurken üstte değişen konsatrasyonlu bir zon oluşmaktadır. Bu zon bulutlu bir yapı olarak görülür.

Şekil 3.10'da, Şekil 3.11 ve Şekil 3.12'de görüldüğü gibi serbest çökelim 120. dakikada halen yavaşlayarak devam etmektedir. Deneyler sırasında yapılan gözleme göre ilk 5. dakikada tabanda iri tanelerin birikmesi gözle görülebilir hale gelmesine karşın üst tarafta belirsiz ve geçişsiz bir değişken konsatrasyon zonu oluşmuştur. Alt tarafta biriken malzeme incelendiğinde çabuk çöken iri tanelerden oluştuğu gözlenmiştir. Böylece numunenin serbest çökelim karakteri için az önce bahsettiğimiz taneler arası boyut farkının çok olduğu 2. tip serbest çökme tipi olduğu söylenebilir.

Bu analiz sonucunda proje kapsamında alt tarafta kısa zamanda biriken kısımdan ziyade üst taraftaki çökmeyen kısmın çöktürülmesi hedeflenerek deneyler gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca mezurda gerçekleştirilen deneylerden elde edilen arayüzey yüksekliği verilerinin, bulanıklık ölçümü ile elde edilen veriler ile yaklaşık bir eğri çizmesi sebebi ile çalışma süresince bulanıklık ölçümleri baz alınarak deneyler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.12: Serbest çökelmede zamana bağlı zon değişimi.

### 3.1.4. DeneYlerde Kullanılan DiğEr Cihaz ve Kimyasallar

#### 3.1.4.1. Koagülasyon ve Elektrokoagülasyon Deney Düzenekleri

Koagülasyon ve elektrokoagülasyon deneylerinde tüm deney şartlarının paralellik arz etmesi açısından pleksiglastan imal edilmiş 150X90X85 (h) mm boyutlarında 1150 ml'lik bir reaktör kullanılmıştır. Her deneyde 1000ml taze pülp reaktöre beslenerek deney sonuçları gözlenmiştir. Deney öncesi 30 gr numune tartılarak 1000 ml su içerisinde 30 dk 500 devir/dk hızla laboratuvar tipi kil çözücü ile karıştırılmış, hazırlanan pülp reaktör hücresi içerisine kayıpsız bir şekilde aktarılarak yine aynı karıştırıcıda deney parametreleri oluşturuluncaya kadar karıştırılmış ve deneyler gerçekleştirilmiştir. Koagülasyon deneylerinde belirlenen zaman aralıklarında 2 ve 5 cm derinliklerden numune alımları yapılarak türbidimetrede bulanıklılık değerleri NTU cinsinden okunmuş ve kaydedilmiştir.

Bununla beraber elektrokoagülasyon deneylerinde yine aynı reaktör kullanılmış ve elektrot olarak alüminyum, demir ve çelik elektrotlar seçilmiştir. Bunlar 50X1X60 (h) mm boyutlu lazer kesim hazırlanan elektrotlar olup üst taraftan birbirlerine sabit aralıklar ile bağlanmıştır. Elektrotlar tamamen pülp içine gömülü monte edilmiştir. Her deney öncesi hassas terazide tartımı yapılmış, deney sonrasında da kurutularak tartım tekrar edilmiştir. Ayrıca deney aralarında elektrot yüzeylerinde oluşabilecek korozyonların önlenmesi amacı ile %30'luk formikasitte 5 dk bekletilmiş ve temizleme sonrasında su ile yıkanarak kullanılmıştır. Deneylerde sürekli pH ölçümü alınarak değişiklikler kaydedilmiştir. Kimyasal koagülasyon deney düzeneği Şekil 3.13'te, elektro koagülasyon deney düzeneği ise Şekil 3.14'de verilmiştir.



**Şekil 3.13:** Kimyasal koagülasyon deney düzeneği.



Şekil 3.14: Elektrokoagülasyon deney düzeneği.

### 3.1.5. Deneylerde Kullanılan Diğer Cihazlar

#### 3.1.5.1. *Türbidimetre*

Deneyler sırasında bulanıklık ölçümlerinde Thermo Orion Aquafast II model türbidimetre kullanılmıştır. Bulanıklık değerleri 3 kez ard arda ölçüm alınarak NTU cinsinden kaydedilmiştir. Deneylerde kullanılan türbidimetre Şekil 3.15'te verilmiştir.



Şekil 3.15: Deneylerde kullanılan Thermo marka Türbidimetre.

#### 3.1.5.2. *Teraziler*

Deneyler sırasında ağırlık ölçümleri 2 haneli Rodway PS 4500 Marka hassas terazi ve 4 haneli Precisa XR 305A model hassas terazi vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.16'da deneylerde kullanılan hassas teraziler verilmiştir.



**Şekil 3.16:** Deneylerde numune hazırlamada kullanılan hassa teraziler.

### 3.1.5.3. *Karıştırıcılar*

Numunenin hazırlanması, koagülasyon işlemlerinde karıştırma-kondisyon kazandırma işlemlerinde hız ayarlı Topo marka laboratuvar karıştırıcısı, elektrokoagülasyon işlemlerinde ise yine hız ayarlı Hanna Marka manyetik karıştırıcı kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan karıştırıcı Şekil 3.17’de verilmiştir.



**Şekil 3.17:** Deneylerde kullanılan Topo marka ayarlanabilir karıştırıcı.

### 3.1.5.4. *Ayarlanabilir DC Kaynağı*

EC deneylerinde güç kaynağı olarak Echinni-C model 0-20 Amper, 0-30 Volt ayarlanabilir laboratuvar tipi güç kaynağı kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan ayarlanabilir doğrusal akım kaynağı Şekil 3.18’de verilmiştir.





**Şekil 3.18:** Deneylerde kullanılan ayarlanabilir doğrusal akım kaynağı.

### 3.1.5.5. *pH ve Sıcaklık Ölçüm İşlemleri*

Deneyler sırasında pH ölçümleri Hanna marka HI 221 model pH metre ve yine Hanna marka mobil cep pH metresi, ve sıcaklık ölçümlerinde Thermo marka mobil sıcaklık ölçer cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

### 3.1.5.6. *Kullanılan Koagülantlar*

Kimyasal koagülasyon deneylerinde kullanılan koagülantlar ve özellikleri Tablo 3.5’de verilmiştir.

**Tablo 3.5:** Kimyasal koagülasyon deneylerinde kullanılan koagülantlar ve özellikleri.

Adı	Kimyasal Formülü	Mol Ağırlığı (g/mol)	Özelliği	Safılık Derecesi	Markası
Alüm	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 16H_2O$	630,39	Asidik	%98’in üstünde	Fluka
Demir Klorür	$FeCl_3 \cdot 6H_2O$	270,50	Asidik	%99’in üstünde	Merck
Demir Sülfat	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	278	Asidik	%99un üstünde	Merck

### 3.1.5.7. *Kullanılan Kimyasallar*

Deneylerde kullanılan kimyasallar aşağıdaki gibidir

- Merck Marka Formik asit
- Emboy Marka sodyumklorür
- Merck marka Hidroklorik asit
- Merck Marka sodyumhidroksit

## **3.2. KİMYASAL KOAGÜLASYON DENEYLERİ**

### **3.2.1. Deneyin Amacı-Teorisi**

Kimyasal koagülasyon deneylerindeki temel amaç değişik alüminyum ve demir tuzlarının kömür hazırlama tesis atıklarında koagülasyon performansının incelenmesi ve daha sonra gerçekleştirilecek olan elektrokoagülasyon deneyleri sonuçları ile performans ve maliyet karşılaştırması yapmaktır.

Bilindiği gibi deneylere konu olan kömür artığı numunesi koloidal yapıdadır. Koloidal maddeler negatif yüklüdür ve bu yüzden genellikle yumaklaştırıcı olarak +3 değerlikli alüminyum ve demir kullanılır. Bu elementlerin sülfat veya klorür bileşikleri suya eklenir ve sudaki alkalinite ile birleşerek metal hidroksitleri oluşturur. Oluşan metal hidroksitler normal pH değerlerinde az çözünen ve çökebilen özelliğe sahiptirler. Çökeltiler beraberinde bir araya gelen kolloid birikimlerini de çökeltirler.

Elektrokoagülasyon deneylerinde alüminyum ve demir elektrotların kullanılması ve bu metal iyonlarının etkilerinin araştırılması sebebi ile piyasada da yaygın olarak kullanılan alüminyum sülfat, demir sülfat ve demir klorür tuzları kullanılmıştır.

### **3.2.2. Deney Düzenekleri**

Tüm koagülasyon deneylerinde aynı düzenek kullanılmakla birlikte koagülasyon hücresi olarak pleksiglastan imal edilmiş 150X90X85 (h) mm boyutlarında 1150 ml'lik bir reaktör kullanılmıştır. Bazı literatür çalışmaları tank şeklinin koagülasyon performansına etki ettiği ortaya konmuş ve bu veriler göz önüne alınarak tüm deneyler aynı reaktör içerisinde gerçekleştirilerek ortam farklılığından kaynaklanan etkiler bertaraf edilmiştir.

Deneyler %3 PKO'nında yapılmıştır. Tesisteki durum göz önüne alınarak deney parametresi olarak PKO değişimi sabit tutulmuştur. Öncelikle hassas terazide tartılan 30 gr numune, 970 ml su içerisine alınarak 30 dk 500 devir/dk hızda karıştırılmıştır. Tamamen dağıldığı görülen numune daha sonra reaktör hücresine alınarak deney şartları

oluşturulmuş ardından da deneyler gerçekleştirilmiştir. Her ne kadar koagülasyonda zaman ekonomisi hedeflense de verilen güvenilirliği açısından tüm deneyler 60 dk'lık periyotlar halinde gerçekleştirilmiştir. Numune alımları pipet vasıtası ile 2 ve 5 cm derinliklerden belirlenen zaman dilimlerinde yapılmış ve bulanıklık değerleri Türbidimetrede NTU (Nepheleometric Turbidity Unit) cinsinden okunarak kayıt edilmiştir.

### 3.3. ELEKTROKOAGÜLASYON PERFORMANS DENEYLERİ

#### 3.3.1. Elektrokoagülasyon Mekanizması

Elektrokoagülasyonda alüminyum ya da demir elektrotlar kullanılarak disperse partiküllerin destabilizasyonu söz konusu olup, koagülant üretim mekanizması kimyasal koagülasyondaki mekanizmaya benzemektedir. Bu proste de  $Al^{3+}$  ve  $Fe^{3+}$ 'ün hidrolizi ve bunun sonunda çeşitli alüminyum hidroksit polimer kompleks ve çökeltileri meydana gelmektedir (Gür, 2008).

Alüminyum elektrot kullanılan elektrokoagülasyon proseslerinde pH dengesi değişimi anot ve katotta meydana gelen yükseltgenme ve indirgenme reaksiyonları ile kontrol edilmektedir.

Anotta, alüminyum yükseltgenirken katotta ise su indirgenmektedir. Tablo 3.6'da alüminyum elektrotta gerçekleşen anot ve katot reaksiyonları verilmiştir.

**Tablo 3.6:** Alüminyum elektrotta temel anot ve katot reaksiyonları.

Anot Reaksiyonu	Katot Reaksiyonu
$Al(s) \Leftrightarrow Al^{3+} + 3e^{-}$	$2H_2O + 2e^{-} \Leftrightarrow H_2\uparrow + 2OH^{-}$
$Al^{3+} + 3H_2O \Leftrightarrow Al(OH)_3\downarrow + 3H^{+}$	

Tablo 3.7'de verilen reaksiyonlara baktığımızda açıkça görülmektedir ki katotta suyun indirgenmesi sonrası hidrojen oluşumu ve ortamda hidroksit birikmesi sonucu pH artmaktadır.

$\text{Al(OH)}_3$  çok yüksek pH'larda amfoterik metal hidroksit özelliğinden dolayı mevcut iyonlarıyla reaksiyona girerek ortamın pH 'sını düşürmektedir (Gür, 2008).



Bu nedenle alüminyum elektrotların kullanıldığı elektrokoagülasyon deneylerinde düşük pH değerlerine sahip çözeltilerin pH 'ları bir süre sonra 8-10 civarına artmakta ve bu değer üstüne çıkamamaktadır. pH 9 'un üzerindeki çözeltilerde ise deneyden bir süre sonra (3.1) reaksiyonu gereği pH 9 değerinde dengelenmektedir.

Alüminyum elektrot kullanılan elektrokoagülasyon proseslerinde anot elektrotta ki elektrokimyasal çözünmenin dışında, elektrotlara özellikle katoda  $\text{H}_2$  çıkışı sırasında üretilen iyonlarının kimyasal atakları sonucu elektrotlarda kimyasal çözünmede meydana gelmektedir (Gür, 2008).



Alüminyum elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyonle üretilen alüminyum iyonları, pH 'ya bağlı olarak monomerik ve polimerik alüminyum hidroksit kompleks türlerini oluşturur. Bu kompleksler pH 4-7 aralığında polimerize olma eğilimindedirler. Bir çok monomerik ve polimerik alüminyum türleri ortaya çıkmaktadır. En çok bilinen monomerik türler;  $\text{Al(OH)}^{+2}$ ,  $\text{Al(OH)}_2^+$ ,  $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{+4}$  ve  $\text{Al(OH)}_4^-$ , en çok bilinen polimerik türler  $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{+3}$ ,  $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{+4}$ ,  $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{+4}$  'tür. Değişik türlerin oluşma oranları koagülasyon veriminde önemli bir rol oynar (Gür, 2008).

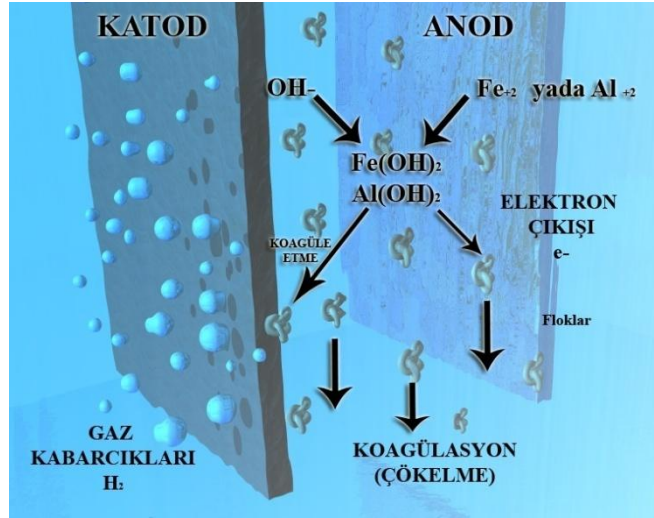
Demir elektrotların kullanılması halinde ise elektrolitik sistemde demirin oksidasyonu sonucu, demir hidroksit,  $\text{Fe(OH)}_n$  ( $n=2$  veya 3 olabilir) üretilir.

Bu reaksiyonlar ise Tablo 3.7'de verilmiştir.

**Tablo 3.7:** Demir elektrotta temel anot ve katot reaksiyonları.

Anot Reaksiyonu	Katot Reaksiyonu
$\text{Fe (s)} \leftrightarrow \text{Fe}^{+2} + 2\text{e}^-$	$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{H}_2\uparrow + 2\text{OH}^-$
$\text{Fe}^{+2} + 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Fe(OH)}_2\downarrow + 2\text{H}^+$	

Yine demir elektrotun elektrokimyasal oksidasyonu ile üretilen demir iyonları, su ortamının pH değerine bağlı olarak  $\text{Fe(O}_2\text{H)}_6^{+3}$ ,  $\text{Fe(O}_2\text{H)}_5(\text{OH})^{+2}$  gibi monomerik iyonları,  $\text{Fe(OH)}_3$  ve polimerik hidroksi kompleksleri oluşturabilir. Redoks reaksiyonun sonucu üretilen  $\text{H}_2$  çözülmüş organikleri veya herhangi askıda maddeleri flotasyon ile giderir. Bu yüzden  $\text{Fe}^{+3}$  iyonları hidratlamaya uğrayabilir ve solüsyon pH'sına bağlı olarak, asidik koşullar altında değişik hidroksit bileşikleri oluşturabilir. (Endyuskin, 1983; Wilcock, 1992; Mollah, vd., 2001). Şekil 3.19'da elektrokoagülasyon hücresinde meydana gelen olaylar temsili olarak gösterilmiştir.

**Şekil 3.19:** Elektrokoagülasyon meydana gelirken hücre içerisindeki olaylar.

### 3.3.2. Deneylerde Kullanılan Çeşitli Bağıntılar

#### 3.3.2.1. Akım Yoğunluğu Hesabı

EC deneylerinde sisteme şarj edilen akımın yoğunluk değeri en önemli parametrelerdendir. Akım yoğunluğu elektrik devresinde elektron yoğunluğunun bir ölçüsüdür. Vektör olarak tanımlanır ve elektrik akımının kesit alana oranıdır. SI'de akım yoğunluğu amper/metrekare veya coulomb/saniye bölü metrekare olarak hesaplanır. EC

prosesinde, hesaplama yaparken sisteme şarj edilen akımın metrekare cinsinden birim alandaki değeri olarak kullanılır. Akım yoğunluğu formülü denklem 3.3'te verilmiştir.

$$\text{Akım Yoğunluğu} = J = \frac{I}{A} \quad (3.3)$$

Burada

$$J = \text{Akım yoğunluğu (A/m}^2\text{)}$$

$$I = \text{Sisteme Şarj Edilen Amper (A)}$$

$$A = \text{Toplam Etkin Anot Elektrot Alanı (m}^2\text{)}$$

Bu hesaplama göre EC deneylerinde kullanılan elektrotların sabit alan değeri ve değişken amper yük değeri üzerinden sisteme şarj ettikleri akım yoğunluğu kolayca hesaplanabilmektedir. Proje kapsamında EC deneylerinde kullanılan elektrotların aktif yüzey alanı toplam **373 cm<sup>2</sup>**dir. Akım yoğunluğu değeri üzerinden sistemin elektrik gideri ve şarj edilen alüminyum ya da demir iyon miktarları hesaplanabilir.

EC deneylerinde kullanılan farklı bağlantılar ve oluşan iyon yoğunlukları ile ilgili bilgi elektrokoagülasyon deneyleri kısmında ayrıca verilecektir.

### 3.3.2.2. Akım Verimi

Anotta çökecek maddenin mol miktarı elektrokoagülasyonun Faraday kanunuyla hesaplanır ve m ile gösterilir (Malkoç, 2008).

$$m = \frac{I \cdot t}{n \cdot F} \quad (3.4)$$

Burada;

I: Akım şiddeti, Amper,

t: Zaman, sn.

n: İyon yükü (alüminyum ve demir için 3<sup>+</sup>),

F: Faraday sabiti (96485 C mol<sup>-1</sup>)

olarak tanımlanır.

### 3.3.2.3. Diğer Bağlıntılar

- Akım verimin hesaplanmasından sonra anot elektrottaki teorik çözünme miktarı,

$$M_{\text{ATe}} = m \cdot (\text{MA})$$

$M_{\text{ATe}}$  (g) aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir (Malkoç, 2008):

Burada; (3.5)

MA: Molekül ağırlığı (Al için 26.982 g, Fe için 55,84 g) 'dır.

- Ayrıca Akım verimi hesabında aşağıdaki bağıntı kullanılır (Malkoç, 2008):

$$m = \frac{A \times I \times h \times t}{z \times 96500} \quad (3.6)$$

m: indirgenen metal miktarı (g)

A: indirgenen metalin mol ağırlığı

I: devreden geçen akım (A)

t: zaman (s)

h: akım verimi (%)

z: elektron sayısı

96500 : Faraday sabiti

olarak tanımlanır.

- Teorik çözünen anot miktarının hesaplanmasından sonra akım verimi hesabı şu şekilde yapılır (Malkoç, 2008):

$$E = \frac{M_{\text{A}}}{M_{\text{ATe}}} \quad (3.7)$$

Burada;

E: Akım verimi,

MA: Pratikte anot elektrottaki çözünme miktarı (g) 'dır.

- Elde edilen verilerden, toplam teorik çözünen Al yada Fe miktarı, aşağıdaki şekilde hesaplanabilir (Malkoç, 2008):

$$M_T = M_A + M_K \quad (3.8)$$

MK: pratikte katot elektrottaki çözünme miktarı (g) 'dır.

- Enerji Tüketimi hesabı ve harcanan elektrik enerjisini Watt saat (Wh) cinsinden hesabı aşağıdaki şekilde yapılabilir (Malkoç, 2008):

$$E = V \cdot I \cdot t \quad (3.9)$$

Burada;

$E$ : Elektrik enerjisi (Wh) ,

$V$ : volt,

$I$ : akım şiddeti, Amper,

$t$ . zaman, saat

olarak tanımlanır.

- Bununla birlikte Faraday/ $m^3$  :hesaplaması aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir.

$$(\text{Faraday} / m^3) = \frac{I \cdot t}{F \cdot v} \quad (3.10)$$

Burada,

$I$ : akım şiddeti, Amper,

$t$ : Zaman, sn.,

$v$ : Elektrolit hacmi,  $m^3$

olarak tanımlanır.



## 4. BULGULAR

### 4.1. KİMYASAL KOAGÜLASYON DENEYLERİ

#### 4.1.1. Demir Sülfat ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) Koagülasyon Deneyleri

##### 4.1.1.1. Tanımı ve Özellikleri

$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  formülü ile gösterilen demir sülfat, endüstriyel atık suların arıtımında ve zirai faaliyetlerde gübre olarak kullanılan bir koagülant (pıhtılaştırıcı) kimyasaldır. Demir sülfat içerisindeki su miktarına göre; unhidrat (susuz), monohidrat (1 - tek sulu), pentahidrat (5 - beş sulu), heptahidrat (7- yedi sulu) şeklinde çeşitlere ayrılır. Demir ( $\text{Fe}^{+2}$ ) içeriği %17.6 oranındadır. Su ile etkin reaksiyonu pH 5-10 aralığında sağlanmaktadır. Korozif özellikte bir kimyasaldır. Açık mavi-yeşil renkli ve kristal formdadır. Demir 2 sülfat hava ve neme karşı oldukça duyarlı bir kimyasaldır. Demir sülfat kullanım alanının genişliği ile birçok sektöre hitap etmektedir. Atık su arıtma sistemlerinde, tarım sektöründe gübre ve yem, yün boyamada, su şartlandırma işlemlerinde demir sülfat kullanılmaktadır.

##### 4.1.1.2. Kondisyon Zamanında Optimum Karıştırma Süresi

Koagülasyon işlemlerinde pülpe eklenen koagülantın tüm pülp içerisine homojen şekilde dağılması, tane yüzeylerine verimli olacak şekilde etki etmesi açısından karıştırma işlemi önem arz etmektedir. Bu süre az tutulursa yeterli etkileşim olmamakta, fazla olursa da oluşmaya başlayan floklar dağılarak ve tekrardan birleşemeyerek verim düşmektedir.

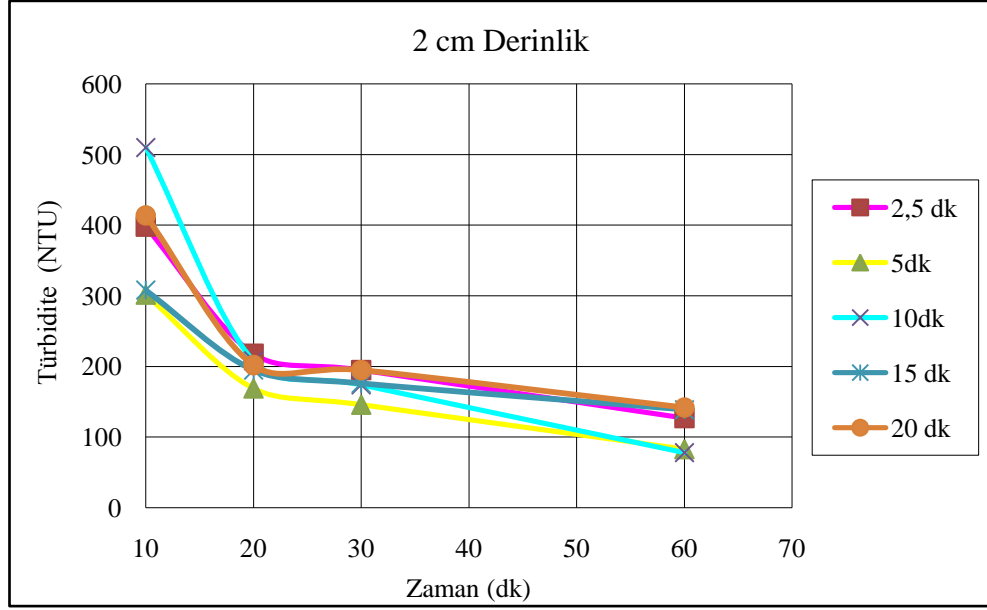
Koagülasyon deneylerinin ilk adımı olarak koagülant eklendikten sonraki kondüsyon süresinin tayini deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde %3 PKO'nında kömür hazırlama tesis artığı numunesi 30 dk 500 devir/dk hızda ön hazırlık işlemine tabii tutulduktan sonra 0.1 Molar 20 ml, 556 gr/ton,  $\text{FeSO}_4$  eklenerek değişik sürelerde karıştırma işlemine tabii tutulmuştur. Karıştırma işlemi topo marka kil dağıtıcı ile yapılmış ve hız 250 devir/dk olarak seçilmiştir. Literatürde yapılan incelemelere göre

bazı koagülasyon deneylerinde genellikle koagülasyon karıştırma hızının 200-300 devir/dk, süresinin de 15sn-5 dk arasında olduğu görülmüştür. Bu sebeple karıştırma hızı ortalama olarak 250 devir/dk olarak seçilmiştir.

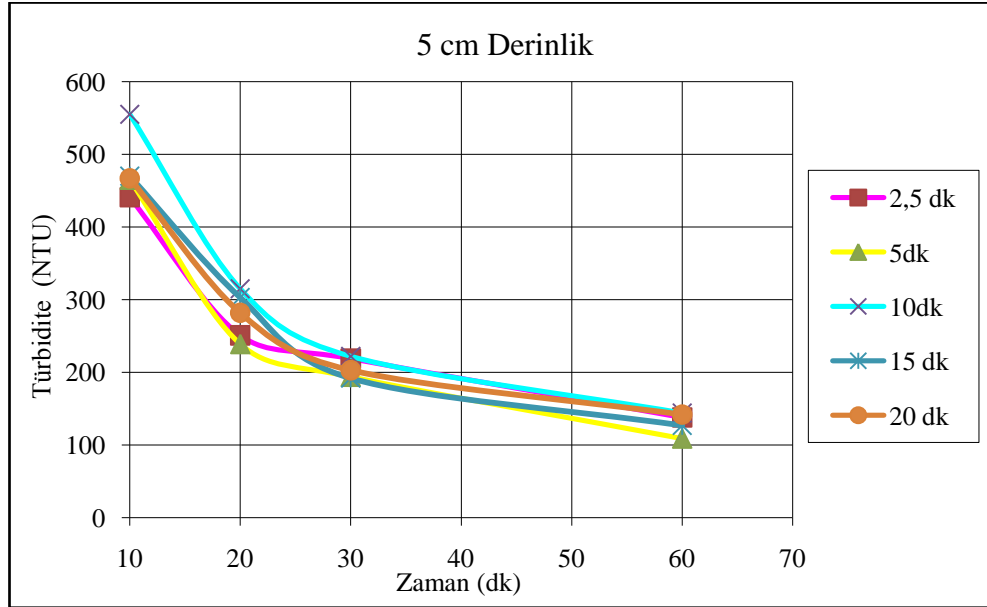
Bu deneylerde kömür hazırlama tesis artığı numunesi 2,5, 5, 10, 15 ve 20 dk karıştırma süresine tabii tutularak 20 ve 50 mm derinliklerden 10, 20, 30 ve 60. dakikalarda numune alınmış ve bulanıklılık NTU cinsinden ölçülmüştür. Gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen veriler tablo halinde Tablo 4.1’de, yüzeyden 2 cm derinlikte gerçekleşen çökme grafiği Şekil 4.1’de ve yüzeyden 5 cm derinlikte gerçekleşen çökme grafiği Şekil 4.2’de verilmiştir.

**Tablo 4.1:** FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O kullanılarak gerçekleştirilen optimum kondisyon süresi deney sonuçları.

Deney Şartları					
Reaktif Tipi					FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O
Reaktif Özellikleri					0,1 M
Reaktif Miktarı					20 ml (556 gr/ton)
Karıştırma Hızı					250 devir/dk
2 cm Derinlik Bulanıklık Verileri (NTU)					
Süre (dk)	2,5 dk	5dk	10dk	15 dk	20 dk
10	398	302	510	308	414
20	218	169	208	195	202
30	195	146	174	176	195
60	127	83	78	139	142
5 cm Derinlik Bulanıklık Verileri (NTU)					
Süre (dk)	2,5 dk	5dk	10dk	15 dk	20 dk
10	441	465	555	470	467
20	251	239	315	303	282
30	219	194	222	192	203
60	138	109	144	127	142



Şekil 4.1: 2 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği.



Şekil 4.2: 5 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği.

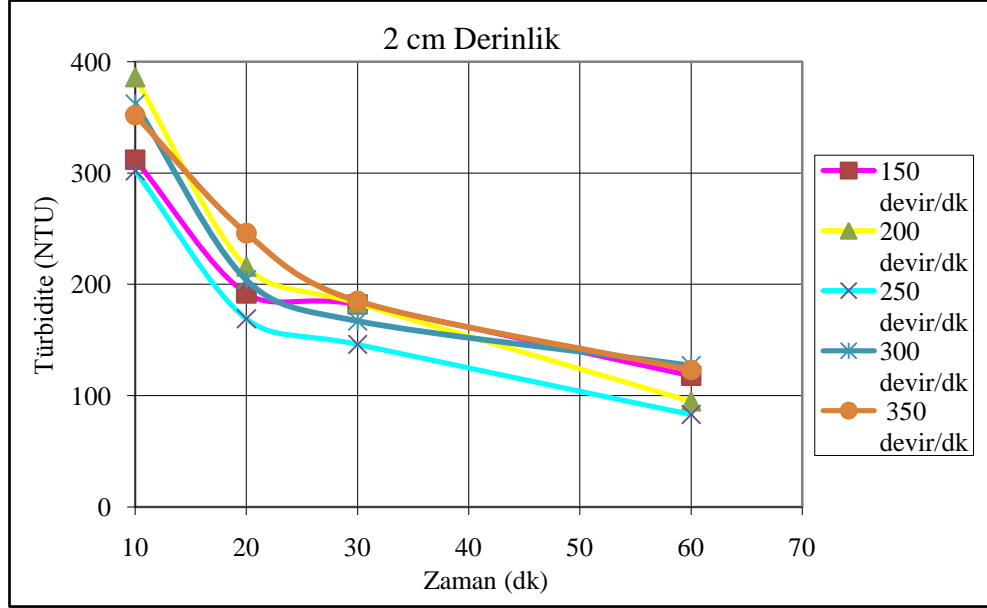
Gerçekleştirilen deneyler sonrasında yukarıdaki grafiklerden de görüldüğü gibi optimum kondisyon karıştırma süresi **5 dakika** olması gerektiğine karar verilmiştir. 5dk'nın altındaki verilerin kötü çıkması yeterli etkileşimin olmadığını, üstündeki değerler ise flokların dağılımının oluşturduğunu göstermektedir. 15 dakikalık ön karıştırmada 10. dakikadaki veri benzer çıksa da çökelme hızı yavaş kalmıştır.

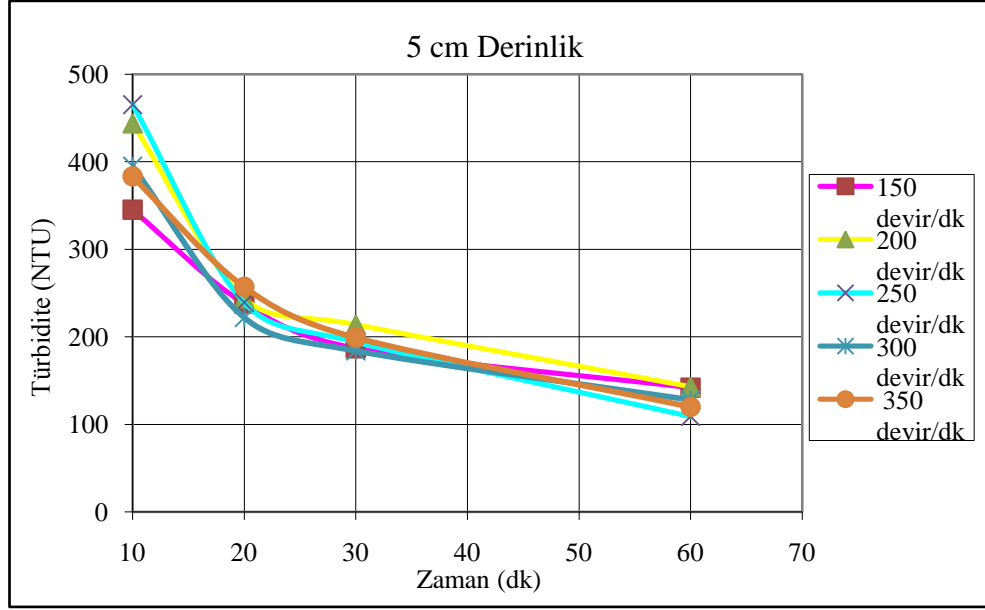
#### **4.1.1.3. *Kondisyon Zamanında Optimum Karıştırma Hızı***

Bir önceki adımda optimum karıştırma süresinin tespitinden sonra kondisyon süresi içinde karıştırıcının hızının optimizasyonu yapılmıştır. Kondisyon işlemi süresinde sürenin etkinliği kadar hızında etkisi önemlidir. Karıştırma hızının artışına bağlı olarak kesme kuvvetleri ile flokların yapısı bozulmakta ve çökelme hızları bundan olumsuz etkilediği yapılan önceki çalışmalardan bilinmektedir. Sistem uygun bir hızda karıştırıldığında, irileşen askıda parçacıklar çökelebilen parçacıklarla çarpışarak onlara yapışır veya oluşan doku içinde tutulur. Böylece büyüyen flokların bir parçası haline gelir. Bu sebeple pülp içerisinde karıştırma sırasında oluşan akımların hızı yine koagülantın verimli bir şekilde tanelerle iletişime geçebilecek şekilde ve flok oluştururken flokların dağılmayacak bir şekilde olması gereklidir. Aksi takdirde floklar akım hızına dayanamayarak dağılır ve sedimentasyon performansı düşer. Bu bilgiler ışığı altında karıştırıcı hızları ayrı ayrı 150, 200, 250, 300 ve 350 devir/dk olacak şekilde değişik hızlar seçilmiş ve denemeler yapılmıştır. Kondisyon hızı 5dk, koagülant miktarı 0,1 molar 20 ml, 556 gr/ton, olacak şekilde seçilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen veriler tablo halinde Tablo 4.2’de, yüzeyden 2 cm derinlikte gerçekleşen çökme grafiği Şekil 4.3’de ve yüzeyden 5 cm derinlikte gerçekleşen çökme grafiği Şekil 4.4’de verilmiştir.

**Tablo 4.2:** FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O kullanılarak gerçekleştirilen optimum karıştırma hızı deney sonuçları.

Deney Şartları					
Reaktif Tipi					FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O
Reaktif Özellikleri					0,1 M
Reaktif Miktarı					20 ml (556 gr/ton)
Karıştırma Süresi					5 dk
2 cm Derinlik Bulanıklık Verileri (NTU)					
Süre (dk)	150 devir/dk	200 devir/dk	250 devir/dk	300 devir/dk	350 devir/dk
10	312	386	302	362	352
20	192	216	169	204	246
30	182	183	146	167	185
60	118	95	83	127	123
5 cm Derinlik Bulanıklık Verileri (NTU)					
Süre (dk)	150 devir/dk	200 devir/dk	250 devir/dk	300 devir/dk	350 devir/dk
10	345	444	465	395	383
20	238	244	239	222	257
30	187	214	194	184	199
60	142	143	109	128	120

**Şekil 4.3:** 2 cm derinlikten elde edilen bulanıklık değerleri grafiği.



Şekil 4.4: 5 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği.

Gerçekleştirilen deneyler sonrasında yukarıdaki grafiklerden de görüldüğü gibi optimum kondisyon karıştırma hızının **250 devir/dk** olması gerektiğine karar verilmiştir. Özellikle 2 cm derinlikten alınan veriler hız etkisini açıkça ortaya koymuştur. Bununla beraber 5 cm derinlikteki durum genel olarak aynıdır. Ancak tikiplerde üstten temiz suyun alınacağı düşünüldüğü için 2 cm derinlikten elde edilen verilen kabul edilmiştir. Bununla beraber 5 cm derinlikte çökelen malzemelerin hızının kesilmesi ve bu alanın bir tür sıkışma zonu olması sebebi ile 2 cm derinlikten elde edilen veriler kabul edilmiştir. 250 devir/dk altındaki hızların yine yeterli koagülant-tane etkileşimini oluşturmadığı bununla beraber yüksek hızların floklarını dağıtmasına sebep olduğu söylenebilir.

#### 4.1.1.4. Optimum Reaktif Miktarı

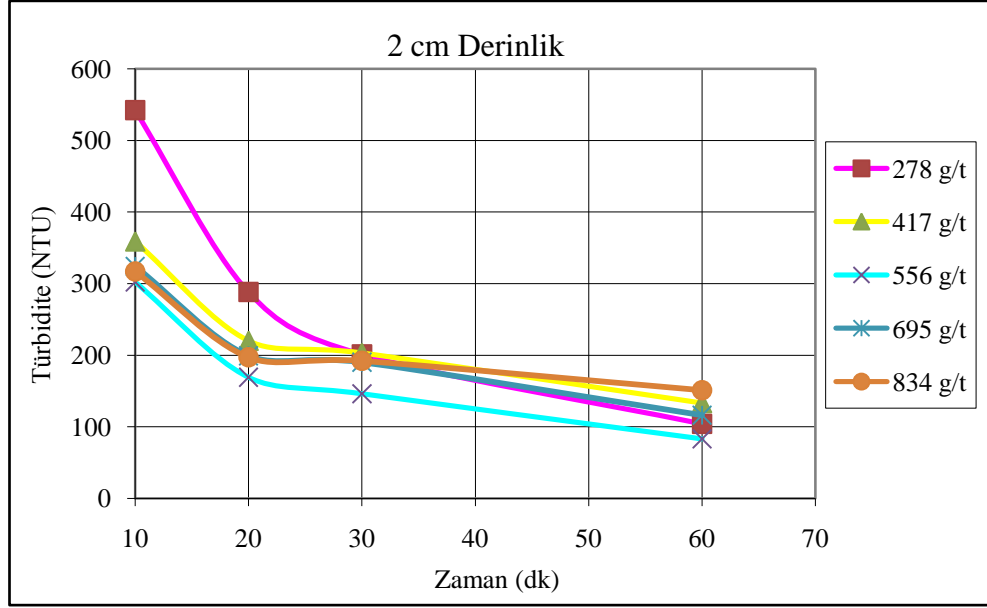
Kondisyon şartlarında optimum karıştırma hızının ve süresinin tespitinden sonra pülpe eklenmesi gereken koagülant miktarlarının optimizasyonu deneyleri yapılmıştır. Koagülant miktarının önemi literatürde başka yapılan koagülasyon çalışmaları ile ortaya konmuştur. Belirli metal tuzları ( $Al_2(SO_4)_3$ ,  $FeCl_3$ ,  $MgCl_2$  gibi) suya eklendiğinde, metal hidroksit formunda hızlı bir tortu oluşumu gözlenir. Kolloid parçacıklar ya bu tortuların çekirdeğini oluşturarak ya da tortu yığınları içerisinde kalarak durağan halden çıkarlar ve bir sonraki aşama olan çöktürme sırasında sudan uzaklaştırılırlar (Duran,1997) Eğer oluşan metal hidroksitlerin konsantrasyonu az ise yeterli flok

oluşturulamamakta, bunun tam tersi olarak ta fazla miktarda metal hidroksitin varlığı durumunda miktarda ters yük oluşturarak flok oluşturmaya engel oluşturmaktadır.

