

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FARKLI BÖLGELERDEN ALINAN UÇUCU KÜLLERİN AĞIR METAL
İYONLARININ ADSORBANSINDA KULLANIMININ GELİŞTİRİLMESİ**

ŞEYMA KÖLEMEN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. NURCAN TUĞRUL**

İSTANBUL, 2012

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI BÖLGELERDEN ALINAN UÇUCU KÜLLERİN AĞIR METAL
İYONLARININ ADSORBANSINDA KULLANIMININ GELİŞTİRİLMESİ**

Şeyma KÖLEMEN tarafından hazırlanan tez çalışması/...../2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Nurcan TUĞRUL
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. Nurcan TUĞRUL
Yıldız Teknik Üniversitesi

.....

.....

.....

.....

Bu alışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü' nün 2011-07-01-KAP01 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Öncelikle bana bu çalışmada yer alma imkanını sunan, çalışmalarım boyunca engin bilgi birikiminden yararlandığım ve yararlanmaya devam ettiğim, çalışmamın her aşamasında önerileriyle bana yardımcı olan hayatım boyunca saygıyla hatırlayacağım kıymetli hocam sayın Prof. Dr. Sabriye PİŞKİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Benim bu değerli çalışmada yer almamı sağlayan sabır, hoşgörü ve manevi desteğini bir an olsun esirgemeyip çalışmalarım boyunca elinden gelen desteği ve ilgiyi gösteren değerli hocam tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Nurcan TUĞRUL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımın her aşamasında sonsuz emeği geçen, çalışmalarım boyunca elinden gelen tüm maddi ve manevi desteği gösteren, desteğiyle, tecrübeleriyle bana yol göstererek çalışmamda hızla yol almamı sağlayan değerli hocam Arş. Gör. Dr. Nil BARAN ACARALI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarımın karakterizasyon aşamasındaki yardımlarından dolayı Arş. Gör. Özgül DERE ÖZDEMİR'e, Arş. Gör. Burak BİROL'a, Teknisyen Gülhan SAĞLAM'a, Teknisyen Cem ÇAKMAK'a ve arkadaşım Emrah ÖZKAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Beni bu günlere getiren, bana her zaman güvenen ve inanan ve anlayışlarını benden esirgemeyen, hayatımın sonuna kadar yanımda olacaklarını bildiğim ve her şeyden çok sevdiğim aileme ve arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ekim, 2012

Şeyma KÖLEMEN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	ix
KISALTMA LİSTESİ.....	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xiv
ÖZET	xvi
ABSTRACT.....	xviii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	3
1.3 Hipotez.....	3
BÖLÜM 2	
SU KİRLİLİĞİ.....	4
BÖLÜM 3	
ATIKSULARIN ÖZELLİKLERİ, SINIFLANDIRILMASI VE ARITILMASI	6
3.1 Atıksuların Özellikleri	7
3.1.1 Evsel Atıksular	7
3.1.2 Sızıntı Suları	8
3.1.3 Endüstriyel Kaynaklı Atıksular	8
3.2 Atıksuların Arıtılması.....	9
3.2.1 Fiziksel Arıtma Yöntemleri	10
3.2.2 Kimyasal Arıtma Yöntemleri.....	11
3.2.3 Biyolojik Arıtma Yöntemleri	12
3.2.4 İleri Atıksu Arıtma Yöntemleri.....	13
BÖLÜM 4	
AĞIR METALLER	15
4.1 Endüstriyel Kaynaklı Atık Sularda Ağır Metal Kirliliği.....	15
4.2 Ağır Metallerin Etkileri.....	18

4.2.1	Kurşun (Pb).....	20
4.2.1.1	Kurşunun kullanım alanları	21
4.2.1.2	Kurşun kirliliğinin kaynakları ve etkileri	22
4.2.1.3	Kurşun kirliliği standartları	24
4.2.1.4	Atık sulardan kurşunun giderilmesinde uygulanan yöntemler	25
4.2.2	Çinko (Zn)	26
4.2.2.1	Çinkonun kullanım alanları.....	27
4.2.3	Ağır Metallerin Sınır Değerleri	28

BÖLÜM 5

ADSORPSİYON	33	
5.1	Adsorpsiyonun Nedenleri ve Tipleri	35
5.1.1	Değişim Adsorpsiyonu.....	36
5.1.2	Fiziksel Adsorpsiyon	36
5.1.3	Kimyasal Adsorpsiyon	37
5.1.4	Biyolojik Adsorpsiyon	39
5.2	Katı-Sıvı Ara Yüzeyinde Adsorpsiyon ve Adsorpsiyon Kriterleri	40
5.3	Adsorpsiyona Etki Eden Faktörler.....	41
5.3.1	Adsorplanacak Maddenin (Adsorbat) Yapısı	42
5.3.2	Sıcaklık.....	42
5.3.3	pH	43
5.3.4	Adsorbanın yapısı ve özellikleri	43

BÖLÜM 6

UÇUCU KÜLLER	44	
6.1	Uçucu Külün Oluşumu	46
6.2	Termik Santraller	48
6.2.1	Termik Santrallerden Uçucu Kül Toplamanın Temel Prensipleri	50
6.3	Uçucu Küllerin Sınıflandırılması	54
6.4	Uçucu Küllerin Özellikleri.....	58
6.4.1	Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri	58
6.4.1.1	Görünüş.....	58
6.4.1.2	Partikül Morfolojisi.....	59
6.4.1.3	Partikül Boyutu (İncelik).....	60
6.4.1.4	Yoğunluk.....	61
6.4.1.5	Karbon Miktarı	63
6.4.1.6	Manyetik Özellik.....	63
6.4.1.7	Mekanik Dayanım	63
6.4.1.8	Suda Çözünürlük	64
6.4.1.9	Ergime	64
6.4.1.10	Elektrik İletkenliği.....	65
6.4.1.11	Dayanım aktivite indisi	65
6.4.1.12	Üniformluluk (Homojenlik)	65
6.4.2	Uçucu küllerin kimyasal özellikleri	65
6.4.3	Uçucu Küllerin Minerolojik Özellikleri.....	68

6.4.4	Uçucu küllerin puzolanik özelliği	72
6.5	Uçucu Küllerin Kullanım Alanları	74
6.6	Dünya’da ve Türkiye’de Uçucu Kül	78
BÖLÜM 7		
PELETLEME		85
7.1	Peletleme Teorisi	85
7.2	Peletleme Hammaddeleri	87
7.2.1	Cevher	87
7.2.2	Bağlayıcılar	87
7.2.2.1	Bentonit	88
7.3	Peletleme İşlemi	90
7.4	Harmanlama	91
7.5	Yaş Pelet Üretimi	91
7.6	Pişirme İşlemleri	91
BÖLÜM 8		
DENEYSSEL ÇALIŞMALAR		92
8.1	Malzemelerin Karakterizasyonunda Kullanılan Enstrümental Analiz Cihazları	92
8.1.1	X-Işını Difraktometre Cihazı (XRD)	92
8.1.2	X-Işınları Floresans Spektroskopisi (XRF)	93
8.1.3	Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM)	93
8.1.4	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrofotometresi (FT-IR)	94
8.1.5	Yüksek Çözünürlüklü Yüzey Alanı ve Mikro Gözenek Boyut Analizi Cihazı (BET)	94
8.1.6	İndüktif Eşleşmiş Plazma-Optik Emisyon Spektrometresi (ICP-OES)	95
8.2	Deneysel Sistem ve Hammaddeler	95
8.2.1	Etüv	95
8.2.2	Yüksek sıcaklık fırını	96
8.2.3	pH metre	96
8.2.4	Mekanik Elek	97
8.2.5	Uçucu kül	97
8.2.6	Bentonit	98
8.2.7	Üleksit	98
8.2.8	Melas	99
8.2.9	Diğer maddeler	99
8.3	Karakterizasyon Çalışmaları	99
8.3.1	Uçucu Kül Numunelerinin Karakterizasyonu	99
8.3.1.1	XRD Analizi	99
8.3.1.2	XRF Analizi	100
8.3.1.3	SEM Analizi	101
8.3.1.4	FT-IR Analizi	101
8.3.1.5	BET Analizi	101
8.3.1.6	Elek Analizi	101

8.3.1.7	Serbest CaO Tayini (%)	102
8.3.1.8	Kızdırma Kaybı Tayini (LOI).....	102
8.3.1.9	Nem Tayini	102
8.4	Peletleme Çalışmaları	103
8.4.1	Birinci Yöntem	103
8.4.2	İkinci Yöntem.....	104
8.5	Küresel Peletlere Uygulanan Testler	105
8.5.1	Basma Dayanımı Testi	105
8.5.2	Düşme Testi.....	106
8.6	Adsorpsiyon Deneyleri.....	106
BÖLÜM 9		
SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....		
107		
9.1	Hammaddeler İçin Yapılan Karakterizasyon Sonuçları	107
9.1.1	Uçucu küllerin elek analizi sonuçları	107
9.1.2	Uçucu küllerin CaO (%) tayini sonuçları	108
9.1.3	Uçucu küllerin nem tayini sonuçları.....	108
9.1.4	Uçucu küllerin kızdırma kaybı tayini (LOI) sonuçları	108
9.1.5	Uçucu küllerin XRD analizi sonuçları	109
9.1.6	Uçucu küllerin XRF analizi sonuçları.....	110
9.1.7	Hammaddeler için SEM analizi sonuçları	112
9.1.8	Hammaddeler için FT-IR analizi sonuçları	114
9.1.9	Uçucu Küllerin BET sonuçları.....	116
9.2	Peletler için Yapılan Karakterizasyon Sonuçları.....	117
9.2.1	Küresel ve Silindirik Peletlerin Basma Dayanımı Testi Sonuçları ...	117
9.2.2	Küresel Peletler İçin Yapılan Düşme Testi Sonuçları	118
9.2.3	Küresel ve Silindirik Peletler için Yüzey Alanı Analizi Sonuçları	119
9.3	Adsorpsiyon Sonuçları	120
9.3.1	Zn Adsorpsiyon Sonuçları.....	120
9.3.1.1	Orhaneli uçucu külünün Zn (100 ppm) adsorpsiyon sonuçları ..	120
9.3.1.2	Çatalağzı uçucu külünün Zn (100 ppm) adsorpsiyon sonuçları..	123
9.3.2	Pb Adsorpsiyon Sonuçları.....	125
9.3.2.1	Orhaneli uçucu külünün Pb (5 ppm) adsorpsiyon sonuçları	125
9.3.2.2	Çatalağzı uçucu külünün Pb (5 ppm) adsorpsiyon sonuçları	128
9.3.3	pH'in Adsorpsiyon Verimi Üzerindeki Etkisi.....	131
9.3.4	Konsantrasyonun Adsorpsiyon Verimi Üzerindeki Etkisi	133
BÖLÜM 10		
SONUÇLAR VE ÖNERİLER		
136		
KAYNAKLAR.....		
139		
ÖZGEÇMİŞ.....		
145		

SİMGE LİSTESİ

A	Kurutulmuş numunenin kütlesi
B	Nemli numunenin kütlesi
D	Küresel tanecik çapı
F	0,1 N HCl faktörü
M	Numune kütlesi
m_1	Numunenin kütlesi
m_2	Piştirme işleminden sonra numunenin kütlesi
m_3	Krozenin kütlesi
P	Sıvı kolonun yüksekliği tarafından uygulanan yüzey gerilimi
R	Kılcal kuvvet tanecik çapı
V	Sarf edilen 0,1 N HCl hacmi
σ	Sıvının yüzey gerilimi
β	Sıvı bağlayıcı arasındaki menisküs açısı
P_c	Kılcal durumdaki yapıya uygulanan kohezyon kuvveti
ϵ	Kürenin gözenekliliği

KISALTMA LİSTESİ

ASTM	American Society for Testing and Materials (Amerikan Malzeme ve Test Birliği)
ATR	Attenuated Total Reflectance (Zayıflatılmış Toplam Yansıma)
BET	Brauner-Emmett-Teller
BOİ	Biyolojik Oksijen İhtiyacı
EDXA	Energy-Dispersive X-ray Analysis (Enerji Yayılımı X-Işını Analizi)
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu
EMS	En Muhtemel Sayı Methodu
EU	European Union (Avrupa Birliği)
FT-IR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi)
ICP-OES	Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (İndüktif Eşleşmiş Plazma Optik Emisyon Spektrometresi)
KOİ	Kimyasal Oksijen İhtiyacı
LOI	Limiting Oxygen Index (Kızdırma Kaybı Tayini)
MBAS	Methylene Blue Active Substances (Metilen Mavisi ile Reaksiyon Veren Yüzey Aktif Maddeler)
PVC	Polyvinyl Chloride (Polivinil Klorür)
SEM	Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
TEK	Türkiye Ekonomi Kurumu
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
WHO	World Health Organization (Dünya Sağlık Örgütü)
XRD	X-Ray Diffraction (X-Işını Difraktometresi)
XRF	X-Ray Fluorescence (X-Işınları Floresans Spektrometresi)

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 3. 1	Aritma Yöntemleri..... 9
Şekil 5. 1	(a) Tek Tabakada (Monomoleküler) Adsorpsiyon ve (b) Çoklu Tabakada (Multimoleküler) Adsorpsiyonun Şematik Gösterimi 34
Şekil 5. 2	Katı faz üzerinde adsorpsiyon ve desorpsiyon işlemleri 35
Şekil 5. 3	Adsorpsiyon türleri..... 36
Şekil 5. 4	Fiziksel ve Kimyasal Adsorpsiyonun Potansiyel Enerji Eğrileri 38
Şekil 6. 1	Baca gazı arıtma ünitesi bulunan bir termik santralde ait akım şeması 47
Şekil 6. 2	Uçucu külün oluşum safhaları 48
Şekil 6. 3	Elektrostatik çöktürücünün çalışma prensibi..... 51
Şekil 6. 4	Siklon..... 52
Şekil 6. 5	Bez Torba Filtreler 53
Şekil 6. 6	Uçucu Küllerin Nemlendirme Yöntemi ile Tutulması..... 54
Şekil 6. 7	Uçucu küllerin görünüşü 59
Şekil 6. 8	Farklı uçucu kül partiküllerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) sonuçları..... 60
Şekil 6. 9	Uçucu kül içerisindeki farklı yoğunluktaki tanecik yüzdesi 63
Şekil 6. 10	Uçucu külün zamanın fonksiyonu olarak su içerisindeki çözünürlüğü 64
Şekil 6. 11	(a) Silika kristali, (b) Camsı silika, (c) İkili bir silika camı yapılarının iki boyutlu gösterimi 69
Şekil 6. 12	Uçucu küllerde cam yapıları arasındaki yapısal farklılıkların gösterilmesi . 69
Şekil 6. 13	Puzolanların sınıflandırılması..... 73
Şekil 6. 14	2000 yılına ait uçucu kül üretim miktarları..... 80
Şekil 6. 15	Avrupa Termik Santralleri tarafından üretilen küller 81
Şekil 6. 16	Avrupa'daki termik santrallerden elde edilen küllerin kullanımları 81
Şekil 6. 17	2008 yılı elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı 82
Şekil 7. 1	Pelet şekillenme mekanizması 86
Şekil 7. 2	Tanecikler arasındaki su köprüsünün yarattığı yüzey gerilim kuvvetinin şematik görüntüsü 86
Şekil 7. 3	Bentonit türlerinin görüntüleri: (a) Ca-Bentoniti, (b) Na-Bentoniti 89
Şekil 8. 1	XRD cihazı..... 92
Şekil 8. 2	XRF cihazı 93
Şekil 8. 3	SEM Cihazı..... 94
Şekil 8. 4	FT-IR Cihazı..... 94

Şekil 8. 5	BET Cihazı	95
Şekil 8. 6	ICP-OES cihazı.....	95
Şekil 8. 7	Etüv	96
Şekil 8. 8	Yüksek Sıcaklık Fırını.....	96
Şekil 8. 9	pH metre	97
Şekil 8. 10	Mekanik Elek.....	97
Şekil 8. 11	Uçucu kül örnekleri: (a) Orhaneli, (b) Çatalağzı	98
Şekil 8. 12	Bentonit	98
Şekil 8. 13	Üleksit Minareli.....	98
Şekil 8. 14	Melas çözeltisi.....	99
Şekil 8. 15	Hidrolik pres makinesi	100
Şekil 8. 16	XRF analizi için basılan peletler.....	101
Şekil 8. 17	Döner peletleme diski.....	103
Şekil 8. 18	Pelet görüntüleri: a) Yaş küresel peletler b) Pişmiş küresel peletler.....	104
Şekil 8. 19	Fırında pişen silindirik peletler.....	105
Şekil 8. 20	Plastik eğme makinası.....	105
Şekil 8. 21	Adsorpsiyon deney düzeneği.....	106
Şekil 9. 1	Çatalağzı termik santraline ait uçucu külün XRD paterni.....	109
Şekil 9. 2	Orhaneli uçucu külüne ait XRD paterni.....	110
Şekil 9. 3	Orhaneli uçucu külünün SEM görüntüsü (×1000).....	112
Şekil 9. 4	Çatalağzı uçucu külünün SEM görüntüsü (×1000)	113
Şekil 9. 5	Bentonitin SEM görüntüsü (×1000)	113
Şekil 9. 6	Üleksitin SEM görüntüsü (×1000)	114
Şekil 9. 7	Çatalağzı uçucu külünün FT-IR spektrumu.....	114
Şekil 9. 8	Orhaneli uçucu külünün FT-IR spektrumu	115
Şekil 9. 9	Bentonitin FT-IR spektrumu.....	115
Şekil 9. 10	Melasın FT-IR spektrumu	116
Şekil 9. 11	Orhaneli uçucu külü için melas oranının atık sudaki Zn konsantrasyonu üzerindeki etkisi (10 gr uçucu kül, % 0 Bentonit).....	120
Şekil 9. 12	Orhaneli uçucu külü için melas oranının atık sudaki Zn konsantrasyonu üzerindeki etkisi (10 gr uçucu kül, % 1 Bentonit).....	121
Şekil 9. 13	Orhaneli uçucu külü için melas oranının atık sudaki Zn konsantrasyonu üzerindeki etkisi (10 gr uçucu kül, % 5 Bentonit).....	121
Şekil 9. 14	Orhaneli uçucu külü için melas oranının atık sudaki Zn konsantrasyonu üzerindeki etkisi (10 gr uçucu kül, % 10 Bentonit).....	122
Şekil 9. 15	Optimum Orhaneli uçucu kül pelet bileşiminin Zn adsorpsiyon verimi üzerindeki etkisi	122
Şekil 9. 16	Çatalağzı uçucu külü için melas oranının atık sudaki Zn konsantrasyonu üzerindeki etkisi (10 gr uçucu kül, % 0 Bentonit).....	123
Şekil 9. 17	Çatalağzı uçucu külü için melas oranının atık sudaki Zn konsantrasyonu üzerindeki etkisi (10 gr uçucu kül, % 1 Bentonit).....	123
Şekil 9. 18	Çatalağzı uçucu külü için melas oranının atık sudaki Zn konsantrasyonu üzerindeki etkisi (10 gr uçucu kül, % 5 Bentonit).....	124
Şekil 9. 19	Çatalağzı uçucu külü için melas oranının atık sudaki Zn konsantrasyonu üzerindeki etkisi (10 gr uçucu kül, % 10 Bentonit).....	124

Şekil 9. 20	Optimum Çatalağzı uçucu kül pelet bileşiminin Zn adsorpsiyon verimi üzerindeki etkisi	125
Şekil 9. 21	Orhaneli uçucu külü için melas oranının atık sudaki Pb konsantrasyonu üzerindeki etkisi (10 gr uçucu kül, % 0 Bentonit).....	126
Şekil 9. 22	Orhaneli uçucu külü için melas oranının atık sudaki Pb konsantrasyonu üzerindeki etkisi (10 gr uçucu kül, % 1 Bentonit).....	126
Şekil 9. 23	Orhaneli uçucu külü için melas oranının atık sudaki Pb konsantrasyonu üzerindeki etkisi (10 gr uçucu kül, % 5 Bentonit).....	127
Şekil 9. 24	Orhaneli uçucu külü için melas oranının atık sudaki Pb konsantrasyonu üzerindeki etkisi (10 gr uçucu kül, % 10 Bentonit).....	127
Şekil 9. 25	Optimum Orhaneli uçucu kül pelet bileşiminin Pb adsorpsiyon verimi üzerindeki etkisi	128
Şekil 9. 26	Çatalağzı uçucu külü için melas oranının atık sudaki Pb konsantrasyonu üzerindeki etkisi (10 gr uçucu kül, % 0 Bentonit).....	128
Şekil 9. 27	Çatalağzı uçucu külü için melas oranının atık sudaki Pb konsantrasyonu üzerindeki etkisi (10 gr uçucu kül, % 1 Bentonit).....	129
Şekil 9. 28	Çatalağzı uçucu külü için melas oranının atık sudaki Pb konsantrasyonu üzerindeki etkisi (10 gr uçucu kül, % 5 Bentonit).....	129
Şekil 9. 29	Çatalağzı uçucu külü için melas oranının atık sudaki Pb konsantrasyonu üzerindeki etkisi (10 gr uçucu kül, % 10 Bentonit).....	130
Şekil 9. 30	Optimum Çatalağzı uçucu kül pelet bileşiminin Pb adsorpsiyon verimi üzerindeki etkisi	131
Şekil 9. 31	Orhaneli uçucu külü için pH'ın Zn adsorpsiyon verimi üzerine etkisi (10 gr uçucu kül, % 0 Bentonit, 0.25 ml Melas).....	131
Şekil 9. 32	Çatalağzı uçucu külü için pH'ın Zn adsorpsiyon verimi üzerine etkisi (10 gr uçucu kül, % 1 Bentonit, 0.50 ml Melas).....	132
Şekil 9. 33	Orhaneli uçucu külü için pH'ın Pb adsorpsiyon verimi üzerine etkisi (10 gr uçucu kül, % 1 Bentonit, 0.50 ml Melas).....	132
Şekil 9. 34	Çatalağzı uçucu külü için pH'ın Pb adsorpsiyon verimi üzerine etkisi (10 gr uçucu kül, % 1 Bentonit, 0.25 ml Melas).....	133
Şekil 9. 35	Orhaneli uçucu külü için konsantrasyonun Zn adsorpsiyon verimi üzerine etkisi (10 gr uçucu kül, % 0 Bentonit, 0.25 ml Melas, pH:5,5)	134
Şekil 9. 36	Çatalağzı uçucu külü için konsantrasyonun Zn adsorpsiyon verimi üzerine etkisi (10 gr uçucu kül, % 1 Bentonit, 0.50 ml Melas pH: 4,5)	134
Şekil 9. 37	Orhaneli uçucu külü için konsantrasyonun Pb adsorpsiyon verimi üzerine etkisi (10 gr uçucu kül, % 1 Bentonit, 0.50 ml Melas, pH:3)	135
Şekil 9. 38	Çatalağzı uçucu külü için konsantrasyonun Pb adsorpsiyon verimi üzerine etkisi (10 gr uçucu kül, % 1 Bentonit, 0.25 ml Melas, pH:5)	135

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 4. 1	Temel endüstrilerden atılan metal türleri 17
Çizelge 4. 2	Ağır metallerin vücuttaki sistem ve organlar üzerine etkileri..... 19
Çizelge 4. 3	Kurşun elementinin fiziksel ve kimyasal özellikleri 20
Çizelge 4. 4	Zn elementinin fiziksel ve kimyasal özellikleri 27
Çizelge 4. 5	Kıta içi su kaynaklarının sınıflarına göre kalite kriterleri 30
Çizelge 5. 1	Fiziksel ve kimyasal adsorpsiyon arasındaki önemli farklar 39
Çizelge 6. 1	Türkiye’de kömürle çalışan termik santraller 49
Çizelge 6. 2	ASTM C 618 Standardına göre F ve C sınıfı uçucu küllerinin gereklilikleri 56
Çizelge 6. 3	TSE Standartlarına ait bilgiler 56
Çizelge 6. 4	Uçucu Külün Kimyasal Özellikleri 57
Çizelge 6. 5	İncelikle hacimsel yoğunluk değişimi 63
Çizelge 6. 6	Uçucu küllerin ASTM C-618 ve TS 639 standartlarına göre sınır değerleri 67
Çizelge 6. 7	Çeşitli uçucu küllerden elde edilen sonuçlara göre F ve C sınıfı uçucu küllerinin yaklaşık kimyasal bileşiklerinin yüzdesi..... 68
Çizelge 6. 8	Düşük kireçli F sınıfı uçucu küleriyle yüksek kireçli C sınıfı uçucu küllerinin içerdikleri camsı ve kristal yapılar 71
Çizelge 6. 9	Türkiye’deki bazı uçucu küllerin mineralojik kompozisyonları 72
Çizelge 6. 10	Elektrik üretimi için temel olarak kömürü kullanan ülkeler 79
Çizelge 6. 11	2006 Yılı Termik Santral Temel Çevre Göstergeleri 83
Çizelge 6. 12	2008 Yılı Termik Santral Temel Çevre Göstergeleri 83
Çizelge 9. 1	Uçucu küllerin elek analizi sonuçları 107
Çizelge 9. 2	Uçucu küllerin CaO (%) tayini sonuçları 108
Çizelge 9. 3	Uçucu küllerin nem tayini sonuçları..... 108
Çizelge 9. 4	Uçucu küllerin kızdırma kaybı tayini sonuçları..... 109
Çizelge 9. 5	Çatalağzı uçucu kül numunelerinin kristal fazları 109
Çizelge 9. 6	Orhaneli uçucu kül numunelerinin kristal fazları 110
Çizelge 9. 7	Çatalağzı uçucu kül numunelerinin majör ve minör bileşen yüzdeleri .. 111
Çizelge 9. 8	Orhaneli uçucu kül numunelerinin majör ve minör bileşen yüzdeleri .. 111
Çizelge 9. 9	Uçucu küllerin yüzey alanları 116
Çizelge 9. 10	Çatalağzı uçucu külüne ait küresel peletlerin basma dayanımı testi sonuçları 117
Çizelge 9. 11	Orhaneli uçucu külüne ait küresel peletlerin basma dayanımı testi sonuçları 117

Çizelge 9. 12	Çatalağzı ve Orhaneli uçucu küllerine ait pişmiş küresel pelet basma dayanımı testi sonuçları	118
Çizelge 9. 13	Çatalağzı ve Orhaneli uçucu küllerine ait pişmiş silindirik pelet basma dayanımı testi sonuçları	118
Çizelge 9. 14	Çatalağzı uçucu külüne ait düşme testi sonuçları.....	118
Çizelge 9. 15	Orhaneli uçucu külüne ait düşme testi sonuçları	119
Çizelge 9. 16	Küresel peletler için yapılan yüzey alanı analizi sonuçları	119
Çizelge 9. 17	Silindirik peletler için yapılan yüzey alanı analiz sonuçları	119

FARKLI BÖLGELERDEN ALINAN UÇUCU KÜLLERİN AĞIR METAL İYONLARININ ADSORBANSINDA KULLANIMININ GELİŞTİRİLMESİ

Şeyma KÖLEMEN

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Nurcan TUĞRUL

Uçucu kül termik santrallerde açığa çıkan önemli bir atık olup, kullanılan kömürün yanması nedeniyle baca tarafından çekilen gazlarla birlikte yukarıya sürüklenen çok ince parçacıklar olarak tanımlanmaktadır. Dünya’da ortaya çıkan uçucu kül miktarı yılda 600 milyon ton civarındadır. Dünya’da üretilen toplam uçucu külün % 25’den daha azı değerlendirilmektedir. Ülkemizde son yıllarda artan enerji ihtiyacı termik santrallerin yaygınlaşmasını kaçınılmaz hale getirmiştir. Türkiye’de faaliyet gösteren termik santrallerde yaklaşık olarak yılda 13 milyon ton uçucu kül elde edilmektedir. Bu miktarın önümüzdeki yıllarda enerji tüketimine bağlı olarak daha da artacağı düşünülmektedir. Ülkemizde 2020 yılına kadar yılda 50 milyon ton atık külün ortaya çıkması beklenmektedir. Termik santrallerden açığa çıkan atıkların, önemli çevre sorunları yarattığı bilinmektedir. Bu atıkların inşaat sektöründe, özellikle beton ve çimento üretiminde değerlendirilmesi çevresel, teknik ve ekonomik yönden büyük faydalar sağlamaktadır. Ancak ortaya çıkacak uçucu kül hacmi çok büyük olduğundan, ilave kullanım alanlarının uygulamaya geçirilmesi son derece önemlidir.

Bu çalışmanın amacı; atık sularda bulunabilecek ağır metal iyonlarının adsorpsiyonu için düşük maliyetli adsorban malzemesi olarak Türkiye’nin farklı bölgelerinden alınan

uçucu küllerin, bağlayıcı (bentonit, üleksit ve melas çözeltisi) katkısıyla peletlendikten sonra, atık sulardan ağır metallerin adsorplanmasında kullanılabilirliğinin incelenmesidir. Öncelikle, farklı bölgelerden alınmış olan uçucu küllerin (Orhaneli, Çatalağzı) karakterizasyon çalışmaları için, X-Işını Difraktometresi (XRD), X-Işınları Floresans Spektrometresi (XRF), Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi (FT-IR), morfolojik açıdan hammadelerin incelenmesi için, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), ve yüzey alanı analizi için Brauner-Emmett-Teller (BET) analizleri, elek analizi, serbest CaO (%) tayini, nem tayini (%) ve kızdırma kaybı tayini (%) uygulanmıştır. Daha sonra, uçucu küller farklı oranlarda bağlayıcılar olarak bentonit (% 0-10, uçucu kül miktarı üzerinden, ağ/ağ), üleksit (% 0-10, uçucu kül miktarı üzerinden, ağ/ağ) ve melas çözeltisi (0-0.75 ml; Melas : Saf su = 1 : 1) ilave edilerek peletlenmiştir. Daha sonra bu peletler çinko (Zn) ve kurşun (Pb) ağır metallerin adsorpsiyon deneylerinde kullanılmış ve deney boyunca 30-150 dakika aralığında atık sulardan alınan numunelerin elementel analizleri gerçekleştirilmiştir.

Uçucu kül türü, bentonit miktarı, üleksit miktarı, melas miktarı, süre, pelet tipi (küresel, silindirik), ağır metal türü, pH ve konsantrasyon gibi deney parametrelerinin adsorpsiyon verimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Küresel peletlerin çinko ve kurşunu adsorplamada yetersiz kaldıkları görülmüştür. Silindirik peletler kullanıldığı durumda, Zn adsorpsiyon verimi için optimum nokta, Orhaneli uçucu külünden yapılan peletler için; Orhaneli uçucu külü (10 gr), bentonit (% 0, uçucu kül miktarı üzerinden, ağ/ağ) ve melas (0.25 ml); Çatalağzı uçucu külünden yapılan peletler için; Çatalağzı uçucu külü (10 gr), bentonit (% 1, uçucu kül miktarı üzerinden, ağ/ağ) , melas (0.50 ml) dir. Pb adsorpsiyon verimi için optimum nokta, Orhaneli uçucu külünden yapılan peletler için; Orhaneli uçucu külü (10 gr), bentonit (% 1, uçucu kül miktarı üzerinden, ağ/ağ) ve melas (0.50 ml), Çatalağzı uçucu külünden yapılan peletler için; Çatalağzı uçucu külü (10 gr), bentonit (% 1, uçucu kül miktarı üzerinden, ağ/ağ), melas (0.25 ml) dir. Sonuç olarak, termik santral atığı olan uçucu küllerin, şeker sanayi atığı olan melas ve diğer bağlayıcılarla farklı yöntemlerle peletlenerek, ağır metallerin atık sudan adsorpsiyonunda adsorban malzeme olarak kullanılabilmesi ve atıkların bu sayede değerlendirilebileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Uçucu kül, ağır metal, bağlayıcı, peletleme, adsorpsiyon

**IMPROVEMENT METHOD FOR USAGE OF FLY ASHES FROM DIFFERENT
AREAS AT ADSORPTION OF HEAVY METAL IONS**

Şeyma KÖLEMEN

Department of Chemical Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Nurcan TUĞRUL

Fly ash is a significant waste that is released of thermal power plants and defined as very fine particles that are drifted uptaken by the flue gases due to the burning of coal. The amount of fly ash emerging in the world is approximately 600 million tons per year. Less than %25 of the total produced fly ash is utilized in the world. In recent years, Turkey has made inevitable of the expansion of the thermal power plants due to the increasing energy demand. In our country, approximately 13 million tons of fly ash per year are obtained at thermal power plants. It is expected that this amount will increase in the next years, depending on energy consumption. In our country, it is expected that 50 million tons of waste ash per year will be produced until 2020. It is already well known that the released waste from the thermal power plants causes significant problems. Assesment of this waste has been proven very beneficial in environmental, technical and economical terms, especially the production of concrete and cement in the construction sector. However, the amount of fly ash produced is very large, implementation of additional utilization areas are extremely important.

The aim of this study is to investigate the possibility of using the pellets which consist the fly ashes taken from different regions of Turkey and binders (bentonite, ulexite and

solution of molass) such as low-cost adsorbents for adsorption of heavy metals ions in waste water. First of all, fly ashes taken from different regions of Turkey were characterized by X-Ray Diffraction (XRD), X-Ray Fluorescence (XRF), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR), Scanning Electron Microscope (SEM) to view the morphology of raw materials, and Brauner-Emmett-Teller analysis (BET) for surface area analysis, sieve analysis, moisture (%), CaO (%) and Loss of Ignition (LOI) (%) of fly ashes. Then, the fly ashes and binders which are bentonite (0 and 1% in terms of fly ash, w/w), ulexite (0 and 1% in terms of fly ash, w/w) and molass (0-0.75 mL) were pelletized. The pellets were used in adsorption experiments and samples from waste water were taken during the experiments in range of 30-150 minutes were analyzed.

The effects of process parameters like species of fly ash, amount of bentonite, amount of ulexite, amount of molass, time, type of pellet (spherical, cylindrical), species of high metal, pH and concentration on adsorption yield were investigated. It was seen that the experiments were not carried out successfully when the spherical pellets were used at adsorption of zinc and lead. When the cylindrical pellets were used, optimum points for Zn adsorption were Orhaneli fly ash (10 gr), bentonite (0%, in terms of fly ash, w/w) ve molass (0.25 ml) for the pellets are prepared by Orhaneli fly ash and Çatalağzı fly ash (10 gr), bentonite (1%, in terms of fly ash, w/w), molass (0.50 ml) for the pellets are prepared by Çatalağzı fly ash. Optimum points for Pb adsorption were Orhaneli fly ash (10 gr), bentonite (1%, in terms of fly ash, w/w) ve molass (0.50 ml) for the pellets are prepared by Orhaneli fly ash and Çatalağzı fly ash (10 gr), bentonite (1%, in terms of fly ash, w/w), molass (0.25 ml) for the pellets are prepared by Çatalağzı fly ash. In conclusion, it was seen that fly ashes which are the waste of thermal power plants, were pelletized with molass which is the waste of sugar industry and other binders by different methods and were used for adsorption of high metals from wastewater, so the wastes can be evaluated.

Key words: Fly ash, heavy metal, binder, pelletization, adsorption

1.1 Literatür Özeti

18. yüzyılın sonlarında başlayan endüstriyel devrim ve buna bağlı olarak insan nüfusunun hızla artması çevresel unsurlar üzerindeki baskıları arttırmış ve sonuç olarak çevre kirliliği kavramı ortaya çıkmıştır. Her geçen gün artan ve doğal yaşamı tehdit eden çevre kirliliğinin önlenmesi için atıkların kontrolü gerekmektedir. Özellikle de 20. yüzyılın ikinci yarısında yaşanan hızlı nüfus artışı ve ileri teknolojik gelişmeler sonucunda ortaya çıkan çevre kirliliği ekosisteminde bozulmasına sebep olmuş ve günümüzde önemli bir sorun haline almıştır. Nitekim ekosistemin bir bölümünü oluşturan ve canlı yaşamında önemli bir yere sahip olan su ortamı; kullanılmış sular ve diğer atıklar için alıcı ve uzaklaştırıcı bir ortam olarak düşünüldüğünde, ekosistem içinde hava ve toprağa oranla daha fazla kirlenmeye uğrayan kısım haline gelmiştir.

Son yılların önemli çevre sorunları arasında kabul edilen ağır metallerin atık sulara yaratmış olduğu kirlilik, tekstil endüstrisi, boya ve baskı endüstrisi, maden endüstrisi, elektro kaplama ve nükleer santraller gibi birçok endüstrinin atıklarının doğrudan tarım arazilerine veya akarsu ve göllere verilmesi sonucu oluşmaktadır. Canlılar üzerinde toksik etkilere sahip olan ağır metallerin atık sular içine karışması ve bu suların ağır metallerden giderilmemesi durumunda canlı hayatını ciddi tehlikelere sokacağı yapılan araştırmalar sonucunda kanıtlanmıştır.

Sulardan ağır metal iyonlarının giderilmesindeki en etkin ve düşük maliyetli yöntem, adsorpsiyondur. Adsorpsiyon bir faz içindeki iyon veya moleküllerin diğer bir faz

yüzeyinde birikmesidir. Genellikle atık sulardan ağır metallerin adsorplanmasında kullanılan adsorbanlar, killer, aktif karbon, jeller, alümina, silika, zeolitler ve reçinelerdir. Aktif karbonun atık sulardan ağır metal adsorplama kapasitesi yüksek olmasına rağmen pahalı oluşu nedeniyle fazla tercih edilmemektedir.

Nüfusun artması ve sanayileşmenin de ilerlemesi ile birlikte insanların refah düzeyleri artmış ancak buna paralel olarak enerji ihtiyaçları da artmıştır. Gün geçtikçe artan enerji talebini karşılamak amacıyla çeşitli kaynaklar kullanılmaya başlanmıştır. Dünya'da ve ülkemizde artan enerji talebini karşılamak amacıyla termik santraller kurulmuştur. Termik santrallerde yakıt olarak genelde pulverize kömür kullanılmaktadır. Kurulan termik santraller enerji ihtiyacını karşılarken bir yandan da enerji üretmek amacıyla kullanılan yakıtların yanması sonucu bir takım atıklar oluşmakta ve bunlar da çevre kirliliğine sebebiyet vermektedir. Termik santrallerde toz halinde veya öğütülmüş taş kömürü veya linyit kömürünün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucu oluşan ve baca gazları ile sürüklenen çok ince partiküllü silis ve alimünosilisi toz halindeki atıklara uçucu kül denilmektedir. Ülkemizde termik santrallerde elektrik enerjisi üretimi sırasında büyük miktarlarda uçucu kül ortaya çıkmaktadır. Bu külleri toplamak veya atmak büyük güçlükler doğurmakta ve çevre açısından sorun kaynağı olmaktadır. Çevre kirliliğini önlemek ve aynı zamanda ekonomik bir hammadde olarak değerlendirilmek amacıyla, termik santral uçucu küllerinin çeşitli alanlarda değerlendirilmesine çalışılmaktadır. Yapılan araştırmalar bu küllerin başta inşaat sektörü olmak üzere endüstride birçok alanda kullanılabileceği ortaya koymuştur.

Son yıllarda atık sulardan ağır metallerin uzaklaştırılması için araştırılan adsorbanların başında uçucu kül gelmektedir. Uçucu kül birim hacim başına büyük bir özgül yüzey alanına ve çok geniş bir tane dağılımına sahiptir. Uçucu küllerin karbon içeriği %1-60 arasında değişmektedir. Uçucu külün yapısındaki karbon miktarı arttıkça adsorplama kapasitesi de artmaktadır. Uçucu külün içerisindeki silika, alüminyum, kalsiyum, magnezyum ve toprak alkali maddeleri su içinde ya da derişik asit çözeltisi içinde serbest hale gelirler. Böylece ham uçucu kül ile elde edilen çözeltiler su ve atık su arıtma işlemlerinde ya da atık sulardaki ağır metallerin adsorplanmasında önemli rol

oyunmaktadır. Özellikle de adsorpsiyon işlemleri ile ağır metallerin gideriminde ticari kullanımı yaygın ve pahalı olan aktif karbon gibi adsorban maddelerin yerine kullanılabilirler.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı, termik santral atıkları olan uçucu küllerin, bentonit, üleksit ve melas gibi bağlayıcılarla peletlenmesi ve atık sulardan ağır metallerin (Zn, Pb) adsorpsiyonunda adsorban malzeme olarak kullanmaktır. Ayrıca, sanayi atıkları olan uçucu kül ve melas kullanılarak, atık sudan ağır metal iyonlarının adsorplanması yoluyla hem atık suyun temizlenmesi hem de atıkların değerlendirilmesi için alternatif yöntemler bulmak amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Yapılan literatür taramalarında; uçucu külün, atık su arıtımında adsorban malzeme olarak kullanılabileceğine dair çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmada; uçucu külün yüzey alanını artırmak amacıyla çeşitli bağlayıcılarla peletlenmesi ve optimum adsorpsiyon verimleri belirlenerek çeşitli deney parametrelerinin adsorpsiyon verimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışmanın özgün yönleri; bir bor kaynağı olan üleksitin ve şeker sanayi atığı olan melasın, uçucu külde bağlayıcı olarak kullanılabilirliğinin araştırılması, küresel peletlere göre daha sağlam olan silindirik peletlerin atık sudan ağır metallerin adsorpsiyonunda kullanılabilirliğinin araştırılması şeklindedir.

BÖLÜM 2

SU KİRLİLİĞİ

Dünyada nüfusun artması ve endüstrinin gelişmesi ile suyun yerküre üzerindeki doğal yapısı istenilmeyen yönde bozulmaktadır. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'ne göre su kirliliğinin tanımı su kaynağının kimyasal, fiziksel, bakteriyolojik, radyoaktif ve ekolojik özelliklerinin olumsuz yönde değişmesi şeklinde gözlenen ve doğrudan veya dolaylı yoldan biyolojik kaynaklarda, insan sağlığında, balıkçılıkta, su kalitesinde ve suyun diğer amaçlarla kullanılmasında engelleyici bozulmalar yaratacak madde veya enerji atıklarının boşaltılması olarak tanımlanmaktadır [1].

Sular fiziksel, kimyasal veya biyolojik kirlilik gösterebilir. Suyun fiziksel özelliklerinin değişmesi (renk, koku, tat, saflık vs.) fiziksel kirliliğe neden olurken, ağır metaller ve inorganik artıklar suda kimyasal kirlilik yapar. Organik atıkların etkisiyle üreyen alg, küfler ve bakterilerle de biyolojik olarak kirlenir.