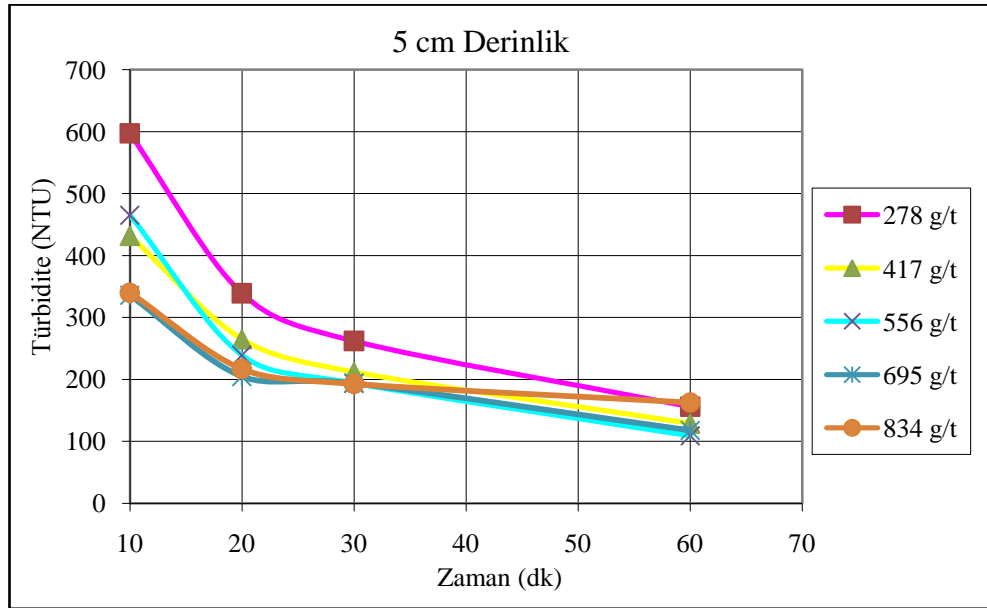
Söz konusu numunelerde optimum miktarın belirlenmesi amacı ile 0,1 Molar  $\text{FeSO}_4$ 'ten 278, 417, 556, 695 ve 834 gr/ton kullanılarak optimum miktar tespit edilmeye çalışılmıştır. Karıştırma hızı 250 devir/dk ve süresi 5 dakika olarak seçilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen veriler tablo halinde Tablo 4.3'te, yüzeyden 2 cm derinlikte gerçekleşen çökme grafiği Şekil 4.5'de ve yüzeyden 5 cm derinlikte gerçekleşen çökme grafiği Şekil 4.6'de verilmiştir.

**Tablo 4.3:**  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  kullanılarak gerçekleştirilen optimum reaktif miktarı deney sonuçları.

<b>Deney Şartları</b>					
<b>Reaktif Tipi</b>					<b><math>\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}</math></b>
<b>Reaktif Özellikleri</b>					<b>0,1 M</b>
<b>Karıştırma Hızı</b>					<b>250 devir/dk</b>
<b>Karıştırma Süresi</b>					<b>5 dk</b>
<b>2 cm Derinlik Bulanıklık Verileri (NTU)</b>					
<b>ml-gr/ton miktar</b>	<b>10 ml</b>	<b>15 ml</b>	<b>20 ml</b>	<b>25 ml</b>	<b>30 ml</b>
<b>Süre (dk)</b>	278 (g/ton)	417 (g/ton)	556 (g/ton)	695 (g/ton)	834 (g/ton)
<b>10</b>	542	359	302	324	317
<b>20</b>	288	220	169	199	197
<b>30</b>	201	203	146	190	192
<b>60</b>	104	133	83	116	151
<b>5 cm Derinlik Bulanıklık Verileri (NTU)</b>					
<b>ml-gr/ton miktar</b>	<b>10 ml</b>	<b>15 ml</b>	<b>20 ml</b>	<b>25 ml</b>	<b>30 ml</b>
<b>Süre (dk)</b>	278 (g/ton)	417 (g/ton)	556 (g/ton)	695 (g/ton)	834 (g/ton)
<b>10</b>	597	432	465	336	340
<b>20</b>	339	265	239	205	217
<b>30</b>	262	212	194	194	193
<b>60</b>	156	129	109	118	163



Şekil 4.5: 2 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği.



Şekil 4.6: 5 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği.

Yukarıdaki verilerde de görüldüğü gibi kömür numunesinin optimum koagülasyonu için **20 ml** 0,1 molar  $\text{FeSO}_4$  başka bir deyişle **556 gr/ton** koagülant yeterli olmaktadır. Bu miktarın altında yeterli demir hidroksit konsantrasyonunun oluşmaması sebebi ile verim düşmüş, üzeri konsantrasyonlarda ise iyonik şarjın fazla olması sebebi ile tanecikler yeterli büyüklükte floklar oluşturamamıştır.



#### 4.1.1.5. *Optimum pH'in Belirlenmesi*

Bilindiği gibi koagülasyon işlemlerinde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bunların bu projeye konu olan yollarından bir tanesi koagülantların ilavesiyle oluşan metal hidroksitler çökerken beraberinde kolloidlerin çöktürülmesidir. Bu sebeple metal hidroksitlerin süspansiyon içerisindeki kimyasal karakterleri bakımından ortam şartları büyük önem taşımaktadır.

Koagülasyon ve flokülasyon işlemlerine birçok unsur etki etmektedir. Bunlar pH, su kalitesi, karıştırma hızı ve süresi, sıcaklık, koagülant madde cinsi, suyun alkalitesi v.b. olarak sıralanabilir. Bu işlemlerde kullanılan en önemli koagülantlar  $Al^{+3}$ ,  $Fe^{+3}$  tuzları ve kireçtir. Alkalinite bulunan bir ortamda suya demir tuzları ilave edildiğinde pH 3-13 aralığında çözünmeyen sulu demir hidroksit oluşur. Gerçekleşen reaksiyonlar genel olarak şu şekilde gösterilebilir. (Öztürk, vd., 2005).



$$[Fe^{+3}][OH^{-}]^3 = 10^{-36} \quad (4.2)$$

Yine yapılan çeşitli araştırmalar göstermiştir ki:

- Asidik pH'da flok yükü pozitif,
- Alkali pH'da negatif,
- pH 6.5-8.0 aralığında ise karışık yüklüdür.

Ortamda anyonların bulunması flokülasyon derecesini etkiler. Sülfat iyonu asit aralığında flokülasyonu yükseltir, alkali aralığında ise düşürür. Klorür iyonu hem asit hem bazik pH'da flokülasyon derecesini biraz yükseltir. (Öztürk, vd., 2005).

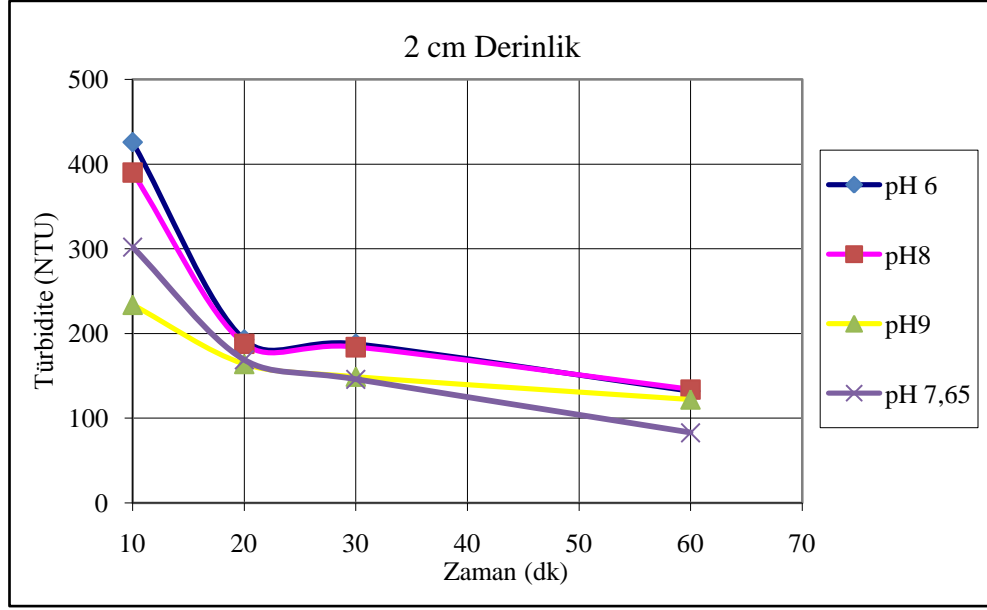
Yukarıdaki genelleştirilmiş reaksiyonlarda da görüldüğü gibi metal tuzlarının sulu ortamdaki davranışlarındaki temel etki, ortamdaki hidroksit iyon miktarı yani ortam pH'sıdır.

Yukarıda verdiğimiz bilgiler ışığında projemize konu olan koagülasyon deneyleri gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Deneyler yine 500 devir/dk'de 30 dk ön karıştırma işlemi daha önce belirlenen optimum hız, süre ve reaktif miktarında gerçekleştirilerek koagülasyon işleminin doğal, pH6, pH8 ve pH 9'daki karakterleri incelenmeye çalışılmıştır. Deneyler sırasında süspansiyonun pH değeri 6'nın altına indirilemediği gibi 9'un üzerine de çıkılamamıştır. Özellikle pH6'nın altında süspansiyon tamponlama yaparak hızla pH'ı 6'ya çekmiştir.

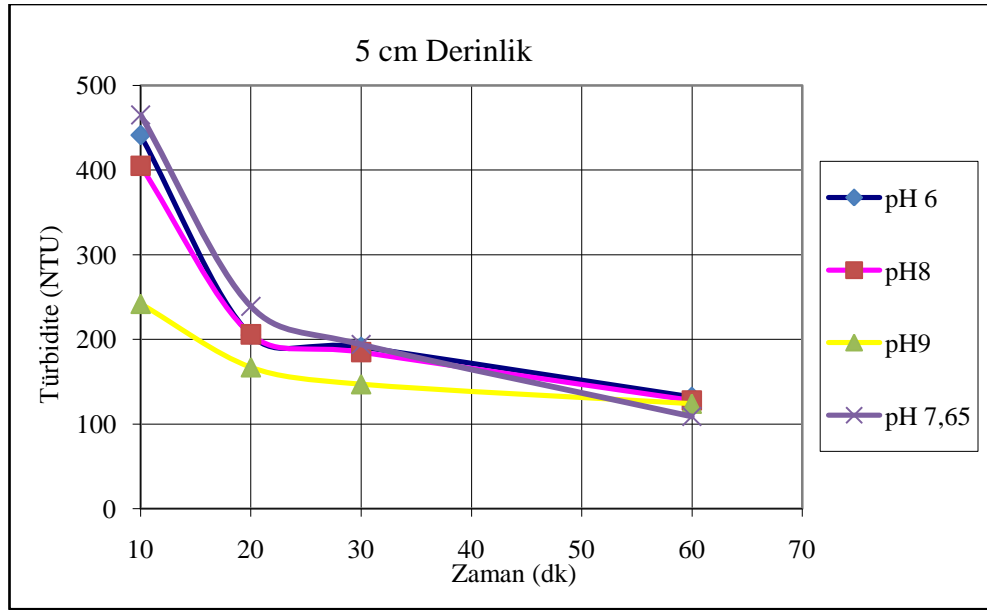
Deneylerde kullanılan 0,1 molar 20 ml, 556 gr/ton, demir sülfat çözeltisinin logaritmik konsantrasyonu hesapladığında -2,60 değeri bulunmakta ve bu değer pH 6, 6.65, 8 ve 9'da Fe(OH)<sub>3</sub> katı formunda bulunmakta ve koagülasyonu gerçekleştirmektedir. Gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen veriler tablo halinde Tablo 4.4'te, yüzeyden 2 cm derinlikte gerçekleşen çökme grafiği Şekil 4.7'de ve yüzeyden 5 cm derinlikte gerçekleşen çökme grafiği Şekil 4.8'de verilmiştir.

**Tablo 4.4:** Değişik pH'larda gerçekleştirilen deney sonuçları.

Deney Şartları				
Reaktif Tipi				FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O
Reaktif Özellikleri				0,1 M
Karıştırma Hızı				250 devir/dk
Karıştırma Süresi				5 dk
Reaktif Miktarı				20ml (556 gr/ton)
2 cm Derinlik Bulanıklık Verileri (NTU)				
Süre (dk)	pH 6	pH 7,65 (doğal)	pH 8	pH 9
10	426	302	390	234
20	193	169	188	164
30	188	146	184	149
60	132	83	134	122
5 cm Derinlik Bulanıklık Verileri (NTU)				
Süre	pH 6	pH 7,65 (doğal)	pH 8	pH 9
10	441	465	405	242
20	205	239	206	167
30	191	194	185	147
60	132	109	128	124



Şekil 4.7: 2 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği.



Şekil 4.8: 5 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği.

Deneylede pH6'nın altına inilememiştir. Bununla birlikte pH6 ve pH8'de demir hidroksit moleküllerinin karışık (+ ve -) yükte olması sebebi ile düşük koagülasyon performansı gösterdiği düşünülmektedir. Buna karşın pH9 ortamında gerçekleştirilen koagülasyon deneylerin de diğer başlangıç pH değerlerine göre daha yüksek verim elde edildiği görülmüştür. Deney sonuçlarına göre optimum başlangıç pH değerinin hem pH

9 için hemde pH 7,65 için 25. Dakika için oldukça yakın olduğu görülmesine karşın 5 cm derinlikten elde edilen veriler dikkate alındığında başlangıç pH'sının **pH 9** olduğu şartların daha verimli olduğu kanısına varılmıştır.

#### **4.1.2. Alüminyum Sülfat ( $\text{Al}_2\text{SO}_4$ ) $_3$ .16 $\text{H}_2\text{O}$ ) Koagülasyon Deneyleri**

##### **4.1.2.1. Tanımı ve Özellikleri**

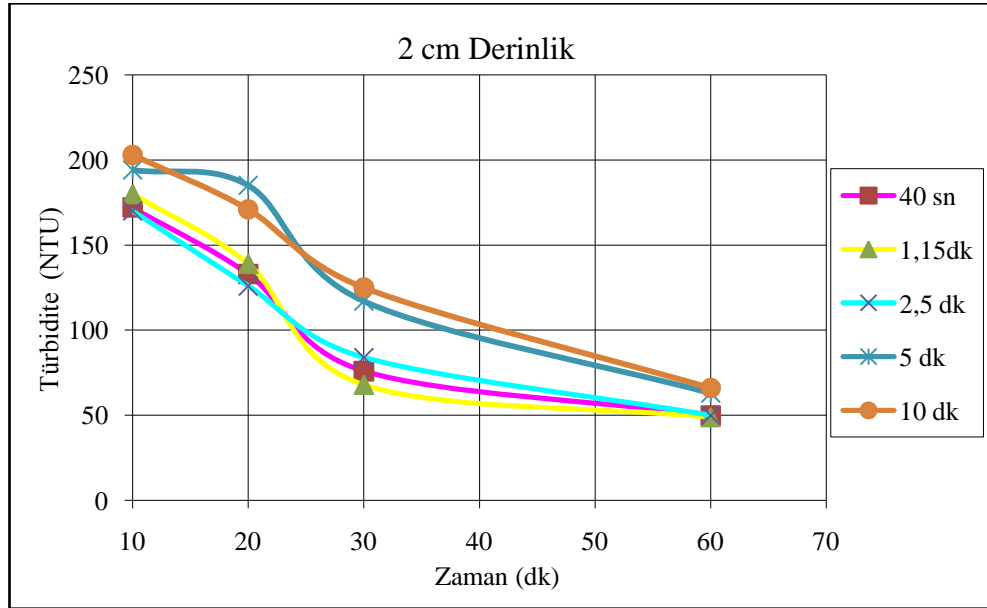
Alüminyum Sülfat, kısaca alüm olarak ifade edilen bir bileşiktir. Kimyasal formülü ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ .16 $\text{H}_2\text{O}$ )'dur. Suda kolayca çözünebilir. Alüm ile koagülasyon düşük pH'larda (pH < 4) genellikle yük nötralizasyonu ile gerçekleşirken, nötral pH'larda (pH: 6-8) sıyırma (sweep) mekanizmasıyla gerçekleşmektedir. Çünkü düşük pH'larda süspansiyonda bol miktarda serbest  $\text{Al}^{+3}$  iyonları bulunurken orta ve yüksek pH'larda hidroksilli Al bileşiği olan  $\text{Al}(\text{OH})_3$  çökeleği oluşur (Gregory, 1989, Zeta-Meter Inc., 1993). Diğer yandan süspansiyona giren alüm dozajının da süspansiyon pH'sı üzerinde ve dolayısıyla da çökelek oluşumunda etkili olduğu ve 30 mg/L den daha yüksek dozajlarda genellikle sıyırma mekanizmasının etkili olduğu ifade edilmektedir (Zeta-Meter Inc., 1993). Alümün suda hidrolizi sonucu oluşan alüminyum hidroksit genellikle  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .x $\text{H}_2\text{O}$  kimyasal formundadır ve amfoterdir.. (Eckfender, 1989).

##### **4.1.2.2. Kondisyon Zamanında Optimum Karıştırma Süresi**

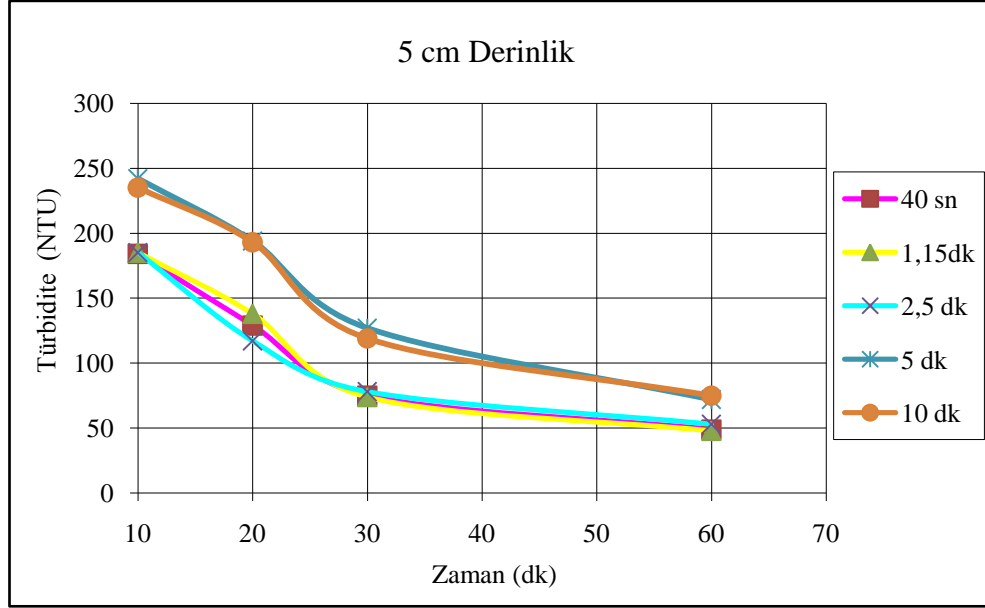
Karıştırma süresinin koagülasyon mekanizmasına etkisini demir sülfat ile yapılan deneyler kısmında verilmiştir. Aynı mantık ile Alüminyum Sülfat ile de aynı sıralamada koagülasyon deneyleri yapılmıştır. Deneylerde %3 PKO kömür hazırlama tesis atık numunesi 30 dk 500 devir/dk hızda ön hazırlık işlemine tabii tutulduktan sonra 0.1 Molar 20 ml, 1260 gr/ton, ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ .16 $\text{H}_2\text{O}$ ) eklenerek değişik sürelerde karıştırma işlemine tabii tutulmuştur. Karıştırma işlemi topo marka kil dağıtıcı ile yapılmış ve hız 250 devir/dk olarak seçilmiştir. Deneylerde ön kondüsyon süresi olarak 40 sn, 1 dk, 2,5dk, 5dk ve 10 dklık süreler denenmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen veriler tablo halinde Tablo 4.5'te, yüzeyden 2 cm derinlikte gerçekleşen çökme grafiği Şekil 4.9'da ve yüzeyden 5 cm derinlikte gerçekleşen çökme grafiği Şekil 4.10'da verilmiştir.

**Tablo 4.5:**  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 16H_2O$  kullanılarak gerçekleştirilen optimum kondisyon süresi deney sonuçları.

Deney Şartları					
Reaktif Tipi		$Al_2(SO_4)_3 \cdot 16H_2O$			
Reaktif Özellikleri		0,1 M			
Reaktif Miktarı		20 ml (1260 gr/ton)			
Karıştırma Hızı		250 devir/dk			
2 cm Derinlik Bulanıklık Verileri (NTU)					
Süre (dk)	40 sn	1,15dk	2,5 dk	5 dk	10 dk
10	172	180	170	194	203
20	133	139	126	185	171
30	76	68	84	117	125
60	50	49	50	63	66
5 cm Derinlik Bulanıklık Verileri (NTU)					
Süre (dk)	40 sn	1dk 15sn	2,5 dk	5 dk	10 dk
10	184	185	185	242	235
20	129	138	117	194	193
30	75	74	78	127	119
60	49	48	53	72	75



**Şekil 4.9:** 2 cm derinlikten elde edilen bulanıklık değerleri grafiği.



**Şekil 4.10:** 5 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği.

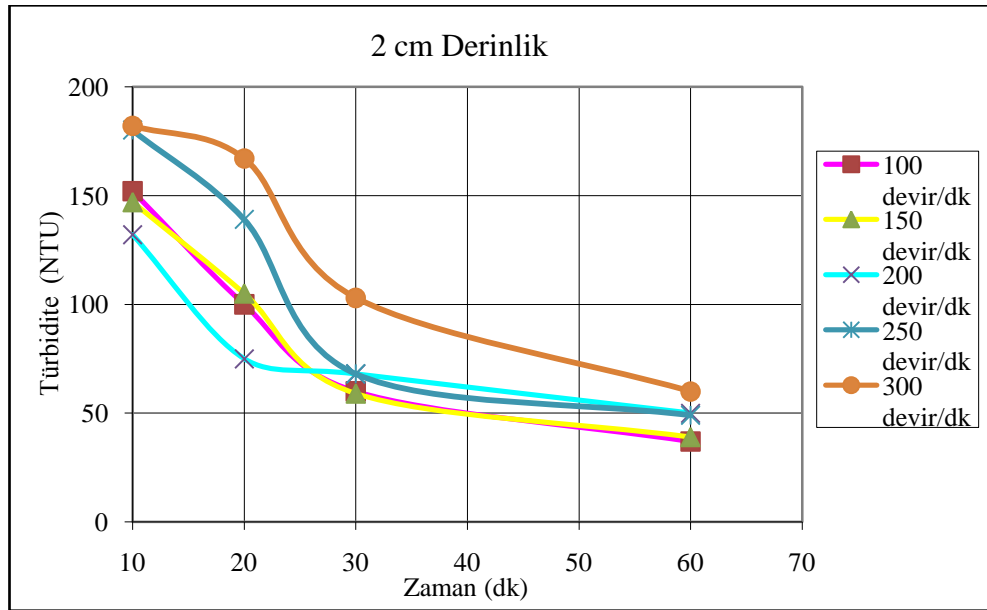
Yukarıdaki grafiklerdeki veriler incelendiğinde alüminyum sülfat ile yapılan çöktürme deneylerinde demir sülfata karşı farklı bir çökeltme grafiği ortaya çıkmıştır. Demir sülfatta lineer çökeltme gibi başlayıp yataylanan grafik karşısında alüminde sanki alüminyum hidroksitlerin taneciklerle etkileşimi daha geç olmakta ve ardından da hızla çökeltim gerçekleşmektedir. Özellikle 20. dakikadan sonra çökeltmede bir hızlanma olmuştur. Deney verileri incelendiğinde **1dk 15 sn'lik** karıştırma süresinin en verimli çökeltme grafiğini çizdiği görülmüştür. Ayrıca burada çökeltimin nihayete erdiği süre 30 dk olarak belirlenmiş demir sülfat sonuçlarına göre 10 dk gecikme yaşandığı görülmüştür.

#### **4.1.2.3. Kondisyon Zamanında Optimum Karıştırma Hızı**

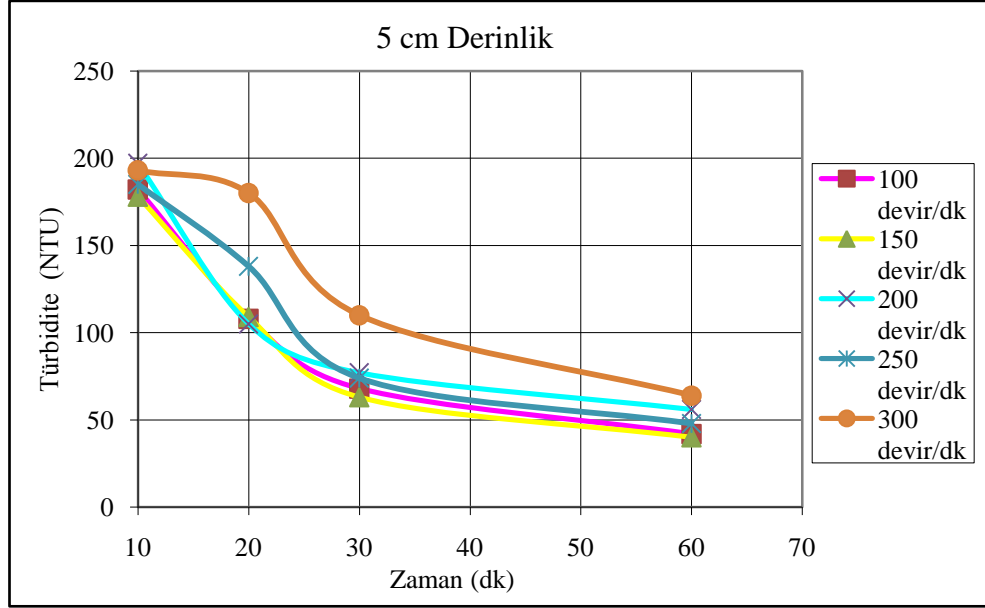
Bir önceki adımda optimum karıştırma süresinin tespitinden sonra kondisyon süresi içinde karıştırıcının hızının optimizasyonu yapılmıştır. Daha önce değindiğimiz bilgiler ışığı altında karıştırıcı hızları ayrı ayrı 100, 150, 200, 250 ve 300 devir/dk olacak şekilde değişik hızlar seçilmiş ve denemeler yapılmıştır. Kondisyon hızı 1dk 15 sn, koagülant miktarı 0,1 molar 20 ml, 1260 gr/ton, olacak şekilde seçilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen veriler tablo halinde Tablo 4.6'da, yüzeyden 2 cm derinlikte gerçekleşen çökme grafiği Şekil 4.11'de ve yüzeyden 5 cm derinlikte gerçekleşen çökme grafiği Şekil 4.12'de verilmiştir.

**Tablo 4.6:**  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 16H_2O$  kullanılarak gerçekleştirilen optimum karıştırma hızı deney sonuçları.

Deney Şartları					
Reaktif Tipi					$Al_2(SO_4)_3 \cdot 16H_2O$
Reaktif Özellikleri					0,1 M
Reaktif Miktarı					20 ml (1260 gr/ton)
Karıştırma Süresi					1dk 15 sn
2 cm Derinlik Bulanıklık Verileri (NTU)					
Süre (dk)	100 devir/dk	150 devir/dk	200 devir/dk	250 devir/dk	300 devir/dk
10	152	147	132	180	182
20	100	105	75	139	167
30	60	59	68	68	103
60	37	39	50	49	60
5 cm Derinlik Bulanıklık Verileri (NTU)					
Süre (dk)	100 devir/dk	150 devir/dk	200 devir/dk	250 devir/dk	300 devir/dk
10	182	178	197	185	193
20	108	109	105	138	180
30	68	63	77	74	110
60	42	40	56	48	64



**Şekil 4.11:** 2 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği.



Şekil 4.12: 5 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği.

Deney sonuç grafikleri göstermektedir ki 200 devir/dk hız zaman açısından verimli gibi dursa da 100 ve 150 devir/dk hızlar 30 dk'lık zaman diliminde daha verimli bir sonuç ortaya çıkarmıştır. Burada dikkat çeken 100 ve 150 devir/dk hızların sonuçların çok benzer olmasıdır. Demek ki alüm ile oluşan flokların yapısı bahsedilen deney şartları içerisinde 250 devir/dk'e kadar sağlam kalmakta ancak 250 devir/dk üzeri hızlarda dağılıma uğramaktadır. Bu sonuç ayrıca alüm floklarında, demir sülfat floklarına göre çok daha güçlü yapıda wan der wals bağları oluşturduğunun göstergesidir. Deney sonuçlarına göre 30 dk'lık veri olarak **150 devir/dk** ile deneylere devam edilmesine karar verilmiştir.

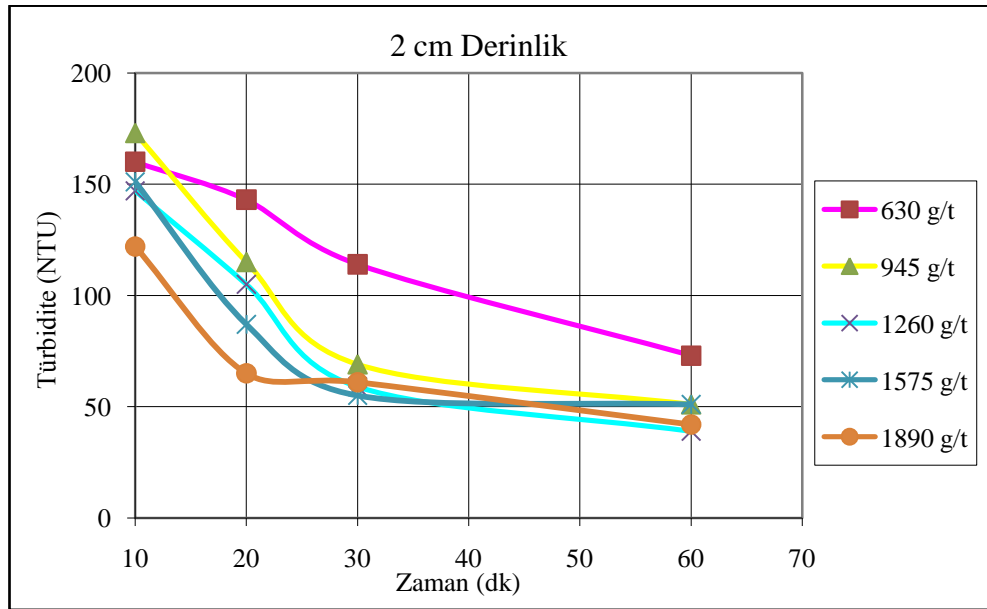
#### 4.1.2.4. Optimum Reaktif Miktarı

Reaktif miktarlarının da parametre olarak kabul edildiği deney düzeneğinde alüm ile de farklı konsantrasyonlarda denemeler yapılmıştır. Söz konusu numunelerde optimum miktarın belirlenmesi amacı ile 0,1 Molar  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 16H_2O$  ten 630, 945, 1260, 1575 ve 1890 gr/ton kullanılarak optimum miktar tespit edilmeye çalışılmıştır. Karıştırma hızı 150 devir/dk ve süresi 1dk 15sn olarak seçilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen veriler tablo halinde Tablo 4.7'de, yüzeyden 2 cm derinlikte gerçekleşen çökme grafiği Şekil 4.13'te ve yüzeyden 5 cm derinlikte gerçekleşen çökme grafiği Şekil 4.14'te verilmiştir.

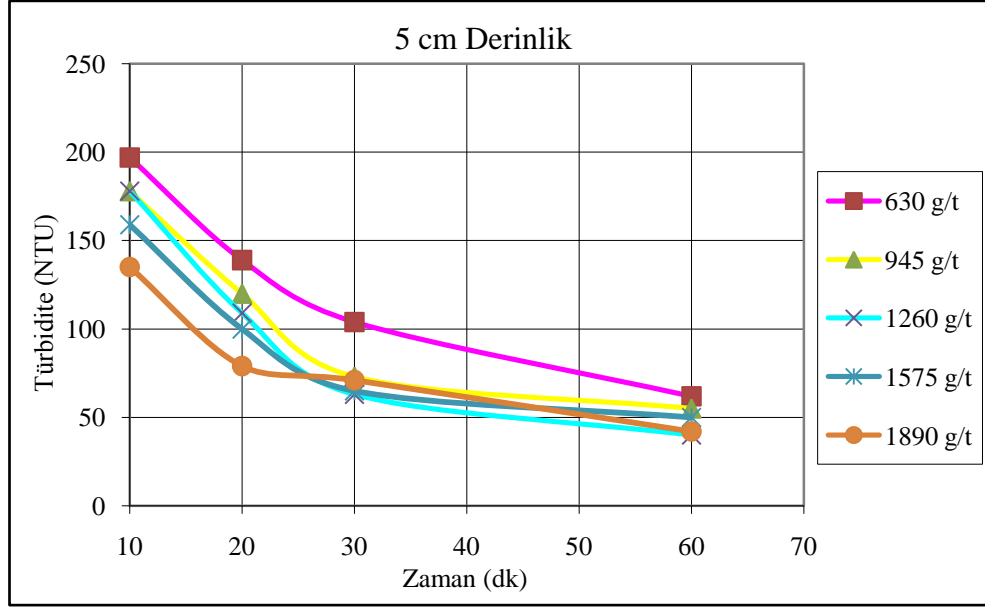


**Tablo 4.7:**  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 16H_2O$  kullanılarak gerçekleştirilen optimum reaktif miktarı deney sonuçları.

Deney Şartları					
Reaktif Tipi			$Al_2(SO_4)_3 \cdot 16H_2O$		
Reaktif Özellikleri			0,1 M		
Karıştırma Hızı			150 devir/dk		
Karıştırma Süresi			1dk 15 sn		
2 cm Derinlik Bulanıklık Verileri (NTU)					
ml-gr/ton miktar	10 ml	15 ml	20 ml	25 ml	30 ml
Süre (dk)	630 gr/ton	945 gr/ton	1260 gr/ton	1575 gr/ton	1890 gr/ton
10	160	173	147	151	122
20	143	115	105	87	65
30	114	69	59	55	61
60	73	51	39	51	42
5 cm Derinlik Bulanıklık Verileri (NTU)					
ml-gr/ton miktar	10 ml	15 ml	20 ml	25 ml	30 ml
Süre (dk)	630 gr/ton	945 gr/ton	1260 gr/ton	1575 gr/ton	1890 gr/ton
10	197	178	178	159	135
20	139	120	109	100	79
30	104	73	63	65	71
60	62	55	40	50	42



**Şekil 4.13:** 2 cm derinlikten elde edilen bulanıklık değerleri grafiği.



**Şekil 4.14:** 5 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği.

Deney verileri incelendiğinde daha önce seçilen 30dk'lık verilerde hemen hemen tüm konsantrasyonların aynı noktada kesiştikleri görülmüştür. 10ml'lik (630 gr/ton) verinin yetersiz kaldığı düşünülürse tüm konsantrasyonların benzer sonuçlar verdiği görülebilir. Bu sebeple konsantrasyon seçiminde daha hızlı sonuç veren **30 ml-1890 gr/ton** lik konsantrasyon optimum değer olarak alınmıştır. Burada 10 ml'lik alüm eklenmesinde tüm alüm bileşikleri taneler arasında dağılmış ancak yeterli olmadıkları için pülp bulanık kalmış, 15, 20 ve 25 ml'lik (945, 1260 ve 1575 gr/ton) konsantrasyonlarda ise tüm alüminyum hidroksitler tanelerle flok oluşturmuş, fazla kalanlarda kendiliğinden çökmüştür. 30 ml'lik verinin daha iyi sonuç vermesi çok fazla artan konsantrasyonda alüminyum hidroksitlerin çok büyük floklar oluşturması olarak açıklanabilir.

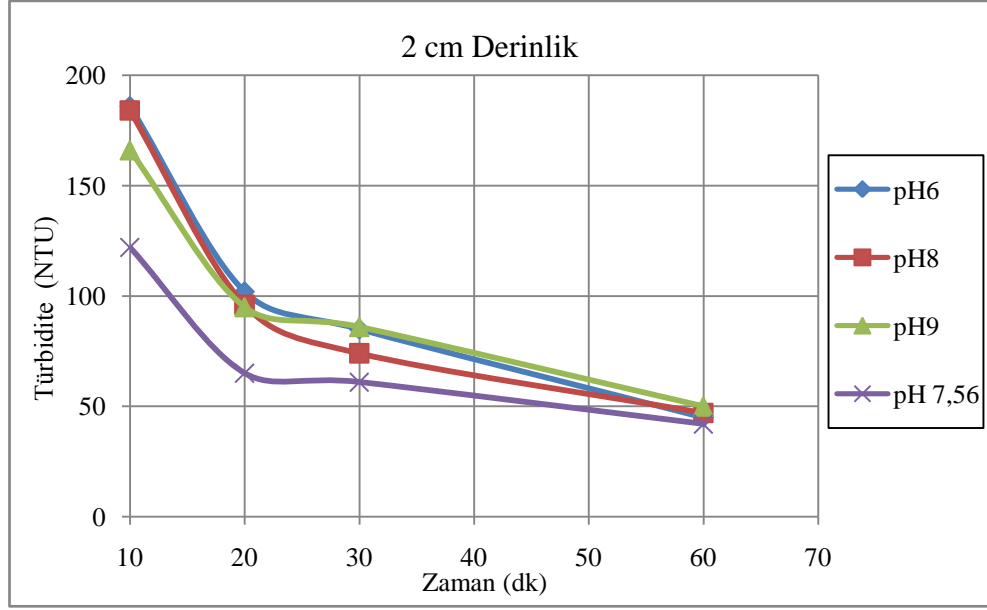
#### 4.1.2.5. *Optimum pH'in Belirlenmesi*

Önceki deneylerde optimum hız, süre ve şarj miktarının belirlenmesinden sonra değişik pH'larda koagülasyon verimlerinin araştırılması yukarıda verdiğimiz bilgiler ışığında projemize konu olan koagülasyon deneyleri gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Deneyler yine 500 devir/dk'de 30 dk ön karıştırma işlemi daha önce belirlenen optimum hız, süre ve reaktif miktarında gerçekleştirilerek koagülasyon işleminin doğal pH, pH6, pH8 ve pH 9'daki karakterleri incelenmeye çalışılmıştır. Deneyler sırasında süspansiyonun pH değeri 6'nın altına indirilemediği gibi 9'un üzerine de çıkılamamıştır. Özellikle pH6'nın altında süspansiyon tamponlama yaparak hızla pH'ı 6'ya çekmiştir.

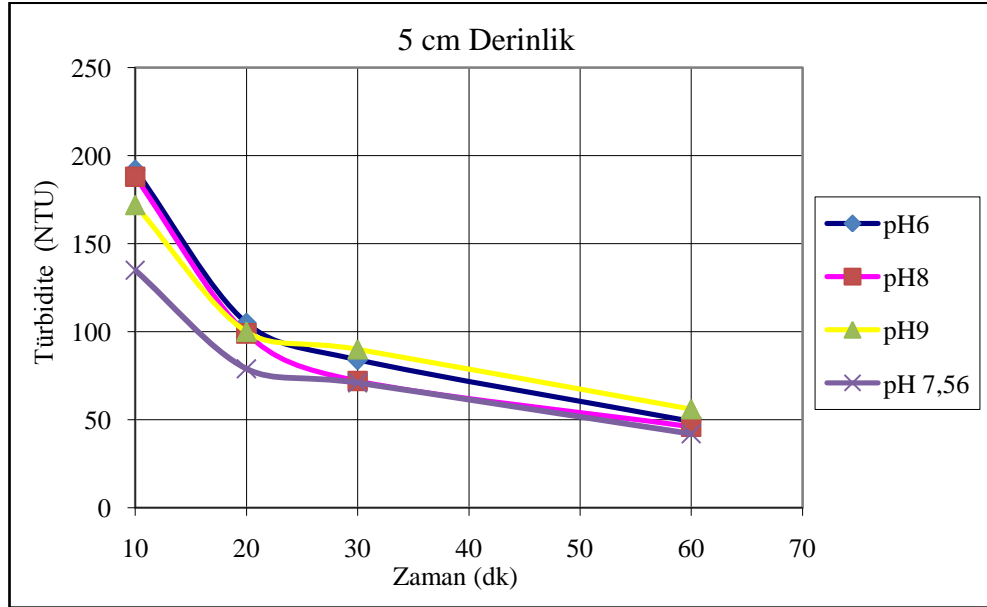
Deneylerde kullanılan 0,1 molar 30 ml, 1890 gr/ton, demir sülfat çözeltisinin logaritmik konsantrasyonu hesapladığında -2,22 değeri bulunmakta ve bu değer pH 6, 7,56, 8 ve 9'da  $Al(OH)_3$  katı formunda bulunmakta ve koagülasyonu gerçekleştirmektedir. Gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen veriler tablo halinde Tablo 4.8'de, yüzeyden 2 cm derinlikte gerçekleşen çökme grafiği Şekil 4.15'te ve yüzeyden 5 cm derinlikte gerçekleşen çökme grafiği Şekil 4.16'da verilmiştir.

**Tablo 4.8:**  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 16H_2O$  kullanılarak gerçekleştirilen optimum pH deney sonuçları.

Deney Şartları				
Reaktif Tipi		$Al_2(SO_4)_3 \cdot 16H_2O$		
Reaktif Özellikleri		0,1 M		
Karıştırma Hızı		150 devir/dk		
Karıştırma Süresi		1dk 15 sn		
Reaktif Miktarı		30 ml (1890 gr/ton)		
2 cm Derinlik Bulanıklık Verileri (NTU)				
Süre (dk)	pH 6	pH 7,56 (Doğal)	pH8	pH9
10	186	122	184	166
20	102	65	96	95
30	85	61	74	86
60	45	42	47	50
5 cm Derinlik Bulanıklık Verileri (NTU)				
Süre (dk)	pH 6	pH 7,56 (Doğal)	pH8	pH9
10	192	135	188	172
20	105	79	99	100
30	84	71	72	90
60	49	42	46	56



Şekil 4.15: 2 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği.



Şekil 4.16: 5 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği.

Alüminyum hidroksit  $Al_2O_3 \cdot x H_2O$  kimyasal formunda olup amfoterik yapıdadır. Yani asit ya da baz gibi davranır. Asidik şartlarda:

$$[Al^{+3}][OH]^{-3} = 1.9 \times 10^{-33} \quad (4.3)$$

pH 4’de çözültide 51.3 mg/L  $Al^{+3}$  mevcuttur. Alkali şartlarda ise susuz alüminyum oksit çözüdür:



$$[AlO_2^-][H^+] = 4 \times 10^{-13} \quad (4.5)$$

Alüm flokları pH 7.0’de çok az çözüdür. pH 7.6’nın altında ise flok yükü pozitif, pH 8.2’nin üstünde ise negatiftir. Bu limitler arasında flok yükü karışıktır. Bununla birlikte sulu ortamın pH değerine bağlı olarak  $Al(OH)^{+2}$ ,  $Al_2(OH)_2^{+4}$  ve  $Al(OH)_4^-$  gibi diğer iyonik türler sistemde mevcut olabilir.

Deneylerden elde edilen sonuçlara göre pH 7,56 (doğal) dışındaki başlangıç pH değerlerinde istenen koagülasyon verimi alınamamış ve en uygun koagülasyonun **pH 7,56**’da olduğu görülmüştür. Ayrıca koagülasyon süresinin 20dk’ya indiği gözlenmiştir.

#### **4.1.3. Demir Klorür ( $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ ) Koagülasyon Deneyleri**

##### **4.1.3.1. Tanımı ve Özellikleri**

$FeCl_3$  formülü ile gösterilen demir 3 klorür, endüstriyel atık su ve içme suyu arıtımında kullanılan bir koagülant (pıhtılaştırıcı) kimyasaldır. Demir 3 klorür %40’lık çözelti formdadır. Su ile etkin reaksiyonu pH 6-9 aralığında sağlanmaktadır. Çözelti formu korozif özellikte olduğu için plastik veya paslanmaz çelik tanklarda stoklanmalıdır. Koyu kahve renklidir. Tip-1 normu içme suyu arıtma proseslerinde kullanılırken, Tip-2 normu atık su arıtma proseslerinde kullanılmaktadır.  $FeCl_3$  etkili bir koagülant olmasının yanı sıra, suda hidrolizi sonucu oldukça aktif ve geniş bir yüzey alanına sahip  $Fe(OH)_3$  flokları da oluşturur. Böylece suda bulunan metaller ve bazı kirleticiler bu floklara adsorpsiyon yoluyla sistemden uzaklaşırlar.

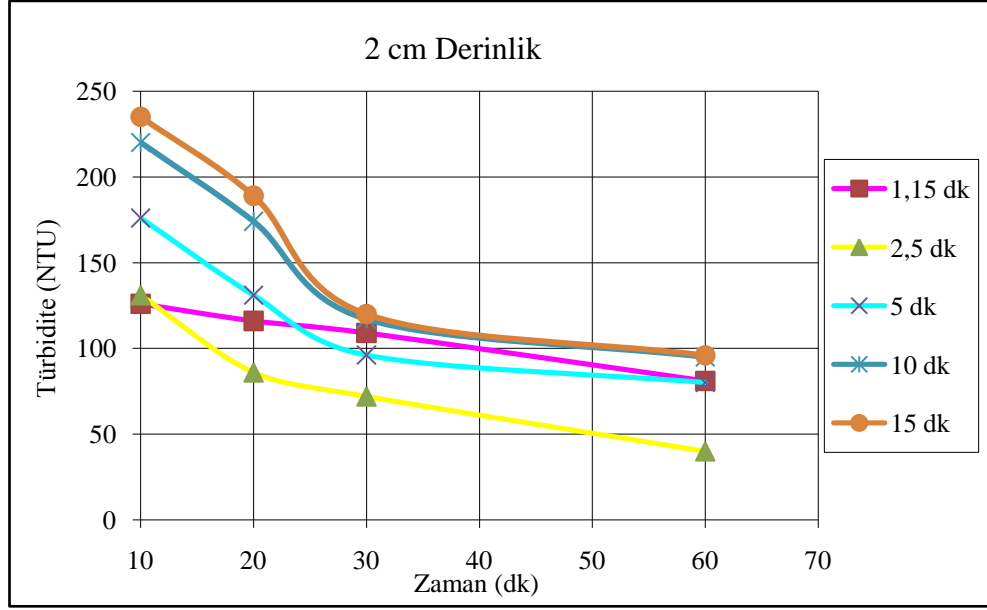
##### **4.1.3.2. Kondisyon Zamanında Optimum Karıştırma Süresi**

Karıştırma süresinin koagülasyon mekanizmasına etkisini demir sülfat ile yapılan deneyler kısmında verilmiştir. Aynı mantık ile Demir Klorür ile de aynı sıralamada koagülasyon deneyleri yapılmıştır. Deneylerde %3 PKO’nda kömür hazırlama tesis atık numunesi 30 dk 500 devir/dk hızda ön hazırlık işlemine tabii tutulduktan sonra 0.1 Molar 20 ml, 541 gr/ton,  $FeCl_3 \cdot 6H_2O$  eklenerek değişik sürelerde karıştırma işlemine

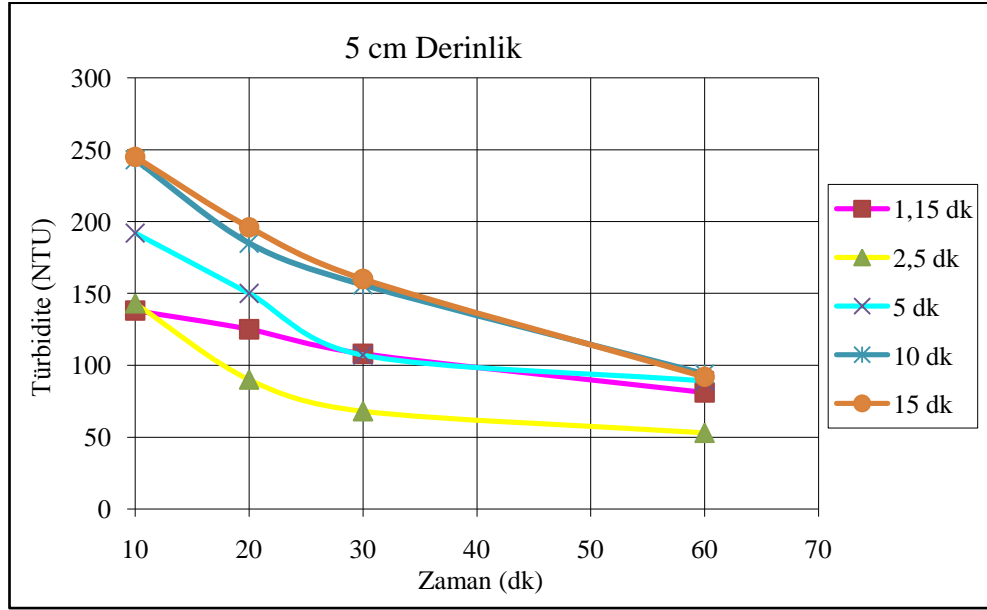
tabii tutulmuştur. Karıştırma işlemi topo marka kil dağıtıcı ile yapılmış ve hız 250 devir/dk olarak seçilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen veriler tablo halinde Tablo 4.9'da, yüzeyden 2 cm derinlikte gerçekleşen çökme grafiği Şekil 4.17'de ve yüzeyden 5 cm derinlikte gerçekleşen çökme grafiği Şekil 4.18'de verilmiştir.

**Tablo 4.9:** FeCl<sub>3</sub> 6H<sub>2</sub>O kullanılarak gerçekleştirilen optimum karıştırma süresi deney sonuçları.

<b>Deney Şartları</b>					
<b>Reaktif Tipi</b>					<b>FeCl<sub>3</sub> 6H<sub>2</sub>O</b>
<b>Reaktif Özellikleri</b>					<b>0,1 M</b>
<b>Reaktif Miktarı</b>					<b>20 ml (541 gr/ton)</b>
<b>Karıştırma Hızı</b>					<b>250 devir/dk</b>
<b>2 cm Derinlik Bulanıklık Verileri (NTU)</b>					
<b>Süre (dk)</b>	<b>1,15 dk</b>	<b>2,5 dk</b>	<b>5 dk</b>	<b>10 dk</b>	<b>15 dk</b>
<b>10</b>	126	131	176	220	235
<b>20</b>	116	86	131	174	189
<b>30</b>	109	72	96	117	120
<b>60</b>	81	40	80	95	96
<b>5 cm Derinlik Bulanıklık Verileri (NTU)</b>					
<b>Süre (dk)</b>	<b>1,15 dk</b>	<b>2,5 dk</b>	<b>5 dk</b>	<b>10 dk</b>	<b>15 dk</b>
<b>10</b>	138	143	192	243	245
<b>20</b>	125	90	150	185	196
<b>30</b>	108	68	107	156	160
<b>60</b>	81	53	89	94	92



Şekil 4.17: 2 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği.



Şekil 4.18: 5 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği.

Gerçekleştirilen deneyler sonucunda oluşturulan grafiklerde açıkça görüldüğü gibi 1 dk 15 sn ön kondisyon süresi yeterli olmayıp uygun boyutlu flok oluşturmamış, bununla beraber 5, 10 ve 15 dakikalık sürelerde ise oluşan floklar uzun kondisyon süresi sebebi ile dağılmıştır. Bu verilerin ışığında optimum süre olarak **2,5 dk** alınmıştır.

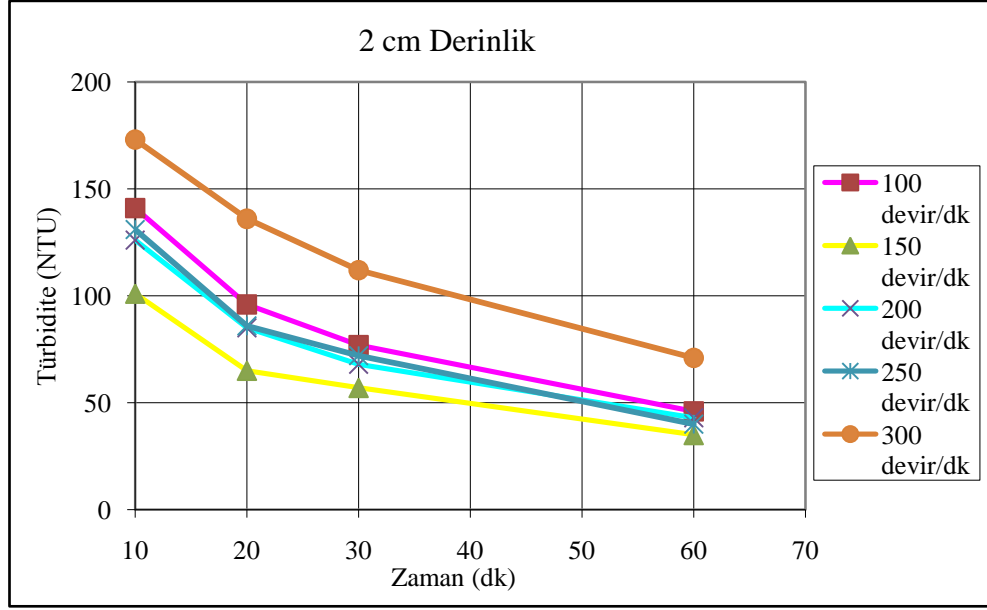
#### 4.1.3.3. *Kondisyon Zamanında Optimum Karıştırma Hızı*

Bir önceki adımda optimum karıştırma süresinin tespitinden sonra kondisyon süresi içinde karıştırıcının hızının optimizasyonu yapılmıştır. Daha önce değindiğimiz bilgiler ışığı altında karıştırıcı hızları ayrı ayrı 100, 150, 200, 250 ve 300 devir/dk olacak şekilde değişik hızlar seçilmiş ve denemeler yapılmıştır. Kondisyon hızı 2,5 dk, koagülant miktarı 0,1 molar 20 ml, 541 gr/ton, olacak şekilde seçilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen veriler tablo halinde Tablo 4.10'da, yüzeyden 2 cm derinlikte gerçekleşen çökme grafiği Şekil 4.19'da ve yüzeyden 5 cm derinlikte gerçekleşen çökme grafiği Şekil 4.20'de verilmiştir.

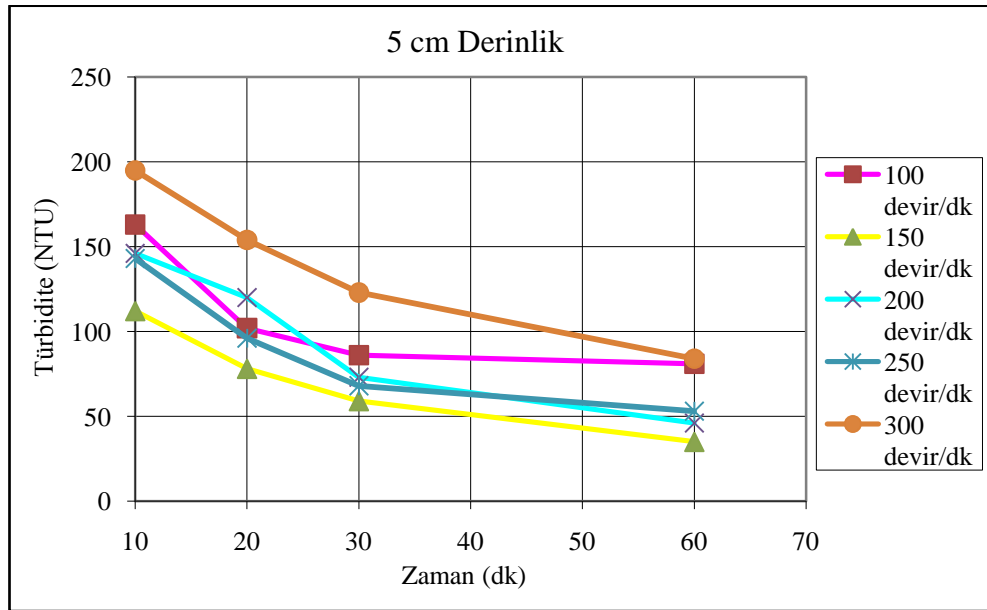
**Tablo 4.10:** FeCl<sub>3</sub> 6H<sub>2</sub>O kullanılarak gerçekleştirilen optimum karıştırma hızı deney sonuçları.

<b>Deney Şartları</b>					
<b>Reaktif Tipi</b>					<b>FeCl<sub>3</sub> 6H<sub>2</sub>O</b>
<b>Reaktif Özellikleri</b>					<b>0,1 M</b>
<b>Reaktif Miktarı</b>					<b>20 ml (541 gr/ton)</b>
<b>Karıştırma Süresi</b>					<b>2,5 dk</b>
<b>2 cm Derinlik Bulanıklık Verileri (NTU)</b>					
<b>Süre (dk)</b>	<b>100 devir/dk</b>	<b>150 devir/dk</b>	<b>200 devir/dk</b>	<b>250 devir/dk</b>	<b>300 devir/dk</b>
<b>10</b>	141	101	126	131	173
<b>20</b>	96	65	85	86	136
<b>30</b>	77	57	68	72	112
<b>60</b>	46	35	43	40	71
<b>5 cm Derinlik Bulanıklık Verileri (NTU)</b>					
<b>Süre (dk)</b>	<b>100 devir/dk</b>	<b>150 devir/dk</b>	<b>200 devir/dk</b>	<b>250 devir/dk</b>	<b>300 devir/dk</b>
<b>10</b>	163	112	146	143	195
<b>20</b>	102	78	120	96	154
<b>30</b>	86	59	73	68	123
<b>60</b>	81	35	46	53	84





**Şekil 4.19:** 2 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği.



**Şekil 4.20:** 5 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği.

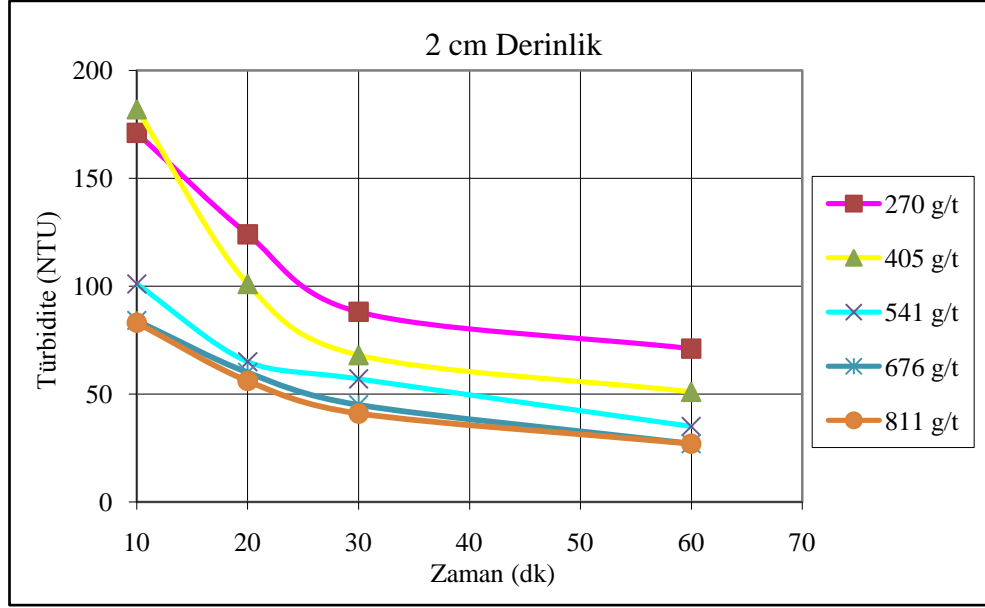
Elde edilen veriler incelendiğinde kondisyon karıştırma hızınının 100 devir/dk'da yetersiz kaldığı, 200 ve 250 devir/dk'da ise flokları dağıttığı anlaşılmaktadır. Bununla beraber 300 devir/dk'de oluşan floklar yüksek akış hızı sebebi ile büyük miktarda dağılmıştır. Bu deneyler sonucunda optimum hızın **150 devir/dk** olduğuna kanaat getirilmiştir.

#### 4.1.3.4. Optimum Reaktif Miktarı

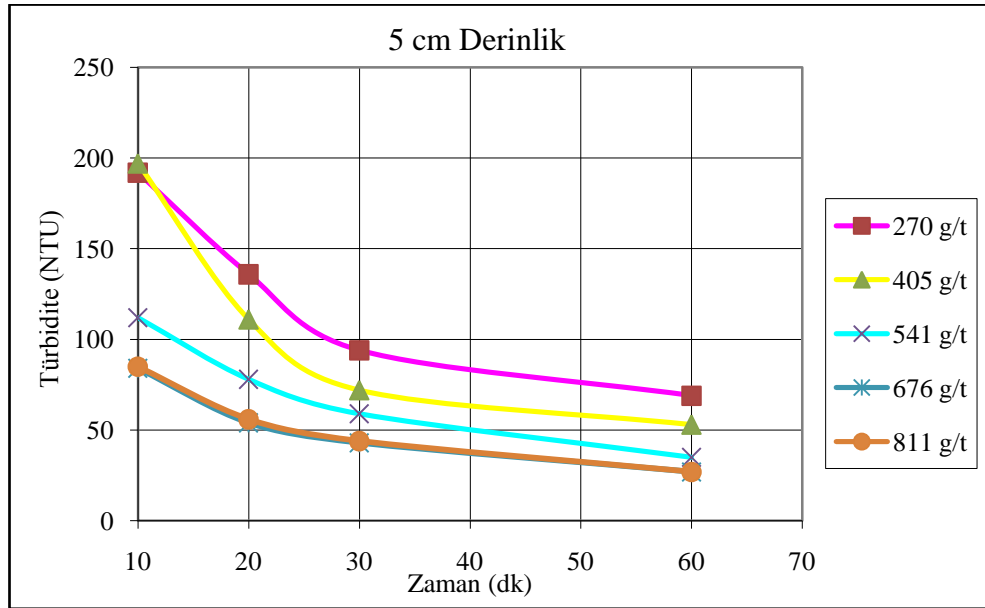
Reaktif miktarlarının da parametre olarak kabul edildiği deney düzeneğinde demir klorür ile de farklı konsantrasyonlarda denemeler yapılmıştır. Söz konusu numunelerde optimum miktarın belirlenmesi amacı ile 0,1 Molar  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ten 270, 405, 541, 676 ve 811 gr/ton kullanılarak optimum miktar tespit edilmeye çalışılmıştır. Karıştırma hızı 150 devir/dk ve süresi 2,5 dk olarak seçilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen veriler tablo halinde Tablo 4.11’de, yüzeyden 2 cm derinlikte gerçekleşen çökme grafiği Şekil 4.21’de ve yüzeyden 5 cm derinlikte gerçekleşen çökme grafiği Şekil 4.22’de verilmiştir.

**Tablo 4.11:**  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  kullanılarak gerçekleştirilen optimum reaktif miktarı deney sonuçları.

Deney Şartları					
Reaktif Tipi			$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$		
Reaktif Özellikleri			0,1 M		
Karıştırma Hızı			150 devir/dk		
Karıştırma Süresi			2,5 dk		
2 cm Derinlik Bulanıklık Verileri (NTU)					
ml-gr/ton miktar	10 ml 270 gr/ton	15 ml 405 gr/ton	20 ml 541 gr/ton	25 ml 676 gr/ton	30 ml 811 gr/ton
Süre (dk)					
10	171	182	101	84	83
20	124	101	65	60	56
30	88	68	57	45	41
60	71	51	35	27	27
5 cm Derinlik Bulanıklık Verileri (NTU)					
ml-gr/ton miktar	10 ml 270 gr/ton	15 ml 405 gr/ton	20 ml 541 gr/ton	25 ml 676 gr/ton	30 ml 811 gr/ton
Süre (dk)					
10	192	197	112	84	85
20	136	111	78	54	56
30	94	72	59	43	44
60	69	53	35	27	27



Şekil 4.21: 2 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği.



Şekil 4.22: 5 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği.

Deney sonuçları incelendiğinde 25 ila 30 ml'lik (676 ve 811 gr/ton) konsantrasyon sonuçlarında benzerlik görülürken, 10, 15 ve 20 ml'lik (270, 405 ve 541 gr/ton) konsantrasyonlarda konsantrasyon arttıkça koagülasyon veriminde performans artışı kaydedilmiştir. 25 ile 30 ml'lik konsantrasyonlarda benzer sonuçların çıkması 25 ml'den sonra artık; konsantrasyon artışının mekanizmanın performansını etkilemediği

sonucunu ortaya koymaktadır. Proje kapsamında maliyet analizi de önemli bir yer tuttuğundan dolayı optimum miktarın **25 ml-676 gr/ton** olduğu sonucuna varılmıştır.

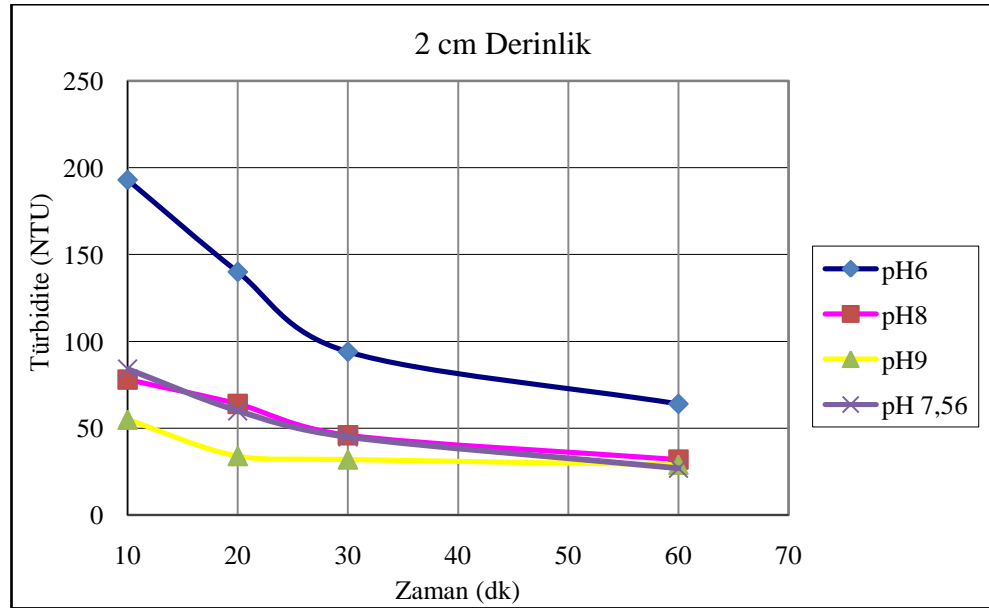
#### **4.1.3.5. Optimum pH'ın Belirlenmesi**

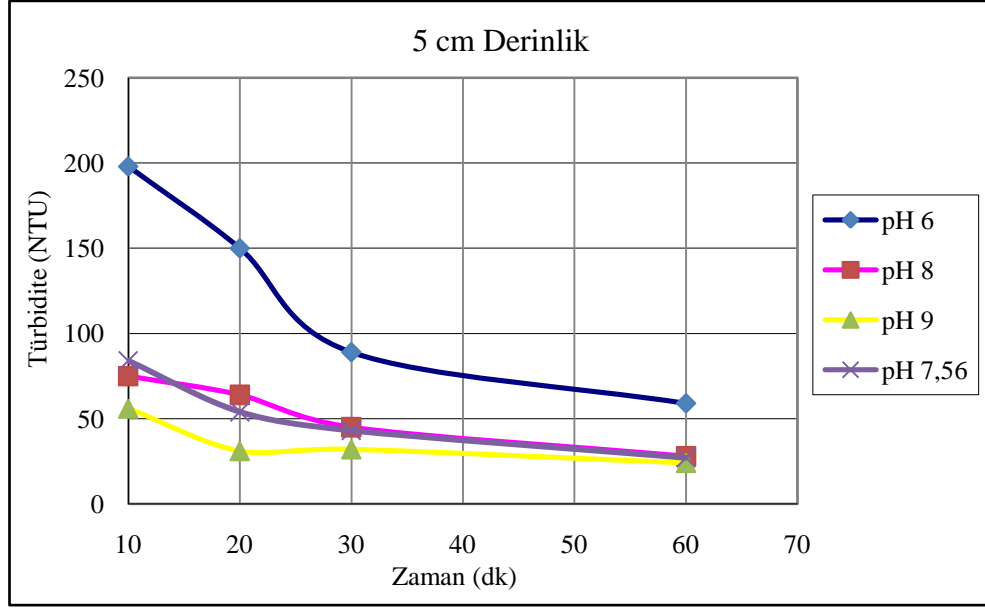
Demir klorür ile optimum hız, süre ve şarj miktarlarının belirlenmesinden sonra yukarıda verdiğimiz bilgiler ışığında projemize konu olan koagülasyon deneyleri gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Deneyler yine 500 devir/dk'de 30 dk ön karıştırma işlemi daha önce belirlenen optimum hız, süre ve reaktif miktarında gerçekleştirilerek koagülasyon işleminin doğal, pH6, pH8 ve pH 9'daki karakterleri incelenmeye çalışılmıştır. Deneyler sırasında süspansiyonun pH değeri 6'nın altına indirelemediği gibi 9'un üzerine de çıkılamamıştır. Özellikle pH 6'nın altında süspansiyon tamponlama yaparak hızla pH'ı 6'ya çekmiştir.

Deneylerde kullanılan 0,1 molar 25 ml, 676 gr/ton, demir sülfat çözeltisinin logaritmik konsantrasyonu hesapladığında -2,60 değeri bulunmakta ve bu değer pH 6, 7,56, 8 ve 9'da  $Fe(OH)_3$  katı formunda bulunmakta ve koagülasyonu gerçekleştirmektedir. Gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen veriler tablo halinde Tablo 4.12'te, yüzeyden 2 cm derinlikte gerçekleşen çökme grafiği Şekil 4.23'te ve yüzeyden 5 cm derinlikte gerçekleşen çökme grafiği Şekil 4.24'te verilmiştir.

**Tablo 4.12:** FeCl<sub>3</sub> 6H<sub>2</sub>O kullanılarak gerçekleştirilen optimum pH deney sonuçları.

Deney Şartları				
Reaktif Tipi		FeCl <sub>3</sub> 6H <sub>2</sub> O		
Reaktif Özellikleri		0,1 M		
Karıştırma Hızı		150 devir/dk		
Karıştırma Süresi		2,5 dk		
Reaktif Miktarı		25 ml (676,25 gr/ton)		
2 cm Derinlik Bulanıklık Verileri (NTU)				
Süre (dk)	pH 6	pH 7,56 Doğal	pH8	pH9
10	193	84	78	55
20	140	60	64	34
30	94	45	46	32
60	64	27	32	29
5 cm Derinlik Bulanıklık Verileri (NTU)				
Süre (dk)	pH 6	pH 7,56 Doğal	pH8	pH9
10	198	84	75	56
20	150	54	64	31
30	89	43	45	32
60	59	27	28	24

**Şekil 4.23:** 2 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği.



Şekil 4.24: 5 cm derinlikten elde edilen bulanıklılık değerleri grafiği.

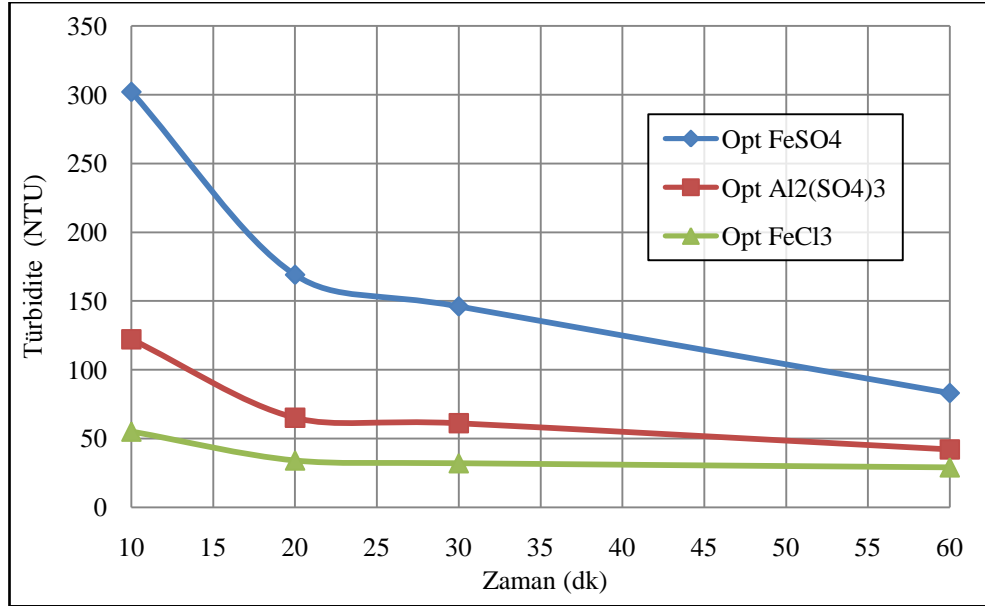
Demir klorür ile değişik başlangıç pH değerlerine gerçekleştirilen deneylerde yine demir sülfat ile gerçekleştirilen deneylere paralel sonuçlar elde edilmiştir. Normal şartlarda pH 9’da düşük verim elde edilmesi gerekirken deney sonuçları alkali bölgede asidik bölgeye göre yüksek koagülasyon verimi alındığını ortaya koymaktadır. Şekil 4.23’de açıkça görüldüğü gibi **pH 9**’da en yüksek koagülasyon verimi alınmıştır.

#### 4.1.4. Tüm Sonuçların Karşılaştırılması

Gerçekleştirilen koagülasyon deneyleri sonucunda tüm sonuçlar değerlendirilerek 3 farklı koagülantın optimum verileri ortaya çıkartılmış ve karşılaştırılmıştır. Tablo 4.13’te her üç koagülant için optimum çökme grafiği ve Şekil 4.25’te grafiksel yorumu verilmiştir.

**Tablo 4.13:** 3 farklı koagülantın optimum verilerinin çökeltme performansları.

Türbitide Değerleri (NTU)	Süre/Koagülant	Serbest Çökeltme	FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> .16H <sub>2</sub> O	FeCl <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O
	Süre (dk)				
	10	1055	302	122	55
	20	575	169	65	34
	30	390	146	61	32
60	195	83	42	29	
<b>Optimum Çökme Süresi (dk)</b>	<b>120</b>	<b>25</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	
<b>Koagülasyon Verimi (%)</b>	-	<b>67,21</b>	<b>88,71</b>	<b>94</b>	
<b>Karıştırma Hızı (devir/dk)</b>	-	250	150	150	
<b>Karıştırma Süresi (dk)</b>	-	5	1dk 15 sn	2,5	
<b>Tüketim (gr/ton pülp)</b>	-	556	1890	676,25	
<b>Başlangıç pH</b>	7,5	9	7,56 (Doğal)	9	

**Şekil 4.25:** Üç farklı koagülantın optimum değerlerinin çökme grafiği.

Demir sülfat, alüminyum Sülfat ve Demir Klorür ile değişik şartlarda gerçekleştirilen koagülasyon deneyleri sonucunda Malkara bölgesinden getirilen lavvar tesisi kömür atıkları üzerinde demir klorürün yüksek verimle koagülasyonu gerçekleştirdiği görülmektedir. Demir sülfat ile gerçekleştirilen deneylerde **25. dakikada** türbitide değeri takribi **158**'e düşürülmüş ve koagüle etme verimi serbest çökmeye göre **% 67,21**; alüminyum sülfat ile gerçekleştirilen deneylerde **20. dakikada** türbitide değeri **65**'e düşürülerek koagüle etme verimi **%88,7** ve demir klorür ile gerçekleştirilen deneylerde **20. dakikada** türbitide değeri **34**'e düşürülerek koagüle etme verimi **%94** olarak elde edilmiştir.

Bu sonuca göre söz konusu numunelerde optimum şartlar **0,1 Molar demir klorür, 150 devir/dk kondisyon hızı, 2,5 dk kondisyon süresi, başlangıç pH 9 ve 675 gr/ton (0,1 Molar-25 ml/lit) reaktif şarjı** olarak verilebilir.

## 4.2. ELEKTROKOAGÜLASYON DENEYLERİ

### 4.2.1. Alüminyum Elektrot İle Gerçekleştirilen Elektrokoagülasyon Deneyleri

#### 4.2.1.1. *Optimum Akım Yoğunluğunun Bulunması*

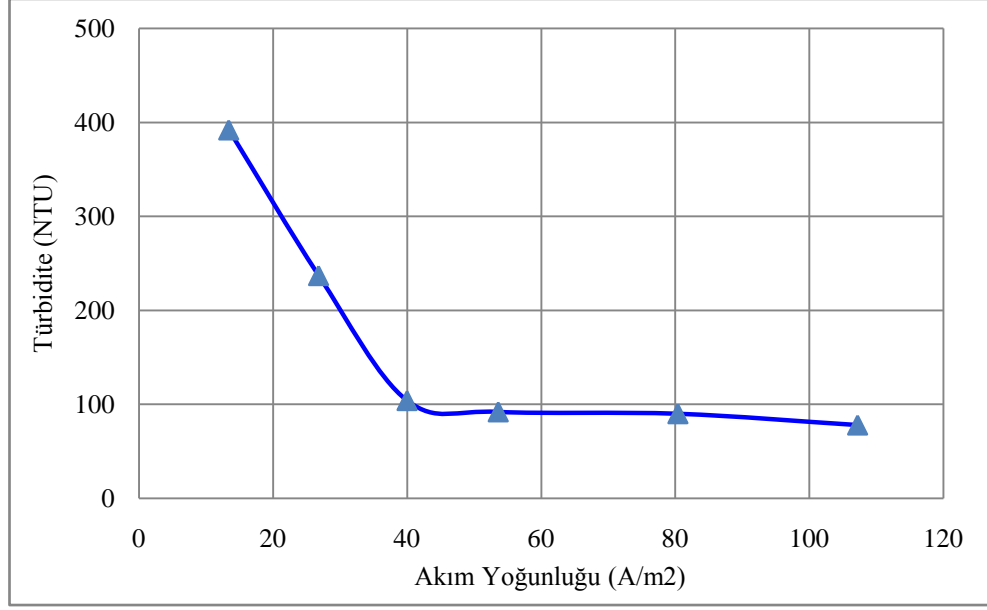
Elektrokoagülasyon mekanizmasında en önemli parametre akım yoğunluğudur. Akım yoğunluğu, elektrik devresinde elektron yoğunluğunun bir ölçüsüdür. Başka bir deyişle ortama şarj edilen elektron miktarı ile bağıntılı olarak üretilen iyon miktarıdır. Elektrokoagülasyon mekanizmasında da ortama şarj edilen iyon miktarı ile paralel oluşan metal hidroksit oranı koagüle etme verimi ile direkt bağıntılıdır. Bu sebeple gerçekleştirilen deneylerde ilk adım olarak optimum akım yoğunluğunun bulunması hedeflenmiştir.

Deneyler, 1000 ml'lik reaktör içerisinde toplamda 373 cm<sup>2</sup> yüzey alanına sahip birbirine paralel yerleştirilen alüminyum elektrotlar ile 0,5, 1, 1,5, 2, 3 ve 4 amper yüklerde gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında oluşan pH ve sıcaklık profilinin çizilmesi için deney süresince pH ve sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ön kondisyon karıştırma hızı 360 devir/dk, ön kondisyon süresi 120 sn, çökeltme modunda elektrokoagülasyon süresi 180 sn olacak şekilde toplam 300 sn elektrokoagülasyon yapılmıştır. Deneyin sonlanmasından 60 sn sonrasında ise yüzeyden 2 cm derinlikten pipetle numune alımı yapılarak türbidimetrede bulanıklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Bununla beraber deney süresince elde edilen verilerden enerji tüketim miktar ve maliyetleri ile koagülasyon performansları hesaplanmıştır. Deneylerden elde edilen veriler Tablo 4.14'te, deney sonuçlarına göre çizilen türbitide eğrisi Şekil 4.26'da ve akım yoğunluğu verim grafiği Şekil 4.27'de verilmiştir.

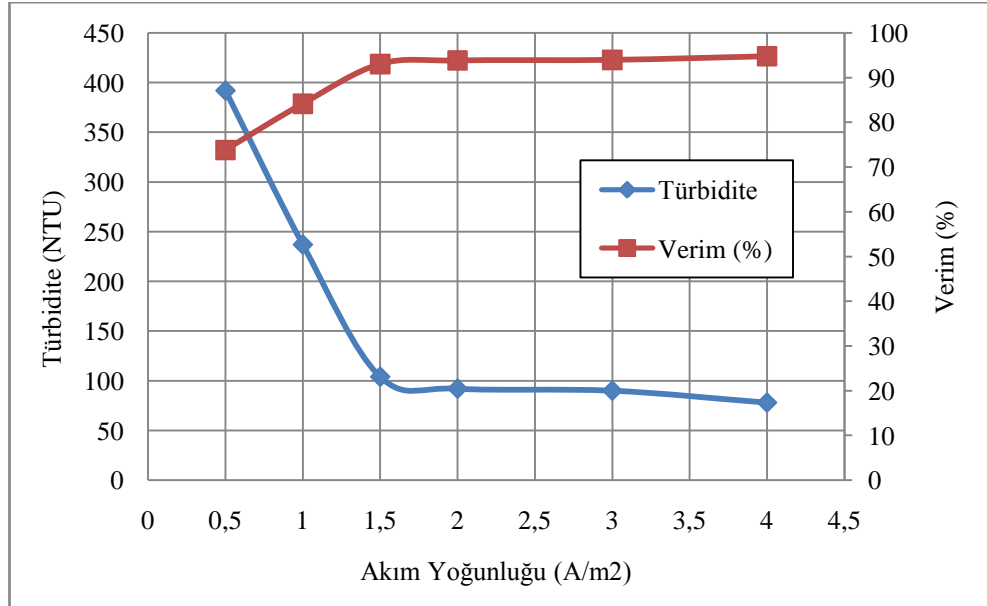


**Tablo 4.14:** Alüminyum elektrot kullanılarak gerçekleştirilen optimum akım yoğunluğu deney sonuçları.

<b>DENEY ŞARTLARI</b>						
Başlangıç pH	7,8	7,8	7,82	7,81	7,86	7,79
<b>Akım (A)</b>	<b>0,5</b>	<b>1</b>	<b>1,5</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Akım Yoğunluğu, (A/m <sup>2</sup> )	13,4	26,8	40	53,6	80,4	107,2
Karıştırma Hızı (devir/dk)	360	360	360	360	360	360
Voltaj, (V)	3,4	6,5	9	11	16	17
PKO (%)	3	3	3	3	3	3
Ön Kondisyon Süresi(sn)	120	120	120	120	120	120
Çökelme Modunda Elektrokoagülasyon Süresi (sn)	180	180	180	180	180	180
Toplam Deney Süresi (sn)	300	300	300	300	300	300
İlk Sıcaklık (C <sup>0</sup> )	24,5	24,5	23,7	24,1	24,8	23,2
<b>DENEYLERDEN ELDE EDİLEN VERİLER</b>						
<b>Deney sonunda türbitidite (NTU)</b>	<b>392</b>	<b>237</b>	<b>104</b>	<b>92</b>	<b>90</b>	<b>78</b>
2 dk sonunda pH	8	7,84	8,08	6,8	6,6	8,89
Elektrokoagülasyon sonunda pH	8,05	7,9	7,95	7,35	7,67	7,62
Numune Alımı Sırasında pH	7,4	8	7,61	7,9	7,7	7,64
Son Sıcaklık	25	25,3	25	26,5	28,2	30
Sıcaklık Farkı (C <sup>0</sup> )	0,5	0,8	1,3	2,4	3,4	6,8
Elektrik birim Maliyeti (KWh/TL)	0,1928	0,1928	0,1928	0,1928	0,1928	0,1928
Enerji Tüketimi, (Wh)	0,142	0,542	1,125	1,833	4,000	5,667
Enerji Maliyeti, (TL))	0,00003 TL	0,00010 TL	0,00022 TL	0,00035 TL	0,00077 TL	0,00109 TL
Ton Başına Enerji Maliyeti (TL/Ton)	0,03 TL	0,10 TL	0,22 TL	0,35 TL	0,77 TL	1,09 TL
Akım Verimi (%)	52%	104%	155%	207%	311%	415%
Teorik Çözünen Alüminyum (gr/lt)	0,01399	0,02798	0,04197	0,05596	0,08394	0,11192
1 m <sup>3</sup> Atık Su İçin Harcanan Al, (gr)	13,99	27,98	41,97	55,96	83,94	111,92
Faraday , (F/m <sup>3</sup> )	1,55	3,11	4,66	6,22	9,33	12,44
<b>Koagüle Etme Verimi, (%)</b>	<b>68%</b>	<b>81%</b>	<b>92%</b>	<b>93%</b>	<b>93%</b>	<b>94%</b>
Elektrot Maliyeti, (TL/m <sup>3</sup> )	0,05 TL	0,10 TL	0,15 TL	0,20 TL	0,30 TL	0,40 TL
<b>Toplam Maliyet, (TL/m<sup>3</sup>)</b>	<b>0,08 TL</b>	<b>0,20 TL</b>	<b>0,37 TL</b>	<b>0,55 TL</b>	<b>1,07 TL</b>	<b>1,49 TL</b>



Şekil 4.26: Alüminyum elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik akım yoğunluklarında çökme grafiği.