Su kaynaklarının kirlenmesi sorununun ortaya çıkmasıyla bütün ülkeler, söz konusu kirlenmeyi önlemek veya en az düzeye indirmek amacıyla endüstrilere bazı yükümlülükler getiren kanun ve yönetmelikleri uygulamaya koymuşlardır. Ülkemizde de çevre kirlenmesi sorunu son yıllarda kendini hissettirmeye başlamıştır. Dünyada olduğu gibi Türkiye'de de su kaynaklarına ihtiyaç giderek artarken, sınırlı olan kaynaklar üzerindeki olumsuz çevre baskıları da ne yazık ki giderek artmaktadır. Teknolojik gelişmeler maalesef beraberinde çeşitli çevre sorunlarını da getirmektedir. İçme ve kullanma suyu temin edilen baraj ve göllerimiz, yerleşimden kaynaklanan yoğun yapılaşma baskısı altındadır. Kıta içi su kaynaklarımızdan göllerimiz, nehirlerimiz ve

yeraltı sularımız ile denizlerimiz aşırı gübreleme ve bilinçsiz kullanılan zirai mücadele ilaçlarından olumsuz etkilenmektedir. Günümüzde tüm hastalıkların % 80'i ve ölümlerin üçte biri kirli sulardan kaynaklanmaktadır [2].

Su her kullanım alanı için o amaca uygun olmalıdır. Örnek olarak içme suyu toksik elementler, mikroorganizmalar ve mikroplar içermemeli; içerisinde fenol, organik klor bileşikleri gibi maddeler, nitrit, nitrat, amonyum, sülfür gibi anyonlar bulunmamalıdır, buna karşılık içinde çözülmüş oksijen, alkali ve toprak alkali elementleri iyonlarından az miktarda bulunmalıdır. Her bir kullanım alanı için sularda aranan özellikler o kullanım alanı için su kriteri olarak belirlenmiştir [3].

ATIKSULARIN ÖZELLİKLERİ, SINIFLANDIRILMASI VE ARITILMASI

Atık sular, suyun evlerde, sanayide ve ticari faaliyetlerde kullanılması sonucu kirlenmesiyle oluşur. Oluşan bu atık suya sızıntı suyu, yüzeysel sular ve yağmur suları karışabilir. Eğer herhangi bir işleme tabi tutulmamış sıvı atıklar doğaya bırakılırsa, içerdikleri organik maddelerin ayrışması sonucu ortaya kötü kokulu gazlar çıkar. Ayrıca arıtılmamış atık su bünyesinde; hastalık yapan mikroorganizmalar (patojenler), besi maddeleri (azot, fosfor) ve tehlikeli maddeler de içermektedir. Bu nedenle atık suyun arıtılarak bu maddelerin giderilmesi veya azaltılması gerekir. Atık suların akıtıldığı ortam herhangi bir akarsu, göl veya deniz olabilir. Alıcı ortamın kirlenmesine neden olabilecek kaynaklar oldukça fazladır. Bu kirletici kaynaklar:

- Endüstrilerden Atılan Atık Sular
- Yerleşim Merkezlerinden Atılan Evsel Atık Sular
- Yerleşim Merkezlerinden Kaynaklanan Yağmur Suları
- Yaygın Kirletici Kaynaklar

Doğal çevrenin korunmasına yönelik bir faaliyet olan atık su arıtmada hangi kirleticilerin hangi seviyeye kadar giderileceği konusu havzanın, yörenin, deşarj edilecek yüzeysel suyun durumuna göre farklılık gösterir. Ülkemizde tüm yörelerde ayırım yapılmadan 'Su Kirliliği ve Kontrol Yönetmeliği'ndeki standartlar geçerlidir.

3.1 Atıksuların Özellikleri

Atık su için gerekli arıtma derecesinin tespitinde, en uygun arıtma metodunun seçilmesinde ve kullanım imkanların araştırılmasında atık suyun miktarı kadar özelliklerinin de bilinmesi gerekir. Kanalizasyon sistemi ve nüfus yoğunluğu bu suyun özelliklerini etkiler.

Atık suyun kirliliği genel olarak toplam azot, toplam fosfor, askıda katı madde, biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ) , kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) gibi parametrelerin değerlerine bağlı olarak belirlenir. Koliform bakteri sayısı ise yüzeysel sularda özellikle içme suyu tesisleri ve plaj yerleri civarında önemli bir kirlilik ölççeği olarak kullanılır. Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği'nde atık suların deşarj kriterleri verilmiştir. Bir arıtma tesisinden geçen sudan alınan numunelerin analizi tesisin kontrolüne ve işletilmesine yardımcı olur. Atık sular % 99 oranında organik ve inorganik maddeleri, % 1 oranında da yabancı maddeleri içerir. Esas olarak atık suya kirlilik özelliğini veren % 1 oranında bulunan bu yabancı maddelerdir. Atık su içindeki maddeler kısmen organik, kısmen inorganiktir. Özellikle organik maddelerin kontrol edilmeyen şartlar altında biyolojik ve kimyasal olarak ayrışması verildikleri yüzeysel suların kullanılmasını tehlikeli hale sokar ve ekolojik dengeyi bozar [4].

Yağmur suları dışında atık suları kaynağına göre üç grup altında incelemek mümkündür:

- Evsel atıksular
- Sızıntı suları
- Endüstriyel atıksular

3.1.1 Evsel Atıksular

İçme suyu sistemiyle evlere verilen sular çeşitli şekillerde kullanıldıktan sonra kanalizasyon sistemi ile uzaklaştırılır.

Evsel atık suyun önemli bir miktarı insan artıklarından, mutfak suyu, sebze ve yiyecek artıklarından meydana gelmektedir. Evsel atık suyun miktarı ve özellikleri daha çok insanların yaşantılarına bağlıdır. Avrupa'da ortalama günlük su tüketimi 200 lt/N.gün olarak alınmaktadır. Kuzey Amerika'da ve İsviçre'de 450-600 lt/N.gün, Almanya'da

endüstriye sahip büyük şehirlerde 200-350 lt/N.gün olarak kabul edilmektedir. Türkiye’de ise 100-250 lt/N.gün değerleri esas alınmaktadır.

Evsel atık su bünyesinde çok sayıda farklı madde bulunmaktadır. Her kademede atık suyun karakterinin belirlenmesi için çeşitli parametrelerin ölçülmesi gerekir [5]. Bunların belirlenebilmesi için fiziksel, kimyasal, biyolojik ve bakteriyolojik deney ve yöntemlerden faydalanılır.

3.1.2 Sızıntı Suları

Yer altı suyunun yüksekliğine ve kanal şebekesinin kalitesine bağlı olarak bir miktar yer altı suyu kanalizasyona girerek arıtma tesisine gelir. Genel olarak sızıntı suyu temiz olarak kabul edilir. Sızma debisi farklı şekillerde hesaplanabilir:

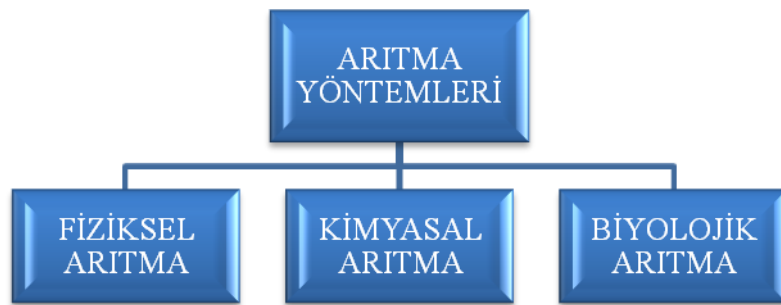
- Oluşan atık su debisinin % 50-% 100 gibi bir oranı sızma debisi olarak ilave edilir.
- Atık suyun toplandığı alanın birim hektar değeri başına 0,1-0,2 l/sn.ha miktarında bir sızma debisi ilave edilir.
- Kanal uzunluğu başına 0,8 l/sn.km sızma debisi ilave edilir.

3.1.3 Endüstriyel Kaynaklı Atıksular

Su kirliliğinin en önemli nedenleri; endüstriyel faaliyetler sonrasında açığa çıkan atık suların herhangi bir işlemde geçirilmeden alıcı ortamlara verilmesidir. Bu atık suların içerdikleri çeşitli ağır metaller, tuzlar, pestisitler ve deterjanlar, sularda kimyasal ve fiziksel değişikliklere neden olur. Endüstrilerin çıkardığı atıklar, çevredeki tarım arazilerini etkilemekte, ormanları tahrip etmekte, mevcut ve potansiyel yeraltı ve yerüstü su kaynakları kirlendiğinden, bu kaynakların içme ve sulama amacıyla kullanım olanakları azalmaktadır. Tesislerin etki alanı içindeki tarım işletmelerinde kirliliğe, toprakta iz element ve ağır metal birikimine, yetiştirilen ürünlerin verim ve kalitelerinde kayıplara, yetiştirilebilecek ürün sayısının azalmasına, yetiştirilen ürünlerde bazı mikro besin maddelerinin toksik düzeylere ulaşmasına ve tarım arazilerinin değerlerinin düşmesine neden olabilmektedir. Sanayinin neden olduğu olumsuzluğa bağlı olarak üreticilerin geliri ve bireylerin sağlığı ve mal varlıkları olumsuz etkilenmektedir [6].

3.2 Atıksuların Arıtılması

Atık su bünyesinde kirliliğe neden olan yabancı maddelerin, çeşitli yöntemlerle atık sulardan giderimi mümkündür. Tane boyutuna bağlı olarak çöktürülebilir, kolloidal yapısından dolayı askıda tutulabilir ya da çözündürülerek uzaklaştırılabilir. Atık su arıtımında uygulanan yöntemleri 3 ana grupta toplamak mümkündür. Bunlardan fiziksel arıtmada, flotasyon işlemi ile yüzebilen ya da çöktürme işlemiyle çöktürülebilen tanecikler ayrılır; kimyasal arıtmada çözülmüş ya da koloidal boyuttaki tanecikler pıhtılaştırılıp yumaklaştırılarak çökebilir hale getirilir; biyolojik arıtmada ise çözülmüş maddeler kısmen biyolojik kütlelerin bir araya gelerek oluşturduğu kolay çökebilir yumaklara, kısmen de mikroorganizmaların enerji ihtiyaçları için yaptıkları solunum sırasında çıkan gazlara ve diğer stabilize olmuş ürünlere dönüşebilmektedir. Atık suların kalitesini arttırmak ve kimyasal ve biyolojik yöntemlerle giderilemeyen kirliliğe neden olan maddeleri uzaklaştırmak için ileri arıtma teknikleri uygulanır. Atık su arıtımında maliyeti azaltmak, maksimum verimi elde etmek amacıyla kimyasal ve biyolojik işlemlerden önce atık su, fiziksel (mekanik) işlemlere tabi tutulur. Mekanik arıtma olarak isimlendirilen ve genellikle ızgara, kum tutucu ve ön çökeltme ünitelerinden meydana gelen ön işlemlerden sonra, biyolojik ve/veya kimyasal arıtma uygulanabilir. Biyolojik ya da kimyasal arıtmada oluşan yumaklar daha sonrasında mekanik işlemlerle uzaklaştırılır [7].



Şekil 3. 1 Arıtma Yöntemleri

3.2.1 Fiziksel Arıtma Yöntemleri

Atık su içerisindeki kirletici maddelerin fiziksel işlemlerle atık sudan alınması amacı ile kullanılan proseslerdir. Uygulamaları; ızgaralar, elekler, kum tutucular, yüzdürme sistemleri, çöktürme havuzları, dengeleme havuzlarıdır [8].

a)Izgaralar; atık sudan diğer arıtma ünitelerine gelecek büyük hacimli maddelerin yükünü hafifletmek amacı ile kullanılan arıtım üniteleridir. Izgara yapıları çubuk aralıklarına göre ince ve kaba ızgaralar; temizleme şekillerine göre ise, elle veya mekanik yolla temizlenen ızgaralar olarak sınıflandırılır. Izgaralarda tutulan maddeler arıtma tesisi sahasında depolanmazlar. Evsel katı artıklar ile birlikte yakma, depolama, kompostlaştırma ve benzeri yöntemlerle bertaraf edilir [9].

b)Elekler; atık su içerisindeki katı maddelerin tutulması ve arıtma sistemine giriş kirlilik yüklerinin azaltılması amacı ile kullanılırlar. Eleklerden toplanan atıklar da ızgara atıkları için uygulanan metotlarla bertaraf edilirler. Bu üniteler tutulan maddelerin boyutlarına göre kaba ve ince elekler olarak sınıflandırılır [8].

c)Kum tutucular; atık su içerisinde bulunan kum, çakıl vb. ayrışmayan maddeleri sudan ayırarak makine ve teçhizatın aşınmasını önlemek, çöktürme havuzlarında kum ve çakıl birikiminin önüne geçmek amacı ile kullanılırlar. Kum tutucularda toplanan kum ve çakıl, büyük tesislerde basınçlı hava ile çalışan pompalar veya bantlı, kovalı ve helezonlu mekanizmalarla sürekli olarak, küçük tesislerde ise elek ile zaman zaman temizlenir [8].

d)Yüzdürme sistemleri; yüzdürme işlemi, çöktürme işleminin tersidir ve sudan daha düşük özgül ağırlığa sahip taneciklerin yükselmesi esasına dayanır. Yüzdürme sistemleri, atık su içerisinde bulunan yağ, sabun, gres, ahşap parçaları gibi sudan hafif maddeleri tutmak için kullanılırlar [8].

e)Çöktürme havuzları; sudan daha fazla yoğunluğa sahip katı maddelerin durağan koşullarda yerçekimi etkisi ile çöktürülerek uzaklaştırılması amacı ile kullanılırlar. Çöktürme havuzları, ön çöktürme veya biyolojik ve kimyasal arıtım işlemi ardından son çöktürme amacı ile kullanılabilirler [9].

f)Dengeleme havuzları; atık suyun debi ve kirlilik yüklerinin dengelenmesi amacı ile kullanılırlar [8].

3.2.2 Kimyasal Arıtma Yöntemleri

Kimyasal arıtma sistemleri, kirliliğe neden olan suda çözünmüş veya askıda veya koloidal halde bulunan maddelerin fiziksel durumunu değiştirerek çökelmelerini sağlamak üzere uygulanan arıtma prosesleridir. Kimyasal arıtma işleminde, uygun pH değerinde atık suya kimyasal maddeler (koagülant, polielektrolit vb.) ilave edilmesi sonucu, çöktürülmek istenen maddeler çökeltilerek çamur halinde sudan ayrılır. Su arıtımında kimyasal çöktürme, sertlik gideriminde kullanılan bir işlemdir. Genelde hidroksit ve karbonat bileşiklerinin sudaki çözünürlüğü oldukça düşüktür. Dolayısıyla giderilmek istenen metal, hidroksit veya karbonat bileşiği haline dönüştürülerek su ortamından uzaklaştırılabilir. Yumuşatma işleminde ise, sertliğe yol açan kalsiyum ve magnezyum gibi iki değerlikli katyonlar da kimyasal çöktürme işleminde karbonat ve hidroksit bileşiklerine dönüştürülerek su ortamından uzaklaştırılırlar. Sertlik giderimi ve ağır metal gideriminde kireç $[Ca(OH)_2]$ kullanılır. Sertlik gideriminde kirecin yanı sıra soda (Na_2CO_3) veya kostik soda (NaOH) kullanılabilir. Uygulamaları; nötralizasyon, flokülasyon ve koagülasyon işlemleridir [8].

a)Nötralizasyon; suyun pH değerinin ayarlanması işlemidir. Atık suların uygun pH değerinin ayarlanması amacıyla asit veya baz ilavesi yapılır [8].

b)Koagülasyon; koagülant maddelerin uygun pH'da atık suya ilave edilmesi ile atık sudaki koloidal ve askıda katı maddelerle birleşerek flok oluşturmaya hazır hale gelmesi işlemidir. Genellikle hızlı karıştırma ünitelerinde yapılır. Koagülasyon işlemi sonrasında oluşan koloidal partiküller ve kimyasal reaksiyon sonucu oluşan tanecikler çok küçük yumaklar halinde birleşirler [9].

c)Flokülasyon (yumaklaştırma); atık suyun uygun hızda karıştırılması sonucunda koagülasyon işlemi ile oluşturulmuş küçük taneciklerin, birbiriyle birleşmesi ve kolay çökebilecek flokların oluşturulması işlemidir. Arıtma verimini arttırmak amacıyla yumaklaştırmaya yardımcı maddeler ilave edilir. Kil, kalsit, polielektrolit, aktif silika, çeşitli alkali ve asitler koagülant maddeler olarak kullanılır. Yumaklaştırıcı (koagülant)

olarak en çok kullanılan kimyasal maddeler ise $Al_2(SO_4)_3$, $AlCl_3$, $Fe_2(SO_4)_3$, $FeCl_3$, CaO , $Ca(OH)_2$ olup, yardımcı madde olarak en fazla polimerler kullanılmaktadır. Kimyasal yumaklaştırma sonucunda oluşan yumakların çöktürülmesi için çökeltme havuzları kullanılır. Hızlı karıştırma, yavaş karıştırma ve çökeltme havuzları ayrı birimler olarak inşa edilebildiği gibi, bunların bir arada yapıldığı bileşik sistemler de mevcuttur [8].

3.2.3 Biyolojik Arıtma Yöntemleri

Biyolojik arıtma atık suyun içinde bulunan askıda veya çözünmüş organik maddelerin bakterilerce parçalanması ve çökebilen biyolojik floklarla sıvının içinde kalan veya gaz olarak atmosfere kaçan sabit inorganik bileşiklere dönüşmesidir. Biyolojik arıtmanın esası organik kirleticilerin doğada yok edilmeleri için yer alan biyoflokülasyon ve mineralizasyon proseslerinin kontrolü ile çevrede ve optimum şartlarda tekrarlanmasıdır. Böylece doğadaki reaksiyonların hızlandırılarak daha kısa bir sürede, emniyetli ortamda gerçekleştirilmeleri sağlanmaktadır. Biyolojik arıtma yöntemleri aerobik ve anaerobik olmak üzere ikiye ayrılır. Arıtmanın oksijenli ortamda gerçekleştiği prosesler aerobik proseslerdir. Burada aktif çamur sistemleri, damlatmalı filtreler ve aerobik stabilizasyon havuzları gibi yöntemlerle arıtma sağlanır. Anaerobik prosesler ise havasız ortamda gerçekleştirilen arıtma prosesleridir. Uygulamaları; sürekli karışimli reaktörler, anaerobik filtreler ve akışkan yataklı sistemlerdir. Sürekli karışimli tank reaktörü, atık suların anaerobik arıtılmasında kullanılan ve katı resirkülasyonu olmayan sürekli karıştırılan tank tipidir. Anaerobik filtre; hareketsiz hücre reaktörlerinin bir uyarlaması olarak geliştirilmiştir. Anaerobik filtre tipinde kullanılan dolgu malzemesi biyofilm gelişmesi için gerekli olan temas yüzeyini sağlar. Akışkan yataklı sistemlerde ise yukarı akışlı reaktör, kısmen bir taşıyıcı malzeme (genellikle kum) ile doldurulur. Söz konusu reaktörde kum tanecikleri üzerinde biyofilm oluşturularak arıtmanın gerçekleştirilmesi amaçlanır [8].

3.2.4 İleri Atıksu Arıtma Yöntemleri

Klasik arıtma sistemleri çıkışında arıtılmış atık suda askıda kalan maddeler, çözünmüş maddeler ve organik maddeler vb. gibi kirleticilerin de arıtımı ilave arıtma sistemlerini gerektirmekte olup bu sistemlere ileri atık su arıtma sistemleri denmektedir.

Bu kirleticiler organik maddeler, askıda katı maddeler, inorganik maddeler (Ca, K, SO₄, fosfat, nitrat vb.) veya kompleks sentetik organik bileşikler olabilmektedir. Söz konusu bileşiklerin çoğunun çevre üzerine etkileri bilinmektedir. Son yıllarda özellikle zehirli bileşiklerin çevreye etkileri ile klasik ve ileri arıtma sistemlerindeki arıtım mekanizmaları araştırılmaktadır.

Bu arıtmada; azot ve fosfor giderme, filtrasyon, dezenfeksiyon, iyon değiştirme, ultrafiltrasyon, ters osmoz, kimyasal çöktürme ve adsorpsiyon yöntemleri uygulanır [8].

a) Azot ve fosfor giderme; Azot ve fosfor mikrobiyolojik büyümede besin olarak çok önemli bir işleve sahiptir. Azot su kaynaklarında istenmeyen alg kümelerine ve ötrofikasyona sebep olur. Bu nedenle azot ve fosfor bileşiklerinin alıcı ortama verilmeden önce giderimi büyük önem taşır. Toplam azot, organik, amonyak, nitrit ve nitrat azotundan oluşur. Azot gidermede, atıksuyun içerdiği amonyum iyonları azot bakterileri yardımıyla önce nitrite, sonra nitrata dönüştürülür (nitrifikasyon), daha sonra azot gazı halinde sudan uzaklaştırılır (denitrifikasyon).