Şekil 4.27: Alüminyum elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik akım yoğunluklarında çökme-verim grafiği.

Alüminyum elektrot kullanılarak değişik akım yoğunluklarında gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen verilere göre kömür hazırlama tesis artığı numunesi 1,5 Amper,  $40 \text{ Amper/m}^2$  akım yoğunluğu altında en verimli çökme grafiğini ortaya koymaktadır. Teorik olarak  $40 \text{ Amper/m}^2$  akım yoğunluğu değerinin altına

yeterli  $Al^{+3}$  iyonu şarj edilememekte, bununla beraber yeterli sayıda  $Al(OH)_3$  flokada oluşturulamamaktadır. Yetersiz kalan  $Al(OH)_3$  flokları tüm pülpü yeterli derecede koagüle edememekte ve ortamda askıda tane kalmaktadır. Bununla beraber 40 Amper/m<sup>2</sup> üzeri akım yoğunluklarında ise ortamda ihtiyaçtan fazla miktarda hidroksit molekülü olduğu ancak koagüle edecek tane bulunmadığı için bu akım yoğunluğundan fazla şarjın yapılması gereksizdir. Bu sonuca göre optimum değer olarak **1,5 Amper, 40 Amper/m<sup>2</sup>** akım yoğunluğu optimum şart olarak kabul edilmiştir.

#### 4.2.1.2. *Optimum Elektrokoagülasyon Süresinin Bulunması*

Elektrokoagülasyon mekanizmasında en önemli parametre olan sisteme şarj edilecek akım yoğunluğunun belirlenmesinden sonra şarj süresinin belirlenmesine yönelik deneyler gerçekleştirilmiştir. Sisteme verilen akımın süresi uzadıkça, o oranda anottan metal iyonlar ortama geçecek, geçen bu iyonlarda daha fazla hidroksit molekülü oluşturacak ve koagüle etme verimi elde edilecektir. Zamanla ortamın pH'ına ve orijinal iyon desenine bağlı olarak bu şarj doymuş bir noktaya gelerek koagülasyon verimini sabitleyecektir. Bu sebeple gerçekleştirilen deneylerde ikinci adım olarak optimum elektrokoagülasyon süresinin bulunması hedeflenmiştir.

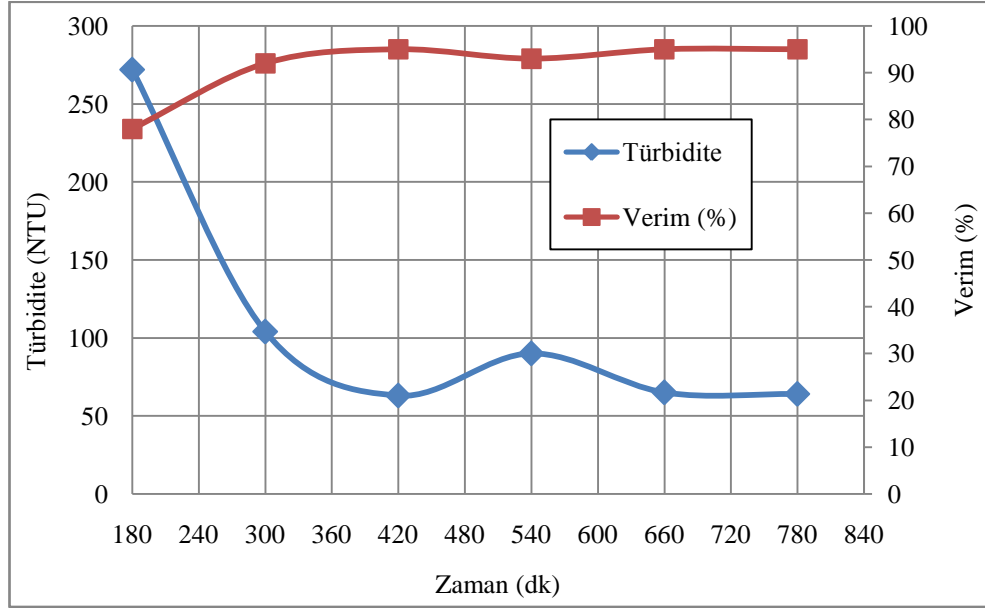
Deneyler, 1000 ml'lik reaktör içerisinde toplamda 373 cm<sup>2</sup> yüzey alanına sahip birbirine paralel yerleştirilen alüminyum elektrotlar ile sabit 1,5 Amper-40 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğu altında gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında oluşan pH ve sıcaklık profilinin çizilmesi için deney süresince pH ve sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ön kondisyon karıştırma hızı 360 devir/dk, ön kondisyon süresi 120 sn, çökme modunda elektrokoagülasyon süresi ise 60, 180, 300, 420, 540 ve 660 sn olacak şekilde seçilerek elektrokoagülasyon yapılmıştır. Elektrokoagülasyon işleminin ardından 60 sn çökme beklenerek yüzeyden 2cm derinlikten pipetle numune alımı yapılarak türbidimetrede bulanıklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Bununla beraber deney süresince elde edilen verilerden enerji tüketim miktar ve maliyetleri ile koagülasyon performansları hesaplanmıştır. Deneylerden elde edilen veriler Tablo 4.15'de, deney sonuçlarına ilişkin çökme grafiği Şekil 4.28'de ve çökme-verim grafiği Şekil 4.29'da verilmiştir.

**Tablo 4.15:** Alüminyum elektrot kullanılarak gerçekleştirilen optimum şarj süresi deney sonuçları.

<b>DENEY ŞARTLARI</b>						
Başlangıç pH	8,04	7,82	8,07	7,95	8,01	7,9
<b>Akım (A)</b>	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Akım Yoğunluğu, (A/m <sup>2</sup> )	40	40	40	40	40	40
Karıştırma Hızı (devir/dk)	360	360	360	360	360	360
Voltaj, (V)	9	9	9	8	7,1	8,8
PKO (%)	3	3	3	3	3	3
Ön Kondisyon Süresi (sn)	120	120	120	120	120	120
Çökeltme Modunda Elektrokoagülasyon Süresi (sn)	<b>60</b>	<b>180</b>	<b>300</b>	<b>420</b>	<b>540</b>	<b>660</b>
Toplam Deney Süresi (sn)	180	300	420	540	660	780
İlk Sıcaklık (C <sup>0</sup> )	25,7	23,7	23,6	24,2	24	23,7
<b>DENEYLERDEN ELDE EDİLEN VERİLER</b>						
<b>Deney sonunda türbitidite (NTU)</b>	<b>272</b>	<b>104</b>	<b>63</b>	<b>90</b>	<b>65</b>	<b>64</b>
2 dk sonunda pH	8,00	8,08	8,10	7,70	7,85	7,82
Elektrokoagülasyon sonunda pH	7,80	7,95	7,81	7,73	7,13	7,08
Numune Alımı Sırasında pH	7,64	7,61	7,68	7,77	7,13	7,05
Son Sıcaklık	25,9	25	25,2	26,5	27,8	28
Sıcaklık Farkı (C <sup>0</sup> )	0,2	1,3	1,6	2,3	3,8	-23,7
Elektrik birim Maliyeti (KWh/TL)	0,1928	0,1928	0,1928	0,1928	0,1928	0,1928
Enerji Tüketimi, (Wh)	0,675	1,125	1,575	1,800	1,953	2,860
Enerji Maliyeti, (TL))	0,00013 TL	0,00022 TL	0,00030 TL	0,00035 TL	0,00038 TL	0,00055 TL
Ton Başına Enerji Maliyeti (TL/Ton)	0,130 TL	0,217 TL	0,304 TL	0,347 TL	0,377 TL	0,552 TL
Akım Verimi (%)	93%	155%	218%	280%	342%	404%
Teorik Çözünen Alüminyum (gr/lit)	0,0252	0,0420	0,0588	0,0755	0,0923	0,1091
1 m <sup>3</sup> Atık Su İçin Harcanan Al, (gr)	25,18	41,97	58,76	75,54	92,33	109,12
Faraday , (F/m <sup>3</sup> )	2,80	4,66	6,53	8,39	10,26	12,12
<b>Koagüle Etme Verimi, (%)</b>	<b>78%</b>	<b>92%</b>	<b>95%</b>	<b>93%</b>	<b>95%</b>	<b>95%</b>
Elektrot Maliyeti, (TL/m <sup>3</sup> )	0,09 TL	0,15 TL	0,21 TL	0,27 TL	0,33 TL	0,39 TL
<b>Toplam Maliyet, (TL/m<sup>3</sup>)</b>	<b>0,22 TL</b>	<b>0,37 TL</b>	<b>0,51 TL</b>	<b>0,62 TL</b>	<b>0,71 TL</b>	<b>0,94 TL</b>



**Şekil 4.28:** Alüminyum elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik şarj sürelerinde çökme grafiği.



**Şekil 4.29:** Alüminyum elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik şarj sürelerinde çökme-verim grafiği.

Alüminyum elektrot kullanılarak kömür hazırlama tesis artığı numunesi üzerinde gerçekleştirilen değişik akım şarj süreleri deneyleri sonucunda elde edilen verilere göre 120 sn'si kondisyon kazandırma süresi, 300 sn'lik şarj süresi olacak şekilde toplamda 420 sn şarj süresi optimum şartları sağlamaktadır. Şekil 4.31'de görüldüğü gibi 300 sn'lik şarj sürelerinin üzerindeki sürelerde ortama şarj edilen iyonların o ana kadar tüm

taneler koagüle edildiği için verim artışı sağlamamaktadır. Bununla beraber daha kısa sürelerde yeterli  $Al^{+3}$  iyonu ve buna bağlı olarak  $Al(OH)_3$  oluşmadığı için koagülasyon verimi düşmektedir. Bu sonuçlara göre optimum süre 120 sn ön kondisyon, 300 sn elektrokoagülasyon olacak şekilde toplamda **420 sn** optimum elektrokoagülasyon süresidir.

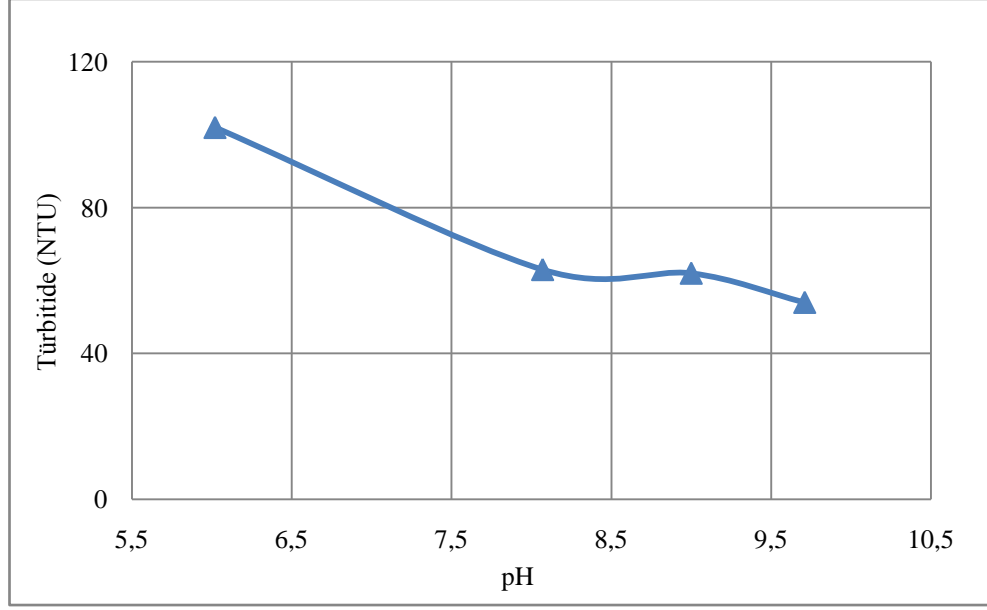
#### **4.2.1.3. Optimum pH'in Bulunması**

Önceki başlıklarda irdelenen akım yoğunluğu ve zaman parametrelerinin optimizasyonunun gerçekleştirilmesinden sonra, elektrokoagülasyonun gerçekleştiği ortamın başlangıç pH'sının, verime etkisi araştırılmıştır. Koagülasyon mekanizmasında olduğu gibi elektrokoagülasyon mekanizmasında da başlangıç pH'sı önemli bir yer tutar. Elektrokoagülasyonun gerçekleşme sürecinde ortama geçen hidroksit ve hidrojen iyonları ortamın pH'ını sürekli değiştirmektedir. Bir yandan hidroksit iyonları ortamda artıp pH'ı arttırırken diğer yandan metal iyonları su molekülleri ile hidroksit bileşiği oluşturmaktadır.

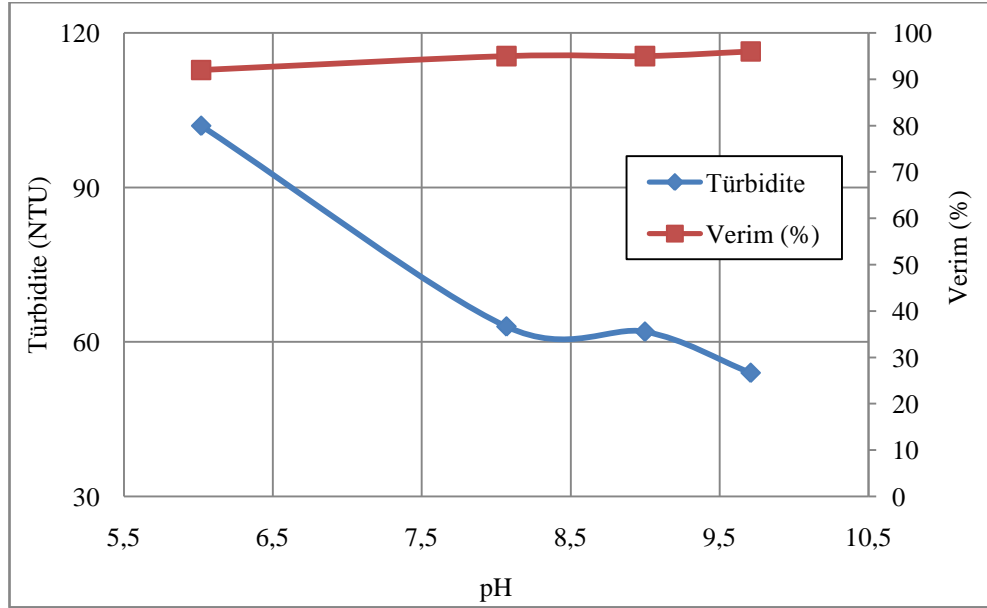
Deneyler 1000 ml'lik reaktör içerisinde toplamda 373 cm<sup>2</sup> yüzey alanına sahip birbirine paralel yerleştirilen alüminyum elektrotlar ile sabit 1,5 Amper-40 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğu altında gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında oluşan pH ve sıcaklık profilinin çizilmesi için deney süresince pH ve sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ön kondisyon karıştırma hızı 360 devir/dk, ön kondisyon süresi 120 sn, çökme modunda elektrokoagülasyon süresi ise 300 sn olacak şekilde seçilerek elektrokoagülasyon yapılmıştır. Elektrokoagülasyon işleminin ardından 60 sn çökme beklenerek yüzeyden 2cm derinlikten pipetle numune alımı yapılarak türbidimetrede bulanıklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Deneylerde başlangıç pH değeri baz alınarak pH 6,02, 8,07, 9,00, 9,71 şeklinde değişik başlangıç pH değerleri seçilmiştir. Bununla beraber deney süresince elde edilen verilerden enerji tüketim miktar ve maliyetleri ile koagülasyon performansları hesaplanmıştır. Deneylerden elde edilen veriler Tablo 4.16'da, deney sonuçlarına ilişkin çökme grafiği Şekil 4.30'da ve çökme-verim grafiği Şekil 4.31'de verilmiştir.

**Tablo 4.16:** Alüminyum elektrot kullanılarak gerçekleştirilen optimum başlangıç pH deney sonuçları.

<b>DENEY ŞARTLARI</b>				
Başlangıç pH	<b>6,02</b>	<b>8,07 (Doğal)</b>	<b>9,00</b>	<b>9,71</b>
<b>Akım (A)</b>	1,5	1,5	1,5	1,5
Akım Yoğunluğu, (A/m <sup>2</sup> )	40	40	40	40
Karıştırma Hızı (devir/dk)	360	360	360	360
Voltaj, (V)	6,3	9	11	8,7
PKO (%)	3	3	3	3
Ön Kondisyon Süresi(sn)	120	120	120	120
Çökeltme Modunda Elektrokoagülasyon Süresi (sn)	300	300	300	300
Toplam Deney Süresi (sn)	420	420	420	420
İlk Sıcaklık (C <sup>0</sup> )	24,3	23,6	23,5	23,5
<b>DENEYLERDEN ELDE EDİLEN VERİLER</b>				
<b>Deney sonunda türbidite (NTU)</b>	<b>102</b>	<b>63</b>	<b>62</b>	<b>54</b>
2 dk sonunda pH	5,02	8,10	8,54	9,43
Elektrokoagülasyon sonunda pH	6,56	7,81	6,90	8,93
Numune Alımı Sırasında pH	6,88	7,68	6,52	8,66
Son Sıcaklık	25,6	25,2	24,5	25,3
Sıcaklık Farkı (C <sup>0</sup> )	1,3	1,6	1	1,8
Elektrik birim Maliyeti (KWh/TL)	0,1928	0,1928	0,1928	0,1928
Enerji Tüketimi, (Wh)	1,103	1,575	1,925	1,523
Enerji Maliyeti, (TL)	0,00021 TL	0,00030 TL	0,00037 TL	0,00029 TL
Ton Başına Enerji Maliyeti (TL/Ton)	0,21 TL	0,30 TL	0,37 TL	0,29 TL
Akım Verimi (%)	218%	218%	218%	218%
Teorik Çözünen Alüminyum (gr/lit)	0,0588	0,0588	0,0588	0,0588
1 m <sup>3</sup> Atık Su İçin Harcanan Al, (gr)	58,76	58,76	58,76	58,76
Faraday , (F/m <sup>3</sup> )	6,53	6,53	6,53	6,53
<b>Koagüle Etme Verimi, (%)</b>	<b>92%</b>	<b>95%</b>	<b>95%</b>	<b>96%</b>
Elektrot Maliyeti, (TL/m <sup>3</sup> )	0,21 TL	0,21 TL	0,21 TL	0,21 TL
<b>Toplam Maliyet, (TL/m<sup>3</sup>)</b>	<b>0,42 TL</b>	<b>0,51 TL</b>	<b>0,58 TL</b>	<b>0,50 TL</b>



**Şekil 4.30:** Alüminyum elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik başlangıç pH'larında çökme grafiği.



**Şekil 4.31:** Alüminyum elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik başlangıç pH'larında çökme-verim grafiği.

Gerçekleştirilen deneyler sırasında pH değerlerinin ayarlanması sırasında Tablo 4.17'de verilen işlemler yapılmıştır.



**Tablo 4.17:** Başlangıç pH ayarlaması sırasında sisteme dışarıdan şarj edilen H<sup>+</sup> ve OH<sup>-</sup> iyon mol miktarları.

İşlem	Eklenen Çözelti	Eklenen Miktar (ml)	Sisteme Teorik Olarak Eklenen OH-H iyonu (mol)	Gözlemler
pH 9 için ayarlama	0,2 Molar NaOH	50	1X10 <sup>-3</sup>	Çok ağır yükselim
pH 9,7 için ayarlama	0,2 Molar NaOH	130	2,6X10 <sup>-2</sup>	Çok ağır yükselim
pH 6,02 için ayarlama	0,1 Molar HCl	60	6X10 <sup>-3</sup>	pH önce hızla düşmekte ancak ardından pH 6,5-7'ye tamponlama yapmakta

pH optimizasyonu deneylerini yorumlamadan önce başlangıç pH'ının proses üzerindeki etkisini ve gerçekleşen kimyasal mekanizmaları tekrardan irdelemek gerekir.

Daha önceki bölümlerde genel olarak değinildiği gibi, Alüminyum elektrot ile elektrokoagülasyon prosesinde Al<sup>+3</sup>'ün hidrolizi ve bunun sonucunda çeşitli alüminyum hidroksit polimer kompleks ve çökeltileri meydana gelmektedir (Mollah et al., 2001). Alüminyum elektrot kullanılan elektrokoagülasyon proseslerinde pH dengesi değişimi anot ve katotta meydana gelen yükseltgenme ve indirgenme reaksiyonları ile kontrol edilmektedir:

Anot elektrotta Al metali yükseltgenerek Al<sup>+3</sup> iyonu olarak sıvı faza geçmektedir:



Al<sup>+3</sup> formundaki iyon ortamdaki su molekülleri ile Alüminyum hidroksit bileşiği oluştururken ortama hidrojen iyonu salmaktadır (Gür, 2008):



Bu reaksiyonlara karşılık katotta ise su molekülleri indirgenerek ortama hidroksit iyonu şarj edilmektedir (Gür, 2008):

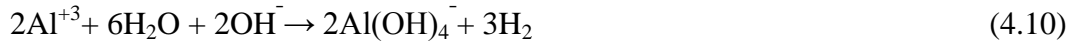


Katottaki bu su indirgenme reaksiyonu neticesinde  $(\text{OH})^-$  iyonları ortamın pH değerini yükseltmektedirler. Ancak pH değeri 9'un üzerine çıktığında Alüminyumun amfoterik metal olması sebebi ile yine ortamdaki  $(\text{OH})^-$  iyonları ile tekrardan bileşik haline gelmektedirler (Gür, 2008):



Alüminyum elektrotların kullanıldığı elektrokoagülasyon deneylerinde düşük pH değerlerine sahip çözeltilerin pH 'ları bir süre sonra 8-10 civarına artmakta ve bu değer üstüne çıkamamaktadır. pH9 'un üzerindeki çözeltilerde ise deneyden bir süre sonra (4.9) reaksiyonu gereği pH9 değerinde geri dengelenmektedir (Gür, 2008).

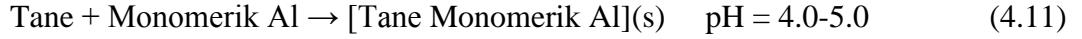
Tüm bu reaksiyonların dışında ortamdaki  $(\text{OH})^-$  iyonları elektrotlar üzerine atak yaparak direkt olarak alüminyum hidroksit molekülü de oluşturabilmektedirler:



Alüminyum elektrotlar kullanılarak elektrolizle üretilen alüminyum iyonları, pH 'ya bağlı olarak monomerik ve polimerik alüminyum hidroksit kompleks türlerini oluşturur ve bu kompleksler pH4-7 aralığında polimerize olma eğilimindedirler (Gür, 2008).

Son yıllarda yapılan çalışmalar düşük pH aralığında flokülasyonla çökeltme, pH>6.5 olduğu aralıklarda adsorbsiyonla safsızlık giderimi gerçekleştiğini göstermiştir (Gür, 2008, Johanson, Amirtrahajah, 1993).

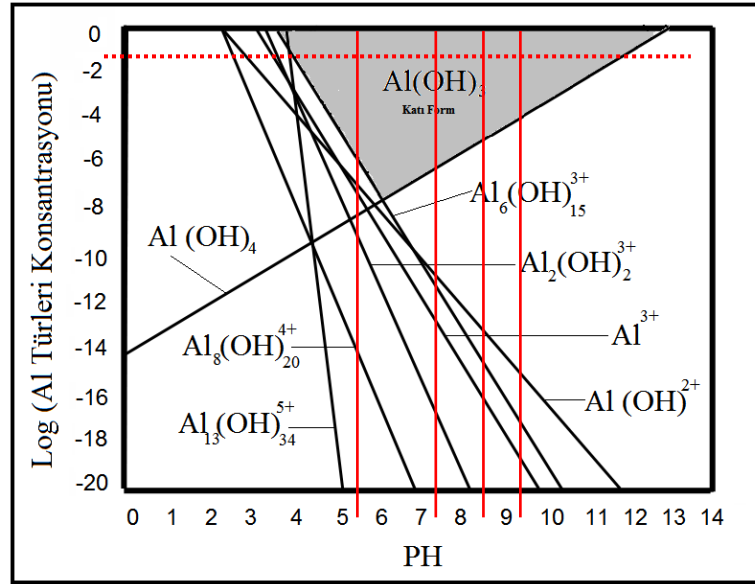
Çökeltme:



Adsorbsiyon ( $\text{pH} > 6.5$ ):



Şekil 4.32’de alüminyum iyonunun değişik konsantrasyonlarda ve pH’larda oluşturduğu hidroksit tipleri verilmiştir.



Şekil 4.32: Alüminyumun değişik konsantrasyonlarda ve pH’larda oluşturduğu hidroksit tipleri(Gür, 2008).

Şekil 4.34 incelendiğinde düşük pH’larda alüminyumun koagülasyon etkisi önemsiz olan  $\text{Al}^{3+}$  formunda olduğu, pH 5.0-7.5 arasında ise kirleticiler için etkin koagülantlar olan  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Al}(\text{OH})^{+2}$ ,  $\text{Al}_{17}(\text{OH})_{32}^{+7}$  gibi monomerik ve polimerik alüminyum kompleksleri formunda olduğu görülmektedir. Daha yüksek pH eğerlerinde  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ’ün çözünürlüğü artacak ve denklem (4.9)’deki reaksiyon ile atık su arıtımında etkisiz olan çözülebilir  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  formuna dönüşecektir (Zaied and ellakhal, 2009). Dolayısıyla pH 5.0-7.5 aralığında ortamda yeterli yumaklaştırıcının bulunması ve pH’ında alüminyumun en düşük çözünürlüğe sahip olduğu aralıkta olması sebebiyle en verimli arıtımın gerçekleştiği düşünülmektedir (Gür, 2008)

Deneyleer sonucunda elde edilen verilere göre pH, verim verileri Tablo 4.18'de verilmiştir:

**Tablo 4.18:** Değişik pH değerlerinde elektrokoaglsyon verimi ve deney sonu pH değerleri.

pH	Koagüle etme verimi (%)	2 dk sonunda pH	Deney sonu pH	Numune Alınırken pH
6,02	92	5,02	6,56	6,88
8,07 (doğal)	95	8,10	7,81	7,68
9,00	95	8,54	6,90	6,52
9,71	96	9,43	8,93	8,66

Başlangıç pH'ın 6,02 olduğu deneyde koagüle etme mekanizmasında sırası ile (4.12), (4.13) ve (4.14)te verilen denklemlerin mekanizmaları çalıştığı düşünülmektedir. Elektrokoagülasyon işlemi sonunda pH değeri de (4.8) denklemleri ile pH 6,56'ya çıkmış numune alımı sırasında ise pH6,88 olmuştur. pH'ın diğer deneylere göre yükselmesi, düşük pH değerlerinde denklem (4.8)'deki reaksiyonun meydana gelmemesi sebebi ile ortamda OH<sup>-</sup> iyonlarının konsantrasyonunun artması olarak düşünülmektedir.

Başlangıç pH'sının 8,07 olduğu deneyde ise koagüle etme mekanizmasında yine (4.13) ve (4.14)de verilen denklemlerin mekanizmaları çalıştığı düşünülmektedir. Ancak bu deneyde sürekli olarak pH düşme eğilimi gözlenmiştir. %95 verimin elde edildiği deneyde pH'ın düşme eğiliminde olmasının sebebinin denklem (4.9) ve (4.10) olduğu düşünülmektedir.

Başlangıç pH'sının 9,00 ve 9,71 olduğu deneylerde ise koagülasyon mekanizması yine (4.13) ve (4.14)'de gösterildiği gibi işlemekte, bununla beraber pH değerinin yüksek olması sebebi ile denklem (4.9) ve (4.10)'da gösterilen reaksiyon oluşarak ortamdaki OH<sup>-</sup> iyonlarının alüminyum hidroksite bağlanarak koagülasyon veriminde artış gözlenmiştir.

Gerçekleştirilen deneylerde türbitide grafiği Şekil 4.32’de verilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi doğal pH ile elde edilen değerler ile daha yüksek pH’larda elde edilen değerler arasında çok büyük bir fark olmadığından diğer deneylere **pH 8,07 (doğal pH)** şartlarında devam edilmesine karar verilmiştir.

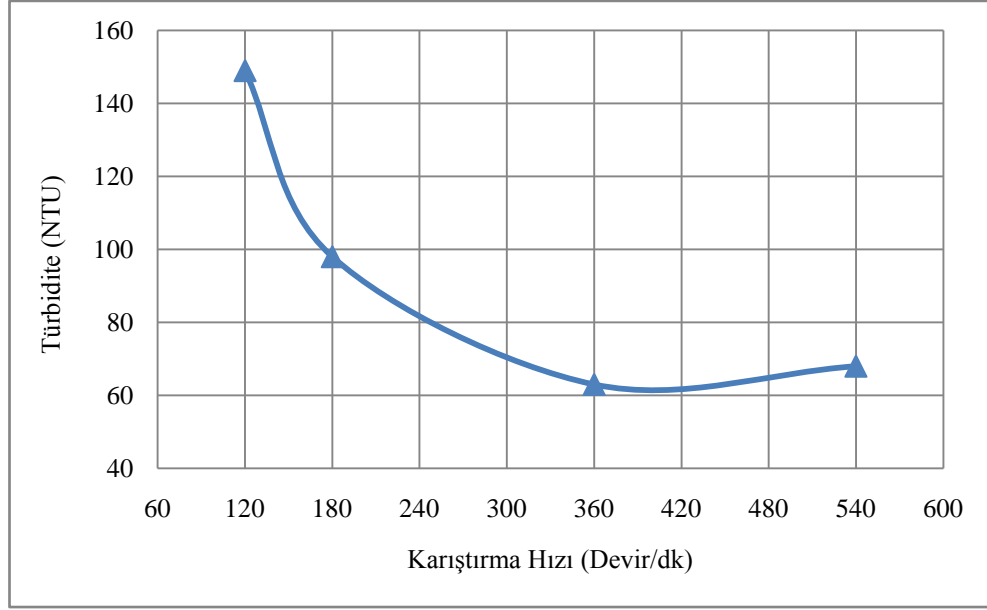
#### **4.2.1.4. Optimum Ön Kondisyon Karıştırma Hızı**

Elektrokoagülasyon işleminde, koagülasyon mekanizması kimyasal koagülasyon ile aynı şekilde çalışmaktadır. Ortama şarj edilen iyon ve moleküllerin, süspansiyonun yapısını oluşturan katı tanecikler ile en verimli şekilde etkileşime girme oranı koagülasyon verimini önemli derecede etkilemektedir. Bu sebeple şarj edilen iyon ve moleküllerin tanelerle etkileşim hızını arttırmak için karıştırma işlemi uygulanmaktadır. Genel olarak bir kimyasal reaksiyonda karıştırma işlemi için -genellikle- bir sınırlama olmasa da koagülasyon mekanizmasında karıştırmanın hız ve süresi belli sınırları aşmamalıdır. Sınırların aşılması durumunda daha önce belirtildiği gibi akış hızı etkisi-vortex etkisi- ve ortamda oluşan kesme kuvvetleri etkisi ile floklar tekrardan dağılabilir, yeterli süre ve hızda karıştırma yapılmaz ise de metal hidroksitler yeterli etkileşime giremeyerek koagülasyon mekanizması verimli sonuçlar ortaya çıkarmayacaktır. Bu bilgiler ışığı altında ön kondisyon işlemi içerisinde çeşitli karıştırma hızları seçilerek optimum karıştırma hızının bulunması hedeflenmiştir.

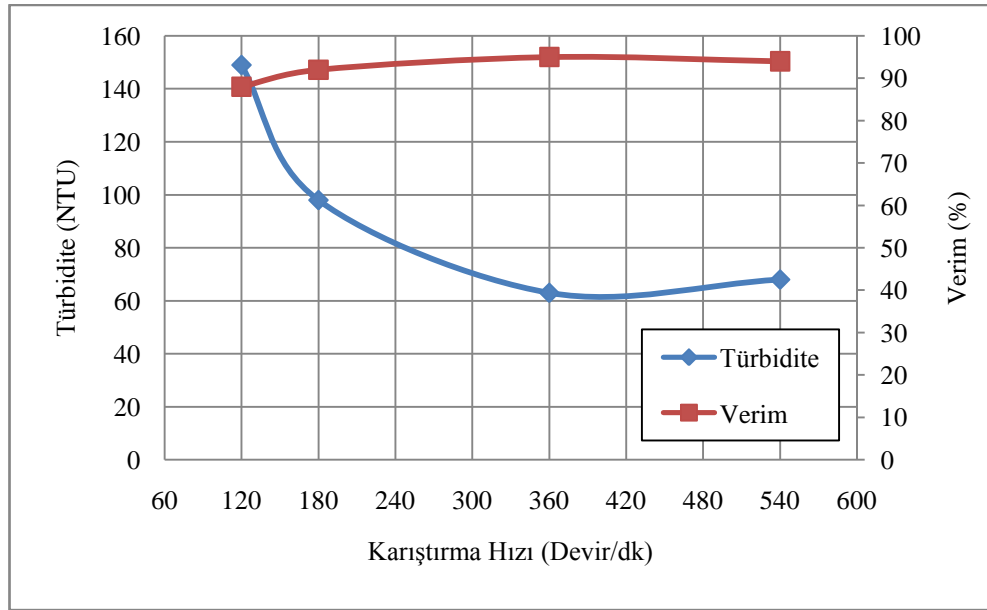
Deneyler 1000 ml’lik reaktör içerisinde toplamda 373 cm<sup>2</sup> yüzey alanına sahip birbirine paralel yerleştirilen alüminyum elektrotlar ile sabit 1,5 Amper-40 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğu altında gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında oluşan pH ve sıcaklık profilinin çizilmesi için deney süresince pH ve sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ön kondisyon karıştırma hızı 120, 180, 360 ve 540 devir/dk, ön kondisyon süresi 120 sn, çökme modunda elektrokoagülasyon süresi ise 300 sn olacak şekilde seçilerek elektrokoagülasyon yapılmıştır. Elektrokoagülasyon işleminin ardından 60 sn çökme beklenecek şekilde yüzeyden 2 cm derinlikten pipetle numune alımı yapılarak türbidimetrede bulanıklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Deneylerde başlangıç pH değeri pH 8 (doğal pH) olacak şekilde seçilmiştir. Bununla beraber deney süresince elde edilen verilerden enerji tüketim miktar ve maliyetleri ile koagülasyon performansları hesaplanmıştır. Deneylerden elde edilen veriler Tablo 4.19’da, deney sonuçlarına ilişkin çökme grafiği Şekil 4.33’de ve çökme-verim grafiği Şekil 4.34’de verilmiştir.

**Tablo 4.19:** Alüminyum elektrot kullanılarak gerçekleştirilen optimum karıştırma hızı deney sonuçları.

<b>DENEY ŞARTLARI</b>				
Başlangıç pH	8,09	8,02	8,07	7,94
<b>Akım (A)</b>	<b>1,5</b>	<b>1,5</b>	<b>1,5</b>	<b>1,5</b>
Akım Yoğunluğu, (A/m <sup>2</sup> )	40	40	40	40
Karıştırma Hızı (devir/dk)	<b>120</b>	<b>180</b>	<b>360</b>	<b>540</b>
Voltaj, (V)	9,6	10,7	9	9,4
PKO (%)	3	3	3	3
Ön Kondisyon Süresi(sn)	120	120	120	120
Çökelme Modunda Elektrokoagülasyon Süresi (sn)	300	300	300	300
Toplam Deney Süresi (sn)	420	420	420	420
İlk Sıcaklık (C <sup>0</sup> )	24	26	23,6	25,2
<b>DENEYLERDEN ELDE EDİLEN VERİLER</b>				
<b>Deney sonunda türbidite (NTU)</b>	<b>149</b>	<b>98</b>	<b>63</b>	<b>68</b>
2 dk sonunda pH	7,21	7,39	8,10	7,49
Elektrokoagülasyon sonunda pH	7,54	7,65	7,81	7,69
Numune Alımı Sırasında pH	7,30	7,37	7,68	7,59
Son Sıcaklık	25,5	27,6	25,2	27,8
Sıcaklık Farkı (C <sup>0</sup> )	1,5	1,6	1,6	2,6
Elektrik birim Maliyeti (KWh/TL)	0,19284	0,1928	0,1928	0,1928
Enerji Tüketimi, (Wh)	1,680	1,873	1,575	1,645
Enerji Maliyeti, (TL))	0,00032 TL	0,00036 TL	0,00030 TL	0,00032 TL
Ton Başına Enerji Maliyeti (TL/Ton)	0,32 TL	0,36 TL	0,30 TL	0,32 TL
Akım Verimi (%)	218%	218%	218%	218%
Teorik Çözünen Alüminyum (gr/lit)	0,0588	0,0588	0,0588	0,0588
1 m <sup>3</sup> Atık Su İçin Harcanan Al, (gr)	58,76	58,76	58,76	58,76
Faraday , (F/m <sup>3</sup> )	6,53	6,53	6,53	6,53
<b>Koagüle Etme Verimi, (%)</b>	<b>88%</b>	<b>92%</b>	<b>95%</b>	<b>94%</b>
Elektrot Maliyeti, (TL/m <sup>3</sup> )	0,21 TL	0,21 TL	0,21 TL	0,21 TL
<b>Toplam Maliyet, (TL/m<sup>3</sup>)</b>	<b>0,53 TL</b>	<b>0,57 TL</b>	<b>0,51 TL</b>	<b>0,53 TL</b>



**Şekil 4.33:** Alüminyum elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik karıştırma hızlarında çökme grafiği.



**Şekil 4.34:** Alüminyum elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik karıştırma hızlarında çökme-verim grafiği.

Alüminyum elektrot kullanılarak kömür hazırlama tesis artığı numunesi üzerinde gerçekleştirilen değişik karıştırma hızları deneyleri sonucunda elde edilen verilere göre karıştırma hızı arttıkça türbiditede düşme yaşanırken verim giderek artmaktadır. Ancak 360 devir/dk hıza ulaşıldığında en yüksek çökme verimi elde edilmekte, bu hızdan sonra

ise türbitide artarken verim düşmektedir. Bir başka değişle 360 devir/dk hızların altında Alüminyum hidroksit molekülleri yeteri kadar taneler ile etkileşime geçememekte, bu hızın üzerinde ise oluşan floklar dağılmakta ve çökme verimi düşmektedir. Bu sonuçlara göre optimum karıştırma hızının **360 devir/dk** olduğuna karar verilmiştir.

#### **4.2.1.5. Optimum Ön Kondisyon Karıştırma Süresi**

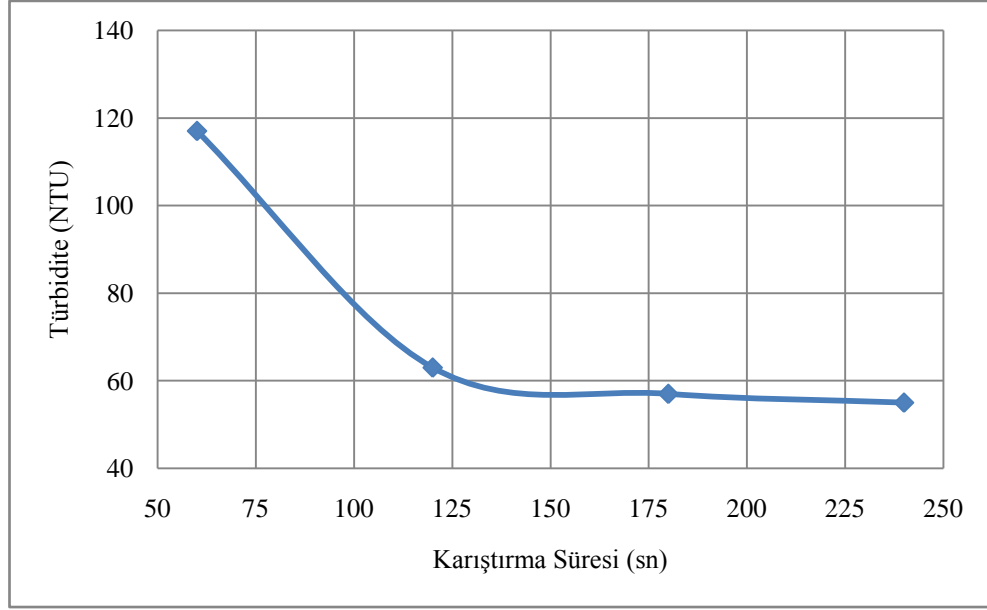
Koagülasyon işlemlerinde pülpe şarj edilen metal ve hidroksit iyonlarının tüm pülp içerisine homojen şekilde dağılması, tane yüzeylerine verimli olacak şekilde etki etmesi açısından karıştırma işlemi önem arz etmektedir. Bu süre az tutulursa yeterli etkileşim olmamakta, fazla olursa da oluşmaya başlayan floklar dağılarak ve tekrardan birleşemeyerek verim düşmektedir. Bu bilgiler ışığı altında ön kondisyon işlemi içerisinde çeşitli karıştırma süreleri seçilerek optimum karıştırma süresinin bulunması hedeflenmiştir.

Deneyler 1000 ml'lik reaktör içerisinde toplamda 373 cm<sup>2</sup> yüzey alanına sahip birbirine paralel yerleştirilen alüminyum elektrotlar ile sabit 1,5 Amper-40 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğu altında gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında oluşan pH ve sıcaklık profilinin çizilmesi için deney süresince pH ve sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ön kondisyon karıştırma hızı 360 devir/dk, ön kondisyon süresi 60, 120, 180 ve 240sn olacak şekilde, seçilerek elektrokoagülasyon işlemi yapılmıştır. Elektrokoagülasyon işleminin ardından 60 sn çökme beklenerek yüzeyden 2 cm derinlikten pipetle numune alımı yapılarak türbidimetrede bulanıklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Deneylerde başlangıç pH değeri pH 8 (doğal pH) olacak şekilde seçilmiştir. Bununla beraber deney süresince elde edilen verilerden enerji tüketim miktar ve maliyetleri ile koagülasyon performansları hesaplanmıştır. Deneylerden elde edilen veriler Tablo 4.20'de, deney sonuçlarına ilişkin çökme grafiğı Şekil 4.35'de ve çökme-verim grafiğı Şekil 4.36'da verilmiştir.

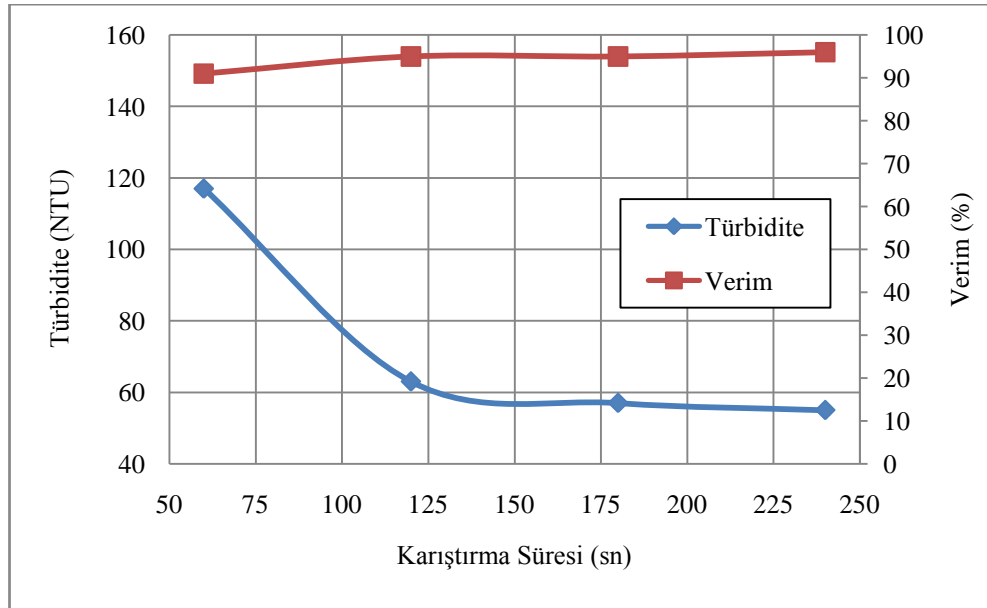


**Tablo 4.20:** Alüminyum elektrot kullanılarak gerçekleştirilen optimum karıştırma süresi deney sonuçları.

<b>DENEY ŞARTLARI</b>				
Başlangıç pH	8,01	8,07	7,99	8,03
<b>Akım (A)</b>	<b>1,5</b>	<b>1,5</b>	<b>1,5</b>	<b>1,5</b>
Akım Yoğunluğu, (A/m <sup>2</sup> )	40	40	40	40
Karıştırma Hızı (devir/dk)	360	360	360	360
Voltaj, (V)	10,9	9	10,7	10,5
PKO (%)	3	3	3	3
Ön Kondisyon Süresi(sn)	60	120	180	240
Çökelme Modunda Elektrokoagülasyon Süresi (sn)	360	300	240	180
Toplam Deney Süresi (sn)	420	420	420	420
İlk Sıcaklık (C <sup>0</sup> )	24,4	23,6	24,6	24,4
<b>DENEYLERDEN ELDE EDİLEN VERİLER</b>				
<b>Deney sonunda türbitidite (NTU)</b>	<b>117</b>	<b>63</b>	<b>57</b>	<b>55</b>
2 dk sonunda pH	5,90	8,10	7,03	7,60
Elektrokoagülasyon sonunda pH	8,24	7,81	7,72	6,77
Numune Alımı Sırasında pH	8,17	7,68	7,50	7,70
Son Sıcaklık	26,8	25,2	26,7	26,50
Sıcaklık Farkı (C <sup>0</sup> )	2,4	1,6	2,1	2,4
Elektrik birim Maliyeti (KWh/TL)	0,1928	0,1928	0,1928	0,1928
Enerji Tüketimi, (Wh)	1,908	1,575	1,873	1,838
Enerji Maliyeti, (TL)	0,00037 TL	0,00030 TL	0,00036 TL	0,00035 TL
Ton Başına Enerji Maliyeti (TL/Ton)	0,37 TL	0,30 TL	0,36 TL	0,35 TL
Akım Verimi (%)	218%	218%	218%	218%
Teorik Çözünen Alüminyum (gr/lt)	0,0588	0,0588	0,0588	0,0588
1 m <sup>3</sup> Atık Su İçin Harcanan Al, (gr)	58,76	58,76	58,76	58,76
Faraday , (F/m <sup>3</sup> )	6,53	6,53	6,53	6,53
<b>Koagüle Etme Verimi, (%)</b>	<b>91%</b>	<b>95%</b>	<b>95%</b>	<b>96%</b>
Elektrot Maliyeti, (TL/m <sup>3</sup> )	0,21 TL	0,21 TL	0,21 TL	0,21 TL
<b>Toplam Maliyet, (TL/m<sup>3</sup>)</b>	<b>0,58 TL</b>	<b>0,51 TL</b>	<b>0,57 TL</b>	<b>0,56 TL</b>



**Şekil 4.35** Alüminyum elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik karıştırma sürelerinde çökme grafiği.



**Şekil 4.36:** Alüminyum elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik karıştırma sürelerinde çökme-verim grafiği.

Alüminyum elektrot kullanılarak kömür hazırlama tesis artığı numunesi üzerinde gerçekleştirilen değişik karıştırma süreleri deneyleri sonucunda elde edilen verilere göre karıştırma süresi arttıkça türbitide de önce düşme yaşanırken verim giderek artmaktadır. Ancak 120 sn'den daha uzun sürelerde türbitide ve verimde bir değişiklik olmamaktadır. Buna ek olarak bir önceki deney grubunda tespit ettiğimiz 360 devir/dk

karıştırma hızının karıştırma süresi arttırılsa da flokların yapılarının bozulmasına bir etkisi olmamaktadır. Koagülasyonda temel hedefin verimli zaman kullanımı olduğu göz önüne alınırsa optimum karıştırma süresinin **120 sn** olduğuna karar verilmiştir.

#### 4.2.2. Alüminyum Elektrot Kullanımında Optimum Şartlar

Kömür hazırlama tesis artığı numunesi üzerinde gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen verilere göre Alüminyum elektrot kullanım şartları Tablo 4.21’de verilmiştir.

**Tablo 4.21:** Alüminyum elektrot kullanımında optimum şartlar.

<b>Başlangıç pH</b>	8,07 (Doğal)
<b>Akım (A)</b>	1,5
<b>Akım Yoğunluğu, (A/m<sup>2</sup>)</b>	40
<b>Karıştırma Hızı (devir/dk)</b>	360
<b>PKO (%)</b>	3
<b>Ön Kondisyon Süresi(sn)</b>	120
<b>Çökelme Modunda Elektrokoagülasyon Süresi (sn)</b>	300
<b>Toplam Deney Süresi (sn)</b>	420
<b>Enerji Tüketimi, (Wh)</b>	1,575
<b>Enerji Maliyeti, (TL)</b>	0,00030
<b>Ton Başına Enerji Maliyeti (TL/Ton)</b>	0,30
<b>Akım Verimi (%)</b>	218%
<b>Teorik Çözünen Alüminyum (gr/lit)</b>	0,0588
<b>1 m<sup>3</sup> Atık Su İçin Harcanan Al, (gr)</b>	58,76
<b>Faraday , (F/m<sup>3</sup>)</b>	6,53
<b>Koagüle Etme Verimi, (%)</b>	<b>95%</b>
<b>Elektrot Maliyeti, (TL/m<sup>3</sup>)</b>	0,21
<b>Toplam Maliyet, (TL/m<sup>3</sup>)</b>	<b>0,51</b>

### 4.2.3. Demir Elektrot İle Gerçekleştirilen Elektrokoagülasyon Deneyleri

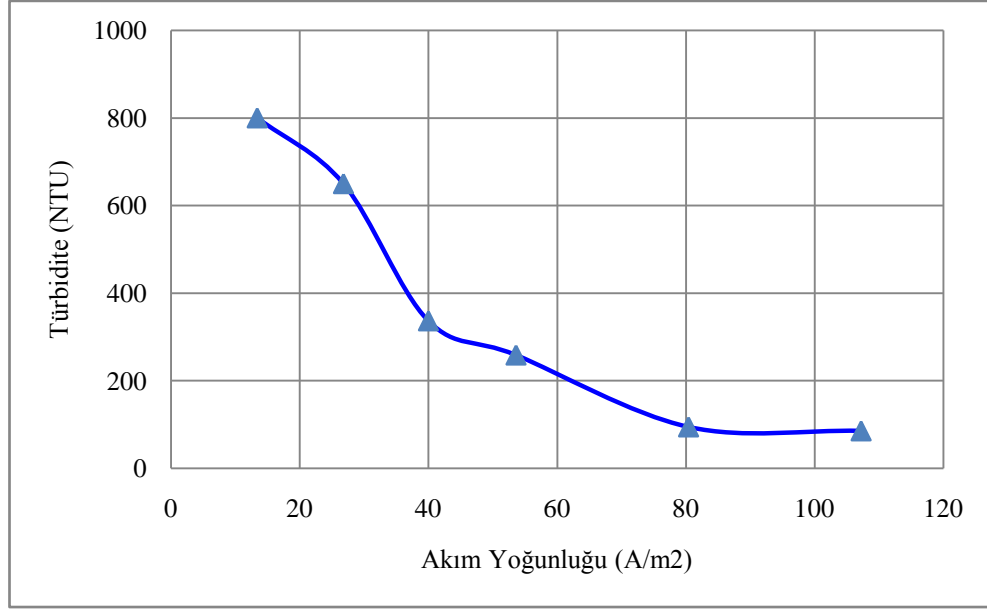
#### 4.2.3.1. *Optimum Akım Yoğunluğunun Bulunması*

Elektrokoagülasyon mekanizmasında en önemli parametre akım yoğunluğu olduğu ve mekanizmanın nasıl çalıştığı önceki bölümlerde irdelenmiştir. Alüminyum elektrotlar kullanılarak gerçekleştirilen deneylere paralel olarak demir elektrotlar ile de optimum akım yoğunluğunun bulunmasına yönelik deneyler gerçekleştirilmiştir.

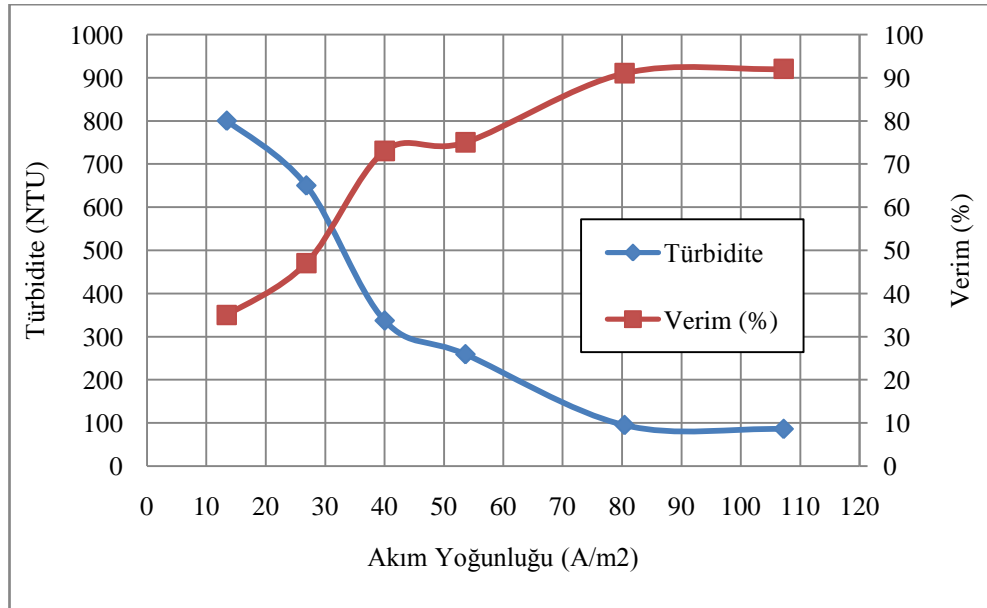
Deneyler, 1000 ml'lik reaktör içerisinde toplamda 373 cm<sup>2</sup> yüzey alanına sahip birbirine paralel yerleştirilen demir elektrotlar ile 0,5, 1, 1,5, 2, 3 ve 4 Amper yüklerde gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında oluşan pH ve sıcaklık profilinin çizilmesi için deney süresince pH ve sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ön kondisyon karıştırma hızı 360 devir/dk, ön kondisyon süresi 120 sn, çökme modunda elektrokoagülasyon süresi 180 sn olacak şekilde toplam 300 sn elektrokoagülasyon yapılmıştır. Deneyin sonlanmasından 60 sn sonrasında ise yüzeyden 2 cm derinlikten pipetle numune alımı yapılarak türbidimetrede bulanıklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Bununla beraber deney süresince elde edilen verilerden enerji tüketim miktar ve maliyetleri ile koagülasyon performansları hesaplanmıştır. Deneylerden elde edilen veriler Tablo 4.22'de deney sonuçlarına ilişkin çökme grafiği Şekil 4.37'de ve çökme-verim grafiği Şekil 4.38'de verilmiştir.

**Tablo 4.22:** Demir elektrot kullanılarak gerçekleştirilen optimum akım yoğunluğu deney sonuçları.

<b>DENEY ŞARTLARI</b>						
Başlangıç pH	8,12	8,12	7,9	7,85	7,88	8,03
<b>Akım (A)</b>	<b>0,5</b>	<b>1</b>	<b>1,5</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Akım Yoğunluğu, (A/m <sup>2</sup> )	13,4	26,8	40	53,6	80,4	107,2
Karıştırma Hızı (devir/dk)	360	360	360	360	360	360
Voltaj, (V)	4,2	8,4	10,8	14,3	21,8	23,5
PKO (%)	3	3	3	3	3	3
Ön Kondisyon Süresi (sn)	120	120	120	120	120	120
Çökelme Modunda Elektrokoagülasyon Süresi (sn)	180	180	180	180	180	180
Toplam Deney Süresi (sn)	300	300	300	300	300	300
İlk Sıcaklık (C <sup>0</sup> )	17,9	16,5	19,2	19,5	18,2	20,8
<b>DENEYLERDEN ELDE EDİLEN VERİLER</b>						
<b>Deney sonunda türbidite (NTU)</b>	<b>800</b>	<b>650</b>	<b>337</b>	<b>259</b>	<b>95</b>	<b>86</b>
2 dk sonunda pH	8,22	7,9	7,5	7,02	9,57	8,17
Elektrokoagülasyon sonunda pH	8,34	8,1	9,1	9,65	9,85	8,35
Numune Alımı Sırasında pH	7,91	8,07	9,05	9,21	10,28	8,5
Son Sıcaklık	18	17,7	20,2	21,3	19,5	22,2
Sıcaklık Farkı (C <sup>0</sup> )	0,1	1,2	1	1,8	1,3	1,4
Elektrik birim Maliyeti (KWh/TL)	0,1928	0,1928	0,1928	0,1928	0,1928	0,1928
Enerji Tüketimi, (Wh)	0,175	0,700	1,350	2,383	5,450	7,833
Enerji Maliyeti, (TL)	0,00003 TL	0,00013 TL	0,00026 TL	0,00046 TL	0,00105 TL	0,00151 TL
Ton Başına Enerji Maliyeti (TL/Ton)	0,034 TL	0,135 TL	0,260 TL	0,460 TL	1,051 TL	1,511 TL
Akım Verimi (%)	52%	104%	155%	207%	311%	415%
Teorik Çözünen Demir (gr/lt)	0,0290	0,0580	0,0870	0,1161	0,1741	0,2321
1 m <sup>3</sup> Atık Su İçin Harcanan Fe, (gr)	29,02	58,03	87,05	116,06	174,09	232,12
Faraday , (F/m <sup>3</sup> )	1,55	3,11	4,66	6,22	9,33	12,44
<b>Koagüle Etme Verimi, (%)</b>	<b>35%</b>	<b>47%</b>	<b>73%</b>	<b>75%</b>	<b>91%</b>	<b>92%</b>
Elektrot Maliyeti, (TL/m <sup>3</sup> )	0,05 TL	0,09 TL	0,14 TL	0,18 TL	0,27 TL	0,37 TL
<b>Toplam Maliyet, (TL/m<sup>3</sup>)</b>	<b>0,08 TL</b>	<b>0,23 TL</b>	<b>0,40 TL</b>	<b>0,64 TL</b>	<b>1,33 TL</b>	<b>1,88 TL</b>



Şekil 4.37: Demir elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik akım yoğunluklarında çökme grafiği.



Şekil 4.38: Demir elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik akım yoğunluklarında çökme-verim grafiği.

Gerçekleştirilen deneyler sonucunda akım yoğunluğunun artışına bağlı olarak türibidite hızla düşmektedir. 3 Amper-80,4 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğunda grafik yataylanmış ve bu akım yoğunluğunun üzerindeki değerlerde türibidite de önemli bir değişiklik olmamıştır. Bu sonuca göre optimum değer olarak **3 Amper, 80,4 Amper/m<sup>2</sup>** akım yoğunluğu optimum şart olarak kabul edilmiştir.

#### 4.2.3.2. *Optimum Elektrokoagülasyon Süresinin Bulunması*

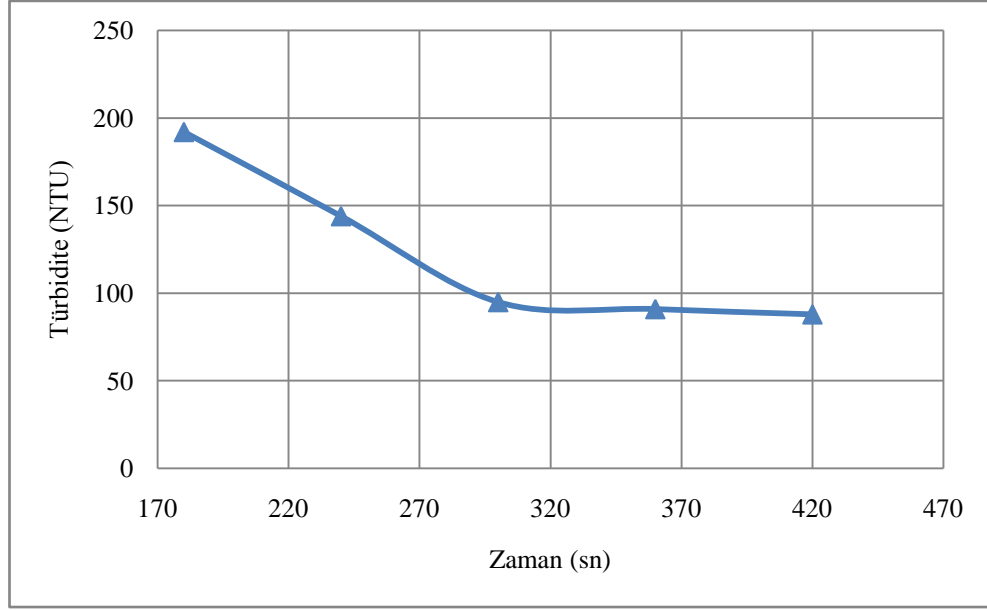
Elektrokoagülasyon mekanizmasında bir diğer önemli parametre sisteme şarj edilecek akımın şarj süresidir. Bu sebeple optimum akım yoğunluğunun belirlenmesinden sonra gerçekleştirilen deneylerde ikinci adım olarak optimum elektrokoagülasyon süresinin bulunması hedeflenmiştir.

Deneyler, 1000 ml'lik reaktör içerisinde toplamda 373 cm<sup>2</sup> yüzey alanına sahip birbirine paralel yerleştirilen demir elektrotlar ile sabit 3 amper-80,4 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğu altında gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında oluşan pH ve sıcaklık profilinin çizilmesi için deney süresince pH ve sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ön kondisyon karıştırma hızı 360 devir/dk, ön kondisyon süresi 120 sn, çökeltme modunda elektrokoagülasyon süresi ise 60, 120, 180, 240 ve 300 sn olacak şekilde seçilerek elektrokoagülasyon yapılmıştır. Elektrokoagülasyon işleminin ardından 60 sn çökeltme beklenecek yüzeyden 2 cm derinlikten pipetle numune alımı yapılarak türbidimetrede bulanıklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Bununla beraber deney süresince elde edilen verilerden enerji tüketim miktar ve maliyetleri ile koagülasyon performansları hesaplanmıştır. Deneylerden elde edilen veriler Tablo 4.23'te, deney sonuçlarına ilişkin çökme grafiği Şekil 4.39'da ve çökme-verim grafiği Şekil 4.40'da verilmiştir.

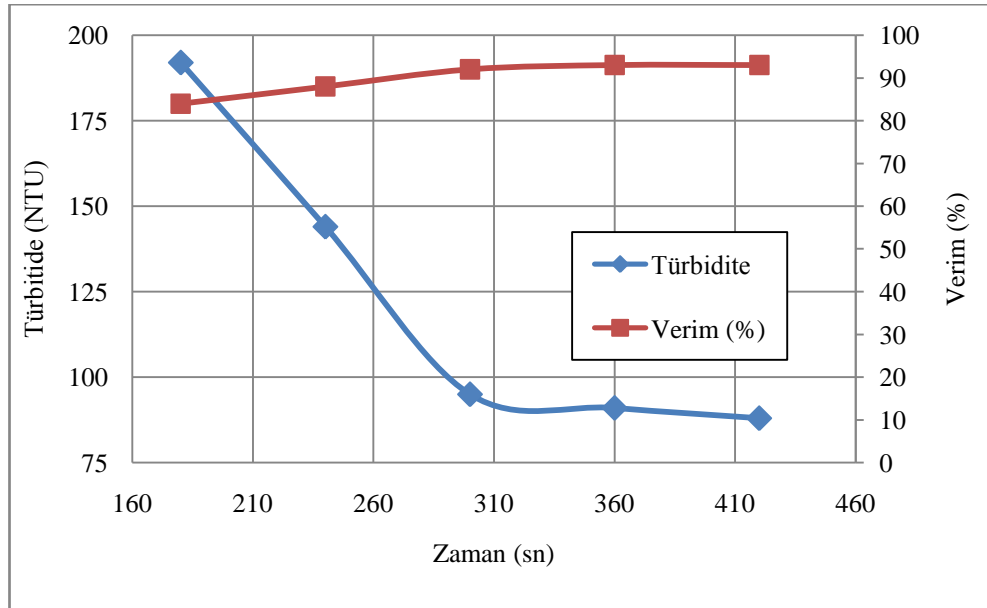
**Tablo 4.23:** Demir elektrot kullanılarak gerçekleştirilen optimum elektrokoagülasyon süresi deney sonuçları.

<b>DENEY ŞARTLARI</b>					
Başlangıç pH	7,8	7,7	7,88	7,87	7,81
<b>Akım (A)</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>
Akım Yoğunluğu, (A/m <sup>2</sup> )	80,4	80,4	80,4	80,4	80,4
Karıştırma Hızı (devir/dk)	360	360	360	360	360
Voltaj, (V)	19,2	18,5	21,8	18,6	19,2
PKO (%)	3	3	3	3	3
Ön Kondisyon Süresi(sn)	120	120	120	120	120
Çökeltme Modunda Elektrokoagülasyon Süresi (sn)	<b>60</b>	<b>120</b>	<b>180</b>	<b>240</b>	<b>300</b>
Toplam Deney Süresi (sn)	180	240	300	360	420
İlk Sıcaklık (C <sup>0</sup> )	17,2	17,9	18,2	16,5	17,2
<b>DENEYLERDEN ELDE EDİLEN VERİLER</b>					
<b>Deney sonunda türbidite (NTU)</b>	<b>192</b>	<b>144</b>	<b>95</b>	<b>91</b>	<b>88</b>
2 dk sonunda pH	8,90	9,59	9,57	8,47	9,32
Elektrokoagülasyon sonunda pH	9,10	8,85	9,85	10,37	10,43
Numune Alımı Sırasında pH	9,92	9,82	10,28	10,64	10,83
Son Sıcaklık	21,8	21,5	19,5	22,2	24
Sıcaklık Farkı (C <sup>0</sup> )	4,6	4,6	1,3	5,7	6,8
Elektrik birim Maliyeti (KWh/TL)	0,1928	0,1928	0,1928	0,1928	0,1928
Enerji Tüketimi, (Wh)	2,880	3,700	5,450	5,580	6,720
Enerji Maliyeti, (TL)	0,00056 TL	0,00071 TL	0,00105 TL	0,00108 TL	0,00130 TL
Ton Başına Enerji Maliyeti (TL/Ton)	0,56 TL	0,71 TL	1,05 TL	1,08 TL	1,30 TL
Akım Verimi (%)	187%	249%	311%	373%	435%
Teorik Çözünen Demir (gr/lt)	0,1045	0,1393	0,1741	0,2089	0,2437
1 m <sup>3</sup> Atık Su İçin Harcanan Fe, (gr)	104,46	139,27	174,09	208,91	243,73
Faraday , (F/m <sup>3</sup> )	5,60	7,46	9,33	11,19	13,06
<b>Koagüle Etme Verimi, (%)</b>	<b>84%</b>	<b>88%</b>	<b>92%</b>	<b>93%</b>	<b>93%</b>
Elektrot Maliyeti, (TL/m <sup>3</sup> )	0,16 TL	0,22 TL	0,27 TL	0,33 TL	0,38 TL
<b>Toplam Maliyet, (TL/m<sup>3</sup>)</b>	<b>0,72 TL</b>	<b>0,93 TL</b>	<b>1,33 TL</b>	<b>1,41 TL</b>	<b>1,68 TL</b>





**Şekil 4.39:** Demir elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik elektrokoagülasyon sürelerinde çökme grafiği.



**Şekil 4.40:** Demir elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik elektrokoagülasyon sürelerinde çökme-verim grafiği.

Gerçekleştirilen deneyler sonucunda elektrokoagülasyon süresinin artmasına bağlı olarak türbidite düşüş göstermektedir. Toplamda 300 sn olarak gerçekleştirilen elektrokoagülasyon deneyinde grafik yataylanmış ve sürenin üzerindeki değerlerde türbidite de önemli bir değişiklik olmamıştır. Sürenin uzaması işletme maliyetlerini

doğrudan etkilediği için sınır-optimum değer olarak 120 sn ön kondüsyon, 180 sn elektrokoagülasyon, toplamda **300 sn** elektrokoagülasyon süresi optimum şart olarak kabul edilmiştir.

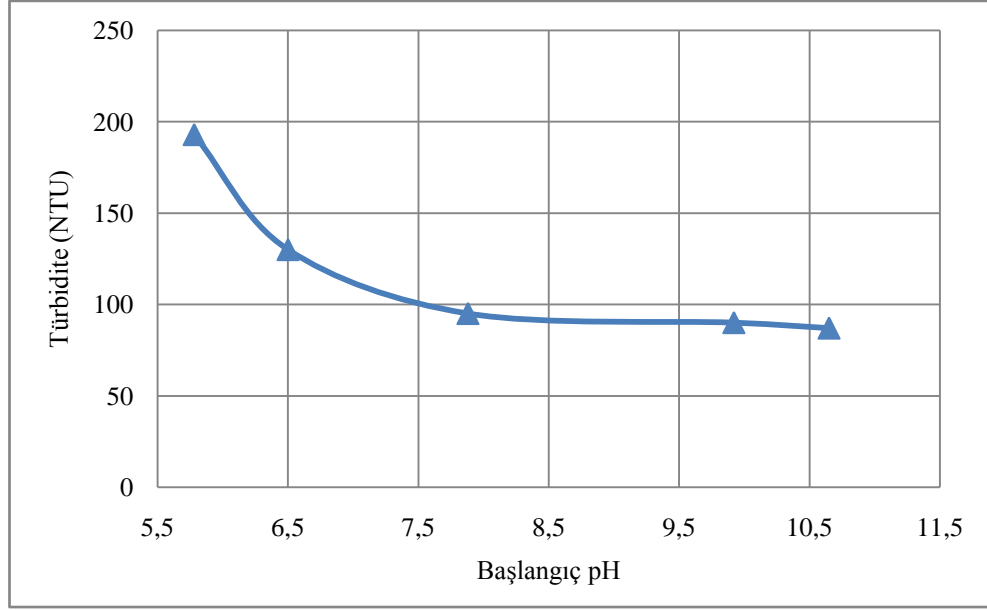
#### 4.2.3.3. *Optimum pH'in Bulunması*

Bu deneylerde önceki başlıklarda irdelenen Akım yoğunluğu ve zaman parametrelerinin optimizasyonunun gerçekleştirilmesinden sonra, elektrokoagülasyonun gerçekleştiği ortamın başlangıç pH'sının, verime etkisi araştırılmıştır.

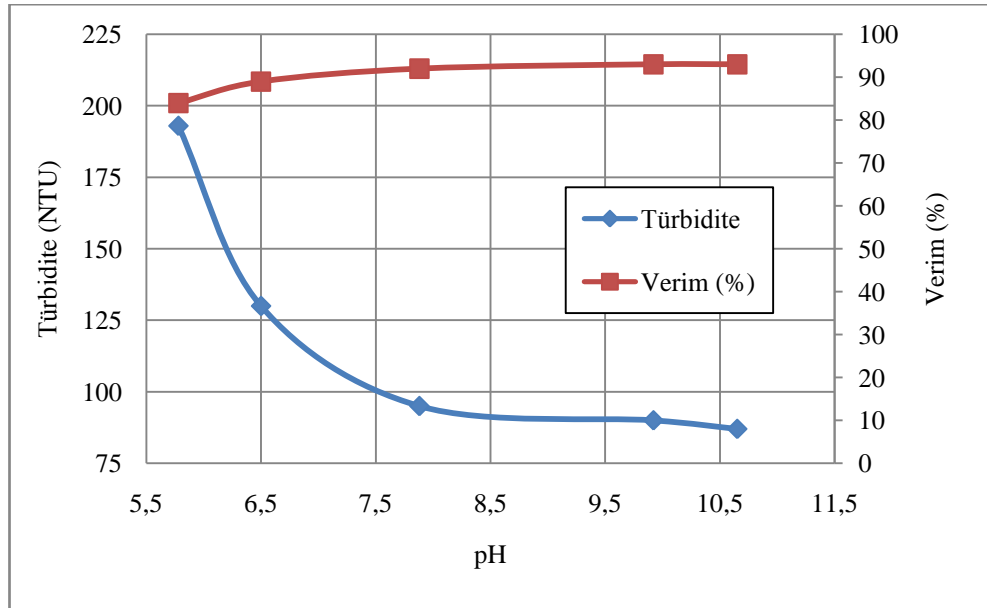
Deneyler 1000 ml'lik reaktör içerisinde toplamda 373 cm<sup>2</sup> yüzey alanına sahip birbirine paralel yerleştirilen demir elektrotlar ile sabit 3 Amper-80,4 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğu altında gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında oluşan pH ve sıcaklık profilinin çizilmesi için deney süresince pH ve sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ön kondisyon karıştırma hızı 360 devir/dk, ön kondisyon süresi 120 sn, çökme modunda elektrokoagülasyon süresi ise 180 sn olacak şekilde seçilerek elektrokoagülasyon yapılmıştır. Elektrokoagülasyon işleminin ardından 60 sn çökme beklenerek yüzeyden 2 cm derinlikten pipetle numune alımı yapılarak türbidimetrede bulanıklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Deneylerde başlangıç pH değeri baz alınarak pH 5,78, 6,50, 7,88 (doğal pH), 9,92, 10,65 şeklinde değişik başlangıç pH değerleri seçilmiştir. Bununla beraber deney süresince elde edilen verilerden enerji tüketim miktar ve maliyetleri ile koagülasyon performansları hesaplanmıştır. Deneylerden elde edilen veriler Tablo 4.24'te, deney sonuçlarına ilişkin çökme grafiği Şekil 4.41'de ve çökme-verim grafiği Şekil 4.42'de verilmiştir.

**Tablo 4.24:** Demir elektrot kullanılarak gerçekleştirilen optimum başlangıç pH'ı deney sonuçları.

<b>DENEY ŞARTLARI</b>					
Başlangıç pH	<b>5,78</b>	<b>6,5</b>	<b>7,88(doğal)</b>	<b>9,92</b>	<b>10,65</b>
<b>Akım (A)</b>	3	3	3	3	<b>3</b>
Akım Yoğunluğu, (A/m <sup>2</sup> )	80,4	80,4	80,4	80,4	80,4
Karıştırma Hızı (devir/dk)	360	360	360	360	360
Voltaj, (V)	9,8	13,9	21,8	12,6	13,23
PKO (%)	3	3	3	3	3
Ön Kondisyon Süresi(sn)	120	120	120	120	120
Çökelme Modunda Elektrokoagülasyon Süresi (sn)	180	180	180	180	180
Toplam Deney Süresi (sn)	300	300	300	300	300
İlk Sıcaklık (C <sup>0</sup> )	17,7	16,4	18,2	17,6	17,5
<b>DENEYLERDEN ELDE EDİLEN VERİLER</b>					
<b>Deney sonunda türbitidite (NTU)</b>	<b>193</b>	<b>130</b>	<b>95</b>	<b>90</b>	<b>87</b>
2 dk sonunda pH	7,25	7,02	9,57	10,76	8,61
Elektrokoagülasyon sonunda pH	6,67	8,41	9,85	10,64	10,93
Numune Alımı Srasında pH	7,34	9,50	10,28	10,76	10,99
Son Sıcaklık	20,4	19,5	19,5	22	23,5
Sıcaklık Farkı (C <sup>0</sup> )	2,7	3,1	1,3	4,4	6
Elektrik birim Maliyeti (KWh/TL)	0,1928	0,1928	0,1928	0,1928	0,1928
Enerji Tüketimi, (Wh)	2,450	3,475	5,450	3,150	4,410
Enerji Maliyeti, (TL)	0,00047 TL	0,00067 TL	0,00105 TL	0,00061 TL	0,00085 TL
Ton Başına Enerji Maliyeti (TL/Ton)	0,47 TL	0,67 TL	1,05 TL	0,61 TL	0,85 TL
Akım Verimi (%)	311%	311%	311%	311%	311%
Teorik Çözünen Demir (gr/lt)	0,1741	0,1741	0,1741	0,1741	0,1741
1 m <sup>3</sup> Atık Su İçin Harcanan Fe, (gr)	174,09	174,09	174,09	174,09	174,09
Faraday , (F/m <sup>3</sup> )	9,33	9,33	9,33	9,33	9,33
<b>Koagüle Etme Verimi, (%)</b>	<b>84%</b>	<b>89%</b>	<b>92%</b>	<b>93%</b>	<b>93%</b>
Elektrot Maliyeti, (TL/m <sup>3</sup> )	0,27 TL	0,27 TL	0,27 TL	0,27 TL	0,27 TL
<b>Toplam Maliyet, (TL/m<sup>3</sup>)</b>	<b>0,75 TL</b>	<b>0,94 TL</b>	<b>1,33 TL</b>	<b>0,88 TL</b>	<b>1,12 TL</b>



**Şekil 4.41:** Demir elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik başlangıç pH'ında çökme grafiği.



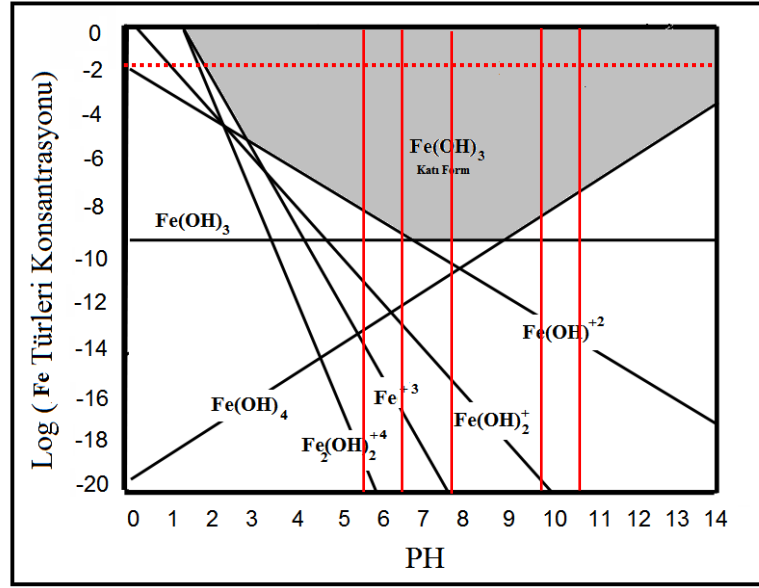
**Şekil 4.42:** Demir elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik başlangıç pH'ında çökme-verim grafiği.

Gerçekleştirilen deneyler sırasında pH değerlerinin ayarlanması sırasında Tablo 4.25'te verilen işlemler yapılmıştır.

**Tablo 4.25:** Başlangıç pH ayarlaması sırasında dışarıdan şarj edilen H<sup>+</sup> ve OH<sup>-</sup> iyon mol miktarları.

İşlem	Eklenen Çözelti	Eklenen Miktar (ml)	Sisteme Olarak Eklenen OH-H iyonu (mol)	Teorik Eklenen	Gözlemler
pH 5,87	0,5 Molar HCl	24,5 ml	$1,2 \times 10^{-2}$		Herhangi farklı bir tepki alınmadı
pH 6,50	0,5 Molar HCl	11,5 ml	$5,7 \times 10^{-3}$		Herhangi farklı bir tepki alınmadı
pH 9,92	0,5 Molar NaOH	4 ml	$2 \times 10^{-3}$		Herhangi farklı bir tepki alınmadı
pH 10,65	0,5 Molar NaOH	10ml	$5 \times 10^{-3}$		Herhangi farklı bir tepki alınmadı

Elektrokoagülasyonda çok sık kullanılan demir elektrotların suda çözünmesiyle oluşturacağı demir(III) kompleksleri önemlidir. Sulu ortamda Fe<sup>3+</sup>'nin oluşturduğu hidroksit kompleksleri ve bu komplekslerin oluşum sabitleri Şekil 4.43'te gösterilmektedir. Sudaki hidroksil iyonları elektrotlardan çözülmüş olan Fe<sup>3+</sup> iyonları ile birleşerek ortamın pH'sına bağlı olarak demir komplekslerinin oluşumuna yol açmaktadır (Benfield ve dig., 1982).



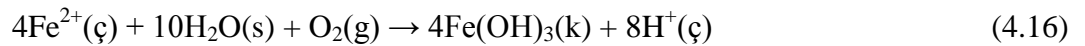
Şekil 4.43: Değişik pH ve iyon konsantrasyonlarında oluşan demir hidroksit türleri.