Fosfor gidermede ise, kimyasal ve biyolojik yöntemler beraber ya da ayrı ayrı kullanılır. Fosfor bileşiklerinin kimyasal olarak arıtımında alüminyum tuzları, demir tuzları ya da kireç kullanılabilir. Bu işlemlerde fosfor, yüksek pH değerlerinde fosfat tuzları halinde çöktürülür. Fosfor bileşiklerinin biyolojik olarak arıtılmasında ise mikroorganizmalar kullanılır [8].

b) Filtrasyon; su kaynağından gelen veya arıtma işlemleri sırasında oluşan kil ve silt taneleri, mikroorganizmalar, kolloid ve çöken humik maddeler, bitki çürümesiyle oluşan parçacıklar, suyun yumuşatılmasında kullanılan kalsiyum karbonat ve magnezyum hidroksit çöktürücüleri gibi askıda katı parçacıkların gideriminde yaygın olarak kullanılan temel işlemlerden birisidir. Yaygın olarak kullanılan granül filtre malzemeleri; kum, silis ve antrasit kömürüdür [8].

c) Dezenfeksiyon; dezenfeksiyonun su arıtımındaki tanımı, “suda bulunan organizmaların, bu suyun kullanımı sonrasında herhangi bir hastalığa neden olmayacakları düzeye kadar azaltılması”dır. Su arıtımında kullanılan başlıca dezenfektanlar; klor (gaz, sodyum ve kalsiyum hipoklorit), kloraminler, klordioksit ve ozondur. Dezenfeksiyon işlemi ile sudan giderilmesi istenen organizmalar; bakteri, spor, virüs, sist ve protozoa (larvalar, kurtçuklar, vb.) içerir [8].

d) İyon değiş-tirme; iyonların çözeltiden katı bir yüzeye ya da katı bir yüzeyden çözeltiliye transfer edildiği fiziksel ve kimyasal bir işlemdir. Bu işlem, temelde çözelti içerisindeki iyonların katı bir yüzeyde elektrostatik güçlerle tutulan benzer yüklü iyonlarla değiştirilmesi esasına dayanır. Su arıtımında yaygın olarak sertlik giderimi amacıyla kullanılır. İyon değiş-tirme yumuşatmanın yanı sıra, baryum, arsenik, krom, flor, nitrat, radyum ve uranyum gibi zehirli veya radyoaktif metallerin giderilmesinde de sıkça kullanılır [8].

e) Ters osmoz; suyun içindeki istenmeyen tüm mineralleri sudan ayıran ve saf su ve içme suyu teminine yönelik olarak kullanılan membran filtrasyon prosesinin adıdır. Bu sistemler çapraz akışlı olarak çalışırlar [8].

f) Ultrafiltrasyon; metodu, çözünmüş ve kolloidal maddelerin uzaklaştırılmasında yarı geçirgen membranların kullanıldığı basınç sürüklemeli membran prosesleridir. Bu yöntemi ters osmoz sistemlerinden ayıran özellik daha düşük basınç sürüklemeli olmalarıdır [8].

g) Adsorpsiyon; Atık sularda bulunan, diğer arıtma yöntemleri ile arıtımı güç olan kimyasal maddelerin gözenekli katı madde yüzeyine kimyasal ve fiziksel bağlarla tutunma işlemine adsorpsiyon denir. İstenilen özellikte su elde etmek amacıyla adsorpsiyon işlemi ara kademelerde uygulanabildiği gibi, biyolojik ve kimyasal arıtmadan sonra da uygulanabilir. Su ve atık su işlemlerinde kullanılan adsorpsiyon tipi sıvı–katı adsorpsiyondur [8].

AĞIR METALLER

Toprakta, diğer elementlere göre düşük konsantrasyonda bulunan kimyasal elementlere iz elementler denir. Bunlar; iz metaller, iz inorganikler ve ağır metaller gibi isimler de alırlar. Diğer bir ifadeyle, atom numarası 20'den yüksek olan metallere ağır metal denilmektedir. Bu grup 70 kadar elementi içermekte, fakat ekolojik öneme sahip 20 kadar ağır metal bulunmaktadır. Bunlar: Arsenik (As), kadmiyum (Cd), gümüş (Ag), civa (Hg), mangan (Mn), demir (Fe), bakır (Cu), kobalt (Co), krom (Cr), kalay (Sn), kurşun (Pb), nikel (Ni), molibden (Mo), platin (Pt), toryum (Th), talyum (Ti), zirkonyum (Zr), tungsten(W), vanadyum (V), uranyum (U) ve çinko (Zn)'dur. Bunlardan Cd, Ni, Cu, Pb, Zn, Hg, Co, As ve Cr doğal çevrede birikme eğilimi gösteren daha çok toksik eğilimli elementlerdir. Toprakta bazı iz elementler tehlike sınırına yakın dozlarda sürekli birikirse bir süre sonra bitki ve daha sonra besin zinciri ile insan sağlığını tehdit eder boyutlara ulaşmaktadır [10].

4.1 Endüstriyel Kaynaklı Atık Sularda Ağır Metal Kirliliği

Endüstriyel atık sular içerdikleri ağır metal iyonları ile günümüzde en önemli çevre sorunlarından birini oluşturmaktadır. Ağır metal kirliliği içeren atık sular, BOI (Biyolojik Oksijen İhtiyacı) değeri düşük, genellikle asidik ve suda yaşayan ve suyu kullanan canlılar için çok zehirli, kendi kendine arıtmada etken olan mikroorganizmaları öldürücü nitelikte inorganik karakterli sulardır. Atık sularda ağır metal bulunması evsel nitelikli atık suların arıtma verimini etkilemekte ve oluşacak çamurun özellikle tarımsal amaçlı kullanımını imkansız hale getirmektedir. Bu nedenle ağır metal içeren endüstriyel atık suların kanalizasyon sistemine deşarjı büyük önem arz etmektedir [11].

Sularda bulunan organik kirleticiler, biyolojik bozunma sonrasında zaman içerisinde yok olabilirken, ağır metallerin biyolojik bozunma ile zararsız ürünlere dönüşmesi söz konusu değildir. Bu nedenle ağır metallerin çevre sularından uzaklaştırılması zorunludur. Ağır metaller çok düşük konsantrasyonlarda bile kuvvetli zehir etkisine sahiptirler ve kirlenmiş sularda metal, katyon, tuz ve kısmen anyon şeklinde bulunurlar. Bunlar hem kirlenmiş suların kendiliğinden temizlenmesini engelleyebilir, hem de bu suların arıtılmış halde sulamada kullanılmasını ve arıtma çamurlarının gübre olarak kullanılmasını sınırlandırabilirler [10].

Ağır metallerin çevreye yayılımında etken olan en önemli endüstriyel faaliyetler çimento üretimi, demir çelik sanayi, termik santraller, cam üretimi, çöp ve atık çamur yakma tesisleridir. Çizelge 4.1’de temel endüstrilerden atılan metal türleri genel olarak gösterilmiştir. Havaya atılan ağır metaller, sonuçta karaya ve buradan bitkiler ve besin zinciri yoluyla da hayvanlara ve insanlara ulaşırlar ve aynı zamanda hayvan ve insanlar tarafından havadan aerosol olarak veya toz halinde solunurlar. Ağır metaller endüstriyel atık suların içme sularına karışması yoluyla veya ağır metallerle kirlenmiş partiküllerin tozlaşması yoluyla da hayvan ve insanlar üzerinde etkin olurlar [12].

Çizelge 4. 1 Temel endüstrilerden atılan metal türleri [12]

Endüstri Adı	As	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Sn	Ti	Tl	V	Zn
Metal Alaşımı	■		■	■	■	■			■		■	■	■	■		■			■
Bateri ve Pil Üretimi		■						■	■		■	■		■					■
Tarım	■							■	■						■	■			
Seramik ve Cam Üretimi	■			■							■	■		■			■		
Kimya, İlaç, Dişçilik	■		■		■	■		■		■		■	■	■	■			■	■
Kaplama			■		■	■				■		■			■				■
Elektronik Cihaz Üretimi		■						■					■						
Gübre	■		■		■			■	■		■	■							■
Fosil Yakıt Yakımı	■		■					■				■	■	■					
Madencilik	■	■	■		■	■		■	■		■	■	■	■		■	■		■
Boya ve Pigment	■		■	■	■	■					■	■	■	■		■			■
Petrol Rafinasyonu	■			■	■	■					■	■						■	■
Makine						■	■					■							
Plastik Üretimi			■									■							
Kağıt Üretimi					■	■		■				■							
Tekstil	■				■	■													

4.2 Ağır Metallerin Etkileri

Ağır metaller, suda düşük konsantrasyonlarda bulunmaları durumunda bile çeşitli hastalıklara ve hatta ölümlere yol açabilmektedir. Eser miktarda bile toksik etki yapabilen bu ağır metaller arasında en önemlileri Ag, As, Be, Cd, Cr, Pb, Mn, Hg, Ni, Se, V ve Zn sayılabilir. Ağır metallerin önemli bir kirletici grubu oluşturdukları bilinmektedir. Bunların toksik ve kanserojen etkileri olduğu gibi, canlı organizmalarda birikme eğilimi (biyobirikim) de söz konusudur. Biyobirikim, zamanla biyolojik bir organizmada bir kimyasal konsantrasyonun, doğadaki konsantrasyonuyla karşılaştırıldığında artması demektir. Bileşiklerin, vücuda alınmaları ve depolanması, metabolize edilmelerinden veya atılmalarından daha hızlıdır [8].

Ağır metaller biyolojik proseslere katılma derecelerine göre yaşamsal ve yaşamsal olmayan olarak sınıflandırılırlar. Yaşamsal olarak tanımlananların organizma yapısında belirli bir konsantrasyonda bulunmaları gereklidir ve bu metaller biyolojik reaksiyonlara katıldıklarından dolayı düzenli olarak besinler yoluyla alınmaları zorunludur. Örneğin bakır hayvanlarda ve insanlarda kırmızı kan hücrelerinin ve birçok oksidasyon ve redüksiyon prosesinin vazgeçilmez parçasıdır. Yaşamsal olmayan ağır metaller ise düşük konsantrasyonlarda bile çeşitli sağlık problemlerine yol açabilmektedir. Bir ağır metalin yaşamsal olup olmadığı, alınan organizmaya göre değişir. Örneğin; nikel bitkiler için zararlı iken, hayvanlarda iz elementi olarak bulunması gerekir. Ağır metallerin canlı organizmaya etkisi, ağır metalin konsantrasyonu, alınan organizma ve metal iyonun yapısına (çözünürlük değeri, kimyasal yapısı, redoks ve kompleks oluşturma yeteneği, vücuda alınış şekli, çevrede bulunma sıklığı) bağlı olarak değişir [13].

Ağır metaller, zihinsel, nörolojik ve hormonal faaliyetleri etkilemektedir; dolayısıyla insan davranışları üzerinde olumsuz etki yaratır. Ağır metallerin çalışmasını etkilediği sistemler, kan ve dolaşım sistemi, toksin atma sistemleri (bağırsaklar, karaciğer, böbrekler, cilt), hormonal sistem, enerji üretim sistemleri, enzimler, mide, bağışıklık, sinir ve üretim sistemleri ve boşaltım sistemidir. Ağır metaller ayrıca, alerjik reaksiyonlara, genlerin değişime uğramasına, zararlı bakterilerin yanı sıra faydalı

bakterilerin de ölümüne ve doku hasarına neden olur. Ağır metallerin etkili olduğu sistemler ve zararları Çizelge 4.2’de gösterilmiştir [8].

Çizelge 4. 2 Ağır metallerin vücuttaki sistem ve organlar üzerine etkileri [8]

Ağır Metaller	Sistem/Organ	Ağır Metal Etkisi
Hg	Merkezi Sinir Sistemi	Beyinde tahribat
Pb ²⁺		Nörolojik fonksiyonların azalması
Hg, As	Üretim Sistemleri	Çocuk düşürme
Pb		Kan hücresi üretimi azalması
Cd	Kan Dolaşımı	Hafif anemi(kan eksikliği)
As		Anemi
As, Hg	Solunum Sistemi	Hücre aralarındaki lifli bağ dokunun artması
Se		Bronjit etkileri
Zn		Solunum yolları iltihabı
Cu		Akut zehirlenmeler
Hg, Cu	Beyin	Deformasyon
As	Karaciğer	Siroz
Cd	Akciğer	Kanser
As	Cilt	Kanser
Cd	İskelet	Osteomolozisi
Se		Dişlerde çürüme
Zn		Adele, eklem ağrıları
Cd, As	Kromozom	Kromozomal bozukluk

Pb, Cd, Mn, Co, Cr, Hg, Ni, Cu ve Zn gibi metaller doğada genellikle sülfür, oksit, karbonat, silikat ve mineralleri şeklinde bulunmaktadır. Suda çözünürlükleri oldukça düşüktür ve suda çok az bulunurlar. Bunların hepsi su hayvanları için toksiktir. Mangan ve demir, ağır metaller arasında en zehirsiz metaller sayılırlar [8].

4.2.1 Kurşun (Pb)

Biyosfere insan faaliyetlerine bağlı olarak önemli oranda yayılan kurşun, günümüzden 4000-5000 yıl öncesinde, antik uygarlıklar tarafından gümüş üretimi esnasında yan ürün olarak keşfedilmiş ve tarih boyunca kurşun üretimi ve kullanımı giderek artış göstermiştir [8]. Kurşun, yüksek yoğunluğa, düşük erime sıcaklığına, düşük ısı ve elektrik iletkenliğine sahip, yumuşak ve kolay şekillendirilebilen bir metaldir. Atom numarası 82 ve atom kütlesi 207.19 g/mol olan kurşunun doğada birçok kararlı izotopu bulunmaktadır. Bu izotoplar doğada bulunma miktarlarına göre 208Pb, 206Pb, 207Pb ve 204Pb şeklinde sıralanmaktadır. Parlak mavimsi gümüş bir renge sahip olan kurşun, havayla temasında oksitlenerek parlaklığını yitirmektedir [14]. Kurşun elementinin fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 4.3'de sunulmuştur.

Çizelge 4. 3 Kurşun elementinin fiziksel ve kimyasal özellikleri [15]

Atom numarası	82
Atom ağırlığı	207,20
Yoğunluğu (gr/cm ³)	11,34
Erime noktası (°C)	327,4
Kaynama noktası (°C)	1751
Kristal yapısı	Kübik
Elektrik iletkenliği (Ag100 kabul edilerek)	7,68
Buharlaşma entalpisi (kJ*mol ⁻¹)	178
Molar hacmi (mL/mol)	18,26

Yer kabuğunun kilogramında yaklaşık olarak 13,0 mg bulunan kurşun doğada en çok var olan ağır metallere birisidir. Doğada nadir olarak element halinde bulunan kurşunun en çok rastlanılan cevherleri; sülfür minerali olan galen (PbS), galenin oksitlenmiş ürünleri olan anglezit (PbSO₄) ve serüsit (PbCO₃) ile minimidir (Pb₃O₄).

Dünyada kurşun üretimi birinci ve ikinci kalite kurşun olmak üzere iki şekilde gerçekleşmektedir. Birinci kalite kurşunun, maden yataklarında genellikle diğer mineraller ve kayalarla beraber bulunan kurşunun zenginleştirilerek çıkartılması ile üretimi yapılırken, ikinci kalite kurşun başta akü, pil olmak üzere boru, levha gibi üretiminde kurşun kullanılmış hurda atıkların eritilerek geri kazanımı ile üretilmektedir [14].

Dünya kurşun rezervinin 100 milyon ton civarında olduğu ve bu rezervin büyük kısmının Avustralya, Kanada, ABD, Çin ve Kazakistan' da yer aldığı bilinmektedir. Dünyadaki toplam kurşun üretimi 6 milyon ton civarında olup bu üretimin yaklaşık 3 milyon tonu doğal minerallerden, geri kalanı ise hurda atıklardan yapılmaktadır. Günümüzde dünyada ikinci kalite kurşun üretimi artarken, birinci kalite kurşun üretimi yavaşta olsa bir azalma eğilimi içerisinde bulunmaktadır [14].

Türkiye' de daha çok Karadeniz Bölgesi, Keban ve Batı Anadolu' da bulunan kurşun rezervlerinin toplam 0,8 milyon ton civarında olduğu tahmin edilmektedir. Türkiye' de yıllık kurşun tüketimi 35 bin ton civarında olup, üretimin 10 bin tonu hurda atıklardan, 5-6 bin tonu hali hazırda bulunan kurşun rezervlerinden yapılmakta ve ihtiyaç açığı olan 15-20 bin tonu ise ithalat yoluyla karşılanmaktadır [14].

4.2.1.1 Kurşunun kullanım alanları

Kurşun, ilk çağlardan günümüze, aksesuarlardan alaşımlara kadar birçok kullanım alanı bulmuştur. Genellikle akü ve pil üretiminde, alaşımlarda ve lehimlerde kullanılan kurşun, yapı ve inşaat sektöründe, çatı sistemlerinde ve duvar kaplamalarında da kullanım alanı bulmaktadır. Ayrıca kurşunun düşük elektrik iletkenliği sayesinde telefon, telgraf ve elektrik kablolarının kaplanması için kullanımı oldukça sık olarak tercih edilmektedir. Radyasyondan korunmak amacıyla X-ray cihazlarının ve nükleer reaktörlerin kaplanması da kullanılan kurşunun organik bileşiklerinden tetraetil

kurşun ve tetrametil kurşun, sıklıkla vuruntuyu önlemek ve oktan sayısını artırmak gibi amaçlarla benzin katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Ancak benzin içerisinde bu amaçlarla kullanımı artık birçok ülkede durdurulmuştur. Petrol içerisine ilave edilen kurşun içerikli katkı maddelerinin ve gıda endüstrisindeki kurşun içerikli lehimlerin kullanımlarının azalması sebebiyle, hava ve yiyeceklerde bulunan kurşun derişiminde yüksek miktarda bir düşüş meydana gelmiştir.

Şehir sularının taşınması için kullanılan boruların yapımında da geçmişte genellikle kurşun tercih edilmiştir. Günümüzde polivinil klorür (PVC) boruların kullanımının yaygınlaşması ile kurşun boru kullanımı azalmış olsa da birçok eski binada halen kurşun borulara rastlanılmaktadır. Dolayısıyla içme suyu ile vücudumuza aldığımız kurşun, hava ve yiyeceklerle aldığımız oranla oldukça yüksek bir miktarı oluşturmaktadır. Başka bir ifade ile günümüzde insanların vücutlarına kurşun alımlarının en büyük sebebini içme suları oluşturmaktadır. Musluk sularında bulunan kurşun nadiren doğal kaynakların çözünmesinden, daha çok kurşun içerikli su tesisatlarından ve borulardan kaynaklanmaktadır. Su tesisatlarından çözünerek içme sularına karışan kurşunun miktarı; pH, sıcaklık, su sertliği, suyun boru içerisinde kalma süresi gibi birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir.

Kurşun; alaşım üretimi, lehim, mühimmat, elektrikli eşya üretimi, renkli televizyon tüpü yapımı, metal yüzey kaplama elemanı, akü ve pil üretimi, boru, levha üretimi, cam, sır, cila, seramik, vernik, boya ve PVC için katkı maddesi olarak birçok sanayi dalında kullanılmaktadır [14].

4.2.1.2 Kurşun kirliliğinin kaynakları ve etkileri

Kurşun, hava, su ve topraktan, solunumla veya besinlere karışarak, biyolojik sistemlere giren zehirleyici özelliklere sahip bir metal olup, yer kabuğunda eser miktarda bileşikler halinde bulunmaktadır. Bu bileşiklerin madencilik faaliyetleri ile çıkarılması, arıtımı, üretimi ve geri kazanımı sırasında açığa çıkan kurşun havada, suda ve toprak yüzeyinde birikmektedir. Kurşunun sanayide kullanımı ile açığa çıkan atık suların herhangi bir işlem uygulamadan çevreye bırakılması da doğal su kaynaklarındaki kurşun kirliliğini artırmaktadır. Özellikle kurşun madenleri ve metal endüstrileri, akü ve

pil fabrikaları, petrol rafinerileri ve boya endüstrisi atık sularında istenmeyen oranlarda kurşun kirliliği söz konusudur. Pil fabrikası atık sularında 5,66 mg/L, asidik kurşun maden drenajlarında 0,02-2,5 mg/L, tetraetil kurşun üreten fabrikaların atık sularında ise 120-150 mg/L organik, 66-85 mg/L inorganik kurşun kirliliğine rastlanmaktadır. Sanayide ayrıca kömür, yağ ve atıkların yakılması sonucu atmosfere yayılan kurşun küçük parçacıklar halinde uzun süre hareket edebilmekte ve yağmurla tekrar yeryüzüne inerek çevreye yayılmaktadır. Özellikle geçmiş yıllarda kurşunlu benzinlerin kullanılması atmosferdeki kurşun miktarını arttırmıştır. Oktan sayısını arttırmak için benzine katılan kurşunun yaklaşık olarak % 70-75' i inorganik kurşun bileşikleri olarak egzoz gazı ile % 1' i de tetraalkil kurşun şeklinde değişmeden atmosfere atılmaktadır. Kurşunlu benzin kullanan taşıtların egzoz gazından havaya atılan kurşun miktarı 2,0-10,0 mg/L arasında değişmektedir. Birçok ülkede petrol içerisinde vuruntu önleyici ve yağlama ajanı olarak kurşun bileşiklerinin kullanımının ve üretiminin durdurulması sayesinde kurşun kirlenici kaynaklarda belirgin bir azalma meydana gelmiştir [14].

İnorganik bir metal olan kurşun, içme suyunun dağıtımı için kullanılan borulardan ve lehimlerden suya karışmaktadır. Arıtma tesislerinden kurşun derişimi 0,005 mg/L' den daha düşük olarak çıkan içme suyu, kurşun borulardan geçerken oluşan korozyon etkisi ile 0,1 mg/L' nin üzerindeki kurşun derişimlerine sahip olabilmektedir. Borulardaki kurşunun korozyonu içerisinde bulunduğu ortamın özelliklerine göre değişirken, içme suyu gibi yumuşak ve asidik sularda çözünme miktarı oldukça yüksektir [14].