Demir anodun elektrolitik çözeltideki ürünleri düşük pH'da anyonik  $\text{Fe(OH)}_4^-$  gibi türlerdir ve bunlar uygun pH değerlerinde önce  $\text{Fe(OH)}_3$ 'e, sonuçta aşağıdaki mekanizmalardaki reaksiyonlara göre  $\text{Fe}_n(\text{OH})_{3n}$ 'e ( $n = 2$  ya da  $3$ ) polimerleşmektedirler (Mollah ve dig., 2001);

Demir için reaksiyon mekanizmaları;

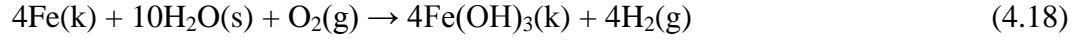
### Mekanizma I

#### Anotta:



#### Katotta:

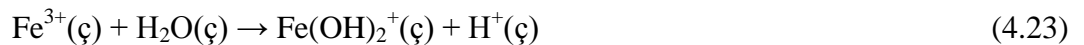


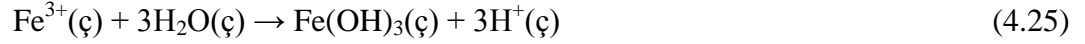
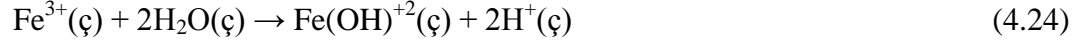
**Toplamda:****Mekanizma II****Anotta:****Katotta:****Toplamda:**

şeklindedir (Gür, 2008).

Elektrostatik çekicilik veya kompleksleşme ve ardından koagülasyon vasıtasıyla atık suları kirleticilerden ayıran  $\text{Fe(OH)}_n\text{(k)}$  akımda jel halinde bir süspansiyon oluşturmaktadır. Yüzey kompleksleşme esnasında, kirletici  $\text{Fe(OH)}_n\text{(k)}$ 'a kimyasal olarak bağlanan bir ligand gibi davranmaktadır (Mollah ve dig., 2001).

Redoks reaksiyonu ile üretilen  $\text{H}_2$ , flotasyon vasıtasıyla, çözünmüş veya askıda katı maddeleri giderebilmektedir. Ancak  $\text{Fe}^{3+}$  iyonları hidrasyona uğrayabilmekte ve çözeltinin pH'sına bağlı olarak  $\text{Fe(OH)}^{2+}$ ,  $\text{Fe(OH)}_2^+$ , ve  $\text{Fe(OH)}_3$  türleri asidik koşullarda bulunabilmektedir. Reaksiyonlar aşağıda gösterilmektedir (Mollah ve dig., 2001).





Ayrıca alkali koşullar altında  $\text{Fe}(\text{OH})_6^{3-}$  ve  $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$  iyonları da bulunabilmektedir. Bu nedenle anyonik ve katyonik türlerin elektrokoagülasyonu çözünen plaka/çubuk demir elektrot kullanımı ile mümkün olmaktadır (Mollah ve diğ.,2001).

pH 3-13 aralığında çözünmeyen sulu demir hidroksit:

- Asidik pH'da flok yükü pozitif,
- Alkali pH'da negatif,
- pH6.5-8.0 aralığında ise karışık yüklüdür.

Yukarıda verilen bilgiler ışığı altında gerçekleştirilen deney sonuçları ve pH değişimi Tablo 4.26'da verilmiştir.

**Tablo 4.26:** Değişik pH değerlerinde elektrokoagülasyon verimi ve deney sonu pH değerleri.

pH	Koagüle etme verimi (%)	2 dk sonunda pH	Deney sonu pH	Numune Alınırken pH
5,78	84	7,25	6,67	7,34
6,5	89	7,02	8,41	9,50
7,88	92	9,57	9,85	10,28
9,92	93	10,76	10,64	10,76
10,65	93	8,61	10,93	10,99

Başlangıç pH'ı pH 5,78'de gerçekleştirilen deneylerde pH değeri artışa geçmiş ancak deney sonunda bir miktar düşmüştür. Bu pH değerinde oluşan deneylerde önce mekanizma 1 çalışarak hidroksitleri oluşturduğu ancak artan hidroksit iyon konsantrasyonu ile mekanizma 2'de devreye girerek ortamın pH değerini düşürdüğü düşünülmektedir. Elektrokoagülasyonun son bulması ile Fe iyon şarjı durduğundan pH değeri hafif artarak dengelenmiştir. Bununla birlikte demir hidroksitlerin asidik ortamda pozitif yüklü olduğu bilinmektedir. Oysa asidik ortamda en düşük verim elde edilmiştir.



Başlangıç pH'sının pH 6,5, 7,88 (doğal), 9,92 ve 10,65 olduğu deneylerde demir hidroksit oluşumunun sadece 1. mekanizma ile olduğu 2. mekanizma çalışmadığı düşünülmektedir. Bu durumu pH'ın deney süresince sürekli artış göstermesinden anlaşılabilir. Bununla birlikte pH 6.5-8.0 aralığında karışık yüklü olan demir hidroksitler elektrokoagülasyon veriminde artış gösterdiği düşünülmektedir. Önceki deneylerde de sürekli negatif zeta potansiyeli gösteren numunelerin alüminyum elektrot kullanıldığında da ters tepki vererek negatif yükte yüksek verim ortaya çıkardığı tespit edilmişti.

Gerçekleştirilen deneylerde türbitide grafiği Şekil 4.41'de verilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi doğal pH ile elde edilen değerler ile daha yüksek pH'larda elde edilen değerler arasında çok büyük bir fark olmadığından diğer deneylere **pH 7,88 (doğal pH)** şartlarında devam edilmesine karar verilmiştir.

#### **4.2.3.4. Optimum Ön Kondisyon Karıştırma Hızı**

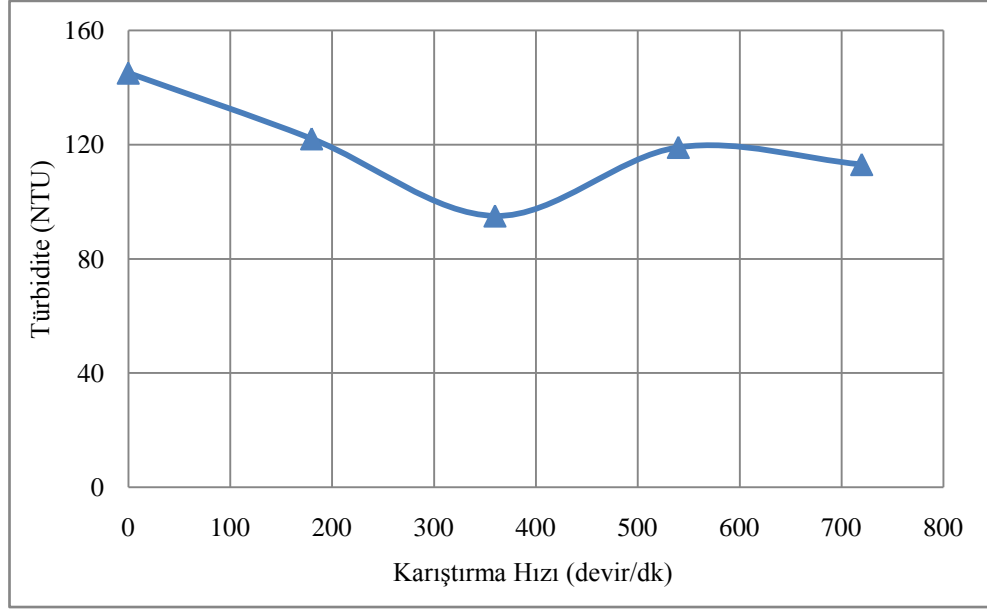
Elektrokoagülasyon işleminde, şarj edilen iyon ve moleküllerin tanelerle etkileşim hızını arttırmak için karıştırma işlemi uygulanmaktadır ve bu işlemin gerek süresi ve gerekse hızı flokların oluşması ve çökme süresince yapılarının sağlam kalması açısından oldukça önemlidir. Bu amaçla ön karıştırma hızının optimizasyonu hedeflenerek deneyler yapılmıştır.

Deneyler 1000 ml'lik reaktör içerisinde toplamda 373 cm<sup>2</sup> yüzey alanına sahip birbirine paralel yerleştirilen demir elektrotlar ile sabit 3 Amper-80,4 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğu altında gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında oluşan pH ve sıcaklık profilinin çizilmesi için deney süresince pH ve sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ön kondisyon karıştırma hızı 0, 180, 360, 540 ve 720 devir/dk, ön kondisyon süresi 120 sn, toplam elektrokoagülasyon süresi 300 sn olacak şekilde seçilerek elektrokoagülasyon yapılmıştır. Elektrokoagülasyon işleminin ardından 60 sn çökme beklenecek şekilde yüzeyden 2 cm derinlikten pipetle numune alımı yapılarak türbidimetrede bulanıklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Deneylerde başlangıç pH değeri pH 7,8 (doğal pH) olacak şekilde seçilmiştir. Bununla beraber deney süresince elde edilen verilerden enerji tüketim miktar ve maliyetleri ile koagülasyon performansları hesaplanmıştır. Deneylerden elde

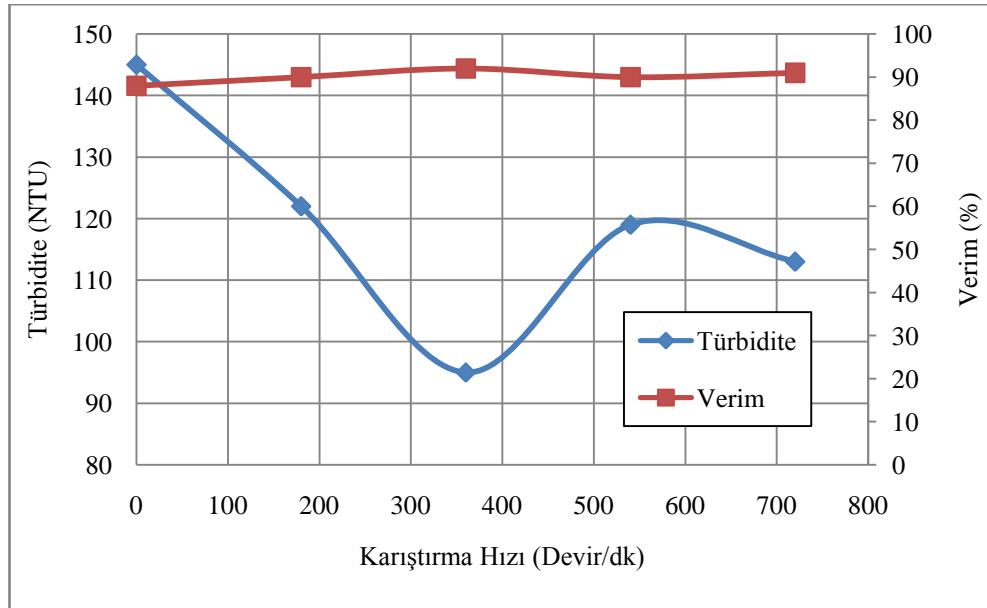
edilen veriler Tablo 4.27’de, deney sonuçlarına ilişkin çökme grafiği Şekil 4.44’de ve çökme-verim grafiği Şekil 4.45’te verilmiştir.

**Tablo 4.27:** Demir elektrot kullanılarak gerçekleştirilen optimum ön kondisyon karıştırma hızı deney sonuçları.

<b>DENEY ŞARTLARI</b>					
Başlangıç pH	7,86	7,89	7,88	7,82	7,86
<b>Akım (A)</b>	3	3	3	3	3
Akım Yoğunluğu, (A/m <sup>2</sup> )	80,4	80,4	80,4	80,4	80,4
Karıştırma Hızı (devir/dk)	<b>0</b>	<b>180</b>	<b>360</b>	<b>540</b>	<b>720</b>
Voltaj, (V)	18,9	19,7	21,8	18,3	18,2
PKO (%)	3	3	3	3	3
Ön Kondisyon Süresi(sn)	120	120	120	120	120
Çökeltme Modunda Elektrokoagülasyon Süresi (sn)	180	180	180	180	180
Toplam Deney Süresi (sn)	300	300	300	300	300
İlk Sıcaklık (C <sup>0</sup> )	17,3	17,8	18,2	17,4	17,4
<b>DENEYLERDEN ELDE EDİLEN VERİLER</b>					
<b>Deney sonunda türbitidite (NTU)</b>	<b>145</b>	<b>122</b>	<b>95</b>	<b>119</b>	<b>113</b>
2 dk sonunda pH	9,2	9,17	9,57	9,10	8,45
Elektrokoagülasyon sonunda pH	9,91	10,61	9,85	8,93	9,66
Numune Alımı Sırasında pH	10,91	10,83	10,28	10,16	10,14
Son Sıcaklık	19,9	19,6	19,5	21,3	20,7
Sıcaklık Farkı (C <sup>0</sup> )	1,5	1,8	1,3	3,9	3,3
Elektrik birim Maliyeti (KWh/TL)	0,19284	0,1928	0,1928	0,1928	0,1928
Enerji Tüketimi, (Wh)	4,725	4,925	5,450	4,575	4,550
Enerji Maliyeti, (TL)	0,00091 TL	0,00095 TL	0,00105 TL	0,00088 TL	0,00088 TL
Ton Başına Enerji Maliyeti (TL/Ton)	0,91 TL	0,95 TL	1,05 TL	0,88 TL	0,88 TL
Akım Verimi (%)	311%	311%	311%	311%	311%
Teorik Çözünen Demir (gr/lit)	0,1741	0,1741	0,1741	0,1741	0,1741
1 m <sup>3</sup> Atık Su İçin Harcanan Fe, (gr)	174,09	174,09	174,09	174,09	174,09
Faraday , (F/m <sup>3</sup> )	9,33	9,33	9,33	9,33	9,33
<b>Koagüle Etme Verimi, (%)</b>	<b>88%</b>	<b>90%</b>	<b>92%</b>	<b>90%</b>	<b>91%</b>
Elektrot Maliyeti, (TL/m <sup>3</sup> )	0,27 TL	0,27 TL	0,27 TL	0,27 TL	0,27 TL
<b>Toplam Maliyet, (TL/m<sup>3</sup>)</b>	<b>1,19 TL</b>	<b>1,22 TL</b>	<b>1,33 TL</b>	<b>1,16 TL</b>	<b>1,15 TL</b>



**Şekil 4.44:** Demir elektrot kullanılarak gerçekleştirilen optimum ön kondisyon karıştırma hızı deneyi çökme grafiği.



**Şekil 4.45:** Demir elektrot kullanılarak gerçekleştirilen optimum ön kondisyon karıştırma hızı çökme-verim grafiği.

Gerçekleştirilen elektrokoagülasyon deneyleri sonucunda Şekil 4.46’da görüldüğü gibi türbitide karıştırma hızı arttıkça etkileşimin artışına bağlı olarak azalmakta, 360 devir/dk hıza ulaştığında en verimli noktaya gelmekte ve ardından hızın artmasıyla tekrardan türbitide değeri artışa geçmektedir. Bu veriler açıkça göstermektedir ki 360 devir/dk altı hızlarda yeterli flok oluşumu olmamakta, bununla beraber yüksek hızlarda

oluşan floklar dağılıma uğramaktadır. Ayrıca alüminyum elektrotlar ile gerçekleştirilen deneylerde hatırlanacağı üzere türbitide önce düşmüş ve sabit bir seviyede kalmıştı. Başka bir deyişle flok yapısında bozulma olmamıştı. Oysa demir elektrot kullanılan deneylerde görülmüştür ki oluşan flokların yapıları zayıf bağlar oluşturmakta ve kolayca dağılmaktadır. Başka bir deyişle demir hidroksitlerin meydana getirdiği floklar alüminyum hidroksitin meydana getirdiği floklardan daha zayıf yapıdadır. Elde edilen verilere göre optimum ön kondisyon karıştırma hızı **360 devir/dk** olduğuna karar verilmiştir.

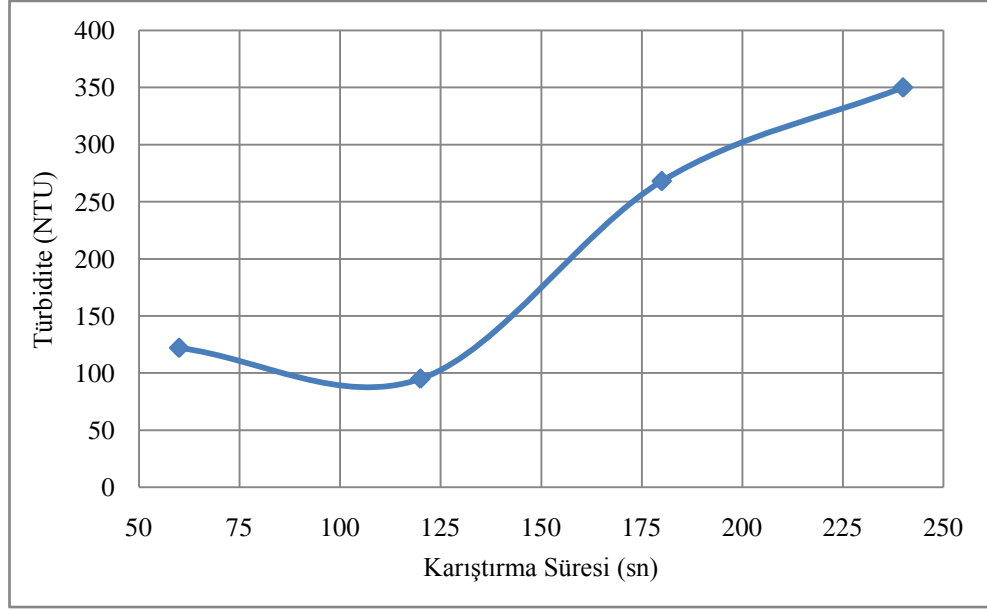
#### **4.2.3.5. Optimum Ön Kondisyon Karıştırma Süresi**

Optimizasyon deneylerinin son aşamasında, ön kondisyon karıştırma süresinin etkisi incelenmiştir. Bu sürenin koagülasyon mekanizmasındaki yeri alüminyum elektrot ile gerçekleştirilen deneyler kısmında verilmiştir.

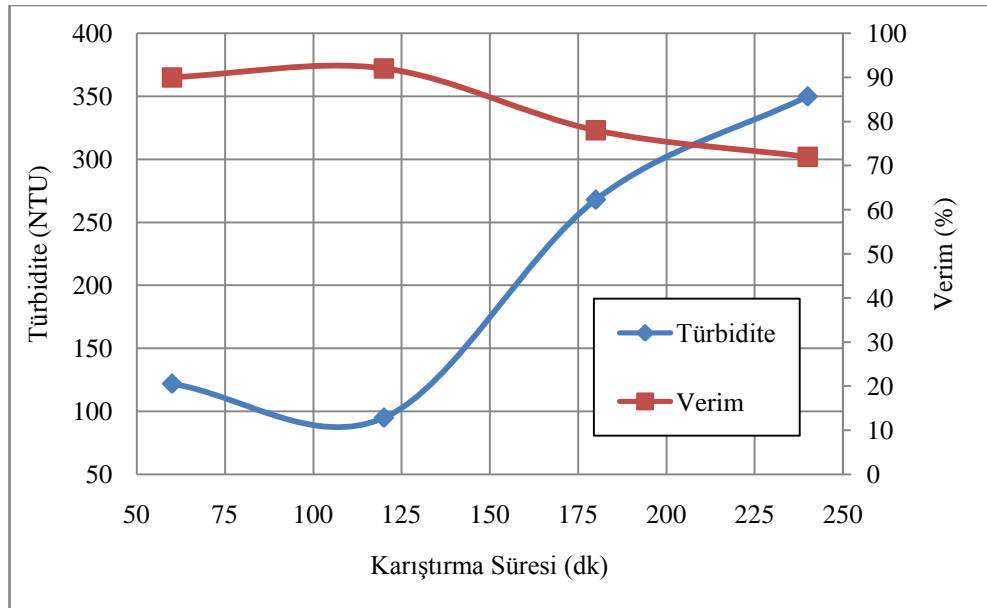
Deneyler 1000 ml'lik reaktör içerisinde toplamda 373 cm<sup>2</sup> yüzey alanına sahip birbirine paralel yerleştirilen demir elektrotlar ile sabit 3 Amper-80,4 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğu altında gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında oluşan pH ve sıcaklık profilinin çizilmesi için deney süresince pH ve sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ön kondisyon karıştırma hızı 360 devir/dk, ön kondisyon süresi 60, 120, 180 ve 240 sn olacak şekilde, seçilerek elektrokoagülasyon işlemi yapılmıştır. Elektrokoagülasyon işleminin ardından 60 sn çökme beklenecek yüzeyden 2 cm derinlikten pipetle numune alımı yapılarak türbidimetrede bulanıklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Deneylerde başlangıç pH değeri pH 8 (doğal pH) olacak şekilde seçilmiştir. Bununla beraber deney süresince elde edilen verilerden enerji tüketim miktar ve maliyetleri ile koagülasyon performansları hesaplanmıştır. Deneylerden elde edilen veriler Tablo 4.28'de, deney sonuçlarına ilişkin çökme grafiği Şekil 4.46'da ve çökme-verim grafiği Şekil 4.47'de verilmiştir.

**Tablo 4.28:** Demir elektrot kullanılarak gerçekleştirilen optimum karıştırma süresi deney sonuçları.

<b>DENEY ŞARTLARI</b>				
Başlangıç pH	7,95	7,88	7,8	7,82
<b>Akım (A)</b>	3	3	3	3
Akım Yoğunluğu, (A/m <sup>2</sup> )	80,4	80,4	80,4	80,4
Karıştırma Hızı (devir/dk)	360	360	360	360
Voltaj, (V)	20,5	21,8	19,8	20,1
PKO (%)	3	3	3	3
Ön Kondisyon Süresi(sn)	<b>60</b>	<b>120</b>	<b>180</b>	<b>240</b>
Çökeltme Modunda Elektrokoagülasyon Süresi (sn)	240	180	120	60
Toplam Deney Süresi (sn)	300	300	300	300
İlk Sıcaklık (C <sup>0</sup> )	16,9	18,2	16,2	16,6
<b>DENEYLERDEN ELDE EDİLEN VERİLER</b>				
<b>Deney sonunda türbidite (NTU)</b>	<b>122</b>	<b>95</b>	<b>268</b>	<b>350</b>
2 dk sonunda pH	8,88	9,57	8,48	8,65
Elektrokoagülasyon sonunda pH	9,65	9,85	8,05	8,90
Numune Alımı Sırasında pH	10,19	10,28	7,89	9,02
Son Sıcaklık	20,8	19,5	21,4	20,9
Sıcaklık Farkı (C <sup>0</sup> )	3,9	1,3	5,2	4,3
Elektrik birim Maliyeti (KWh/TL)	0,1928	0,1928	0,1928	0,1928
Enerji Tüketimi, (Wh)	5,125	5,450	4,950	5,025
Enerji Maliyeti, (TL)	0,00099 TL	0,00105 TL	0,00095 TL	0,00097 TL
Ton Başına Enerji Maliyeti (TL/Ton)	0,99 TL	1,05 TL	0,95 TL	0,97 TL
Akım Verimi (%)	311%	311%	311%	311%
Teorik Çözünen Demir (gr/lt)	0,1741	0,1741	0,1741	0,1741
1 m <sup>3</sup> Atık Su İçin Harcanan Fe, (gr)	174,09	174,09	174,09	174,09
Faraday , (F/m <sup>3</sup> )	9,33	9,33	9,33	9,33
<b>Koagüle Etme Verimi, (%)</b>	<b>90%</b>	<b>92%</b>	<b>78%</b>	<b>72%</b>
Elektrot Maliyeti, (TL/m <sup>3</sup> )	0,27 TL	0,27 TL	0,27 TL	0,27 TL
<b>Toplam Maliyet, (TL/m<sup>3</sup>)</b>	<b>1,26 TL</b>	<b>1,33 TL</b>	<b>1,23 TL</b>	<b>1,24 TL</b>



**Şekil 4.46:** Demir elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik karıştırma sürelerinde çökme grafiği.



**Şekil 4.47:** Demir elektrot kullanılarak gerçekleştirilen değişik karıştırma sürelerinde çökme-verim grafiği.

Gerçekleştirilen elektrokoagülasyon deneyleri sonucunda Şekil 4.48’de görüldüğü gibi türbidite ön kondisyon süresi arttıkça önce koagülant-tane etkileşimin artışına bağlı olarak azalmakta, 120 sn’lik süreye ulaştığında en verimli noktaya gelmekte ve ardından sürenin uzamasıyla tekrardan türbidite değeri artışa geçmektedir. Bu veriler açıkça göstermektedir ki 120 sn altı ön kondisyon süresi yeterli flok oluşumu olmamakta, bununla beraber bu değerden uzun sürelerde oluşan floklar dağılıma uğramaktadır.

Ayrıca alüminyum elektrotlar ile gerçekleştirilen deneylerde hatırlanacağı üzere süre artışına bağlı olarak türbitide önce düşmüş ve sabit bir seviyede kalmıştı. Başka bir deyişle flok yapısında bozulma olmamıştı. Oysa demir elektrot kullanılan deneylerde görülmüştür ki oluşan flokların yapıları süre arttıkça kolayca dağılmaktadır. Başka bir deyişle demir hidroksitlerin meydana getirdiği floklar alüminyum hidroksitinin meydana getirdiği floklardan daha zayıf yapıdadır. Elde edilen veriler göre optimum ön kondisyon karıştırma süresinin **120 sn** olduğuna karar verilmiştir.

#### 4.2.4. Demir Elektrot Kullanımında Optimum Şartlar

Kömür hazırlama tesis artığı numunesi üzerinde gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen verilere göre Demir elektrot kullanım şartları Tablo 4.29'da verilmiştir.

**Tablo 4.29:** Demir elektrot kullanımında optimum şartlar.

<b>Başlangıç pH</b>	7,88
<b>Akım (A)</b>	<b>3</b>
<b>Akım Yoğunluğu, (A/m<sup>2</sup>)</b>	80,4
<b>Karıştırma Hızı (devir/dk)</b>	360
<b>PKO (%)</b>	3
<b>Ön Kondisyon Süresi(sn)</b>	120
<b>Çökelme Modunda Elektrokoagülasyon Süresi (sn)</b>	180
<b>Toplam Deney Süresi (sn)</b>	300
<b>Enerji Tüketimi, (Wh)</b>	5,450
<b>Enerji Maliyeti, (TL)</b>	0,00105 TL
<b>Ton Başına Enerji Maliyeti (TL/Ton)</b>	1,05 TL
<b>Akım Verimi (%)</b>	311%
<b>Teorik Çözünen Demir (gr/lit)</b>	0,1741
<b>1 m<sup>3</sup> Atık Su İçin Harcanan Fe, (gr)</b>	174,09
<b>Faraday , (F/m<sup>3</sup>)</b>	9,33
<b>Koagüle Etme Verimi, (%)</b>	<b>92%</b>
<b>Elektrot Maliyeti, (TL/m<sup>3</sup>)</b>	0,27 TL
<b>Toplam Maliyet, (TL/m<sup>3</sup>)</b>	<b>1,33 TL</b>

#### 4.2.5. Alüminyum ve Demir Elektrotlar ile Elde Edilen Verilerin Karşılaştırılması

Alüminyum ve demir elektrotlar ile gerçekleştirilen bir dizi deney sonucunda her iki elektrot tipinde optimum şartlar ortaya konmuştur. Elde edilen optimum şartlar Tablo 4.30'da verilmiştir.

**Tablo 4.30:** Alüminyum ve Demir elektrotlar kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde elde edilen en optimum şartlar.

<b>DENEY ŞARTLARI</b>		
<b>Elektrot Tipi</b>	<b>Alüminyum</b>	<b>Demir</b>
Başlangıç pH	8,07 (Doğal)	7,88 (Doğal)
<b>Akım (A)</b>	<b>1,5</b>	<b>3</b>
<b>Akım Yoğunluğu, (A/m<sup>2</sup>)</b>	<b>40</b>	<b>80,4</b>
Karıştırma Hızı (devir/dk)	360	360
Voltaj, (V)	9	21,8
PKO (%)	3	3
Ön Kondisyon Süresi(sn)	120	120
Çökeltme Modunda Elektrokoagülasyon Süresi (sn)	300	180
Toplam Deney Süresi (sn)	420	300
İlk Sıcaklık (C <sup>0</sup> )	23,6	18,2
<b>DENEYLERDEN ELDE EDİLEN VERİLER</b>		
<b>Deney sonunda türbidite (NTU)</b>	<b>63</b>	<b>95</b>
2 dk sonunda pH	8,10	9,57
Elektrokoagülasyon sonunda pH	7,81	9,85
Numune Alımı Sırasında pH	7,68	10,28
Son Sıcaklık	25,2	19,5
Sıcaklık Farkı (C <sup>0</sup> )	1,6	1,3
Elektrik birim Maliyeti (KWh/TL)	0,1928	0,19284
Enerji Tüketimi, (Wh)	1,575	5,450
Enerji Maliyeti, (TL)	0,00030 TL	0,00105 TL
Ton Başına Enerji Maliyeti (TL/Ton)	0,30 TL	1,05 TL
Akım Verimi (%)	218%	311%
Teorik Çözünen Metal (gr/lt)	0,0588	0,1741
1 m <sup>3</sup> Atık su için Harcanan Metal, (gr)	58,76	174,09
Faraday , (F/m <sup>3</sup> )	6,53	9,33
<b>Koagüle Etme Verimi, (%)</b>	<b>95%</b>	<b>92%</b>
Elektrot Maliyeti, (TL/m <sup>3</sup> )	0,21 TL	0,27 TL
<b>Toplam Maliyet, (TL/m<sup>3</sup>)</b>	<b>0,51 TL</b>	<b>1,33 TL</b>



#### 4.2.6. Amper Artışına Karşın Verim Analizi

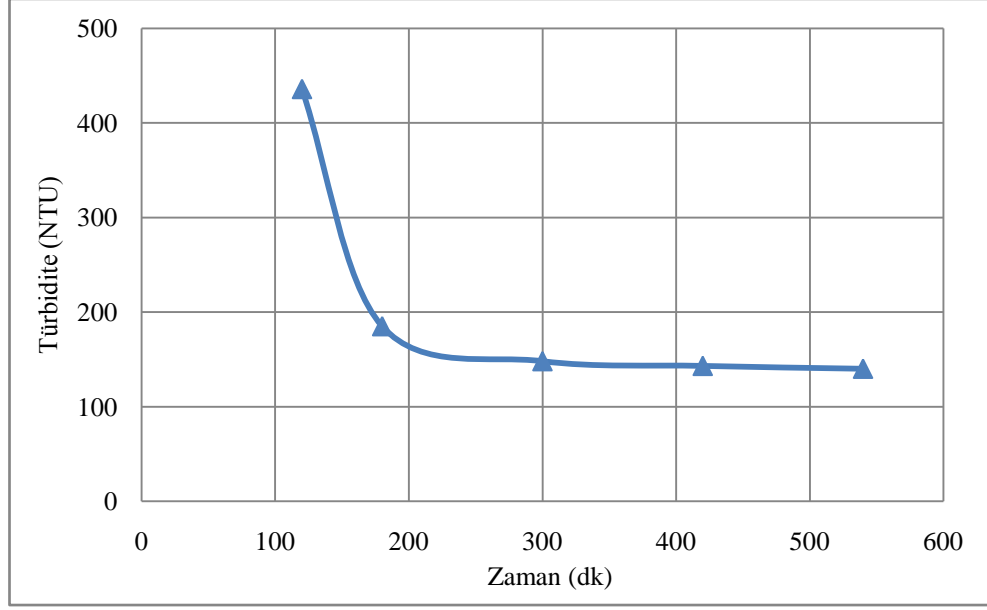
##### 4.2.6.1. *Optimum Elektrokoagülasyon Süresinin Bulunması*

Alüminyum ve demir elektrotlar ile optimum elektrokoagülasyon şartlarının elde edilmesinden sonra demir elektrotlar ile bir dizi deney daha gerçekleştirilerek, daha önce belirlenen optimum değer olan 3 amper- 80,4 Amper/m<sup>2</sup> akım yoğunluğunun 4 Amper olarak alınması halinde elektrokoagülasyon verimine etkisinin olup olmadığı araştırılmaya çalışılmıştır. Başka bir ifade ile akım yoğunluğunda optimum seviyeye göre bir artış yaşanırsa, zamandan bir kazancın söz konusu olup olmadığı incelenmiştir.

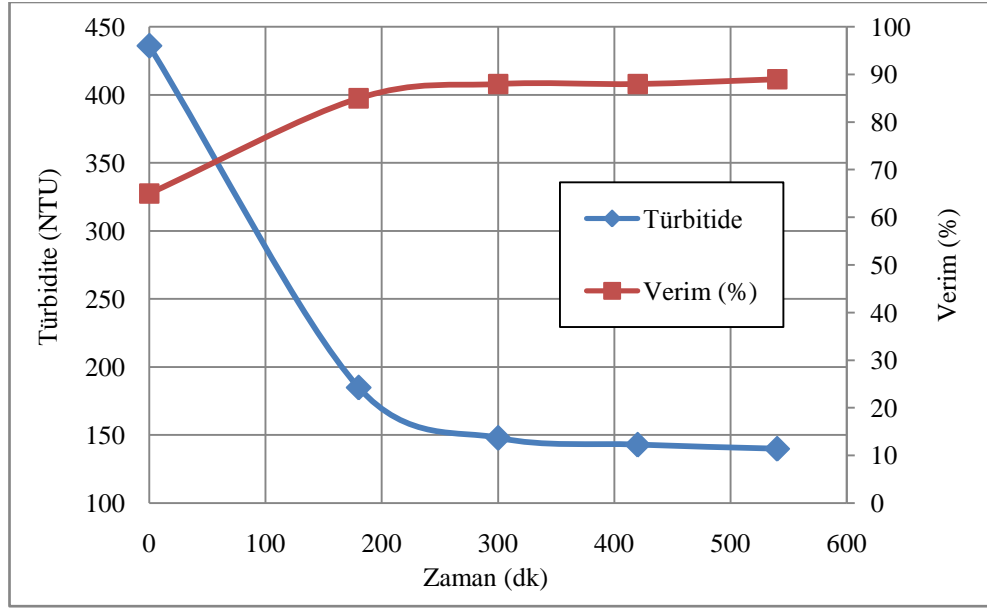
Deneyler, 1000 ml'lik reaktör içerisinde toplamda 373 cm<sup>2</sup> yüzey alanına sahip birbirine paralel yerleştirilen demir elektrotlar ile sabit 4 Amper-107,2 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğu altında gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında oluşan pH ve sıcaklık profilinin çizilmesi için deney süresince pH ve sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ön kondisyon karıştırma hızı 360 devir/dk, ön kondisyon süresi 120 sn, çökeltme modunda elektrokoagülasyon süresi ise 0, 60, 180, 300 ve 420 sn olacak şekilde seçilerek elektrokoagülasyon deneyleri yapılmıştır. Elektrokoagülasyon işleminin ardından 60 sn çökeltme beklenerek yüzeyden 2 cm derinlikten pipetle numune alımı yapılarak türbidimetrede bulanıklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Bununla beraber deney süresince elde edilen verilerden enerji tüketim miktar ve maliyetleri ile koagülasyon performansları hesaplanmıştır. Deneylerden elde edilen veriler Tablo 4.31'de, deney sonuçlarına ilişkin çökme grafiği Şekil 4.48'te ve çökme-verim grafiği Şekil 4.49'da verilmiştir. Ayrıca Şekil 4.50'de 3 Amper-80,4 Amper/m<sup>2</sup> akım yoğunluğunda elde edilen türbitide verileri ile karşılaştırma grafiği ve Şekil 4.51'de elektrokoagülasyon maliyetlerinin karşılaştırıldığı grafik verilmiştir.

**Tablo 4.31:** 4 amper-107,2 A/m<sup>2</sup> altında optimum elektrokoagülasyon süresinin bulunması deney sonuçları.

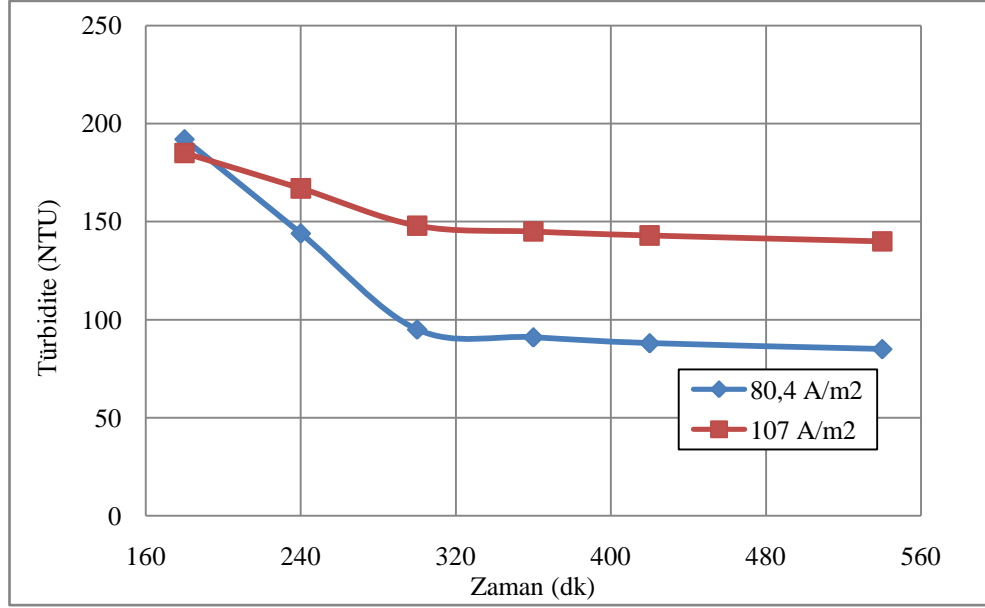
<b>DENEY ŞARTLARI</b>					
Başlangıç pH	8,32	8,44	8,31	8,29	8,36
<b>Akım (A)</b>	4	4	4	4	4
Akım Yoğunluğu, (A/m <sup>2</sup> )	107,2	107,2	107,2	107,2	107,2
Karıştırma Hızı (devir/dk)	360	360	360	360	360
Voltaj, (V)	26,3	30,5	31	29,7	29,5
PKO (%)	3	3	3	3	3
Ön Kondisyon Süresi(sn)	120	120	120	120	120
Çökeltme Modunda Elektrokoagülasyon Süresi (sn)	<b>0</b>	<b>60</b>	<b>180</b>	<b>300</b>	<b>420</b>
Toplam Deney Süresi (sn)	120	180	300	420	540
İlk Sıcaklık (C <sup>0</sup> )	17,8	16,3	16,4	16,5	16,6
<b>DENEYLERDEN ELDE EDİLEN VERİLER</b>					
<b>Deney sonunda türbitidite (NTU)</b>	436	185	148	143	140
2 dk sonunda pH	8,4	8,50	7,56	10,55	8,80
Elektrokoagülasyon sonunda pH	8,2	8,66	9,79	9,61	9,80
Numune Alımı Sırasında pH	8,36	9,31	10,02	9,58	10,10
Son Sıcaklık	20,2	22,3	26,8	29,2	32,5
Sıcaklık Farkı (C <sup>0</sup> )	2,4	6	10,4	12,7	15,9
Elektrik birim Maliyeti (KWh/TL)	0,1928	0,1928	0,1928	0,1928	0,1928
Enerji Tüketimi, (Wh)	3,507	6,100	10,333	13,860	17,700
Enerji Maliyeti, (TL)	0,00068 TL	0,00118 TL	0,00199 TL	0,00267 TL	0,00341 TL
Ton Başına Enerji Maliyeti (TL/Ton)	0,68 TL	1,18 TL	1,99 TL	2,67 TL	3,41 TL
Akım Verimi (%)	166%	249%	415%	580%	746%
Teorik Çözünen Demir (gr/lt)	0,0928	0,1393	0,2321	0,3250	0,4178
1 m <sup>3</sup> atıksu için harcanan Fe, (gr)	92,85	139,27	232,12	324,97	417,82
Faraday , (F/m <sup>3</sup> )	4,97	7,46	12,44	17,41	22,38
<b>Koagüle Etme Verimi, (%)</b>	<b>65%</b>	<b>85%</b>	<b>88%</b>	<b>88%</b>	<b>89%</b>
Elektrot Maliyeti, (TL/m <sup>3</sup> )	0,15 TL	0,22 TL	0,37 TL	0,51 TL	0,66 TL
<b>Toplam Maliyet, (TL/m<sup>3</sup>)</b>	<b>0,82 TL</b>	<b>1,40 TL</b>	<b>2,36 TL</b>	<b>3,18 TL</b>	<b>4,07 TL</b>



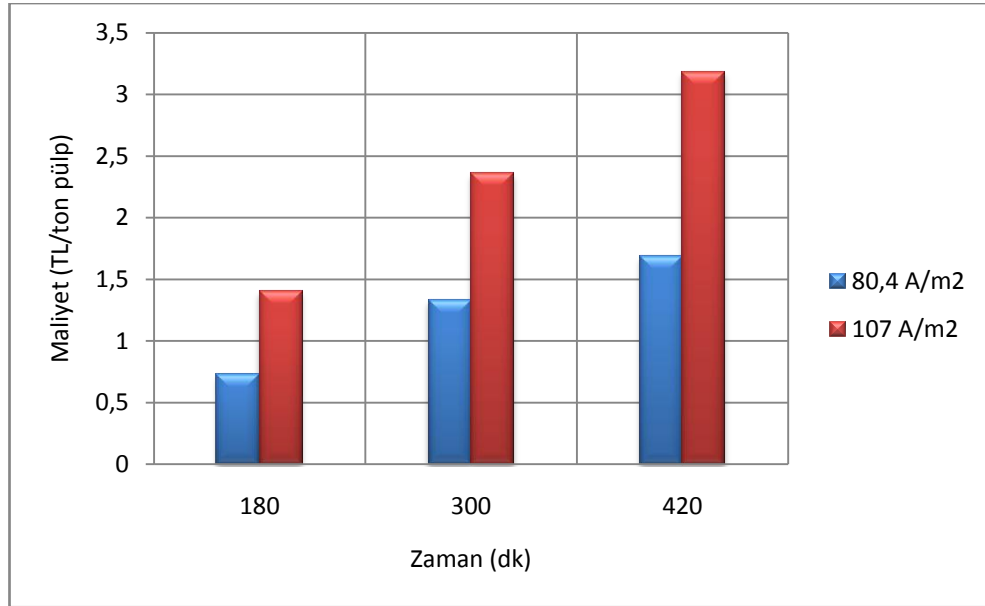
Şekil 4.48: 4 amper-107,2 A/m<sup>2</sup> altında gerçekleştirilen değişik elektrokoagülasyon sürelerinde çökme grafiği.