Kurşun özellikle doğmamış ve yeni doğmuş bebekler ile küçük çocukların sinir hücrelerinde ciddi hasarlar meydana getirmektedir. Plasenta içerisine gebeliğin 12. haftasından itibaren kolaylıkla sızan kurşun iyonları, hem merkezi hem de çevresel sinir sistemi üzerinde hasar bırakarak beyinsel ve fiziksel problemler yaratmaktadır. Sinir hücrelerinin tahribatını engellemek amacı ile belirlenen eşik seviyesi, yapılan çalışmalar doğrultusunda son 20 yıldır sürekli azalmakta ve kanda 0.03 mg/L' nin üzerinde bulunduğu özellikle çocukların zeka düzeylerinde gerileme meydana getirmektedir. Gençlerin beyinlerini ve sinir hücrelerini yaşlılara oranla daha fazla etkilemesinin en önemli sebebi, gençlerde kurşun iyonlarının beyin zarından geçişinin daha kolay ve hızlı olmasıdır. Küçük çocukların kurşunu absorplama oranı yaklaşık olarak yetişkinlerin

absorpladığının 4-5 katıdır, ayrıca yetişkinler vücutlarına aldıkları kurşunun % 90'ını atarlarken, çocuklar ve bebekler ancak % 30' unu atabilmektedirler. Zeka kaybı, öğrenme zorluğu ve sindirim sistemi fonksiyonlarında ciddi problemler oluşturan kurşun, beyin dokusuna oldukça hızlı bir şekilde nüfus edip hızla geniş bir alana yayılarak sinir hücrelerinde dönüşü olmayan dejenerasyonlara yol açmaktadır. Göz retinasındaki sinir hücrelerine zarar vererek fotoreseptörlerin dejenerasyonuna yol açmasının yanı sıra beyindeki kılcak damarlarda kanamaya neden olduğu da bilinmektedir.

Salgın hastalıklar üzerine yapılan çalışmalar, kurşun içeren yiyecek ve suya maruz kalan insanların sağlıklarının daha çabuk bozulduğuna işaret etmektedir. Kurşunun insan sağlığına verdiği zarar, kandaki kurşun derişimi ölçülerek belirlenmektedir. Kandaki kurşun derişimi 1,0-2,0 mg/L gibi oldukça yüksek seviyelere ulaştığında, sinir hücrelerini tahrip ederek geri dönüşü olmayan beyin hasarı oluşmasına neden olmaktadır. Kanındaki kurşun derişimi 0,4-0,6 mg/L civarında olan yetişkinlerde, beyin ve sindirim sisteminde aynı anda semptomlar görülebilmektedir. Kanlarındaki kurşun derişimi 0,8-1,0 mg/L olan çocuklarda, ciddi beyin hasarlarının yanı sıra ölümler meydana gelmektedir. Ölümcül olmayan 0,4-0,6 mg/L civarındaki kurşun derişimleri ise zeka geriliği ve birçok sinirsel rahatsızlıklara neden olmaktadır. Kandaki kurşun derişimi 0,05 mg/L gibi düşük seviyelerdeyken belirgin bir zehirlenme etkisi gözlemlenmemesine karşın, çocuklarda hemoglobin molekülünün proteinsiz kısmının biyosentezinde görevli ana enzimin aktivitesi engellenmektedir.

Kurşun vücuttaki kalsiyum metabolizmasına hem direkt hem de D vitamini metabolizmasının düzgün bir şekilde çalışmasını engelleyip dolaylı olarak müdahale etmektedir. Bu durum daha çok kanlarındaki kurşun seviyesi 0,12-1,2 mg/L civarında olan çocuklarda gözlemlenmektedir [14].

4.2.1.3 Kurşun kirliliği standartları

Dünya Sağlık Örgütü tarafından 1958 yılında belirlenmiş olan içme suyu için uluslararası standartlara göre, izin verilen en yüksek kurşun derişimi 0,1 mg/L' dir. Bu değer, 1963 yılında Dünya Sağlık Örgütü tarafından 0,05 mg/L' ye indirilmiştir. İçme suyundaki

kurşun derişimi için geçici olarak belirlenmiş olan 0,05 mg/L üst sınır değeri 1971 yılında tekrar 0,1 mg/L' ye çıkartılmıştır. 1971 yılında yapılan bu düzenlemenin sebepleri, birçok ülkede bu değerin kullanılmasının kabul edilmesi, özellikle kurşun boruların kullanıldığı ülkelerde 0,05 mg/L gibi çok düşük bir değere ulaşılmasının oldukça zor olması ve 0,1 mg/L üst sınır değerinin kullanıldığı 1958-1963 yılları arasındaki 5 yıl içerisinde içme sularındaki kurşundan kaynaklanan herhangi bir hastalığa rastlanılmamış olmasıdır [14].

1984 yılında, Dünya Sağlık Örgütü ile Gıda ve Tarım Örgütümün ortak çalışmaları sonucunda hazırladıkları İçme Suyu Kalite Yönetmelikleri'nin birinci baskısında sağlık açısından kurşun derişimi için önerilen üst sınır yeniden 0,05 mg/L' ye indirilmiştir. 1993 yılında yayınlanmış olan yönetmeliklerde ise kurşunun zehirleyici olduğu dikkate alınarak, içme suyundaki kurşun derişiminin üst sınır değeri 0,01 mg/L' ye indirilmiştir [14].

Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından belirlenmiş ve günümüzde halen geçerliliğini koruyan, içme sularındaki kurşun derişimi için üst sınır değer 0,01 mg/L olmasına karşın, endüstriyel atık sulardaki kurşun iyonu derişimi sektörlere göre farklılıklar göstermektedir. Kurşun derişiminin 0,1 mg/L' den fazla olması sularda yaşayan canlılar önemli bir tehdit oluşturmaktadır.

4.2.1.4 Atık sulardan kurşunun giderilmesinde uygulanan yöntemler

Birçok organik kirleticiden farklı olarak oldukça dayanıklı bir yapıya sahip olan ağır metallerin, biyolojik olarak zehirli etkilerinin giderilmesi mümkün değildir. Ağır metal olan kurşun iyonlarının sulu çözeltilerden uzaklaştırılmasında sıklıkla tercih edilen yöntemler:

- Kimyasal Çöktürme
- Membran filtrasyonu
- Biyolojik prosesler
- iyon değiştirme

•Adsorpsiyon

Ancak günümüzde halen atık suların içerisinde yer alan ağır metallerin güvenli, etkili ve ekonomik bir şekilde uzaklaştırılması için mevcut sistemler geliştirilmekte ve yeni prosesler tasarlanmaktadır [14].

4.2.2 Çinko (Zn)

Çinko, antik çağlardan beri bilinen ancak üretimi ve kullanılması tam anlamıyla olmadığından diğer metallerle karıştırılan bir elementtir. Metalin ilk tanıtımı, Strabos'un yazdığı Mysia adlı eserin Andriera adlı bölümünde "Sahte gümüş" (False silver, Yunanca: Pseudargyros) olarak yapılmıştır [16].

Çinko, bileşiklerinde +2 değerlikli olarak bulunur. Oluşturduğu bileşiklerde kovalent bağ yapar. Amonyak, amin, siyanür ve halojenler ile kompleks bileşikler oluşturur. Mineral asitlerinde H₂ çıkışıyla çözünür. Ancak nitrik asitte NO_x çıkışı olur. Dolayısıyla çinko özellikle toz halde çok etkili bir indirgeyicidir. Normal sıcaklıkta havada bırakılan metalin yüzeyinde koruyucu bir tabaka oluştuğundan bu sıcaklıkta halojenlere bile dayanıklıdır. HCl gazı çinkoyu çok çabuk korozyona uğratar. Toz çinkonun reaksiyona girme kabiliyeti oldukça fazladır. Fakat yanıcı değildir. Yüksek sıcaklıkta oksijen, klor ve kükürt gibi elementlerle şiddetle reaksiyona girer. Civa ile sert bir amalgam meydana getirir [17].Çinko elementine ait fiziksel ve kimyasal özellikler Çizelge 4.4'te verilmiştir.

1984 yılı verilerine göre dünya çinko rezervleri 290 milyon ton metal çinko civarındadır.1984-1993 yılları arasında 108.7 milyon ton dolayında yeni rezervler bulunmuştur. Aynı yıllar arasında 68.7 milyon ton üretim yapılmış olup, 1994 yılı çinko rezervleri 330 milyon ton metal çinko civarındadır. Şu anda Dünya'da bilinen çinko kaynakları 1.8 milyar ton civarında olup, ekonomik olmayan kaynaklarda dikkate alındığında bu miktar 4.4 milyar tona kadar çıkmaktadır [17].

Çizelge 4. 4 Zn elementinin fiziksel ve kimyasal özellikleri [16]

Atom numarası	30
Atom ağırlığı (g/mol)	65,409(4)
Yoğunluğu (gr/cm ³)	7,14
Erime noktası (°C)	419,53
Kaynama noktası (°C)	907
Kristal yapısı	Hegzagonal
Buharlaşma entalpisi (kJ*mol ⁻¹)	123,6

4.2.2.1 Çinkonun kullanım alanları

Günümüzde çinko; çelik, alüminyum ve bakırdan sonra Dünya’da miktar olarak yıllık tüketimi en fazla olan metaldir. Kimyasal yönden aktif olması ve diğer metallerle kolayca alaşım yapabilmesi nedeniyle çinko, endüstride birçok alaşımın ve bileşiğin üretiminde kullanılmaktadır. Çinko:

- * Korozyondan korunma amacıyla, çelik gibi diğer metallerin galvanize edilmesinde,
- * Pirinç, nikelli gümüş, değişik lehimler, alman gümüşü gibi alaşımların yapımında,
- * Genellikle otomotiv endüstrisinde döküm kalıplarında,
- * Pillerin gövdelerinin yapımında kullanılır.
- * Çinko oksit, sulu boyalarda beyaz pigment olarak ve lastik sanayiinde aktivatör olarak kullanılır. Reçetesiz satılabilen bazı merhemlerin bileşiminde bulunur ve ince bir tabaka halinde uygulandığında cildin su kaybetmesini önler. Yazın güneş, kışın da soğuk yanıklarına karşı koruyucudur. Bebeklerin bez bağlanan bölgelerinde çok az miktarda kullanılarak ciltte meydana gelebilecek kızarıklıklar önlenir. Yaşa bağlı göz hastalıklarının tedavisinde de kullanılır.
- * Çinko klorür, deodorantlarda ve ahşap koruyucu olarak kullanılır.
- * Çinko sülfür, karanlıkta parlayan pigment olarak saatlerin akrep ve yelkovanlarında kullanılır.

* Çinko metil, (Zn(CH₃)₂) pek çok organik maddenin sentezinde kullanılır.

* Çinko, pek çok günlük vitamin ve mineral ilaçlarının bileşenidir. Cildin ve kasların erken yaşlanmasını önleyen anti-oksidan özellikler taşıdığına inanılmaktadır [16].

4.2.3 Ağır Metallerin Sınır Değerleri

31 Aralık 2004 tarih ve 25687 sayılı Resmi Gazetede yayınlanan "Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği"nin amacı, ülkenin yer altı ve yer üstü su kaynakları potansiyelinin her türlü kullanım amacıyla korunmasını, en iyi biçimde kullanımının sağlanmasını ve su kirlenmesinin önlenmesini ve su kirliliğinin kontrolü esaslarının belirlenmesi için gerekli olan hukuki ve teknik esasları ortaya koymaktadır [1]. Bu yönetmelikte, kıta içi su kaynakları ile atık suların organik, inorganik, fiziksel ve kimyasal parametrelerin sınır değerleri verilmiştir. Karalarda bütün yapay ve doğal yeraltı ve yüzeysel sulara, denizle bağlantısı olan su kaynaklarında ise, tatlı su sınır noktasına kadar olan sulara kıta içi su kaynağı denilmektedir.

Bu sular kalitesine göre dört sınıfa ayrılmaktadır. Kıta içi yüzeysel suların kalitelerine göre yapılan sınıflama aşağıda verilmiştir:

Sınıf I : Yüksek kaliteli su,

Sınıf II : Az kirlenmiş su,

Sınıf III : Kirli su,

Sınıf IV : Çok kirlenmiş su.

Yukarıda belirtilen kalite sınıflarına karşılık gelen suların, aşağıdaki su kullanım alanları için uygun olduğu kabul edilir.

a) Sınıf I - Yüksek kaliteli su;

- 1) Yalnız dezenfeksiyon ile içme suyu temini,
- 2) Yeniden yapılanmaya yönelik amaçlar (yüzme vb.)
- 3) Alabalık üretimi,
- 4) Hayvan üretimi ve çiftlik ihtiyacı,

5) Diğer amaçlar.

b) Sınıf II - Az kirlenmiş su;

1) İleri veya uygun bir arıtma ile içme suyu temini,

2) Yeniden yapılanmaya yönelik amaçlar,

3) Alabalık dışında balık üretimi,

4) Teknik Usuller Tebliği'nde verilmiş olan sulama suyu kalite kriterlerini sağlamak şartıyla sulama suyu olarak,

5) Sınıf I dışındaki diğer bütün kullanımlar.

c) Sınıf III - Kirlenmiş su; gıda, tekstil gibi kaliteli su gerektiren endüstriler hariç olmak üzere uygun bir arıtmadan sonra endüstriyel su temininde kullanılabilir.

d) Sınıf IV - çok kirlenmiş su; Sınıf III için verilen kalite parametrelerinden daha düşük kalitede olan ve üst kalite sınıfına iyileştirilerek kullanılabilir. Yzeyssel sulardır.

Kıtai su kaynaklarının sınıflarına göre kalite kriterleri izelge 4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4. 5 Kita içi su kaynaklarının sınıflarına göre kalite kriterleri [1]

SU KALİTE PARAMETRELERİ	SU KALİTE SINIFLARI			
	I	II	III	IV
A) Fiziksel ve inorganik- kimyasal parametreler				
1) Sıcaklık (°C)	25	25	30	> 30
2) pH	6.5-8.5	6.5-8.5	6.0-9.0	6.0-9.0 dışında
3) Çözünmüş oksijen (mg O ₂ /L) ^a	8	6	3	< 3
4) Oksijen doygunluğu (%) ^a	90	70	40	< 40
5) Klorür iyonu (mg Cl ⁻ /L)	25	200	400b	> 400
6) Sülfat iyonu (mg SO ₄ ⁼ /L)	200	200	400	> 400
7) Amonyum azotu (mg NH ₄ ⁺ -N/L)	0.2c	1c	2c	> 2
8) Nitrit azotu (mg NO ₂ ⁻ -N/L)	0.002	0.01	0.05	> 0.05
9) Nitrat azotu (mg NO ₃ ⁻ -N/L)	5	10	20	> 20
10) Toplam fosfor (mg P/L)	0.02	0.16	0.65	> 0.65
11) Toplam çözünmüş madde (mg/L)	500	1500	5000	> 5000
12) Renk (Pt-Co birimi)	5	50	300	> 300
13) Sodyum (mg Na ⁺ /L)	125	125	250	> 250
B) Organik parametreler				
1) Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) (mg/L)	25	50	70	> 70
2) Biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ) (mg/L)	4	8	20	> 20
3) Toplam organik karbon (mg/L)	5	8	12	> 12

4) Toplam kjeldahl-azotu (mg/L)	0.5	1.5	5	> 5
5) Yağ ve gres (mg/L)	0.02	0.3	0.5	> 0.5
6) Metilen mavisi ile reaksiyon veren yüzey aktif maddeleri (MBAS) (mg/L)	0.05	0.2	1	>1.5
7) Fenolik maddeler (uçucu) (mg/L)	0.002	0.01	0.1	> 0.1
8) Mineral yağlar ve türevleri (mg/L)	0.02	0.1	0.5	> 0.5
9) Toplam pestisid (mg/L)	0.001	0.01	0.1	> 0.1
C) İnorganik kirlenme parametreleri ^d				
1) Civa ($\mu\text{g Hg/L}$)	0.1	0.5	2	> 2
2) Kadmiyum ($\mu\text{g Cd/L}$)	3	5	10	> 10
3) Kurşun ($\mu\text{g Pb/L}$)	10	20	50	> 50
4) Arsenik ($\mu\text{g As/L}$)	20	50	100	> 100
5) Bakır ($\mu\text{g Cu/L}$)	20	50	200	> 200
6) Krom (toplam) ($\mu\text{g Cr/L}$)	20	50	200	> 200
7) Krom ($\mu\text{g Cr}^{+6}/\text{L}$)	Ölçülmeyecek kadar az	20	50	> 50
8) Kobalt ($\mu\text{g Co/L}$)	10	20	200	> 200
9) Nikel ($\mu\text{g Ni/L}$)	20	50	200	> 200
10) Çinko ($\mu\text{g Zn/L}$)	200	500	2000	> 2000
11) Siyanür (toplam) ($\mu\text{g CN/L}$)	10	50	100	> 100
12) Florür ($\mu\text{g F}^{-}/\text{L}$)	1000	1500	2000	> 2000
13) Serbest klor ($\mu\text{g Cl}_2/\text{L}$)	10	10	50	> 50
14) Sülfür ($\mu\text{g S}^{-}/\text{L}$)	2	2	10	> 10

15) Demir ($\mu\text{g Fe/L}$)	300	1000	5000	> 5000
16) Mangan ($\mu\text{g Mn/L}$)	100	500	3000	> 3000
17) Bor ($\mu\text{g B/L}$)	1000 ^e	1000 ^e	1000 ^e	> 1000
18) Selenyum ($\mu\text{g Se/L}$)	10	10	20	> 20
19) Baryum ($\mu\text{g Ba/L}$)	1000	2000	2000	> 2000
20) Alüminyum (mg Al/L)	0.3	0.3	1	> 1
21) Radyoaktivite (Bq/L)				
Alfa-aktivitesi	0,5	5	5	> 5
beta-aktivitesi	1	10	10	> 10
D) Bakteriyolojik parametreler				
1) Fekal koliform(EMS/100 mL)	10	200	2000	> 2000
2) Toplam koliform (EMS/100 mL)	100	20000	100000	> 100000
<p>(a) Konsantrasyon veya doygunluk yüzdesi parametrelerinden sadece birisinin sağlanması yeterlidir.</p> <p>(b) Klorüre karşı hassas bitkilerin sulanmasında bu konsantrasyon limitini düşürmek gerekebilir.</p> <p>(c) pH değerine bağlı olarak serbest amonyak azotu konsantrasyonu 0.02 mg $\text{NH}_3\text{-N/L}$ değerini geçmemelidir.</p> <p>(d) Bu gruptaki kriterler parametreleri oluşturan kimyasal türlerin toplam konsantrasyonlarını vermektedir.</p> <p>(e) Bora karşı hassas bitkilerin sulanmasında kriteri 300 $\mu\text{g/L}$'ye kadar düşürmek gerekebilir.</p>				

ADSORPSİYON

Katı veya akışkanlar içinde moleküller her yönden çekildikleri için, bu çekim kuvvetleri dengededir. Oysa, fazlar arası yüzeyde, moleküllere etki eden çekim kuvvetleri farklılık göstermektedir. Bu yüzden malzemenin derişimi ara yüzeye yakın bölgede ara yüzeyi oluşturan fazlar içerisindeki yığın derişiminden farklıdır. Dolayısıyla katı yüzeylerine değmekte olan gazlar, sıvılar veya bunların içerisinde çözünmüş olan maddeler bu yüzeyler tarafından tutulur. Katı yüzeyindeki atom ve moleküllerin etkileşim kuvvetlerinden dolayı adsorpsiyon katı yüzeyinde meydana gelir. Yüzey tarafından tutunan, gaz veya sıvı olabilir. Adsorpsiyon, malzemelerin derişiminin ara yüzeyde (katı yüzeyinde) yığın derişimine göre artışı şeklinde tanımlanabilir [8].

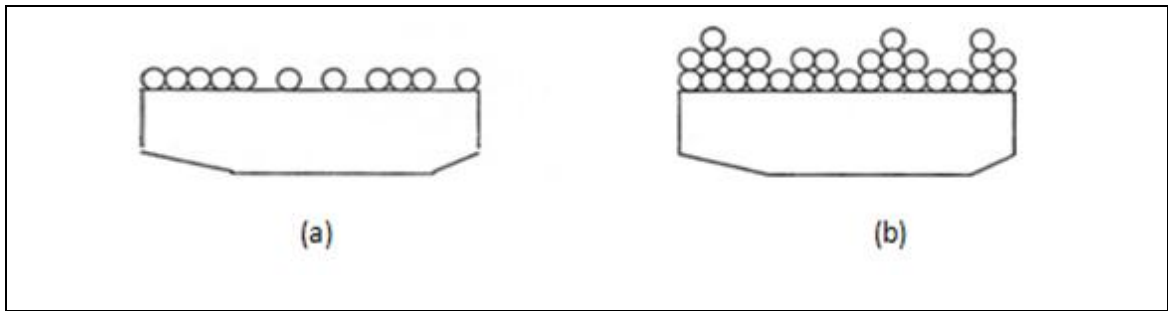
Birikim gösteren maddeye adsorbat, adsorplayan maddeye adsorban denilmektedir. Adsorpsiyon; sıvı-sıvı, sıvı-gaz, sıvı-katı ya da gaz- katı gibi iki faz arasında oluşur. Bu iki fazı ayıran yüzeyler “ara yüzey” olarak isimlendirilir [18].

İster granüler ister toz halinde olsun, katı bir adsorbanın düşük de olsa dış yüzeyinde bir adsorpsiyon kapasitesi vardır. Bütün sorbentler hacimce % 5-60 arasında mikro gözenek fraksiyonu içerir. Bu mikro gözeneklerin çapı 150 Å' den daha büyük ise mikro kristalize ve gözenekli yapıda; çap 5 Å kadar ise reçinemsî ve geçirgen yapıdadır. Çözünen ilk adsorban arasındaki moleküller arası çekim, gaz veya sıvı içerisindeki yabancı maddeleri adsorbanın yüzeyinde tutarak sıvının bu maddelerden arıtılmasını sağlar [19].

Adsorpsiyon sırasında adsorbat taşınımı üç aşamada meydana gelmektedir. Birinci aşamada kirletici adsorplayıcı sıvı fazdan partikül yüzeyine doğru hareketi gerçekleşir.

İkinci kademede kirletici adsorplayıcı partikülü çevreleyen film tabakasını geçerek partikül içine doğru taşınır. Son aşama ise kirletici adsorplayıcının gözeneklerinden geçerken tutunur [20].

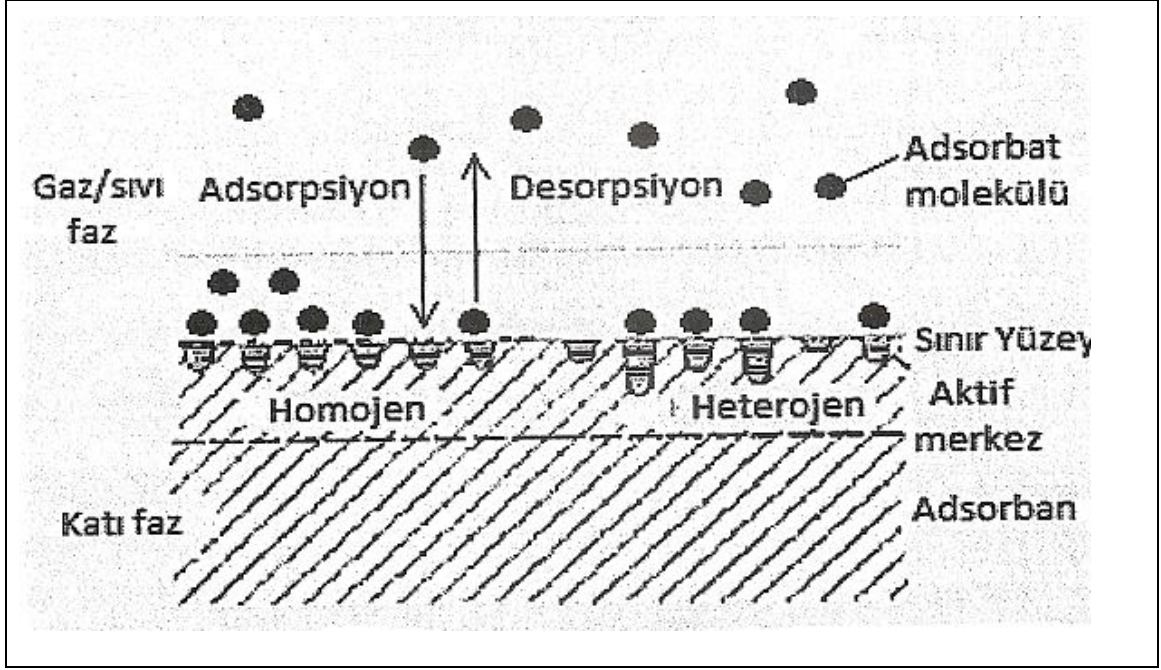
Adsorban ile doğrudan temas halinde olan adsorbat molekülleri yüzeyle fiziksel veya kimyasal bir bağ oluşturur. Adsorbat molekülleri yüzeyi tamamen kapladığında bir monotabaka oluşur. Bundan sonra adsorplanan diğer moleküller yüzeye halen zayıf bir etkileşim içerisinde olmakla beraber, ağırlıklı olarak birinci tabaka ile etkileşmektedir. Şekil 5.1’de tek tabakalı ve çoklu tabakalı adsorpsiyon şematik olarak gösterilmiştir [21].



Şekil 5. 1 (a) Tek Tabakada (Monomoleküler) Adsorpsiyon ve (b) Çoklu Tabakada (Multimoleküler) Adsorpsiyonun Şematik Gösterimi [21]

Çoklu tabaka adsorpsiyonunda, adsorban yüzeyinde pek çok adsorbat tabakası mevcutken, tek tabakada adsorpsiyonda, isminden de anlaşılacağı gibi, adsorbat molekülleri tek katman halinde yüzeye tutunmuştur. Çoklu tabaka adsorpsiyonu bir yoğuşma prosesidir ve adsorbat molekülleri arasında kuvvetli etkileşim bulunması sebebiyle gerçekleşir [21].

Şekil 5.2’te görüldüğü gibi herhangi bir maddenin bir fazdan diğer bir faza geçerek ikinci faz yüzeyinde birikmesi, başka bir ifade ile adsorbat atom, iyon ya da moleküllerinin, adsorban yüzeyinde yer alan aktif merkezler tutunması adsorpsiyon olarak adlandırılırken, tutunan adsorbatların yüzeyden ayrılması olayına ise desorpsiyon adı verilir [14].

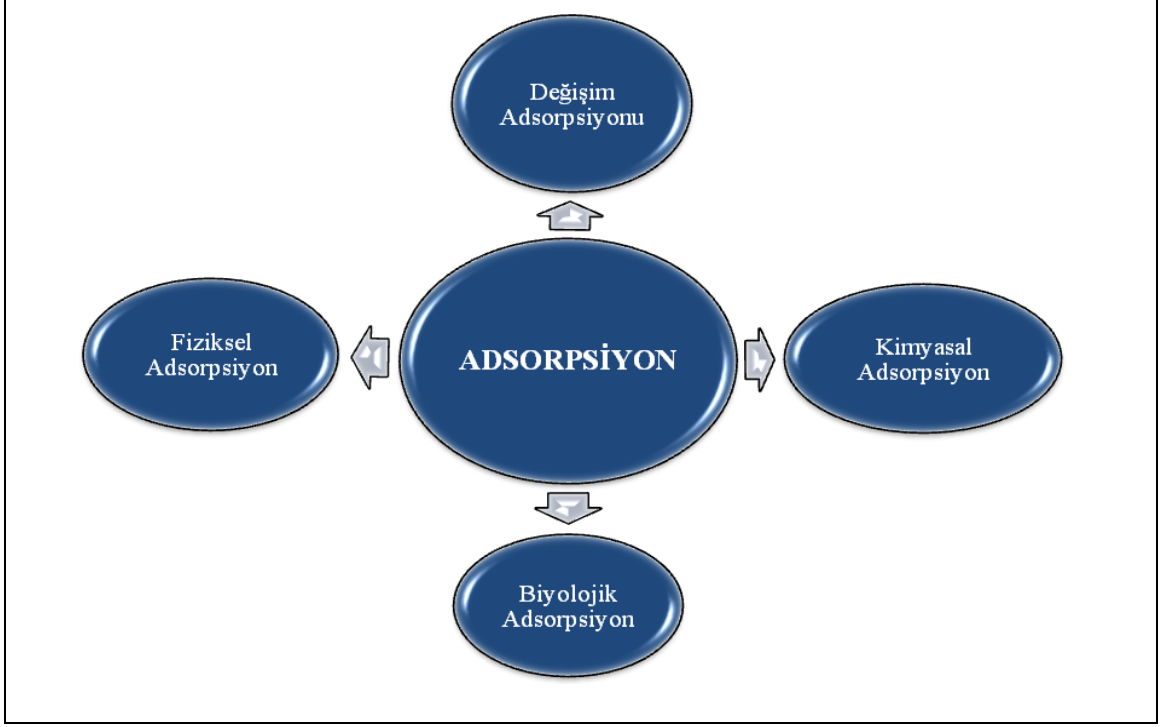


Şekil 5. 2 Kırtı faz üzerinde adsorpsiyon ve desorpsiyon işlemleri [14]

5.1 Adsorpsiyonun Nedenleri ve Tipleri

Verilen çözücü-sıvı-kırtı sistemi veya bunların kombinasyonu için bir sıvıdan kırtı üzerine adsorpsiyon olayı iki karakteristik özellikten biri sonucunda oluşur. Adsorpsiyonun gerçekleşmesi için en etkili kuvvet çözücüye bağılı olarak sıvının liyofobik (çözücü sevmeyen) karakterinin veya sıvının kırtıya olan yüksek eğiliminin bir sonucu olabilmektedir. Su ve atıksu arıtımda bu iki kuvvetin ortak etkisi gözlenir. Adsorpsiyonun bu iki öncelikli sebebinin her biri çok sayıdaki faktörden etkilenmektedir. Çözünmüş maddenin çözünürlük derecesi, iki etkili kuvvetin ilkinin şiddetinin belirlenmesinde en belirleyici faktördür. Madde ne kadar hidrofilik (çözücü sistemini seven) ise madde sulu çözültiden o kadar az adsorbe edilebilir. Bunun karşıtı olarak hidrofobik (suyu sevmeyen) bir madde sulu çözültiden o kadar iyi adsorbe edilecektir. Adsorpsiyon için ikinci etkili kuvvet sıvının kırtıya olan belirli bir eğilimi sonucu oluşur. Bu iki kuvvetten yola çıkarak adsorpsiyon tiplerine varılır. Bu tiplerin belirlenmesinde etkili olan faktörler, sıvının adsorbana doğru elektriksel çekimi, Van der Waals çekimi ve kimyasal yapısıdır. Buna göre adsorpsiyon tiplerini 4'e ayırabiliriz [22]:

- Değişim adsorpsiyonu
- Fiziksel adsorpsiyon
- Kimyasal adsorpsiyon
- Biyolojik adsorpsiyondur.



Şekil 5. 3 Adsorpsiyon türleri

5.1.1 Değişim Adsorpsiyonu

Değişim adsorpsiyonu, adsorbat ile yüzey arasındaki elektriksel çekim ile olmaktadır. İyon değişimi bu sınıfa dahil edilir. Burada, zıt elektrik yüklerine sahip olan adsorbat ile adsorban yüzeyinin birbirlerini çekmesi önem kazanmaktadır. Elektrik yükü fazla olan iyonlar ve küçük çaplı iyonlar daha iyi adsorbe olurlar [18].

5.1.2 Fiziksel Adsorpsiyon

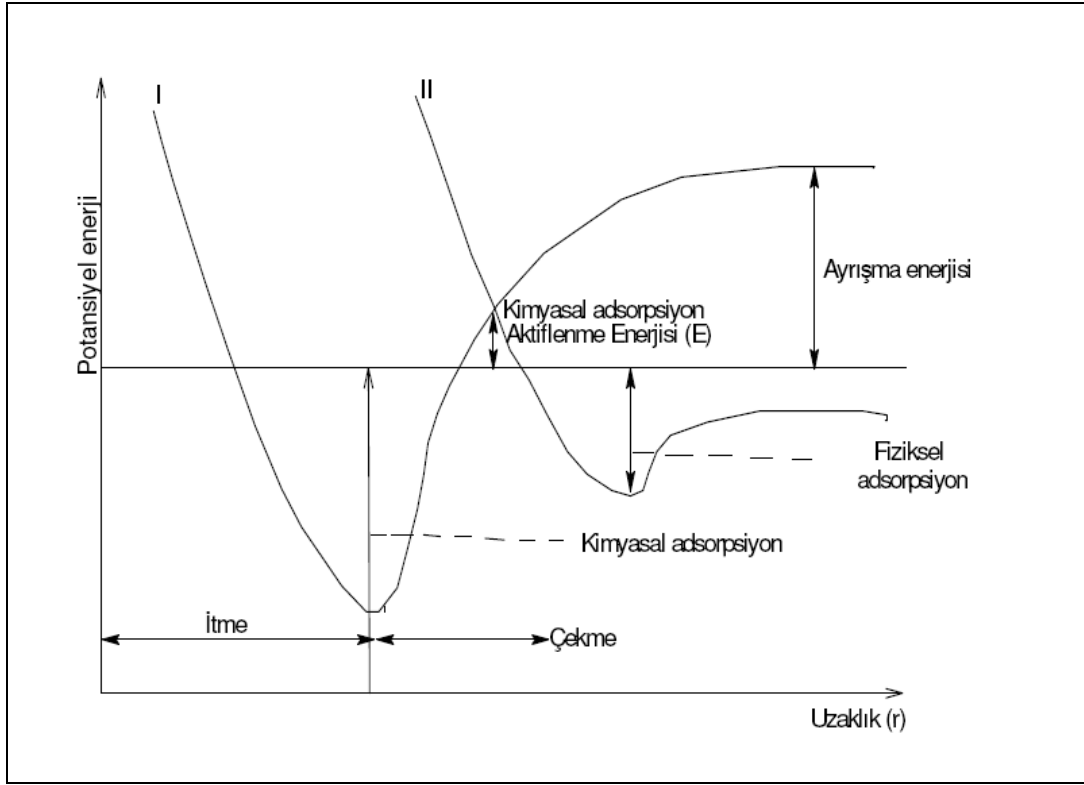
Fiziksel adsorpsiyonun moleküller arası düşük çekim gücünden veya Van Der Waals kuvvetlerinden dolayı meydana gelmektedir. Adsorbe olan molekül katı yüzeyinde belirli bir yere bağlanmamıştır, yüzey üzerinde hareketli bir durumdadır. Bununla birlikte, adsorbat adsorbanın yüzeyinde birikir ve gevşek bir tabaka oluşturur [15].

Fiziksel adsorpsiyon entalpisi, ısı kapasitesi bilinen bir numunenin sıcaklığındaki yükselme kaydedilmek suretiyle ölçülebilir. Tipik entalpi değerleri -20 kJ/mol aralığındadır. Bu küçük entalpi değişimi bağ kırılmasına yol açmaya yeterli değildir ve dolayısıyla fiziksel olarak adsorbe olmuş bir moleküle karşı gene de kendi kimliğini korur. Adsorblanan molekül arasında genellikle Van der Waals kuvvetleri oluşacağından, fiziksel adsorbisyona çoğunlukla adsorblanan maddenin çok tabakalı bir yapı oluşturması durumunda rastlanır. Fiziksel adsorbisyon genellikle düşük sıcaklıkta ve hızlı meydana gelir, olay geri dönüşümlüdür. Bu nedenle, gaz basıncı veya derişimi düşürülerek adsorblanan moleküller kolaylıkla yerlerinden oynanabilirler [23].

5.1.3 Kimyasal Adsorpsiyon

Adsorplanan taneciklerin, adsorplanan yüzeyine rastlayan atomlar tarafından kimyasal bağ ile tutunması ile oluşan adsorpsiyon şeklidir. Kimyasal bağın dayanıklılığı farklılıklar göstermektedir. Bununla beraber oluşan bağlar fiziksel adsorpsiyondaki bağlardan kuvvetlidir. Kimyasal adsorbisyona genellikle katı katalizörlü reaksiyon sistemlerinde rastlanır. Adsorpsiyon enerjisi adsorbe edilenin molü başına 20.000–100.000 kalori arasındadır. Olayın ekzotermik ve endotermik olmasına bağlı olarak bu değer, kimyasal reaksiyonlardaki reaksiyon ısısı ile yaklaşık aynı değerdedir. Kıyaslama yapıldığında; kimyasal adsorpsiyon yalnızca bir tabakalı olabildiği halde, fiziksel adsorpsiyon bir tabakalı veya çok tabakalı olabilir. Fiziksel adsorpsiyon genellikle tersinir bir olaydır. İşlem şartlarının (derişim, P, T vb.) değiştirilmesi ile desorpsiyon meydana gelirken kimyasal adsorpsiyon, kuvvetli bağ oluşumu söz konusu olduğu için tersinmez bir işlemdir. Fiziksel adsorpsiyon genellikle sıcaklık yükseltilmesi ile azaldığı halde, kimyasal adsorpsiyon, adsorpsiyonun ekzotermik veya endotermik olmasına ve aktivasyon enerjisine bağlı olarak sıcaklık yükseltilmesi ile artış veya azalma gösterebilir. Fiziksel adsorpsiyon (özellikle düşük derişim aralıklarında ayırmanın gerekli olduğu durumlarda) önemli endüstriyel ayırma işlemlerinin temelini oluşturmaktadır. Belirli katıların karışım içerisinde bazı malzemeleri seçici olarak adsorbe edebilme özelliği ayırma işleminin temel prensibidir. Su buharının havadan veya diğer gazlardan uzaklaştırılması, endüstriyel gaz karışımı içerisindeki karbondioksit, kükürtdioksit gibi

safsızlıkların giderilmesi, gaz ve sıvı karışımlardan istenmeyen kokuların uzaklaştırılması, şeker çözeltisinin renginin giderilmesi, organik sıvılar içerisinde çözünen suyun uzaklaştırılması endüstriyel uygulamalar arasında yer alan tipik örneklerdir. Kimyasal adsorpsiyon ile özellikle katı katalizör uygulamalarında önemli bir yer tutmaktadır [8]. Fiziksel ve kimyasal adsorpsiyon arasındaki fark Şekil 5.4’de potansiyel enerji eğrisiyle gösterilmiştir.



Şekil 5. 4 Fiziksel ve Kimyasal Adsorpsiyonun Potansiyel Enerji Eğrileri [23]

Şekil 5.4’de adsorplayıcı yüzey ile adsorplanan molekül arasındaki uzaklık gösterilmektedir. Bu eğrilerden I numaralı eğri kimyasal adsorpsiyon, II numaralı eğri ise fiziksel adsorpsiyonu göstermektedir. I ve II numaralı eğrilerin kesim noktası kimyasal adsorpsiyon için aktifleşme enerjisini belirler. Bu noktada molekül bir tür adsorpsiyondan, diğerine, enerjide bir değişme olmadan geçebilir. Eğer fiziksel adsorpsiyon meydana gelmiyorsa, kimyasal adsorpsiyona ilişkin adsorpsiyon enerjisi adsorplanan gaz moleküllerinin ayrışma enerjisine denk gelir. Her iki adsorpsiyon olayı da gerçekleşiyorsa önce fiziksel adsorpsiyon olayı gerçekleşir [23]. Fiziksel ve kimyasal adsorpsiyon arasındaki farklar Çizelge 5.1’de verilmiştir [24].

Çizelge 5. 1 Fiziksel ve kimyasal adsorpsiyon arasındaki önemli farklar [24]

Parametre	Fiziksel Adsorpsiyon	Kimyasal Adsorpsiyon
Adsorban	Bütün katılar	Bazı katılar
Adsorbat	Çözünmüş maddeler Kritik sıcaklık altında bütün gazlar	Çözünmüş maddeler Bazı kimyasal reaktif gazlar
Sıcaklık sınırı	Düşük sıcaklık	Yüksek sıcaklık
Adsorpsiyon ısı	Düşük	Yüksek (reaksiyon ısısına uygun)
Hız (aktivasyon enerjisi)	Çok hızlı (düşük E)	Aktif olmayan, Düşük E Aktif olan, Yüksek E
Geri dönüşüm hızı (desorpsiyon)	Yüksekçe geri dönüşüm	Geri dönüşümsüz
Önem	Yüzey alanı ve gözenek boyutunun tayini için	Yüzey-reaksiyon kinetiklerinin ifadesi aktif merkez alanının tayini için

5.1.4 Biyolojik Adsorpsiyon

Biyolojik sistemler tarafından metal iyonlarının ortamdaki uzaklaştırılması biyosorpsiyon (biyolojik uzaklaştırma) olarak tanımlanır. Mikroorganizmaların biyosorbent olarak ağır metal gideriminde kullanımı, yüksek performans ve düşük sorban maliyetleri nedeniyle cazip alternatif olarak görülmektedir. Biyosorpsiyon metodunda, mikroorganizmaları canlı veya ölü; tutulmuş veya serbest olarak kullanmak mümkündür. Metal iyonlarının biyosorpsiyonu genel olarak; adsorpsiyon, iyon değiştirme, kompleks oluşumu, mikro çökelme, indirgenme, metilasyon, çözünürlük, biyoakümülyasyon olaylarını içermekte olup, hızlı ve tersine döndürülebilen bir olaydır.

Biyosorpsiyon kinetiği iki basamakta incelenir: birinci basamak mikroorganizma ile metal arasında çok kısa sürede dengenin kurulduğu fiziksel adsorpsiyon (pasif adsorpsiyon) veya iyon değişimidir. İkinci basamak ise metabolik aktiviteye bağlı olarak

oluşan kimyasal adsorpsiyondur. Metal iyonları biyosorpsiyonu; adsorpsiyon, kompleks oluşturma, iyon değiştirme şeklinde gerçekleşmektedir. Ağır metal kirliliğinin giderilmesinde kurutulmuş veya çeşitli şekillerde inaktive edilmiş alg, maya, küf mantarı gibi mikroorganizmaların adsorbent olarak kullanılması son yılların en çok araştırılan konularındandır. Ayrıca uçucu kül, çeşitli silikatlar, atık aktif çamur, çeşitli tarımsal atıklar da (odun talaşı, pirinç kabuğu, pancar küspesi, vb.) ağır metal kirliliğinin gideriminde araştırılan yeni adsorbanlardır [18].

5.2 Katı-Sıvı Ara Yüzeyinde Adsorpsiyon ve Adsorpsiyon Kriterleri

Katı-sıvı ara yüzeyinde gerçekleşen adsorpsiyonda etkili olan kuvvetler, sulu çözeltilerin, adsorbatın ve adsorban yüzeyinin özellikleri tarafından belirlenmektedir. Atom, iyon, radikal ve sürekli veya indüklenmiş dipol olabilen adsorbatın adsorpsiyonu yük, yapı, polar ve apolar grupların varlığı gibi etkenlere bağlı olmaktadır. Ayrıca katı sıvı ara yüzey adsorpsiyonunda, adsorbanın kristal yapısındaki bozukluklar ve gözeneklilik ile adsorbanın boştaki yükleri ve hidrasyonu önemli olmaktadır. Katı yüzeyler çeşitli enerji merkezleri içeren heterojen yüzeyler olduklarından, adsorplanan iyonlar ve moleküller bu yüzeylere, düzensiz bir şekilde tutulmaktadır. Katı-sıvı adsorpsiyonundaki sıvı kısım, genelde sulu bir çözelti olmaktadır. Sulu bir çözeltinin yapısını, çözeltinin pH değeri, içerdiği iyonların konsantrasyonu, ilave çözünmüş maddeler ve sıcaklık gibi etkenler belirlemektedir. Bu yapı büyük ölçüde ayrışma, hidrasyon, kümelenme ve çözünme gibi parametrelerle ilişkilidir. Adsorban olarak kullanılan bir katı maddenin yüzeyi su ile temas ettiği zaman, sudaki H^+ ve OH^- iyonların etkisi ile pozitif veya negatif işaretli bir elektrik yük kazanmaktadır. Elektrik yüklü bir yüzey ile onu çevreleyen çözeltinin bu sistemdeki davranışları, elektro kinetik olayları meydana getirmektedir [25].