Şekil 4.49: 4 amper-107,2 A/m<sup>2</sup> altında gerçekleştirilen değişik elektrokoagülasyon sürelerinde çökme-verim grafiği.



**Şekil 4.50:** 3 Amper-Amper/m<sup>2</sup> ile 4 amper-107,2 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluklarında değişik elektrokoagülasyon sürelerinde elde edilen türbitide değerleri.



**Şekil 4.51:** 3 Amper-Amper/m<sup>2</sup> ile 4 amper-107,2 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluklarında elektrokoagülasyon maliyetleri karşılaştırması.

Gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen verilere göre daha önce 3 Amper-80,4 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğunda seçilen optimum akım yoğunluğu değeri, 4 Amper-107,2 Amper/m<sup>2</sup> akım yoğunluğuna çıkartılsa da elektrokoagülasyon süresinde bir değişiklik olmamakta yine 120 sn ön kondüsyon toplam **300 sn** elektrokoagülasyon olarak karşımıza çıkmaktadır. Buna karşın koagüle etme verimi %92'den %88'e düşmekte ve

ton başına maliyette 1,18 TL/tondan 2,17 TL/tona çıkararak **%83,89**'lik işletme maliyetini arttırmaktadır. Teorik olarak akım yoğunluğunun artışı daha fazla demir iyonunun ortama şarj edilmesi, bununla birlikte daha hızlı flok oluşumu olarak sonuçlanması gerekirken, deney sonuçları türbitide değerlerinin daha arttığını göstermiştir. Bunun sebebi çok fazla demir iyonunun ortama şarj edilmesi ile çok fazla demir hidroksit iyonu oluşmakta, fazla miktarda oluşan demir hidroksitler çökelirken de küçük boyutlu floklar oluşturmakta ve buda çökme performansını olumsuz yönde etkilediği şeklinde düşünülmektedir. Kısaca akım yoğunluğunun artışı elektrokoagülasyon verimini arttırmadığı gibi maliyeti %83,89 oranında arttırmıştır.

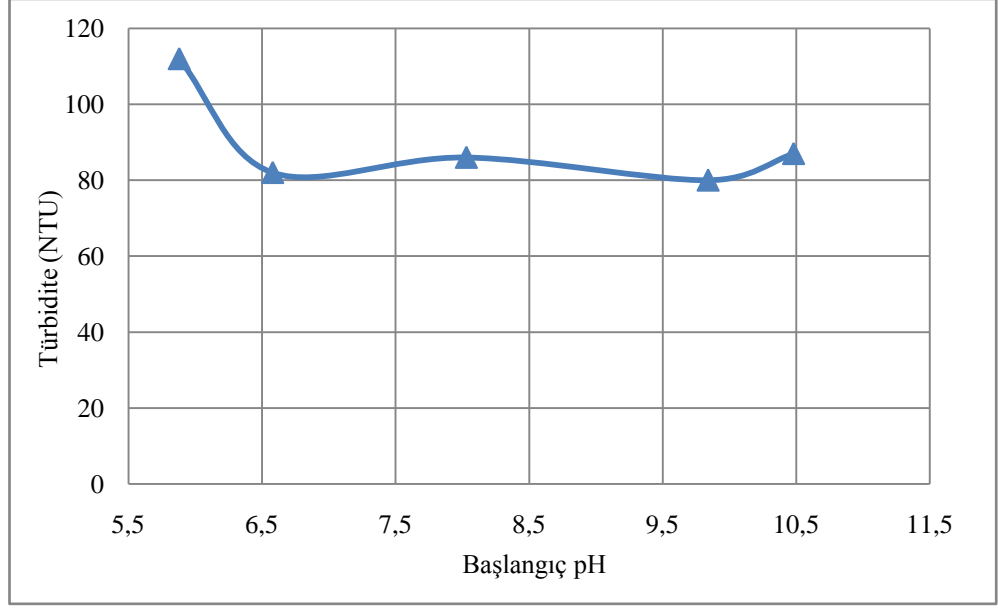
#### **4.2.6.2. Optimum pH'ın Bulunması**

Önceki başlıklarda irdelenen akım yoğunluğu ve zaman parametrelerinin optimizasyonunun gerçekleştirilmesinden sonra, elektrokoagülasyonun gerçekleştiği ortamın başlangıç pH'sının, verime etkisi araştırılmıştır.

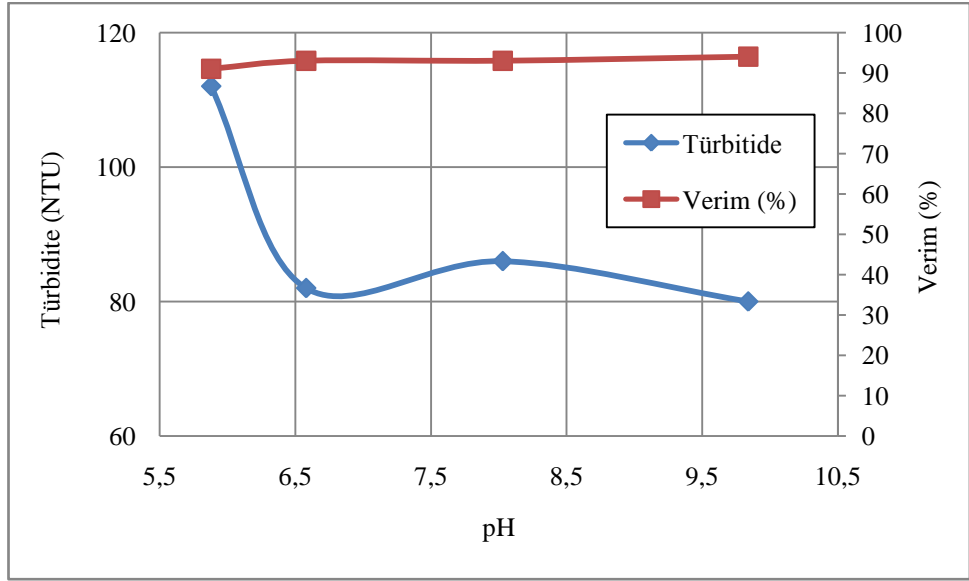
Deneyler 1000 ml'lik reaktör içerisinde toplamda 373 cm<sup>2</sup> yüzey alanına sahip birbirine paralel yerleştirilen demir elektrotlar ile sabit 4 Amper-107,2 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğu altında gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında oluşan pH ve sıcaklık profilinin çizilmesi için deney süresince pH ve sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ön kondisyon karıştırma hızı 360 devir/dk, ön kondisyon süresi 120 sn, çökme modunda elektrokoagülasyon süresi ise 180 sn olacak şekilde seçilerek elektrokoagülasyon yapılmıştır. Elektrokoagülasyon işleminin ardından 60 sn çökme beklenerek yüzeyden 2 cm derinlikten pipetle numune alımı yapılarak türbidimetrede bulanıklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Deneylerde başlangıç pH değeri baz alınarak pH 5,88, 6,58, 8,03 (doğal pH) , 9,84 ve 10,48 olacak şekilde değişik başlangıç pH değerleri seçilmiştir. Bununla beraber deney süresince elde edilen verilerden enerji tüketim miktar ve maliyetleri ile koagülasyon performansları hesaplanmıştır. Deneylerden elde edilen veriler Tablo 4.32'de, deney sonuçlarına ilişkin çökme grafiği Şekil 4.52'de ve çökme-verim grafiği Şekil 4.53'te, 3 Amper-Amper/m<sup>2</sup> akım yoğunluğu ile elde edilen türbitide değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4.54'te verilmiştir.

**Tablo 4.32:** 4 amper-107,2 A/m<sup>2</sup> altında gerçekleştirilen değişik başlangıç pH değerlerinde gerçekleştirilen deney sonuçları.

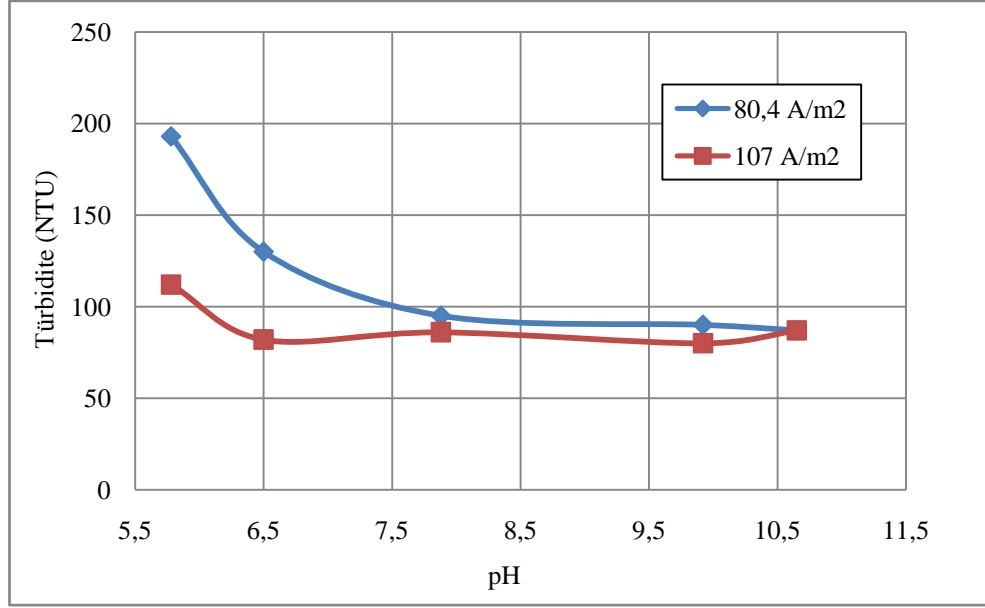
<b>DENEY ŞARTLARI</b>					
Başlangıç pH	<b>5,88</b>	<b>6,58</b>	<b>8,03 (Doğal)</b>	<b>9,84</b>	<b>10,48</b>
<b>Akım (A)</b>	4	4	4	4	<b>4</b>
Akım Yoğunluğu, (A/m <sup>2</sup> )	107,2	107,2	107,2	107,2	107,2
Karıştırma Hızı (devir/dk)	360	360	360	360	360
Voltaj, (V)	15,5	18,6	23,5	25,7	23,9
PKO (%)	3	3	3	3	3
Ön Kondisyon Süresi(sn)	120	120	120	120	120
Çökeltme Modunda Elektrokoagülasyon Süresi (sn)	180	180	180	180	180
Toplam Deney Süresi (sn)	300	300	300	300	300
İlk Sıcaklık (C <sup>0</sup> )	21,5	22,4	20,8	19,2	20
<b>DENEYLERDEN ELDE EDİLEN VERİLER</b>					
<b>Deney sonunda türbidite (NTU)</b>	112	82	86	80	87
2 dk sonunda pH	4,88	7,45	8,17	5,88	7,61
Elektrokoagülasyon sonunda pH	7,59	9,90	8,35	9,94	10,73
Numune Alımı Sırasında pH	8,15	10,02	10,02	9,98	10,79
Son Sıcaklık	27	28,4	28,7	29	28,5
Sıcaklık Farkı (C <sup>0</sup> )	5,5	6	7,9	9,8	8,5
Elektrik birim Maliyeti (KWh/TL)	0,19284	0,1928	0,1928	0,1928	0,1928
Enerji Tüketimi, (Wh)	5,167	6,200	7,833	8,567	7,967
Enerji Maliyeti, (TL)	0,00100 TL	0,00120 TL	0,00151 TL	0,00165 TL	0,00154 TL
Ton Başına Enerji Maliyeti (TL/Ton)	1,00 TL	1,20 TL	1,51 TL	1,65 TL	1,54 TL
Akım Verimi (%)	415%	415%	415%	415%	415%
Teorik Çözünen Demir (gr/ltr)	0,2321	0,2321	0,2321	0,2321	0,2321
1 m <sup>3</sup> atıksu için harcanan Fe, (gr)	232,12	232,12	232,12	232,12	232,12
Faraday , (F/m <sup>3</sup> )	12,44	12,44	12,44	12,44	12,44
<b>Koagüle Etme Verimi, (%)</b>	<b>91%</b>	<b>93%</b>	<b>93%</b>	<b>94%</b>	<b>93%</b>
Elektrot Maliyeti, (TL/m <sup>3</sup> )	0,37 TL	0,37 TL	0,37 TL	0,37 TL	0,37 TL
<b>Toplam Maliyet, (TL/m<sup>3</sup>)</b>	<b>1,36 TL</b>	<b>1,56 TL</b>	<b>1,88 TL</b>	<b>2,02 TL</b>	<b>1,90 TL</b>



Şekil 4.52: 4 Amper-107,2 A/m<sup>2</sup> altında gerçekleştirilen değişik başlangıç pH değerlerinde çökme-verim grafiği.



Şekil 4.53: 4 Amper-107,2 A/m<sup>2</sup> altında gerçekleştirilen değişik başlangıç pH değerlerinde çökme-verim grafiği.



**Şekil 4.54:** 3 Amper-Amper/m<sup>2</sup> ile 4 amper-107,2 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluklarında değişik başlangıç pH değerlerinde elde edilen türbütite değerleri.

Gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen verilere göre yüksek amper ve akım yoğunluğu altında değişik başlangıç pH değerlerinde elektrokoagülasyon veriminde herhangi bir değişiklik olmamaktadır. Şekil 4.52’de verilen değerlere bakıldığında pH 6,58 altında türbütite artmakta ancak pH 6,58-10,48 aralığında kayda değer bir değişim olmamaktadır. Bununla beraber optimum değer pH 8,03 (doğal pH) olarak alınırsa, 3 Amper-80,4 Amper/m<sup>2</sup> akım yoğunluğu optimum verilerine göre koagüle etme verimi %92’den %93’e çıkmakta ve ton başına maliyette 1,18 TL/tondan 1,88 TL/tona çıkarak **%59,32**’lik işletme maliyetini arttırmaktadır. %1’lik koagüle etme veriminin okuma ve deney şartları hatası olduğu kabul edilirse amperin-akım yoğunluğunun artırılması zaman, işletme verimi ve maliyet açısından bir kar oluşturmamaktadır.

Başlangıç pH etkisi deneylerinden sonra amper artışının ekonomik şartlar ortaya koymayacağı anlaşıldığından deneylere devam edilmemiştir.



#### 4.2.7. Elektrokoagülasyonda Alüminyum Elektrotta Tuz etkisi

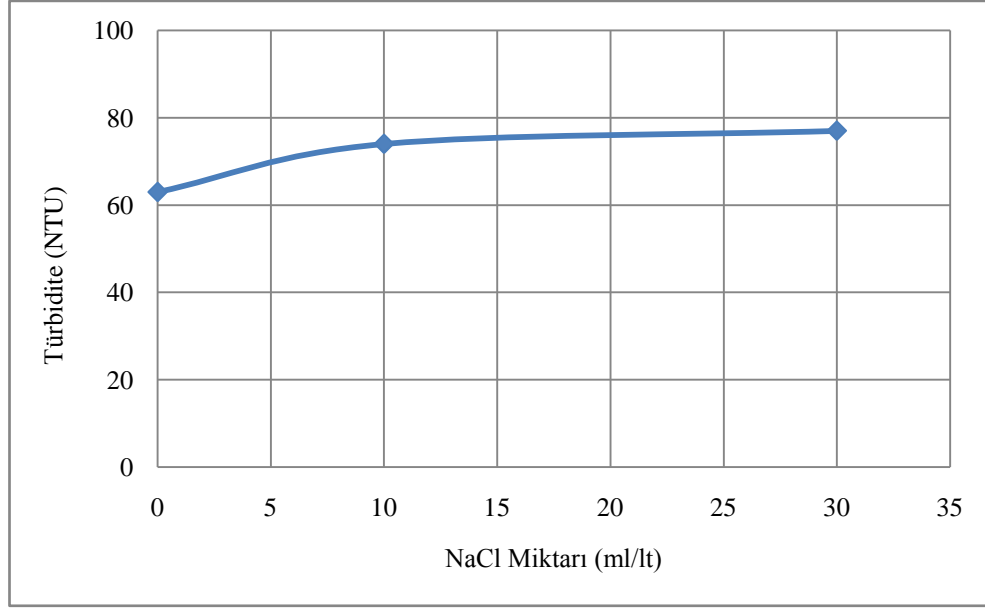
Değişik elektrotlar ile gerçekleştirilen optimizasyon deneyleri sonrası elektrokoagülasyon mekanizmasına NaCl konsantrasyonunun bir etkisinin olup olmadığı araştırılmıştır. Elektrokoagülasyon işleminde çözelti iletkenliğini arttırmak için NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> gibi elektrolitler yaygın olarak kullanılır. Bunların içinde ucuz ve kolay elde edilebilir olması nedeniyle en çok tercih edilen NaCl'dir. (Chen, 2004). Kağıt fabrikası atıklarında kullanılan elektrokoagülasyon prosesinde tuz etkisinin araştırıldığı bir çalışmada bipolar bağlı reaktöre tuz çözeltisi eklendiğinde KOİ giderim verimi %50'den %90'a çıkmıştır. (Karabacakoğlu, Tezakıl, 2012)

Elektrokoagülasyon ortamında sodyum ve klorür iyonları konsantrasyonunda artış meydana geldiğinde, iyon konsantrasyonuna bağlı olarak iletkenlik artmakta, buna voltajı düşürdüğü ve elektron iletimini arttırdığı için elektrik maliyetlerini aşağıya çekmektedir. Bununla birlikte yapılan bazı çalışmalarda sodyum ve klorür iyonunun ortama şarj edilmesi ile elektrokoagülasyon veriminin arttığı kaydedilmiştir.

Bu bilgiler ışığında optimum elektrokoagülasyon prosesi olarak seçilen alüminyum elektrotlar ile bir dizi deneyler gerçekleştirilerek tuz iyon etkisinin olup olmadığı araştırılmıştır. Deneyler 1000 ml'lik reaktör içerisinde toplamda 373 cm<sup>2</sup> yüzey alanına sahip birbirine paralel yerleştirilen alüminyum elektrotlar ile sabit 1,5 Amper-40 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğu altında gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında oluşan pH ve sıcaklık profilinin çizilmesi için deney süresince pH ve sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ön kondisyon karıştırma hızı 360 devir/dk, ön kondisyon süresi 120 sn, çökeltme modunda elektrokoagülasyon süresi ise 300 sn olacak şekilde seçilerek elektrokoagülasyon yapılmıştır. Elektrokoagülasyon işleminin ardından 60 sn çökeltme beklenerek yüzeyden 2 cm derinlikten pipetle numune alımı yapılarak türbidimetrede bulanıklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Deneylerde başlangıç pH değeri doğal pH olacak şekilde deneyler gerçekleştirilmiştir. İyon çözeltisi olarak 1 molar NaCl çözeltisi kullanılmıştır. Deneyler de 0,58 ve 1,76 kg/ton NaCl çözeltisi eklenerek koagülasyon verimi incelenmiştir. Bununla beraber deney süresince elde edilen verilerden enerji tüketim miktar ve maliyetleri ile koagülasyon performansları hesaplanmıştır. Deneylerden elde edilen veriler Tablo 4.33'de, deney sonuçlarına ilişkin çökme grafiği Şekil 4.55'de verilmiştir.

**Tablo 4.33:** Değişik NaCl iyon konsantrasyonlarında gerçekleştirilen elektrokoagülasyon deney sonuçları.

<b>DENEY ŞARTLARI</b>			
Başlangıç pH	8,07	7,98	7,93
<b>Akım (A)</b>	<b>1,5</b>	<b>1,5</b>	<b>1,5</b>
Akım Yoğunluğu, (A/m <sup>2</sup> )	40	40	40
NaCl Molar Değer	0	1	1
Eklenen NaCl Miktarı (ml)	0	10	30
Eklenen NaCl Miktarı (kg/ton)	0	0,58	1,76
Karıştırma Hızı (devir/dk)	360	360	360
Voltaj, (V)	9	3,9	2,3
PKO (%)	3	3	3
Ön Kondisyon Süresi(sn)	120	120	120
Çökeltme Modunda Elektrokoagülasyon Süresi (sn)	300	300	300
Toplam Deney Süresi (sn)	420	420	420
İlk Sıcaklık (C <sup>0</sup> )	23,6	24,8	24,4
<b>DENEYLERDEN ELDE EDİLEN VERİLER</b>			
<b>Deney sonunda türbitidite (NTU)</b>	63	74	77
2 dk sonunda pH	8,10	8,00	7,97
Elektrokoagülasyon sonunda pH	7,81	7,75	7,93
Numune Alımı Sırasında pH	7,68	7,56	7,67
Son Sıcaklık	25,2	25,6	24,9
Sıcaklık Farkı (C <sup>0</sup> )	1,6	0,8	0,5
Elektrik birim Maliyeti (KWh/TL)	0,1928	0,1928	0,1928
Enerji Tüketimi, (Wh)	1,575	0,683	0,403
Enerji Maliyeti, (TL)	0,00030 TL	0,00013 TL	0,00008 TL
Ton Başına Enerji Maliyeti (TL/Ton)	0,30 TL	0,13 TL	0,08 TL
Akım Verimi (%)	218%	218%	218%
Teorik Çözünen Alüminyum (gr/lit)	0,0588	0,0588	0,0588
1 m <sup>3</sup> atıksu için harcanan Al, (gr)	58,76	58,76	58,76
Faraday , (F/m <sup>3</sup> )	6,53	6,53	6,53
<b>Koagüle Etme Verimi, (%)</b>	<b>95%</b>	<b>94%</b>	<b>94%</b>
Elektrot Maliyeti, (TL/m <sup>3</sup> )	0,21 TL	0,21 TL	0,21 TL
<b>Toplam Maliyet, (TL/m<sup>3</sup>)</b>	<b>0,51 TL</b>	<b>0,34 TL</b>	<b>0,29 TL</b>



**Şekil 4.55:** Değişik NaCl iyon konsantrasyonlarında gerçekleştirilen elektrokoagülasyon deney türbütide grafiği.

Deney sonuçları incelendiğinde kömür hazırlama tesis artığı numunesi ile gerçekleştirilen elektrokoagülasyon mekanizmasında ortama çözelti halinde 0,58 ve 1,76 kg/ton NaCl iyonları eklendiğinde, voltaj değerleri 3'te 1 oranına düşse de türbütide değerleri bir miktar yükselerek koagüle etme verimi %1 düşmüştür. Bunun sebebi ortama eklenen  $\text{Na}^+$  iyonlarının kömür artığı yapısında bulunan killerde iyon değişimi yaparak yüzey yükü değerini daha da negatife çekmesi olarak düşünülmektedir. Daha negatif olan tanelerin ise koagüle olma performansları düşmektedir. Bu konu ile ilgili literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Koagüle etme verimindeki %1'lik kayba karşın işletme maliyeti daha önce elde edilen 17 TL/ton artıktan **9,56 TL/ton artığa** inmektedir. Başka bir deyişle işletme maliyetinde %44 ekonomi sağlanmaktadır.

#### 4.2.8. Çelik Elektrot İle Gerçekleştirilen Elektrokoagülasyon Deneyleri

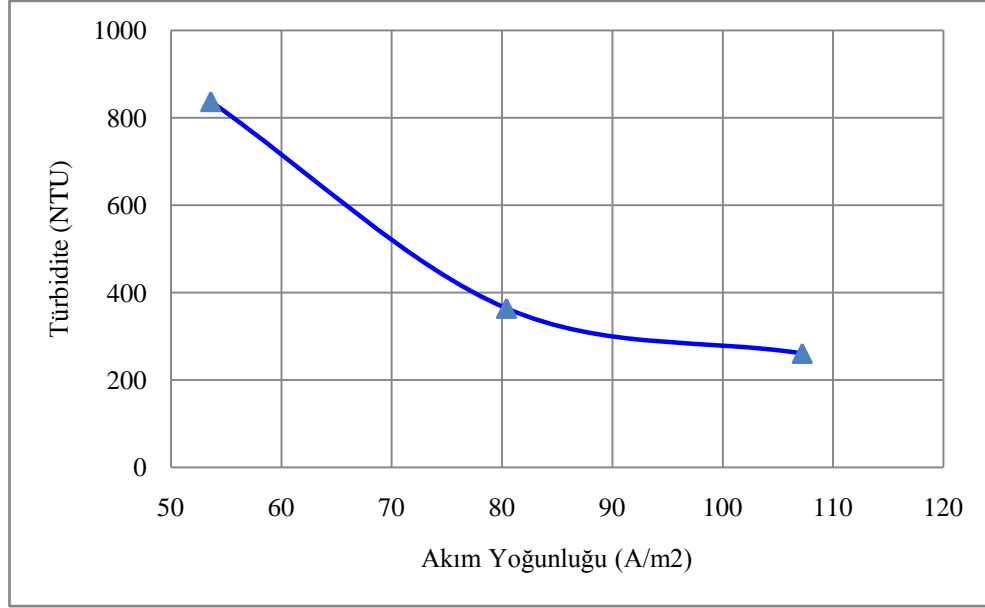
Alüminyum ve demir elektrotlar ile gerçekleştirilen optimizasyon deneyleri sonrası, elektrokoagülasyon proseslerinde zaman zaman kullanılan çelik (305 SS Paslanmaz Çelik) elektrotlar ile de çeşitli denemeler yapılarak çelik elektrot performansının demir ve alüminyum performans verileri ile karşılaştırılması yapılmıştır. Proseste çelik elektrotlar kullanıldığında diğer metaller ile aynı elektrokoagülasyon mekanizması işlemekte ancak ortama demir yada alüminyum iyonu değil bir miktar magnezyum iyonu salınmaktadır. Magnezyum iyonu da yine hidroksit bileşikleri oluşturarak

ortamdaki taneleri koagüle etmektedir. Ayrıca ortamda doğal yollardan gelen Mg ve Ca iyon konsatrasyonu fazlaysa elektrokoagülasyon verimi artmaktadır.

Deneyle 1000 ml'lik reaktör içerisinde toplamda 373 cm<sup>2</sup> yüzey alanına sahip birbirine paralel yerleştirilen çelik elektrotlar ile 2, 3 ve 4 Amper yükler altında gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında oluşan pH ve sıcaklık profilinin çizilmesi için deney süresince pH ve sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ön kondisyon karıştırma hızı 360 devir/dk, ön kondisyon süresi 120 sn, çökme modunda elektrokoagülasyon süresi ise 300, 420 ve 600 sn olacak şekilde seçilerek elektrokoagülasyon yapılmıştır. Elektrokoagülasyon işleminin ardından 60 sn çökme beklenecek şekilde yüzeyden 2 cm derinlikten pipetle numune alımı yapılarak türbidimetrede bulanıklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Deneylede başlangıç pH değeri doğal pH olacak şekilde deneyleler gerçekleştirilmiştir. Bununla beraber deney süresince elde edilen verilerden enerji tüketim miktar ve maliyetleri ile koagülasyon performansları hesaplanmıştır. Deneylelerden elde edilen veriler Tablo 4.34'de, deney sonuçlarına ilişkin çökme grafiği Şekil 4.56'da verilmiştir.

**Tablo 4.34:** Çelik elektrotlar kullanılarak değişik amper ve elektrokoagülasyon sürelerinde gerçekleştirilen deney sonuçları.

<b>DENEY ŞARTLARI</b>			
Başlangıç pH	7,61	7,78	7,74
<b>Akım (A)</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Akım Yoğunluğu, (A/m <sup>2</sup> )	53,6	80,4	107,2
Karıştırma Hızı (devir/dk)	360	360	360
Voltaj, (V)	13,6	24,4	26,7
PKO (%)	3	3	3
Ön Kondisyon Süresi(sn)	120	120	120
Çökme Modunda Elektrokoagülasyon Süresi (sn)	180	300	480
Toplam Deney Süresi (sn)	300	420	600
İlk Sıcaklık (C <sup>0</sup> )	17,2	17,1	16,8
<b>DENEYLERDEN ELDE EDİLEN VERİLER</b>			
<b>Deney sonunda türbitidite (NTU)</b>	<b>837</b>	<b>364</b>	<b>261</b>
2 dk sonunda pH	9,3	9,12	9,08
Elektrokoagülasyon sonunda pH	9,11	9,01	8,27
Numune Alımı Sırasında pH	8,84	8,9	8,85
Son Sıcaklık	18,6	19,5	21,2
Sıcaklık Farkı (C <sup>0</sup> )	1,4	2,4	4,4
Elektrik birim Maliyeti (KWh/TL)	0,1928	0,1928	0,1928
Enerji Tüketimi, (Wh)	2,267	8,540	17,800
Enerji Maliyeti, (TL)	0,00044 TL	0,0016 TL	0,0034 TL
Ton Başına Enerji Maliyeti (TL/Ton)	0,44 TL	1,65 TL	3,43 TL
Akım Verimi (%)	207%	435%	829%
Teorik Çözünen Çelik (gr/lt)	0,0560	0,1175	0,2238
1 m <sup>3</sup> atıksu için harcanan Çelik, (gr)	55,96	117,51	223,83
Faraday , (F/m <sup>3</sup> )	6,22	13,06	24,87
<b>Koagüle Etme Verimi, (%)</b>	<b>32%</b>	<b>65%</b>	<b>75%</b>
Elektrot Maliyeti, (TL/m <sup>3</sup> )	0,32 TL	0,67 TL	1,28 TL
<b>Toplam Maliyet, (TL/m<sup>3</sup>)</b>	<b>0,76 TL</b>	<b>2,32 TL</b>	<b>4,71 TL</b>



**Şekil 4.56:** Çelik elektrotlar kullanılarak değişik amper ve elektrokoagülasyon sürelerinde elde edilen türbitide grafiği.

Gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen verilere göre en yüksek verim 4 Amper-107,2 Amper/m<sup>2</sup> akım yoğunluğunda ve 600 sn elektrokoagülasyon deneyinde elde edilmiş, türbitide değeri 261 NTU, koagüle etme verimi %75 ve ton başına maliyet 4,71 TL olmuştur. Projenin önceki bölümlerinde gerçekleştirilen denemelerde en optimum elektrot tipinin Alüminyum olduğu ve %95 koagüle etme verimi ve 0,51 TL ton başına işletme maliyeti olduğu hatırlanırsa, çelik elektrotlardan söz konusu numunelerde başarılı bir sonuç elde edilemediği söylenebilir. Keza literatürde yapılan araştırmalarda çelik elektrotların daha çok tekstil endüstrisinde atık sulardan boya giderme amacı ile kullanıldığı ve elektrokoagülasyon prosesinin takribi 60 dk'lık sürelerle kadar uzadığı öğrenilmiştir. Çelik elektrotlar, paslanmaz özellikleri sebebi ile ortama iyon vermekte son derece cimri davranan metallerdir. Bu sebeple ancak yüksek amper ve uzun süren proseslerde yeteri kadar iyon şarj edilmekte ve istenen verim alınabilmektedir. Proje kapsamında gerek işletme maliyeti gerekse zaman ekonomisi hedeflendiği için çelik elektrotların, projeye konu olan kömür hazırlama tesis artığı numunesinde başarılı sonuç vermeyeceği söylenebilir.

### 4.3. MALİYET ANALİZİ

Kömür artığı tesis atıkları üzerinde çeşitli kimyasal ve elektrokoagülasyon parametrelerinin denenmesinden ve her bir tip için optimum değerlerin elde edilmesinden sonra her yöntem işletme maliyetleri açısından karşılaştırılmaya çalışılmıştır.

#### 4.3.1. Kimyasal Koagülasyon Maliyet Analizi

Kimyasal koagülasyon deneylerinden sonra elde edilen sonuçlara göre koagülant tipine göre ton pülp başına şarj edilemesi gereken koagülant miktarları Tablo 4.35’de verilmiştir.

**Tablo 4.35:** Değişik koagülantların kullanıldığı proseste tüketim miktarları.

Koagülant Tipi	Deneylerde Kullanılan Molaritesi (Molar)	Şarj Edilen Miktar (ml)	Ton Pülp Başına Tüketim (gr/ton pülp)	Ton Atık Başına Tüketim (kg/ton atık)
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,1	25	556	18,53
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$	0,1	20	1890	63
$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0,1	20	676,25	22,54

Tablo 4.35 de verilen değerlerden hareketle Tablo 4.36’da her bir koagülant için ayrı ayrı teknik ve ekonomik verim hesaplamaları verilmiştir

**Tablo 4.36:** Değişik koagülantların kullanıldığı proseste maliyetler.

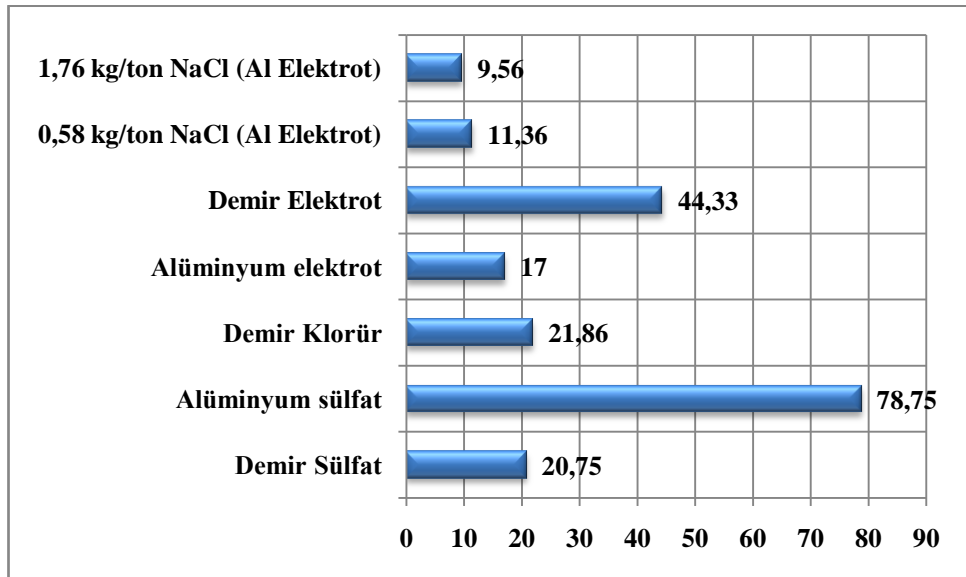
Koagülant	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$	$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Zaman (dk)	25	20	20
Başlangıç pH	9	7,56 (doğal)	9
Son türbitide (NTU)	158	65	34
Koagülasyon verimi (%)	<b>67,21</b>	<b>88,71</b>	<b>94</b>
Koagülant Tüketimi (kg/ton pülp)	<b>0,556</b>	<b>1,890</b>	<b>0,676</b>
Koagülant Tüketimi (kg/ton atık)	<b>18,53</b>	<b>63</b>	<b>22,54</b>
Birim Maliyet (TL/kg)	1,12	1,25	0,97
Ton Pülp Başına Maliyet (TL/ton)	<b>0,62</b>	<b>2,36</b>	<b>0,656</b>
Ton Artık Başına Maliyet (TL/ton)	<b>20,75</b>	<b>78,75</b>	<b>21,86</b>

### 4.3.2. Elektrokoagülasyon Maliyet Analizi

Alüminyum ve demir elektrotlar ile gerçekleştirilen elektrokoagülasyon deneyleri sonucunda elde edilen veriler Tablo 4.37’de, tüm maliyetlerin karşılaştırılması Şekil 4.57’de verilmiştir.

**Tablo 4.37:** Alüminyum ve demir elektrotların kullanıldığı proseste maliyetler.

<b>DENEY ŞARTLARI</b>			
<b>Elektrot Tipi</b>	<b>Alüminyum</b>	<b>Demir</b>	<b>Al+NaCl</b>
<b>Başlangıç pH</b>	8,07	7,88	7,93
<b>Akım Yoğunluğu, (A/m<sup>2</sup>)</b>	<b>40</b>	<b>80,4</b>	<b>40</b>
<b>Deney sonunda türbidite (NTU)</b>	63	95	77
<b>Koagüle Etme Verimi, (%)</b>	<b>95%</b>	<b>92%</b>	<b>%94</b>
<b>Elektrik birim Maliyeti (KWh/TL)</b>	0,1928	0,19284	0,19284
<b>Metal Birim Maliyeti (TL/kg)</b>	3,56	1,58	3,56
<b>Enerji Tüketimi, (Wh)</b>	1,575	5,450	0,403
<b>Enerji Maliyeti, (TL/lt pülp)</b>	0,00030	0,00105	0,00008
<b>Ton Başına Enerji Maliyeti (TL/m<sup>3</sup> pülp)</b>	0,30 TL	1,05 TL	0,08
<b>Teorik Çözünen Metal (gr/lt)</b>	0,0588	0,1741	0,0588
<b>1 m<sup>3</sup> Atık su için Harcanan Metal, (gr/m<sup>3</sup> pülp)</b>	58,76	174,09	58,76
<b>Toplam Maliyet, (TL/m<sup>3</sup> pülp)</b>	<b>0,51</b>	<b>1,33</b>	<b>0,29</b>
<b>Toplam Maliyet, (TL/ton artık)</b>	<b>17</b>	<b>44,33</b>	<b>9,56</b>



**Şekil 4.57:** Tüm susuzlandırma yöntemlerinin maliyet karşılaştırması.



Tablo 4.38, 4.39 ve Şekil 4.61 incelendiğinde kimyasal koagülasyon ile susuzlandırmada Demir klorür **20** dk çökme süresi, **%94** koagülasyon verimi ve **21,86 TL/ton atık** maliyeti ile en ekonomik koagülant olarak belirlenmiştir. Buna karşın elektrokoagülasyon ile susuzlandırmada Alüminyum elektrot **7** dk çökme süresi, **%95** koagülasyon verimi ve **17 TL/ton atık** maliyeti ile en ekonomik elektrokoagülasyon yöntemi olarak belirlenmiştir.

Her iki koagülasyon yöntemi karşılaştırıldığında, elektrokoagülasyon ile susuzlandırma metodunda kimyasal yöntemlere göre zaman açısından **%65**, maliyet açısından **%22,23** ekonomi sağlandığı görülmüştür.

Bununla beraber reaktör ortamına **1.755 gr/ton NaCl** eklenmesi durumunda koagülasyon verimi %1 düşsede ortama eklenen sodyum ve klor iyonların etkisi ile maliyet **17 TL/ton atık**'tan **9,56 TL/ton atığa** inmiştir. Başka bir deyişle maliyet açısından tekrardan **%44** ekonomi sağlandığı görülmüştür.

Elde edilen verilere göre günümüzde yeni yeni madencilik alanında tanınmaya başlanan elektrokoagülasyon prosesi geleneksel yöntemlere göre zaman, maliyet, işletme kolaylığı, hammadde temini ve bakım-onarım işlemleri açısından öne çıkmaktadır.

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Madencilikte ortaya çıkan cevher hazırlama ve zenginleştirme tesis atıkları, kompleks yapısı ve içerdiği mineral ve kimyasallar sebebi ile doğaya salınımı tehlikeli atıkların başında gelmektedir. Gelişen teknoloji ile yüksek maliyetli susuzlandırma yöntemlerinin önüne geçebilmek için her geçen gün yeni uygulamalar denenmekte, yeni arayışlara girilmektedir. Özellikle son yıllarda elektrokoagülasyon yöntemi birçok avantajı ile diğer ileri arıtım yöntemlerinin bir adım önüne geçmiş durumdadır. Literatürde henüz elektrokoagülasyon yöntemi ile cevher hazırlama tesis atıklarının arıtılabilirliğine ilişkin yeterli sayıda çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada ileri arıtım tekniklerinden biri olan elektrokoagülasyon yöntemiyle cevher hazırlama tesis atıklarının ön arıtılabilirliği üzerine bir çalışma yapıp, çeşitli işletme parametreleri üzerinde değerlendirmeler yapılmıştır.

Çalışma kapsamında, Tekirdağ'da faaliyet gösteren özel bir işletmeye ait kömür hazırlama tesisinde bulunan lavvar tesisi atıkları üzerinde öncelikle numune ön tanımlama analizleri yapılmış, buna müteakip kimyasal ve elektrokoagülasyon deneyleri yapılarak kömür hazırlama tesis atıklarının çökme performansları incelenmiştir.

Tesisten elde edilen numuneler üzerinde öncelikle ön tanımlama analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analiz sonuçlarına göre:

- ✚ Tesiste ortaya çıkan artıkların PKO oranı **%3**'tür.
- ✚ Kızdırma kaybı deney sonuçlarına göre kömür artığı kızdırma kaybı **%30** olarak elde edilmiştir.
- ✚ Alt ve üst Isıl değer deney sonuçlarına göre üst ısıl değer **820 kcal/kg**, alt ısıl değer ise **802 kcal/kg** olduğu görülmüştür.