Araştırmacılar tarafından yapılan adsorpsiyon deneyleri sonucunda, sulu çözeltilerdeki iyonların adsorplayıcılar ve iyon değiştiriciler tarafından eşit olarak adsorplanmadıkları görülmüştür. Bunun sonucu olarak seçimli adsorpsiyonu gösteren kurallar ileri sürülmüştür. Bu kurallardan birisi Fajans-Paneth kuralıdır. Bu kurala göre, bir iyon, iyonik şebeke türünden olan bir adsorplayıcının ters işaretindeki bir iyonu ile

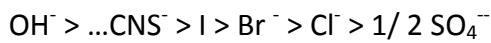
çözünmeyen tuz oluşturabiliyorsa, iyonik şebeke adsorplayıcısı tarafından kuvvetle adsorplanmaktadır. Örneğin gümüş iyodür tanecikleri iyot ve gümüş iyonları içeren sulu çözeltiyle muamele edildiğinde bu iki iyonu adsorplar, çünkü her iki halde de taneciklerin yüzeyinde çözünürlüğü az olan gümüş iyodür meydana gelir. Bu adsorpsiyon tamamıyla polardır. Aynı çözeltiye NO_3^- ve K^+ iyonları ilave edildiğinde adsorplanmazlar, çünkü bunlar yüzeyde çözünmeyen bir bileşik oluşturmazlar [25].

Ayrıca iyonların değerleri ve adsorplanma kapasitesi ile ilgili bir kural daha vardır. Bu kurala göre 3 değerlikli bir iyon sırasıyla iki değerlikli ve bir değerliklilerden daha kuvvetli adsorplanır. Aynı değerlikli iyonların da adsorplanma kapasiteleri değişiktir [25].

Anyonları aynı kalmak şartı ile katyonların adsorplanma güçleri aşağıdaki seri ile temsil edilmektedir:



Katyonlar aynı kalmak şartı ile anyonlar için belirlenen adsorplanma serisi ise şöyledir:



Görüldüğü gibi, H^+ ve OH^- en kuvvetli adsorplanan iyonlardır. Serilere dikkat edilirse, katyon adsorplanma serisinde iyonik çapların küçülmesiyle adsorplanma gücünün azaldığı, anyon adsorplanma serisinde ise bu durumun tersi olduğu ve tüm farklı yüzeyler için bu kuralın geçerli olduğu tespit edilmektedir [25].

5.3 Adsorpsiyona Etki Eden Faktörler

Adsorpsiyon işleminin verimini etkileyen temel faktörler adsorban maddenin fiziksel ve kimyasal özellikleri, adsorban maddenin fiziksel ve kimyasal özellikleri ve adsorpsiyonun gerçekleştiği ortamın karakteristiğidir. Bu ana başlıklar aşağıdaki biçimde özetlenebilir [2]:

1. Adsorbanın özellikleri

a) Parçacık büyüklüğü (Yüzey alanı)

b) Gözeneklerin yapısı ve gözenek büyüklüğünün dağılımı

c) Adsorbanın miktarı ve yüzey özellikleri

2. Adsorbatın özellikleri

a) Sıvı içerisindeki çözünürlüğü

b) Moleküler büyüklüğü

c) Moleküler yapısı

d) Sıvı içindeki derişimi

3. Ortamın özellikleri

a) Sıcaklık

b) pH

c) Zaman

d) Ortamdaki diğer çözünmüş maddeler

5.3.1 Adsorplanacak Maddenin (Adsorbat) Yapısı

Adsorbatın çözünürlüğü adsorpsiyonu etkileyen önemli faktörlerdendir. Maddenin çözünürlüğü azaldıkça adsorpsiyon verimi artar. Adsorplanacak maddenin molekül büyüklüğü de adsorpsiyon hızını etkiler. Molekül büyüklüğü adsorbatın molekül ağırlığıyla ilişkilidir. Molekül ağırlığı ise molekülün hareket edebilme özelliğini etkilemektedir. Bunun gözenek difüzyonu üzerine etkisi önemlidir. Bir maddenin adsorplanma verimi molekülün kimyasal yapısına da bağlıdır. Adsorban ile adsorbatın yüklerinin aynı olması sonucunda da adsorpsiyon prosesi gerçekleşmemektedir. Bu durumu gidermek için adsorban modifiye edilerek kullanılabilir [15].

5.3.2 Sıcaklık

Sıcaklık adsorpsiyon prosesine etki eden en önemli parametrelerden birisidir. Sıcaklık çözelti fazındaki iyonların veya moleküllerin iyonlaşması ve çözünmesi üzerine etki etmektedir. Artan sıcaklıklarda adsorbanın por çapı genişlediğinden daha fazla yüzey oluşur ve adsorpsiyon artar. Endotermik sistemlerde sıcaklık artışına paralel olarak

adsorpsiyon veriminde artış kaydedilirken, egzotermik sistemlerde ise verim azalması gerçekleşmektedir [18].

5.3.3 pH

Çözünmüş maddenin pH'sı iyonlaşma derecesini ve iyon yüklerini belirlediğinden adsorban yüzeyinde elektriksel çekim kuvvetini değiştiren bir etki yapmaktadır. Düşük pH değerlerinde çözeltilerde daha fazla pozitif yüklü proton bulunması negatif yüklü iyonlar ile pozitif yüklü adsorban yüzeyleri arasındaki elektrostatik çekim kuvvetini artırmaktadır [18].

5.3.4 Adsorbanın yapısı ve özellikleri

Adsorpsiyon ara yüzeyde gerçekleşen bir olaydır. Adsorbanın fizikokimyasal yapısı adsorpsiyonun hızı ve verimi üzerinde etkilidir. Ayrıca adsorpsiyon prosesi üzerinde; özel yüzey alanı, gözenek hacmi dağılımı, inorganik içerik ve aktif yüzey yerleri önemli etkiye sahiptir. Genel olarak partikül çapı küçüldükçe yüzey alanı büyüdüğü için adsorpsiyon verimi de artmaktadır. Gazların adsorpsiyonu sırasında basınç yükseltilecek olunursa, adsorban daha fazla miktarda madde adsorplayacaktır. Çözeltilerin adsorpsiyonu için de aynı kural geçerlidir. Çözeltinin adsorpsiyonu, adsorbe olacak maddenin doğasına ve çözelti içerisindeki konsantrasyonuna bağlıdır [15].

Adsorplama bir yüzey olayı olup adsorpsiyon derecesi spesifik yüzey alanıyla orantılıdır. Spesifik yüzey alanı, adsorplamada kullanılan alanın toplam yüzey alanına oranı olarak ifade edilebilir. Adsorbanın birim ağırlığına karşı adsorplanan madde miktarı, katı maddenin porozitesine bağlı olarak artar. Yüzey alanının partikül şekline göre aktif alan değişmektedir [23].

UÇUCU KÜLLER

Uçucu kül, toz halinde veya öğütülmüş taşkömürü veya linyit kömürünün, yüksek sıcaklıklarda yanması sonucunda oluşan ve baca gazları ile sürüklenen, silis ve alümino - silisli toz halinde bir yanma kalıntısıdır. Baca gazları ile sürüklenen ve hava ile temas sonucu ani soğuma ile puzolanik özellik kazanan uçucu küllerin tanecik boyutları, yaklaşık 1-100 μm arasında değişim gösterir [26]. Bu ince kül parçacıkları çeşitli yöntemlerle tutulmakta (elektro filtre, silikon vs.) ve baca gazları ile atmosfere yayılmaları önlenmektedir. Uçucu küller 0,5–200 μm tane iriliğinde düzensiz şekilli parçacıklar halinde bulunmasına karşın, yakma kazanı içinden kısa geçişleri boyunca ergidiklerinden genellikle küresel şekildedirler [27].

Uçucu kül terimi elektrik enerjisi endüstrisinde 1930'lu yıllarda ortaya çıkmıştır. 1930'larda kömür ile çalışan elektrik santrallerinden çok miktarda uçucu kül elde etmek mümkün hale gelmiştir. Uçucu külün portland çimentosu üretiminde kullanılması da yine bu tarihlerde başlamıştır. 1937 yılında, R.E. Davis ve arkadaşları California Üniversitesi'nde uçucu küllü betonla ilgili yaptıkları çalışmaların sonuçlarını yayımlamışlardır. Bu çalışma, ilk şartnamelerin, test metotlarının ve uçucu kül kullanımının temelini oluşturmuştur [28]. Davis ve meslektaşları çalışmalarında portland çimentosu hamurunda, uçucu külün kalsiyum ve alkali-hidroksitler ile reaktivitesini tanımlamışlar; bununla da uçucu külün zararlı alkali-agrega reaksiyonlarına karşı önleyici davranışını tespit etmişlerdir. A.B.D. Mühendisler Kolordusu, Islah Bürosu, büyük mühendislik firmaları ve diğer bazı kişi ve kurumlar uçucu külün kütle betonlarındaki hidratasyon ısısını düşürme avantajını ve taze

betonun işlenebilirliği üzerindeki olumlu etkisini bulmuşlar ve uçucu külün faydalı yönleri ilk olarak büyük kütleli baraj inşaatlarında ortaya çıkmıştır [29]. Örneğin A.B.D.'de 1940'lı yıllarda önce Hoover daha sonra Hungry Horse barajlarının yapımında uçucu kül ilk defa kullanılmıştır [30].

1970'lerdeki benzin krizi elektrik santrallerinde daha fazla kömür kullanımına sebep olmuştur. Daha fazla oranda kalsiyum oksit içeren uçucu küller, yanmayan kısımlarında kalsiyum bileşikleri içeren taşkömürü ve linyit kullanımı nedeniyle elde edilebilir hale gelmiştir. Uçucu külün artan elde edilebilir miktarı ile uyumlu olarak A.B.D., Kanada ve başka yerlerde yapılan yoğun çalışmalar kimyasal reaksiyonların daha iyi anlaşılmasına imkan vermiş ve beton endüstrisi için şu an kullanımı mümkün olan büyük miktardaki uçucu külün ekonomik olarak kullanımına olanak sağlamıştır [29].

Ülkemizde ise uçucu kül ile ilgili çalışmalara, 1964 yılında Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Araştırma Dairesi Kimya Laboratuvarı uzmanları tarafından başlanıldığı görülmektedir. Yapılan çalışmada, Soma ve Tunçbilek uçucu küllerinin Gökçekaya barajında kullanım olanakları araştırılmıştır. Çalışma, A.S.T.M. ve Bureau of Reclamation metotlarına göre yapılmış ve iyi sonuç alınmıştır.

Aynı tarihlerde Karayolları Genel Müdürlüğü Laboratuvarı'nda 4. Bölge Pazar Köprüsü inşaatı ile ilgili olarak uçucu küllü betonlar üzerinde bir araştırma yapılmıştır. Bu çalışmada, kısmen çimento yerine kullanılan külün erken sürelerdeki basınç dayanımını olumlu şekilde etkilediği bildirilmiştir.

1968 yılında, uçucu kül standartlarının hazırlanmasına yardımcı olmak amacıyla İmar ve İskan Bakanlığı Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda çeşitli santrallerden alınan küllerin puzolanik özellikleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır. A.S.T.M. metotlarına göre yapılan deneyler sonucunda, elektro filtrelerden alınmış olan küllerin, genellikle bu standartlara uygun olduğu, No. 200 elekten elendiği takdirde ise bu küllerin puzolanik değerlerinin daha da arttığı tespit edilmiştir [31].

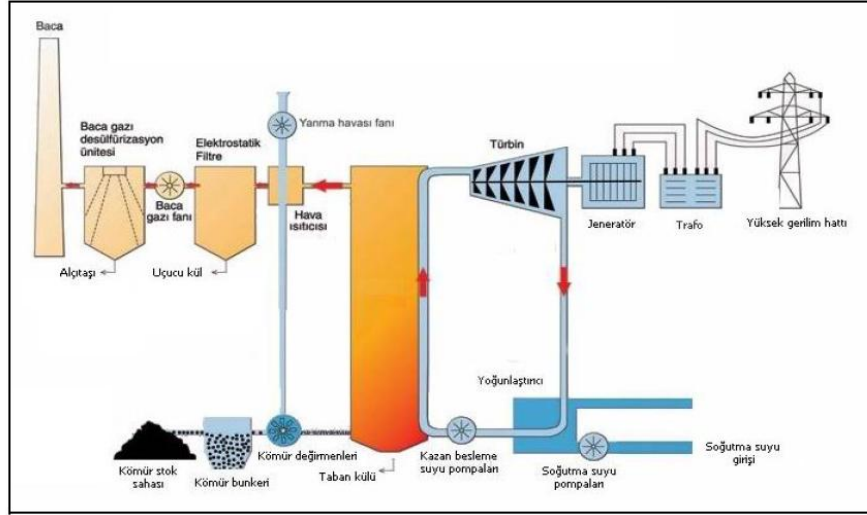
1968 yılından 1973'e kadar geçen süre içinde iki barajın inşaatında 55000 tonun üzerinde uçucu kül kullanılmıştır. 1970'de Kütahya-Tavşanlı yolunun 700 m'lik bir bölümünde uçucu kül-çimento karışımı ile zemin stabilizasyonu çalışmaları yapılmıştır.

Çimento endüstrisinin uçucu küle tanışması ise yine 1970'lerde olmuştur. Bu yıllarda Afyon ve Balıkesir Çimento Fabrikalarında, Soma ve Seyitömer Termik Santralleri uçucu külleri kullanılarak, deneme amaçlı çimento üretimi gerçekleştirilmiştir.

1960 ve 1970'lerde uçucu kül üretimi sırasıyla 500.000 ve 1.200.000 ton/yıl civarında gerçekleşmiştir. Dolayısıyla, en fazla kullanımın olduğu dönemlerde bile, uçucu kül kullanımı hiçbir zaman üretimin % 7'sini geçmemiştir. Türkiye Ekonomi Kurumu (TEK) yetkililerinden alınan bilgilere göre, kullanım son yıllarda daha da düşüktür. 1989 yılında üç termik santralden 33.355 ton uçucu kül satılabilmektedir. Bu rakam toplam üretimin % 0.4'ünden daha da azdır. Aynı şekilde 1990'da tüketim üretimin % 0.3'ü civarında gerçekleşmiştir [29]. Ancak son yıllarda özellikle hazır beton endüstrisinin gelişmesi ve Avrupa'dan uyarlanan yeni çimento ve beton standartları, çimento ve beton endüstrilerinde uçucu küle olan ilgiyi arttırmış bulunmaktadır [30].

6.1 Uçucu Külün Oluşumu

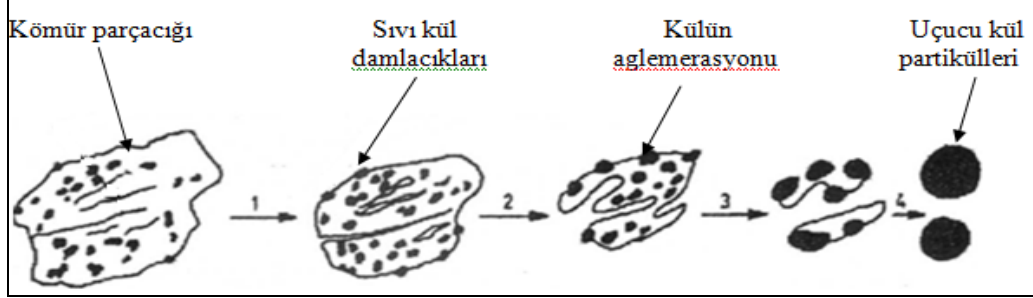
Kömürle çalışan termik santrallerde kömürü yakmak için üç tip kazan kullanılmaktadır; bunlar kuru taban kazanları, ıslak taban kazanları ve siklon fırınlarıdır. Kömürü yakmak için en sık kullanılan kazan tipi kuru taban kazanlarıdır. Pulverize kömür kuru taban kazanında yandığı zaman üretilen külün % 80'i fırını uçucu kül olarak terk eder ve baca gazıyla dışarı atılır. Külün geriye kalan % 20'lik kısmı; koyu gri renkte, granül, gözenekli, baskın olarak kum boyutunda olan kuru taban külüdür. Bu malzeme fırının tabanında yer alan su dolu silolarda toplanır [32]. Pulverize kömür ıslak tabanlı kazanda yandığında ise külün % 50'si fırında kalır ve geri kalan % 50'si baca gazıyla dışarı çıkar. Şekil 6.1'de baca gazı arıtma ünitesi bulunan bir termik santralde ait akım şeması görülmektedir [33].



Şekil 6. 1 Baca gazı arıtma ünitesi bulunan bir termik santralde ait akım şeması [33]

Değirmenlerde öğütülüp pulverize hale getirilen kömür, yakma havası ile birlikte kazana püskürtülerek, kazan içerisinde yanması sağlanır, böylece yakıtın kimyasal enerjisinin ısı enerjisine dönüşmesi gerçekleşir. Yanma sonucu oluşan ısı enerjisi vasıtasıyla, kazanın etrafında bulunan borulardan geçen saf su buharlaşır. Elde edilen yüksek basınç ve sıcaklıktaki buharın (kızgın buhar) türbine gönderilmesiyle türbin rotoru harekete geçer ve dönmeye başlar. Böylece suda bulunan ısı enerjisi kinetik enerjiye dönüşür. Kinetik enerji, bir şaftla türbin rotoruna bağlı halde bulunan jeneratör rotorunu aynı hızla çevirerek jeneratörde elektrik enerjisine dönüşür. Elektrik enerjisi trafolardan yüksek gerilim hattına iletilir ve oradan da dağıtım şebekesine gönderilerek nihai kullanıcılara iletilmesi sağlanır. Türbinde kullanılarak basıncı ve sıcaklığı düşmüş olan buhar (çürük buhar) yoğunlaştırıcı adı verilen bölgede deniz suyu ile ısı alış-verişi sonrası su fazına geçer ve bu su tekrar kullanılmak üzere kazan besleme suyu pompaları ile kazana gönderilir. Kömürün yanması sonucu açığa çıkan ve 100 μm 'den büyük tanecik boyutuna sahip olan küller kazanın dibine toplanır ve sistemden uzaklaştırılır. 0.5 μm ile 100 μm arasında tanecik boyutuna sahip olan ve "uçucu kül" olarak isimlendirilen küller ise baca gazı ile birlikte kazanı üstten terk eder [33]. Yanma işlemi süresince kömürün yapısındaki organik bileşiklerin (organometalik yapı) içinde bulunan elementler sıcaklığın etkisiyle sıvı fazdan gaz fazına geçerler. Zamanla uçucu organik maddeler tükenir ve inorganik yapı içerisinde bulunan uçucu kül matris

elemanları (aluminosilikat, SiO_2 , vs) küresel uçucu kül partikülleri oluşturmak üzere erirler. Uçucu külün oluşum safhalarını açıklayan mekanizma Şekil 6.2’de verilmiştir [34].



Şekil 6. 2 Uçucu külün oluşum safhaları [34]

Uçucu kül, kazanı takiben bulunan elektrostatik çöktürücülerde tutularak baca gazından uzaklaştırılır. Tozundan arındırılmış olan baca gazı elektrostatik çöktürücülerden sonra desülfürizasyon ünitesine geçer. Desülfürizasyon ünitesinde, baca gazı içerisinde bulunan SO_2 'nin absorpsiyonu için gaz üzerine bir absorban madde gönderilerek SO_2 'den arındırılır ve arıtılmış olan baca gazı bacadan atmosfere bırakılır [33].

6.2 Termik Santraller

Gelişmekte olan ülkelerde artan sanayileşme ve kentleşme enerji gereksinimlerini de beraberinde getirmiştir. Gerekli olan enerji gereksinimlerini karşılamak amacıyla hidroelektrik ve termik santraller kurulmuştur [35]. Türkiye’de kurulu ve halen faaliyette olan termik santrallere ait bilgiler Çizelge 6.1’de verilmiştir [36].

Çizelge 6. 1 Türkiye’de kömürle çalışan termik santraller [36]

Termik santral adı	Bulunduğu il/ilçe	Kurulduğu yıl	Kurulduğu güç (MW)	Ana yakıt	Yardımcı yakıt
18 Mart Çan	Çanakkale/Çan	2003	320	Linyit	Fuel Oil-Motorin
Afşin Elbistan-A	Kahramanmaraş/Afşin	1984	1355	Linyit	Fuel Oil-Motorin
Afşin Elbistan-B	Kahramanmaraş/Afşin	2004	1440	Linyit	Fuel Oil-Motorin
Aliğa	İzmir/Aliğa	1975	180	Motorin	Motorin
Ambarlı Doğalgaz	İstanbul/Ambarlı	1988	1350.90	Doğalgaz	-
Ambarlı Fuel-Oil	İstanbul/Avcılar	1967	630	Fuel Oil	Motorin
Bursa Doğalgaz	Bursa/Osmangazi	1998	1432	Doğalgaz	-
Çatalağzı	Zonguldak/Çatalağzı	1989	300	Taş Kömürü	Fuel Oil-Motorin
Denizli Jeotermal	Denizli/Sarayköy	1984	15	Tabii Buhar	-
Hamitabat Doğalgaz	Kırklareli/Lüleburgaz	1985	1120	Doğalgaz	-
Hopa	Artvin/Hopa	1973	50	Fuel Oil	Motorin
Kangal	Sivas/Kangal	1991	457	Linyit	Fuel Oil-Motorin
Orhaneli	Bursa/Orhaneli	1992	210	Linyit	Fuel Oil-Motorin
Seyitömer	Kütahya/Seyitömer	1973	600	Linyit	Fuel Oil-Motorin
Soma-B	Manisa/Soma	1981	1034	Linyit	Fuel Oil-Motorin
Tunçbilek-B	Kütahya/Tunçbilek	1956	365	Linyit	Fuel Oil-Motorin

Birçok termik santralde, elektrik üretimi için gerekli enerjiyi sağlayabilmek amacıyla, yakıt olarak pulverize kömür kullanılmaktadır. Dolayısıyla atık malzeme olarak değişik karakterlerde küller elde edilmektedir [37].