- ✚ XRD ve XRF analiz sonuçlarına göre kömür hazırlama tesis artığı numunesi yapı itibarıyla kuvars, muskovit, montmorillonit, klorit, serpantin, albit, kalsit ve dolomit gibi çok çeşitli gang mineral ihtiva etmektedir.
- ✚ Boyut dağılım analiz deneyleri sonuçlarına göre  $d_{50}$  boyut değeri **45**  $\mu\text{m}$ ,  $d_{90}$  tane boyutunun **184**  $\mu\text{m}$  ve altı olduğu bulunmuştur.
- ✚ Tesiste geri beslemeye verilen sudan alınan numuneler üzerinde iyon tayin analizleri yapılarak, sıvı faz içerisinde yüksek miktarda sodyum (Na), magnezyum (Mg), sülfat (S), kalsiyum (Ca) ve klorür (Cl) iyonları ile az miktarda Florür (F), Bromür (Br), Nitrat (N) ve Potasyum (P) bulunmuştur.
- ✚ Koagülasyonda ve flokülasyonda önemli bir yeri olan zeta potansiyeli ölçümleri gerçekleştirilerek numunenin yüzey yükü ölçülmeye çalışılmıştır. Saf su içerisinde gerçekleştirilen deneylerden sonra tesisten elde edilen iyon yüklü suda ve deneylerde kullanılan şebeke suyunda ayrı ayrı yüzey yükü ölçümleri tekrar edilerek değişik pH'larda yüzey yükleri tespit edilmiştir. Deneyler sonucunda her üç durumda da yüzey yükünün pH 4 ile pH 9 arasında **-20 mV** civarında olduğu bulunmuştur.
- ✚ Serbest çökme performansının görülmesi açısından çökme deneyleri yapılarak değişik zamanlarda türbitide değerleri NTU cinsinden okunmuştur. Buna göre; serbest çökmede **25. dakikada** alt tarafta sıkışmış bir tortu ve üst kısımda bulutlu bir zon oluşmaktadır. Serbest çökme ancak 120. Dakikada son bulmaktadır.

Kimyasal koagülasyon deneyleri piyasada yaygın olarak kullanılan demir sülfat ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), alüminyum sülfat ( $\text{Al}_2\text{SO}_4)_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$ ) ve demir klorür ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) ile gerçekleştirilmiştir. Her koagülant tipi ile optimum karıştırma süresi, optimum karıştırma hızı, optimum reaktif miktarı ve optimum pH başlıklarında bir dizi deney yapılmıştır. Her bir deney sonunda koagülasyon tankında yüzeyden 2 ve 5 cm derinlikten numune alınarak farklı derinliklerdeki türbitide değerleri okunmuştur. Tüm koagülantlardan 0,1 Molar süspansiyonlar hazırlanarak istenen miktar dereceli pipet ile pülpe eklenmiştir. Deneyler 1 lt hacimli pleksiglass'dan üretilmiş tank içerisinde gerçekleştirilmiştir.

Demir sülfatın ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) koagülant olarak kullanıldığı deneylerde optimum karıştırma süresinin tespiti için bir dizi deney gerçekleştirilmiş ve optimum zamanın **5 dakika** olduğu bulunmuştur. Bu süre üzerindeki karıştırma sürelerinde floklar kesme kuvvetlerinin etkisi ile dağılırken, altındaki sürelerde uygun flok oluşumu gerçekleşmediği görülmüştür. Başka bir deyişle süspansiyon içerisinde oluşan demir hidroksitler molekülleri çökerken yeterli derecede tane ile etkileşime girecek süreyi bulamamıştır.

Karıştırma hızının optimizasyonunun hedeflendiği deneyler sonucunda en uygun hızın **250 devir/dk** olduğu tespit edilmiştir. Bu değer üzerinde floklar yine ortamda oluşan kesme kuvveti etkisi ile hızla dağılmış, altındaki hızlarda ise ortamdaki taneler ile yeteri kadar etkileşime geçemeyerek uygun boyutlu flok oluşturamamıştır. Koagülasyon veriminde karıştırma hızı ve süresi flok oluşum mekanizması için oldukça önemlidir.

Reaktif miktarının optimizasyonunun hedeflenerek gerçekleştirilen deneylerde ise optimum değer **20 ml-556 gr/ton** olduğu bulunmuştur. Deney sonuçlarına göre 20 ml'nin altındaki değerlerde ortama yeteri kadar demir iyonunun şarj edilmemesi sebebi ile yeterli demir hidroksit oluşmamış, bu değer üzerinde ise ortamda yeterli hidroksit bileşiği oluşmasına rağmen askıdaki taneler tükendiği için performansta bir artış görülemedi, sadece işletme maliyetin arttığı görülmüştür.

Demir Sülfat ile ilgili optimizasyon deneylerinin son aşaması olarak değişik pH'larda koagülasyon verimi incelenmiştir. Bilindiği gibi demir hidroksit iyonu farklı pH değerlerinde farklı yükler yüklenmekle birlikte süspansiyon içerisinde çökerken yanında askıdaki taneyi de çöktürmektedir. pH 6 ila pH 9 arasında gerçekleştirilen deneylerde en yüksek verimi süspansiyonun pH'sının **9** olduğu zaman ortaya koymuştur. Keza literatürde demir sülfatın pH9-9,5 arasında en yüksek koagülasyon verimini verdiği bilinmekle birlikte yapılan deneylerle teyid edilmiştir. Ayrıca gerçekleştirilen tüm deneylerde çökme işleminin 25. dk'da son bulduğu, türbitidenin kabul edilebilir oranda

düştüğü görülmüştür. 25 dk üzerindeki sürelerde grafikler yataylanmaktadır. 25 dk üzeri sürelerde alt tarafta oluşan çökelek sıkışma eğilimi göstermiştir. 25. dakikada elde edilen koagülasyon verimi eş zamanlı serbest çökmeye göre **%67,21**' olmuştur.

Alüminyum Sülfat ( $Al_2SO_4)_3 \cdot 16H_2O$ ) kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde ilk adım olarak optimum karıştırma süresi incelenmiştir. Değişik zaman aralıklarında gerçekleştirilen deneylerde **1 dk 15 sn** (75 sn) üzerindeki ve altındaki sürelerde türbitide değerinin yükseldiği görülmüştür. Bunun sebebi kısa kondisyon süresinde yeterli tanelü alüminyum hidroksit etkileşimi olmamakta, üzerindeki sürelerde ise oluşan floklar ortamdaki kesme kuvvetinin etkisi ile dağılmaktadır. Gerçekleştirilen deneylerde ayrıca alüminyum iyonlarının oluşturduğu flokların demir sülfat koagülantının kullanıldığı deneylerde elde edilen floklara göre çok daha fazla zayıf olduğu görülmüştür.

İkincil olarak karıştırıcı hızının optimizasyonu amacı ile değişik hızlarda bir dizi denemeler gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda **150 devir/dk**'lık ön kondisyon karıştırma hızı ile optimum koagülasyon veriminin elde edildiği görülmüştür. Bu karıştırma hızı üzerinde floklar hızlı kesme kuvvetlerinin etkisi ile dağılıma uğramışlar, altında hızlarda ise yeterli flok yapısı oluşturamamışlardır.

Reaktif miktarının optimizasyonunun hedeflendiği gerçekleştirilen deneylerde ise optimum değer **30 ml-1890 gr/ton** olduğu bulunmuştur. Alüminyum sülfat ile gerçekleştirilen deneylerde reaktif miktarının tespitine kadar 30. dakikaya kadar koagülasyon eğrilerinde yataylanma görülemedi ancak bu süre sonrasında çökmenin tamamlandığı kanısına varılmıştır. Oysa reaktif miktarının artırılması ile süre 10 dk daha kısalarak çökme süresi 20 dakikaya inerek demir iyonları ile elde edilen koagülasyon verimi yakalanmıştır.

Başlangıç pH'sının optimizasyonun araştırıldığı deneylerde ise değişik başlangıç pH değerlerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. pH 6 ila 9 arasında gerçekleştirilen deneyler sonucunda pH 6, pH8 ve pH9'da düşük koagülasyon verimi elde edilirken, **pH 7,56**'da en verimli sonuçlar elde edilmiştir. Literatürde alüminyum sülfatın en yüksek koagülasyon verimini pH 7-7,5 ile verdiği bilinmekle birlikte deney sonuçları bu bilgiyi desteklemektedir. Deney sonuçlarında elde edilen verilere göre 20 dakikada çökmenin tamamlandığı, bu süreden sonra tabanda biriken çökeleğin sıkışma eğilimi gösterdiği anlaşılmıştır. 20. dakikada elde edilen koagülasyon verimi eş zamanlı serbest çökmeye göre **%88,7** olarak tespit edilmiştir.

Kimyasal koagülasyonun son adımı olarak demir klorür ( $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ ) ile de bir dizi optimizasyon deneyi gerçekleştirilmiştir. İlk olarak yapılan karıştırma süresinin koagülasyon mekanizmasına etkisinin araştırıldığı bir dizi deneyde, değişik karıştırma süreleri seçilerek optimum süre bulunmaya çalışılmıştır. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda optimum sürenin **2,5 dk** olduğu görülmüştür. Türbitide grafikleri incelendiğinde 2,5 dakikalık süreye daha az ve uzun olan diğer süreler arasındaki türbitide farkının diğer koagülantlara göre daha yüksek değerlerde kaldığı görülmüştür. Bunun sebebi demir klorürün projeye konu olan numuneler ile koagülasyonu sırasında etkileşimin zor olması, bununla beraber flok oluşturduktan sonra da flokların kararsız davranıp kolay dağılmaları olarak açıklanabilir.

Bir önceki adımda optimum karıştırma süresinin tespitinden sonra kondisyon süresi içinde karıştırıcının hızının optimizasyonu amacı ile değişik hızlarda denemeler gerçekleştirilmiştir. Değişik karıştırıcı hızlarının kullanıldığı deneylerde optimum karıştırıcı hızının **150 devir/dk** olduğu anlaşılmıştır. Bu deney sonuçlarında da özellikle yüksek hızlarda türbitide yüksek değerlerde kalmış ve çökme gecikmiştir. Bu sonuçlar yine söz konusu kömür hazırlama tesis artığının demir klorür ile sağlam flok oluşturamadığını ortaya koymuştur.

Reaktif miktarının optimizasyonunun hedeflenerek gerçekleştirilen deneylerde ise optimum değer **25 ml-676 gr/ton** olduğu bulunmuştur. Daha düşük reaktif şarjlarında

yeteri kadar flok ortamda oluşamayarak türbitide değerleri yüksek kalmıştır. Bununla beraber daha yüksek şarj miktarlarında da türbitide değerlerinde bir değişiklik kaydedilmemiştir.

Başlangıç pH'sının optimizasyonu için değişik pH değerlerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. pH 6 ile 9 arasında değişik pH değerlerinde başlangıç pH'ı alınarak bir dizi deneyler gerçekleştirilmiş ve pH'ın demir klorür koagülasyon mekanizmasına etkisi araştırılmıştır. Deneyler sonucunda en yüksek pH verimi **pH 9**'da elde edilmiştir. Deneysel sonuçlarında elde edilen verilere göre 20 dakikada çökmenin tamamlandığı, bu süreden sonra tabanda biriken çökeleğin sıkışma eğilimi gösterdiği anlaşılmıştır. 20. dakikada elde edilen koagülasyon verimi eş zamanlı serbest çökmeye göre **%94** olarak tespit edilmiştir.

Gerçekleştirilen deneyler sonucunda, piyasada sıkça kullanılan demir sülfat, alüminyum sülfat ve demir klorür ile kömür hazırlama tesis artığı üzerinde koagülasyon verimleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen verilere göre demir sülfat ile gerçekleştirilen deneylerde **25. dakikada** türbitide değeri **158**'e düşürülmüş ve koagüle etme verimi serbest çökmeye göre **% 67,21**; alüminyum sülfat ile gerçekleştirilen deneylerde **20. dakikada** türbitide değeri **65**'e düşürülerek koagüle etme verimi **%88,7** ve demir klorür ile gerçekleştirilen deneylerde **20. dakikada** türbitide değeri **34**'e düşürülerek koagüle etme verimi **%94** olarak elde edilmiştir. Buna göre çalışmaya esas olan numune için optimum şartlar **0,1 Molar demir klorür, 150 devir/dk kondisyon hızı, 2,5 dk kondisyon süresi, pH9 ve 675 gr/ton (25 ml/lit) reaktif şarjı** olarak belirlenmiştir.

Elektrokoagülasyon deneyleri literatürde sıkça yer alan alüminyum, demir ve çelik elektrotlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler monopolar bağlama şeklinde 1 litrelik pleksiglas tank içerisinde doğrusal akım kaynağı kullanılarak gerçekleştirilmiş, Deneyler süresince pH ve sıcaklık değişimleri canlı takip edilmiştir. Özellikle pH değerlerindeki değişimler tüm deney aşamalarında ayrı ayrı not edilerek pH değişiminin mekanizma üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Elektrokoagülasyon hücresi toplam 373cm<sup>2</sup>

aktif yüzey alanına sahip seri bağlı 6 anot ve 6 katot elektrottan oluşmaktadır. Ön kondisyon ve serbest çökme süresince elektrokoagülasyona devam edilerek akımın kesilmesinden 1 dk sonra pipet kullanılarak 2 cm derinliklerden numune alımı yapılmıştır. Numunelerin türbitide değerleri NTU cinsinde okunarak kaydedilmiş, elde edilen verilerden koagülasyon verimi ve maliyet hesaplamaları ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Bununla beraber demir elektrotta optimum akım yoğunluğunun arttırılması durumunda elektrokoagülasyon performansının değişimi incelenmiş ayrıca alüminyum elektrotların kullanıldığı bir düzenekte NaCl iyonunun varlığının elektrokoagülasyona etkisi araştırılmıştır.

Alüminyum elektrotların kullanıldığı deney düzeneğinde öncelikle optimum akım yoğunluğunun bulunmasına yönelik değişik amper ve akım yoğunluklarında denemeler yapılmıştır. 0,5 ile 4 Amper-13,4-107,2 Amper/m<sup>2</sup> akım yoğunluklarında gerçekleştirilen denemelerde optimum değer olarak **1,5 Amper, 40 Amper/m<sup>2</sup>** akım yoğunluğu optimum şart olarak kabul edilmiştir. Bu akım yoğunluğunun altında ortama yeteri derecede Al<sup>+3</sup> iyonunun şarj edilememesi sebebi ile koagülasyon verimi düşmüş, 40 Amper/m<sup>2</sup> akım yoğunluğu üzerindeki şarjlarda ise ortama bolca Al<sup>+3</sup> iyonu şarj edilmesine karşın Al iyonları hidroksitlere dönüşerek çökelmiş, ancak ortamda yeterli tane olmadığı için verimde bir değişiklik olmamıştır.

Optimum akım yoğunluğunun belirlenmesinden sonra iyon şarj süresinin belirlenmesine yönelik deneyler gerçekleştirilmiştir. 60 ile 660 sn arasında çeşitli değerler alınarak gerçekleştirilen deneylerde optimum süre 120 sn ön kondisyon, 300 sn elektrokoagülasyon olacak şekilde toplamda **420 sn** optimum elektrokoagülasyon süresi olarak bulunmuştur. Bilindiği gibi sisteme verilen akımın süresi uzadıkça, o oranda anottan metal iyonlar ortama geçecek, geçen bu iyonlarda daha fazla metal hidroksit molekülü oluşturacaktır. Ancak ortamda bulunan katı oranının düşük olması sebebi ile 420 sn üzeri sürelerde üretilen alüminyum hidroksitler verime bir katkı sağlamamaktadır.



Başlangıç pH'sının elektrokoagülasyona etkisini araştırmak amacı ile de değişik pH değerlerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. pH 6 ile 9,71 arasında başlangıç pH değerleri seçilerek gerçekleştirilen deneylerde düşük pH değerinde düşük koagülasyon verimi kaydedilirken, pH 8 ile pH 9,71 arasında koagülasyon veriminde artış gözlenmiştir. Alüminyum hidroksit'in değişik pH değerlerinde değişik yük ve koagülasyon davranışları sergilediği bilinmektedir. Özellikle deneyler sırasında alüminyum elektrotların bir karakteristik davranışı olan sistemin pH'sının 9'un üzerine çıkması sıkça gözlenmiş ancak sistem kendisini tamponlayarak pH değeri pH 9'a düşmüştür. Değişik pH kademelerinde değişik hidroksit oluşum ve koagülasyon mekanizmalarının olduğu düşünülen deney sonuçlarına göre doğal pH ile elde edilen değerler ile daha yüksek pH'larda elde edilen türbitide değerleri arasında çok büyük bir fark olmadığından optimum pH'nın **pH 8,07 (doğal pH)** olduğuna karar verilmiştir.

Ön kondisyon karıştırma hızının optimizasyonunun hedeflendiği deneylerde ise 120 ile 540 devir/dk hızlar arasında değerler seçilerek denemeler yapılmış ve en uygun hızın **360 devir/dk** olduğuna karar verilmiştir. 360 devir/dk hızların altında Alüminyum hidroksit molekülleri yeteri kadar taneler ile etkileşime geçememekte, bu hızın üzerinde ise oluşan floklar dağılmakta ve çökme verimi düşmektedir. Ön kondisyon karıştırma süresinin optimizasyonunun belirlenmesi için de 60 ile 240 sn arasında değişik kondisyon süreleri seçilerek bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre kimyasal koagülasyona karşın türbitide veriminin **120 sn**'ye kadar yükseldiği ve bu değerden sonra değişmediği görülmüştür. Oysa elektrokoagülasyon ile oldukça paralel mekanizmaların işlediği kimyasal koagülasyonda süre uzadıkça flokların dağıldığı görülmüştü. Bu sebeple elektrokoagülasyonda oluşan flokların kimyasal koagülasyona karşın çok daha kararlı ve sıkı yapıda olduğu sonucuna varılmıştır.

Demir elektrot kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde optimum akım yoğunluğunun bulunmasına yönelik 0,5 ile 4 amper- 13,4-107,2 Amper/m<sup>2</sup> akım yoğunluklarında gerçekleştirilen denemelerde optimum değer olarak **3 Amper, 80,4 Amper/m<sup>2</sup>** akım yoğunluğu optimum şart olarak kabul edilmiştir.

Optimum elektrokoagülasyon süresinin belirlenmesine yönelik gerçekleştirilen deneylerde ise 60 ile 300 sn arasında değişik süreler seçilerek deneyler yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre toplamda 300 sn olarak gerçekleştirilen elektrokoagülasyon deneyinde grafik yataylanmış ve bu sürenin üzerindeki değerlerde türbitide de önemli bir değişiklik olmamıştır. Sürenin uzaması işletme maliyetlerini doğrudan etkilediği için sınır-optimum değer olarak 120 sn ön kondisyon ve 180 sn elektrokoagülasyon olmak üzere toplamda **300 sn** elektrokoagülasyon süresi optimum şart olarak kabul edilmiştir.

Başlangıç pH'sının optimizasyonunun incelendiği deneylerde ise pH 5,78 ile pH 10,65 arasında değişik pH değerlerinde deneyler gerçekleştirilerek elektrokoagülasyon mekanizması anlaşılmasına çalışılmıştır. Deney süresince ortam pH'sı sürekli dalgalanarak demir iyonlarının hidroksite dönüştüğü farklı mekanizmalar çalışmış ve elde edilen sonuçlarda **pH 7,88 (doğal pH)** değeri üzerinde grafiğin yataylandığı ve türbitide değerinin değişmediği görülmüştür.

Ön kondisyon karıştırma hızının incelendiği deneylerde ise 0 ile 720 devir/dk değerleri arasında değişik karıştırma hızları seçilerek denemeler yapılmış, deneyler sonucunda **360 devir/dk** hızın optimum değer olduğu görülmüştür. Demir elektrotlarda alüminyum elektrotlara karşı hız arttıkça verim düşmüştür. Deneyler sırasında çok daha sağlam flok yapısı gözlenen demir elektrot sisteminde flokların ortamdaki kesme kuvvetlerine karşı daha zayıf olduğu anlaşılmıştır.

Optimizasyon deneylerinin son aşamasında, ön kondisyon karıştırma süresinin etkisi incelenmiştir. 60 ile 240 sn arasında değerler seçilerek gerçekleştirilen deneylerde değişik sürelerde ön karıştırma yapılmış ve türbitide değerleri okunmuştur. Deney sonuçlarına göre süre arttıkça koagülasyon verimi düşmüştür. Alüminyum elektrotlar ile gerçekleştirilen deneylerde hatırlanacağı üzere kondisyon süresi artışına bağlı olarak türbidite önce düşmüş ve sabit bir seviyede kalmıştı. Başka bir deyişle flok yapısında bozulma olmamıştı. Oysa demir elektrot kullanılan deneylerde görülmüştür ki oluşan flokların yapıları süre arttıkça kolayca dağılmaktadır. Elde edilen verilere göre optimum ön kondisyon karıştırma süresinin **120 sn** olduğuna karar verilmiştir.

Alüminyum ve demir elektrotlar ile gerçekleştirilen optimizasyon deneyleri sonrası, elektrokoagülasyon proseslerinde zaman zaman kullanılan çelik (305 SS Paslanmaz Çelik) elektrotlar ile de çeşitli denemeler yapılarak çelik elektrot performansının demir ve alüminyum performans verileri ile karşılaştırılması yapılmıştır. Akım yoğunluğunun optimizasyonu amacı ile 2 ile 4 Amper-53,6-107,4 A/m<sup>2</sup> akım yoğunlukları arasında denemeler yapılmıştır. Elde edilen verilere göre akım yoğunluğu arttıkça verim artmış ancak sisteme 4 Amper üzeri yük yüklenemediği için bu değerden sonrası denemeler gerçekleştirilememiştir. Bununla beraber 4 Amper-107,4 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğunda en düşük türbitide değeri 261 olarak bulunmuş elektrokoagülasyon süresi 10 dk'ya kadar uzamıştır. Bunun sebebinin paslanmaz çeliğin ortama iyon salmak istememesi bu sebeple ortama salınan kalsiyum ve magnezyum iyonlarının oluşturduğu hidroksitlerin yeterli konsantrasyona ulaşamaması olduğu düşünülmektedir. Literatürde yapılan incelemede çelik elektrotların daha çok tekstil endüstrisi atıkları olan tekstil boyalarının giderimin de 60 dk'yı bulan elektrokoagülasyon sürelerinde kullanıldığı görülmüştür. Proje kapsamında en uygun elektrokoagülasyon süresinin 7 dk olduğu göz önüne alındığında çelik elektrot ile oluşturulacak bir reaktör sisteminin kömür hazırlama tesis atıkları üzerinde düşük koagülasyon verimi sergileyebileceğine karar verilmiştir.

Her üç elektrot tipinde birbirinden bağımsız gerçekleştirilen deneyler sonucunda alüminyum elektrot kullanımında **1,5 Amper-40 A/m<sup>2</sup>** akım yoğunluğunda, **doğal** başlangıç pH'ında **360 devir/dk** karıştırma hızı ve **420 sn** elektrokoagülasyon süresinin ve **%95** koagülasyon verimi ile en yüksek verimi ortaya koyduğu görülmüştür. Yine demir elektrotlar ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda **3 Amper-80,4 A/m<sup>2</sup>** akım yoğunluğunda, **doğal** başlangıç pH'ında, **360 devir/dk** karıştırma hızı ve **300 sn** elektrokoagülasyon süresinin **%92** koagülasyon verimi ile en yüksek ikinci verimi ortaya koyduğu görülmüştür.

Kimyasal koagülasyon sonuçları ile karşılaştırıldığında ise Alüminyum elektrot ve demir klorür ile elde edilen koagülasyon veriminin **%95** olarak verim açısından farklılık göstermediği, ancak zaman açısından 20 dakikalık koagülasyon süresine karşın **7 dakikada** aynı verim elde edilebilmiştir.

Demir elektrotlar ile optimum elektrokoagülasyon şartlarının belirlenmesinden sonra, akım yoğunluğunun artışının elektrokoagülasyon sürecinde zamana bir etkisinin olup olmadığı araştırılmıştır. Bu amaçla akım değeri 3 Amper, 80,4 Amper/m<sup>2</sup> den 4 Amper-107,2 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğuna çıkartılarak optimizasyon deneyleri elektrokoagülasyon süresi ve başlangıç pH başlıklarında tekrarlanmıştır. 120 ile 540 sn elektrokoagülasyon süreleri arasında çeşitli değerler alınarak gerçekleştirilen deneylerde 300 sn'lik süreden sonra türbitide değerlerinde sabitlenme olduğu ve bu değer üzerinde değişme olmadığı görülmüştür. Demir elektrotların kullanıldığı deneylerde optimum elektrokoagülasyon süresi yine 300 sn olarak bulunmuştu. Bu sonuçlara göre akım yoğunluğunun artırılması halinde ortama şarj edilen iyon miktarı artsa da demir hidroksitlerin flok oluşturma performansları aynı kalmaktadır. Bununla beraber akım yoğunluğunun artırılması halinde elde edilen türbitide değerleri 3 Amper, 80,4 Amper/m<sup>2</sup> akım yoğunluğuna göre daha yüksek kalmış, bunun sebebi fazla demir hidroksit şarjının zayıf ve küçük floklar oluşturduğu ve bu sebeple çökme veriminin düştüğü düşünülmektedir.

Optimum sürenin analizinin gerçekleştirilmesinden sonra yine 4 Amper-107,2 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğunda değişik başlangıç pH değerlerinde denemeler yapılarak çökme verimi incelenmiştir. Elde edilen verilere göre yüksek akım yoğunluğu düşük pH değerlerinde yüksek çökme verimi ortaya koyarken pH 7den itibaren akım yoğunluğunun farklılığı çökme performansında bir değişikliğe sebep olmamıştır. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda bir elektrokoagülasyon prosesinde akım yoğunluğunun artışı verim artışı anlamına gelmeyeceği, fazla miktarda ortama iyon şarjının koagülasyon verimini olumsuz etkilediği sonucuna varılmıştır.

Elektrokoagülasyon mekanizmasında tuz iyon etkisinin araştırılması amacı ile alüminyum elektrot kullanılarak, değişik NaCl konsantrasyonlarında deneyler gerçekleştirilerek, daha önce elde edilen optimum şartlarla karşılaştırılması yapılmıştır. 1 molar olarak hazırlanan NaCl çözeltisi ile 0 ile 30 ml – 0-1.755 gr/ton arasındaki konsantrasyonlarda reaktöre eklenerek denemeler yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre reaktöre tuz çözeltisi eklendikten sonra, voltaj değerleri 3'te 1 oranına düşse de elde edilen koagüle etme verimi %95'ten %94'e düşmüştür. Bunun temel sebebinin ortama

eklenen  $\text{Na}^+$  iyonlarının killerde iyon deęiřimi etkisi ile zeta potansiyelini dūřurerek koagüle olma verimini etkilemesi olarak dūřünölmektedir. 1,75 kg/ton NaCl eklenmesi ile iřletme maliyeti %44 oranında dūřürölmüřtür.

Her iki koagölasyon yönteminde optimum şartlar elde edildikten sonra her iki yöntemle göre maliyet analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kimyasal koagölasyon ile susuzlandırmada demir klorür **%94** koagölasyon verimi ve **21,86 TL/ton artık** maliyetle, elektrokoagölasyon ile susuzlandırmada alüminyum elektrot ise **%95** koagölasyon verimi ve **17 TL/ton artık** maliyeti ile en ekonomik yöntem olarak belirlenmiştir. Her iki koagölasyon yöntemi karşılaştırıldığında, elektrokoagölasyon ile susuzlandırma metodunda kimyasal yöntemlere göre zaman açasından **%65**, maliyet açasından **%22,23** ekonomi sağlandığı tespit edilmiştir. Ayrıca reaktör sistemine minimum 1,75 kg/ton NaCl eklenmesi ile işletme maliyetinde **%44** daha ekonomi sağlanarak **9,56 TL/ton artık** olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu sonuçlara göre elektrokoagölasyon ile susuzlandırma prosesi, Madencilik Sektöründe ortaya çıkan artıkların susuzlandırılmasında, bu güne kadar uyguladığımız koagölasyon ve flokülasyon tekniklerinin yerine kolayca ve ekonomik olarak uygulanabilir

## 5.1. ÖNERİLER

✚ Elektrokoagölasyon prosesi çok yeni bir teknoloji gibi görünse de tarihi eskilere dayanan bir susuzlandırma yöntemidir. Özellikle son yıllarda dikkatleri üzerine toplamayı başaran bu yöntem genel olarak tekstil ve atık su endüstrisinde kullanım alanı bulmuştur. Oysa yadsınamayacak derecede atık su üreten madencilik sektöründe elektrokoagölasyon prosesi hemen hemen hiç denenmemiştir.

Yapılan çeşitli çalışmalar incelendiğinde sadece mineral bazlı incelemelerin yapıldığı görülmüştür. Oysa doğal şartlarda tesis artıkları karmaşık mineral yapılarını barındırmakta ve bu yapı tekil minerallere karşın çok farklı çökme performansı sergilemektedir. Bu sebeple farklı mineraller ihtiva eden farklı cevher artıkları üzerinde orijinal numuneler ile deney sayılarının artırılması gerekir. Bununla beraber mineral davranışının tam olarak ortaya konabilmesi için tekil mineraller üzerinde çalışmalar yapılarak sonuçların karşılaştırılması gerekir.

Günümüzde birçok firmanın flokülant kullanarak bertaraf ettiği artıklarda tamamen ithal flokülantlar kullanılmakta ve döviz ile alım-satımı yapılmaktadır. Bu gün için flokülasyon tekniği ekonomik gibi görünse de zamanla ithal malzemenin pahalılaşacağı unutulmamalıdır. Ayrıca önemli bir maliyet kalemi olan elektrik maliyetlerinin ülkemizde gerçekleştirilen enerji santral yatırımları ile ucuzlayacağı, bunun da maliyetleri doğrudan etkileyeceği beklenmektedir.

Bu çalışmanın devamı olarak değişik mineral süspansiyonlarında değişik bağlama şekillerinde ve farklı kombinasyonlarda elektrokoagülasyon verimi araştırılabilir.

Elektrokoagülasyon prosesi ucuz, uygulaması kolay ve çevreye diğer kimyasallara oranla daha az zarar veren bir yöntemdir. Bu sebeple işletmelere bu proses tanıtılmalı ve örnek uygulamalar yapılmalıdır.

## KAYNAKLAR

- Akın Y, Çelik MS (1995) Montmorillonit Tipi Killerin Elektrokinetik Davranışı. *1. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu Bildirileri Kitabı*, 21-22 Nisan 1995, İzmir, 135-142.
- Bayramoğlu, M., Eyvaz, M., Kobyay, M., 2007. Treatment of the Textile Wastewater by Electrocoagulation Economical Evaluation. *Chemical Engineering Journal*, 128, 155–161.
- Bentli İ., Kömür Lavvar Tesisi Atıkların Flokülasyonun Da İnorganik Elektrolitlerin Etkisi, *Ekoloji Dergisi* Sayı 19, 76, 71-77 (2010) Doi: 10.5053/Ekoloji.2010.768.
- Bentli İ, Karagüzel C., 2005, Kömür Hazırlama Tesis Atıklarının Çökeltme Davranışlarına Tek Değerlikli Tuzların Etkisi. In: Yakupoğlu T, Açlan M, Köse O (Eds), *12. Ulusal Kil Sempozyumu Bildirileri Kitabı*, 05-09 Eylül 2005, Van, 239.
- Can, O.T., 2002, *Alüminyum Elektrotlar Kullanılarak Tekstil Atık su ve Boyalarının Elektrokoagülasyon ile Arıtımı*, GYTE Müh., ve Fen Bil. Ens.,Yüksek Lisans Tezi, Gebze, 2002.
- Can O.T., Kobyay M., Demirbaş E., Bayramoğlu M., 2006, Treatment of The Textile Waste water by Combined Electrocoagulation, *Chemosphere*, 62: 181-187.
- Canizares P., Carmona M., Lobato J., Martinez F., Rodrigo M.A., 2005, Electrodeposition Of Aluminum Electrodes In Electrocoagulation Processes, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 44 (2005) 4178-4185.
- Chen, G., 2004, Electrochemical technologies in wastewater treatment, *Separation and Purification Technology*, 38, 11–41, 2004.
- Coşar, Y. Z., 1997, Ülkemiz Enerji Sektöründe MTA Genel Müdürlüğünün Yeri. *MTA Doğal Kaynaklar Ve Ekonomi Bülteni*, 6-8, Ankara.
- Eckenfelder W.W.Jr.,1989,Industrial Water Pollution Control. Second Edition, *Mc Graw- Hill International Editions*, Singapore.
- Eyvaz, M., 2005. *Farklı Demir ve Alüminyum Elektrot Bağlantıları İle Tekstil Atık sularının Elektrokoagülasyonu*. Gebze yüksek teknoloji enstitüsü, Yüksek lisans tezi, 172 s, Gebze.
- Eyvaz, M., Bayramoğlu, M., & Kobyay, M., 2010, Tekstil endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyon ile arıtılması: Teknik ve ekonomik değerlendirme. *İTÜ Dergisi*, 16(1-3).

- Escobara, C., Cesar, S.S., Toral, M.I., 2006, Optimization Of The Electrocoagulation Process For The Removal Of Copper, Lead And Cadmium In Natural Waters And Simulated Wastewater. *Journal Of Environmental Management*, 81, 384–391.
- Gür N., 2008, *Tekstil Endüstrisi Atık sularının Elektrokoagülasyonla Arıtılabilirliği*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Holt, P.K., Barton, G.W., Wark, M., Mitchell, C.A., 2002. A Quantitative Comparison between Chemical Dosing and Electrocoagulation. *Colloids and Surfaces A, Physicochem. Eng. Aspects*, 211, 233-248.
- İpekoğlu Ü., 1997, *Susuzlandırma ve Yöntemleri*, D.E.Ü Mühendislik Fakültesi Basım Ünitesi, No:179, İzmir.
- İrdemez, Ş., Demircioğlu, N., Yıldız, Y. Ş., & Bingül, Z. (2006). The effects of current density and phosphate concentration on phosphate removal from wastewater by electrocoagulation using aluminum and iron plate electrodes. *Separation and Purification Technology*, 52(2), 218-223.
- Joffe, L., & Knieper, L. (2000). Electrocoagulation Technology quickly removes barium, total suspended solids from a waterretention pond for fractions of a cent per gallon. *Ind. Wastewater*, 5, 1-5.
- Johnson P.N., Amirtharajah A., Ferric Chloride and Alum as Single and Dual Coagulants. *J. AWWA* 5, 232-39, (1983)
- Karabacakoğlu B., Tezakıl F., 2012, Oluklu Mukavva Kutu Üretimi Atık Suyunun Elektrokoagülasyon Yöntemi ile Arıtımı, *BAÜ Fen Bil. Enst. Dergisi* Cilt 14(1) 34-39.
- Kılıç G.M., 2009, *A Parametric Comparative Study Of Electrocoagulation And Coagulation Of Aqueous Suspensions Of Kaolinite And Quartz Powders*, Doktora Tezi, ODTÜ, Maden Mühendisliği Bölümü.
- Koby M., Bayramoğlu M., Can T, Sözbir M., Akyol A., 2008, Endüstriyel Atıksuların Arıtılması İçin Elektrokimyasal Reaktör Geliştirilmesi, Proje No 104y267, *Türkiye Bilimsel Ve Teknik Araştırma Kurumu*.
- Koby, M., Hiz, H., Şentürk, E., Aydiner, C., Demirbaş, E. 2006. Treatment Of Potato Chips Manufacturing Wastewater By Electrocoagulation. *Desalination*, 190, 201–211.
- Kocakuşak, S., Savaşçı, Ö. T., & Ayok, T., 2001, *Doğal Zeolitler Ve Uygulama Alanları*. Türkiye Bilimsel Ve Teknik Araştırma Kurumu Marmara Araştırma Merkezi, Malzeme Ve Kimya Teknolojileri Araştırma Enstitüsü, Rapor No: Km, 362.
- Koparal, A.S., Öğütveren, Ü.B., 2002. Removal of Nitrate from Water by Electro Reduction and Electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, B89, 83-94.



- Lagaly G., Ziesmer S., 2003, Colloid chemistry of clay minerals: the coagulation of montmorillonite dispersions, *Advances in Colloid and Interface Science*, Volumes 100–102, 28 February 2003, Pages 105–128.
- Malkoç R.,2008, *Reaktif Tekstil Boya Çözeltilerinin Elektrokoagülasyon Yöntemi İle Arıtımının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, C.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Sivas.
- Mansour, B.L., Ksentini, L., Elleuch, B., 2007. *Treatment Of Wastewaters Of Paper Industry By Coagulation–Electroflotation Desalination* 208, 34–41.
- Mollah, M.Y.A., Morkovsky, P., Gomes, J.A.G., Kesmez, M., Parga, J., Cocke, D.L., 2004. Fundamentals, Present and Future Perspectives of Electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, b114, 199–210.
- Mollah, M. Y. A., Schennach, R., Parga, J. R., Cocke, D. L., 2001, Electrocoagulation (ec)-Science and Applications, *Journal of Hazardous Materials*, b84, 29-41.
- Mpofu.P. , Mensah .J.A., Ralston.J.,2003, Investigation of the effect of the polymerstructure type on flocculation rheology and dewatering behaviour of kaolinile dispersions. *International Journal of Mineral Processing*, Vol.71,pp.247-268.
- Öteyaka B., Yamık A., , Uçar A., Şahbaz O., Yılmaz B.,2005, Seyitömer Killerinin Çökeltme Davranışları, *Türkiye 19.Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, IMCET2005*, İzmir,Türkiye,09-12Haziran 2005.
- Öztürk T., 2006, *İzmit Evsel Ve Tehlikeli Katı Atık Düzenli Depolama Tesisi Sızıntı Sularının Elektro ve Kimyasal Koagülasyon Yöntemleri İle Arıtılabilirliğinin İncelenmesi*, Doktora Tezi Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Özyonar F., Karagözoğlu B., 2011, *İçme Sularından Elektrokoagülasyon Ve Kimyasal Koagülasyon İle Bulanıklığın Giderimi*, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., Cilt 27, No 1, 81-89, 2012.
- Rebhun M., Lurie M., Control of Organic Matter by Coagulation and Floc Separation. *Wat. Sci. Tech.* 27,1-20, (1993)
- Sabah E., Erkan Z.E., 2006, *Interaction mechanism of flocculants with coal waste slurry*, Department of Mining Engineering, Afyon Kocatepe University, 03200 Afyon, Turkey, FuelVolume 85, Issue 3, February 2006, Pages 350–359.
- Sütçü E., Paker S., Nurlu Y., Kumtepe P., Cengiz T., 2009, Tekirdağ-Malkara Havzasında CBS Yöntemleriyle Potansiyel Kömür Sahalarının Belirlenmesine Yönelik İki Değişkenli İstatiksel Yaklaşım, *TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi 2009* İzmir.
- Solak M., 2007, *Elektrokoagülasyon Prosesi İle Mermer Atık sularının Arıtılması*, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Svarovsky,L.,1981,Characterization of Particles Suspendedin Liquids, *Solid-Liquid Separation*, Second Edition,Ed. Ladiila Svarovsky, pp,8-32.
- Şanlı N., 2006, *Deri Sanayi Atıksularının Kimyasal Koagülasyon Ve Elektrokoagülasyon İle Arıtımı*, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.
- Şengüler İ., 2000, *Ülkemiz Enerji Bütünlemedesinde Marmara Ve Trakya Bölgesi Kömürlerinin Yeri*, Maden Tetkik Ve Arama Genel Müdürlüğü Enerji Dairesi Başkanlığı 06520 Ankara.
- Şengüler, İ.,Toprak, S., Kara, H., Öner, A., Tuncalı, E. Ve Kır, N., (2000) Güney Trakya Bölgesindeki Kömürlerin Petrografik İncelemesi Ve Ortamsal Yorumu. *Türkiye 12. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı*, 173-180, Zonguldak.
- Türkiye Enerji Raporu, 2008, *Dünya enerji Konseyi Türk Milli Komitesi yayınları* [Online], <http://www.dektmk.org.tr/incele.php?id=MTQ3> [Ziyaret tarihi 10 Ağustos 2012].
- Türkyılmaz O., 2011, Türkiyenin Enerji Görünümü, *TMMOB Makine Mühendisleri Odası Adana Şubesi Yayınları*.
- Türkoğlu G.,2007, *Dispers Boya Banyo Atık Sularının Elektrokoagülasyon İle Arıtılabilirliğinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Uğurlu, M., 2004. The Removal of Some Inorganic Compounds from Paper Mill Effluents by the Electrocoagulation Method. *Journal of Science*, 17(3), 85-99.
- Uygun, R., 2003. *Demir ve Alüminyum Elektrotlar Kullanılarak Tekstil Boyalarının Elektrokoagülasyon ile Arıtımı*, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli.
- Vardar B., 2006, *Tekstil Endüstrisi Reaktif Boya Banyolarını Elektrokimyasal Yöntemler İle Arıtımı*, Yüksek Lisans Tezi, İÜ Fen bilimleri Enstitüsü.

## ÖZGEÇMİŞ



### Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı	Mehmet Furkan ÖZKAN
Uyruğu	T.C.

### Eğitim

Derece	Kurum/Anabilim Dalı/Programı	Yılı
Lisans	İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fak. Maden Müh Bölümü	2003
Lise	Özel İstanbul Fen Lisesi	1998