Termik santrallerde pulvarize kömürün yanması sonucu üç atık malzeme meydana gelir:

- Baca gazları ile taşınmayan, yanarak tabana düşen ve aglomere olan küller (taban külü)
- Siklon tipi ocaklarda, yanan kömür külünün ergimesi ve suda soğutularak uzaklaştırılmasıyla elde edilen küller (ergimiş kül veya cüruf),
- Baca gazları ile taşınan, mekanik veya elektrostatik toz tutucularda tutulan çok ince küller (uçucu kül) [38]

6.2.1 Termik Santrallerden Uçucu Kül Toplamanın Temel Prensipleri

Termik santrallerden atmosfere verilen baca külünün (uçucu kül) toplanması hava kirliliğinin kontrolü konusunda en önemli işlemlerden birisidir. Baca külünün tane irilik dağılımı, kimyasal bileşimi ve konsantrasyon seviyelerindeki çok geniş değişimlerin görülmesi külün tutulmasını daha da zorlaştırmaktadır. Tüm bu faktörler kullanılan yakıt ve yakma sistemine (örneğin kullanılan kazan tipi) bağlıdır.

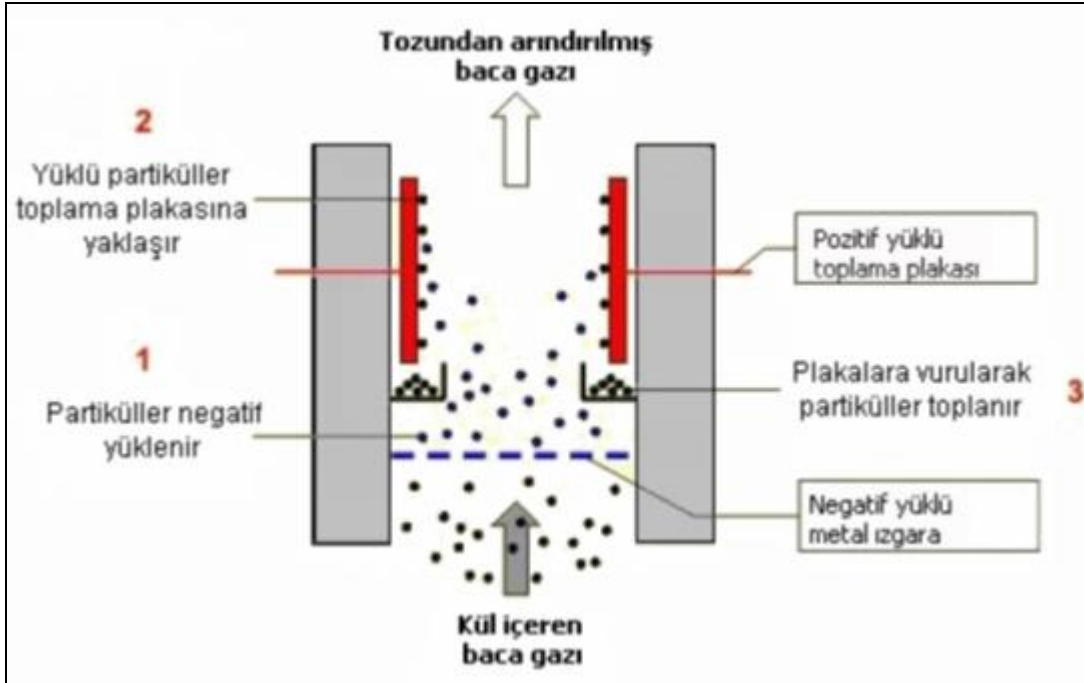
Uçucu küllerin toplanmasında aşağıdaki yöntemler kullanılmaktadır:

- Elektrofiltreler
- Siklonlar
- Nemlendirme
- Filtrelerde toplama
- Ultrasonik Çöktürme
- Kontrol Prosesleri

Termik santrallerde en çok kullanılan kül tutma yöntemleri elektrofiltre ve siklonlarda toplamadır. Uçucu küllerin tane boyutunun büyük olduğu durumlarda siklon gibi mekanik tutucular, küçük olduğu durumlarda ise elektrofiltreler kullanılır [39].

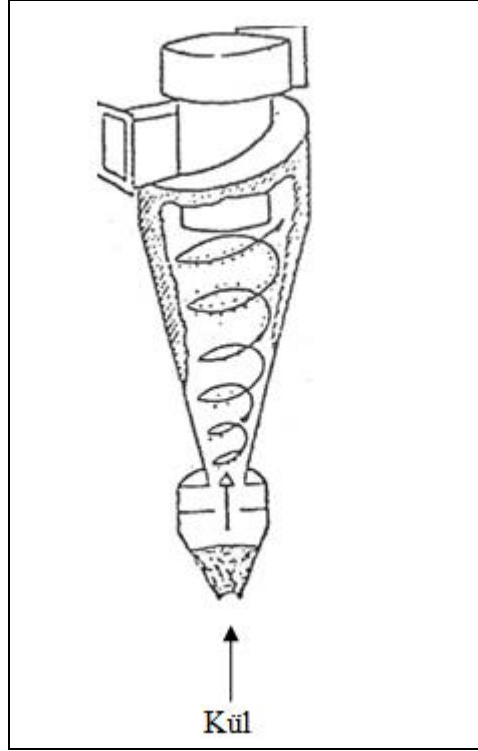
a) Elektrofiltreler: Elektrofiltreler, baca gazı içerisindeki tozu elektrostatik yüklerle toplayarak çöktürme prensibi ile çalışan toz (uçucu kül) tutma üniteleridir ve elektrostatik bir alanda toz partiküllerinin elektrotlara yapışması prensibiyle çalışırlar.

Plaka yüzeyleri dolduğu zaman, plakalar sarsılarak toplanan külün boşalması sağlanır. Şekil 6.3’de elektrostatik çöktürücünün çalışma prensibi şematik olarak verilmiştir [33].



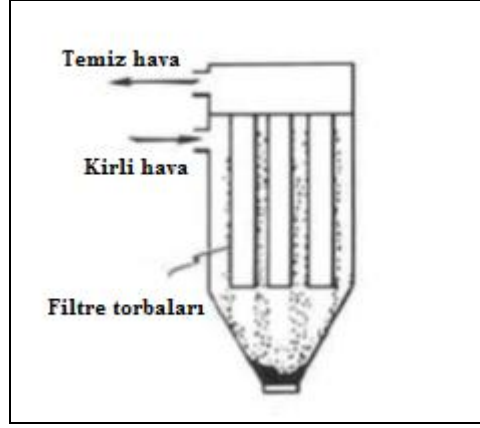
Şekil 6. 3 Elektrostatik çöktürücünün çalışma prensibi [33]

b) Siklonlar: Merkezkaç kuvvetinin etkisiyle parçacıkları gazdan ayırma yöntemidir. Yapı olarak bir siklonun genellikle bir gaz girişi, gaz çıkış kısmı ve hava kolonu (girdap) oluşturacak şekilde gövde tasarımının olması istenir. Siklonun konik yapısı nedeni ile çepere yakın helezon bir hareket kazanarak ve giderek hızlanarak önce aşağıya doğru, sonra yine helezonî bir hareketle ortadan yukarı çıkar ve siklonu terk eder. Helezoni hareket nedeni ile oluşan merkezkaç kuvvetleri etkisi ile kül partikülleri çepere doğru hareket kazanır ve gazdan ayrılır, alttaki toplama bölgesinde siklonu terk eder. Tekli siklon ve çoklu siklon tipi olmak üzere iki gruba ayrılan bu tutucu tipi en yaygın ve kullanışlı olanıdır. Hava akımı belirli bir açı ile siklona girerek santrifüj hareketini gerçekleştirir. Santrifüj hareketi ile partiküller siklon çeperinde toplanırlar alt çıkıştan çıkarlar [40].



Şekil 6. 4 Siklon [32]

c) Filtrasyon ile Toz Tutma: Gaz içindeki toz parçacıkları tutmada kullanılan en eski yöntemlerinden birisi bez filtre kullanımıdır. Bu işlemde, gaz içindeki tanecikler poroz bir yapıya sahip (filtre bezi) malzemenin geçirilerek, daha iri boyutlu taneler bu malzemenin üstünde toplanırken daha ince boyutlu taneler ortamdan geçerek ayrılır. Bez filtrelerin kullanılması ile külün 1 mikrona kadar olan ince kısımları yakalanabilmektedir. Ancak bez filtrelerin kullanılması bir süre yeni sorunlar yaratmaktadır. Pamuk, yün naylon ya da amyanttan yapılan filtreler yüksek sıcaklıklara dayanmamakta ve sık sık temizlenmeleri gerektiği için sürekli ve güvenli çalışma şartlarını yerine getirmede güçlük çıkarmaktadır. Bez filtreler genellikle elektrofiltreden sonra baca gazında kalan çok ince külün yakalanması için kullanılırlar. Bu tip filtrelerde tutulan kül toplam külün % 1–2 'si kadardır. Bez filtreler 1–44 mikron arasındaki külün % 98–99 kadarını yakalayabilir [40].



Şekil 6. 5 Bez Torba Filtreler [40]

d) Nemlendirme: Bu sistemlerde yıkama sıvısı (genellikle su) toz taneciklerini taşıyan gaz akımı ile bir araya gelirler. Gaz ve sıvı arasındaki kontak kurma ne kadar fazlaysa sistemin toz tutma verimi o kadar yüksek olmaktadır.

Kullanılan bütün yağ yıkayıcılar genelde 3 temel işlemi gerçekleştirmektedir. Bunlar;

- Gaz-nemlendirme: Çok ince boyutlu taneciklerin gaz nemlendirme işlemi ile boyutlarında büyüme görülür ve böylece daha kolay tutulurlar.

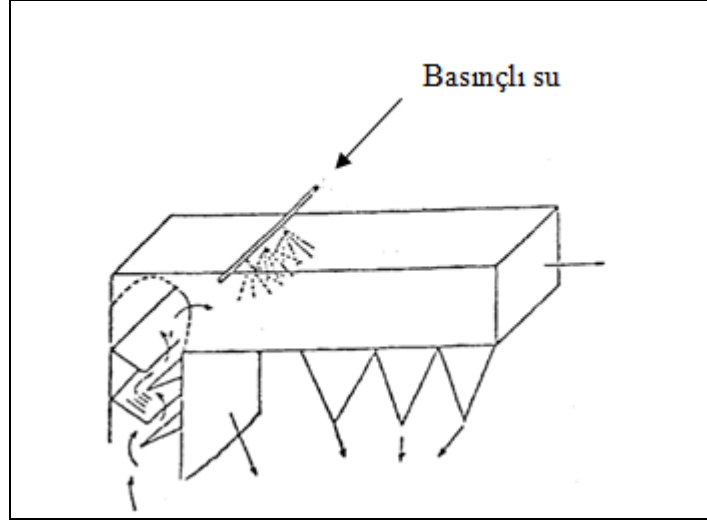
- Gaz-sıvı teması: Bir tane ve sıvı damlası 3 temel mekanizma şeklinde temasa geçer.

- Yapışma: Toz taneciklerinin su damlalarına çarparak yapışması.

- Yayıma: Daha küçük boyutlu taneciklerin difüzyonu sağlanarak sıvı damlacıkları tarafından toplanması.

- Yoğunlaşma: Yıkayıcının içinden geçen gaz belirli bir sıcaklıktan sonra yoğunlaşmakta ve oluşan nem taneciklerin boyutunu arttırmakta ve böylece toplama daha da kolaylaşmaktadır.

- Gaz-sıvı ayırımı: Toz tanecikleri ve su damlacıktan birbirleriyle temasa geçince aglomeratlar oluşturmakta ve bu büyümeyle çökme gerçekleşmektedir [40].



Şekil 6. 6 Uçucu Küllerin Nemlendirme Yöntemi ile Tutulması [39]

6.3 Uçucu Küllerin Sınıflandırılması

Uçucu külün yapısı ve özellikleri santral tipi, kullanılan kömürün çeşidi, kömürün öğütülmesi, yakılma yöntemi gibi faktörlere bağlı olduğundan birçok gelişmiş ülke uçucu külün farklı alanlarda kullanılmasını geçerli kılacak standartlara ihtiyaç duymuştur. Bu nedenle uçucu küle ilgili standartların belirlenmesi için yoğun çalışmalar yapılmıştır [41].

Uçucu küllerin sınıflandırılması kökenlerine, kimyasal yapılarına ve kimyasal bileşen yüzdelerine göre değişik başlıklar altında incelenebilir [42].

Uçucu küllerin kökenlerine göre sınıflandırılması

Uçucu küller termik santrallerde kullanılan yakıta göre iki ana gruba ayrılabilir. Bir termik santral genelde yakıt olarak taş kömürü ve linyit kullandığından aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

- ✓ Taş kömürü uçucu külleri
- ✓ Linyit uçucu külleri [43]

Bu sınıflandırma, çok basite indirgenmiş ve standartlara uymayan bir yöntemdir. Kimyasal özellikleri bakımından linyit uçucu külü, taş kömürü uçucu külüne göre özellikle toprak alkali metallerin fazla oluşu bakımından farklıdır. Bu özellik, linyit uçucu külünün kullanılmasında büyük önem taşır. Taş kömürü uçucu külü tamamen kuru

olarak elde edilmekte olup, taneciklerin büyük bir kısmı camsı minerallerden meydana gelmektedir [42].

Kimyasal yapıları bakımından uçucu küllerin sınıflandırılması

a) Silika-alümina esaslı uçucu kül: Bileşimlerinin büyük bir kısmını (%80-90) kuvars (SiO_2) ve bir miktar alümina (Al_2O_3) oluşturmaktadır. Bu uçucu küller içerdikleri alkali ve toprak alkali oksitleri nedeniyle çok ince taneli ve camsı yapıya sahiptirler. Taş kömürü uçucu külleri genellikle bu yapıdadır [26].

b) Silika-kalsit esaslı uçucu kül: Kimyasal yapılarının ana kısmını SiO_2 ve CaO oluşturmaktadır. CaO miktarı oldukça yüksektir [26].

c) Sülfö-kalsit esaslı uçucu kül: Bu tip uçucu küllerin kimyasal yapılarının büyük bir kısmı SO_2 ve CaO ' ten meydana gelmektedir. Bazı tür linyitlerin uçucu külleri bu sınıfa girmektedir. Ancak her taş kömürü uçucu külü silika-alümina veya her linyit uçucu külü sülfö-kalsit tipte olmayabilir. Örneğin; bir taş kömürü uçucu külünde, silis ve alümina oranı düşük ve kalsiyum oksit oranı yüksek olabilir [26].

d) Sınıflandırılmayan uçucu kül: Termik santrallerde yakma sisteminin homojen olmamasından dolayı belirli bir kimyasal yapıya sahip olmayan küldür. Bu sınıfa giren külün kimyasal yapısı sürekli değişebilmektedir [26].

Kimyasal bileşen yüzdesine göre uçucu küllerin sınıflandırılması

Uçucu küllerin genel, en yaygın sınıflandırmasında, kimyasal bileşen yüzdesini esas alan standartlardan biri ASTM C 618 (American Society of Testing Materials – Standart Specification for Coal Fly Ash Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete) [42].

ASTM C 618 standardına göre uçucu küllerin sınıflandırılması

ASTM C 618 standardına göre uçucu küllerin F ve C sınıfına ayrılırlar.

a)F sınıfı uçucu küller, bitümlü kömürden üretilen, $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi % 70'den fazla olan ve CaO yüzdesi % 10'un altında olduğu için düşük kireçli olarak da adlandırılan küllerdir. Puzolanik özelliğe sahiptirler.

b)C sınıfı uçucu küller ise, linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilen ve toplam $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ miktarı % 50'den fazladır. CaO yüzdesi % 10'dan fazla olduğu için de yüksek kireçli uçucu kül olarak adlandırılırlar. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğin yanı sıra bağlayıcı özelliğe de sahiptirler [44].

Aşağıdaki çizelgede ASTM C 618 standardına göre F ve C sınıfı uçucu küllerinin gereklilikleri verilmiştir [44].

Çizelge 6. 2 ASTM C 618 Standardına göre F ve C sınıfı uçucu küllerinin gereklilikleri [44]

Gereklilikler (%)	F sınıfı uçucu külü	C sınıfı uçucu külü
$SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$	>70	>50
SO ₃	<5	<5
Nem içeriği	<3	<3
Kızdırma Kaybı	<6	<6
Alkaliler	<1,5	<1,5

Ülkemizde Türk Standartları Enstitüsü (TSE) uçucu küllerle ilgili 5 tane standart yayınlamıştır. Bunlar sırasıyla, TS 639, TS EN 450, TS EN 451-1 ve TS EN 451-2 standartlarıdır. TS 640, AB'ye uyum çerçevesinde yürürlükten kaldırılmış ve yerine TS EN 197-1 standardı uygulamaya konmuştur [45]. Bu standartlara ait bilgiler Çizelge 6.3'de verilmektedir [46], [47], [48], [49], [50].

Çizelge 6. 3 TSE Standartlarına ait bilgiler [46], [47], [48], [49], [50]

Standart No	Standartın adı	Açıklama
TS 639	Uçucu Küller	Uçucu küllerin tarifi, sınıflandırılması ve özellikleri, muayene ve deneyler, piyasaya arz şekli ile denetleme esasları
TS EN 197-1	Çimento	Genel çimentolar-bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri
TS EN 450-1	Uçucu Kül-Betonda Kullanılan	Tarif, özellikler ve uygunluk kriterleri
TS EN 450-2	Uçucu Kül – Betonda Kullanılan	
	Uygunluk Değerlendirilmesi	
TS EN 451-1	Uçucu Kül Deney Metodu, Bölüm 1	Serbest kalsiyum oksit muhtevasının tayini

TS 639'a göre uçucu küller yalnız bir sınıftır. TS 639 "Uçucu Kül": Uçucu küllerin tanımı, sınıflandırılması, özellikleri, deney yöntemleri ve kalite kontrolü ile ilgilidir. Uçucu küllerin kimyasal özellikleriyle ilgili olarak getirilen sınırlandırmalar Çizelge 6.4'te verilmiştir.

Çizelge 6. 4 Uçucu Külün Kimyasal Özellikleri [46]

Özellikler	Standart Sınırlar
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	en az %70
MgO	en çok %5
SO_3	en çok %5
Rutubet	en çok %3
Kızdırma Kaybı	en çok %10

TS 197-1 Standardında uçucu küller; Silissi (V) Uçucu Küller ve Kalkersi (W) Uçucu Küller olmak üzere iki gruba ayrılır.

1) V sınıfı uçucu küller, çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel partiküllerden meydana gelen ince bir toz olup; esas olarak reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksitten (Al_2O_3)'den oluşur. Geri kalan kısmı ise demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşenleri içermektedir. Reaktif CaO oranı kütlece % 10'dan az olmalıdır. Reaktif SiO_2 içeriği kütlece % 25'den az olmamalıdır [47].

2) W sınıfı uçucu küller, hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup, esas olarak reaktif kalsiyum oksit (CaO), reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3)'den oluşur. Geri kalanı demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşikler içerir. Bu küllerde reaktif kalsiyum oksit oranı kütlece % 10'dan az olmamalıdır. % 10 - % 15 arasında reaktif kalsiyum oksit içeren kalkersi uçucu külün, reaktif silisyum dioksit içeriği kütlece % 25'den az olmamalıdır [47].

6.4 Uçucu Küllerin Özellikleri

Uçucu kül amorf ve kristalin fazların her ikisini de içeren heterojen kompleks bir maddedir. Uçucu külün puzolanik aktivitesinin, içinde barındırdığı amorf karakterli silikat ve aluminatlar nedeniyle meydana geldiği düşünülmektedir [34]. Uçucu külün fiziksel, kimyasal, minerolojik ve puzalonik özelliklerinin en belirgin ortak yanı, bunların yöreden yöreye, hatta aynı yörede dahi değişkenlik göstermeleridir. Bu değişkenlik,

- Uçucu külün kaynağının oluşturan kömürün türü ve değişkenliğine
- Kömürün yakılmadan önceki öğütülme (pulvarizasyon) derecesine
- Kazan türüne
- Yakma sıcaklığı ve diğer işletme parametrelerine
- Kül toplama ve uzaklaştırma sistemlerinin özellikleri ve işleyişine
- Çevrenin korunması amacıyla kömüre ilave edilen katkı maddeleri gibi faktörlerden ve faktörlerin de zamana göre değişebilmelerinden kaynaklanan özelliklere bağlıdır [51].

6.4.1 Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri

6.4.1.1 Görünüş

Uçucu küllerin renkleri açık kremden koyu kahverengiye kadar değişiklik gösterir. Bu renk, kullanılan fırınların işletilmesine ve kömürün kalitesine bağlı olarak değişir. Uçucu kül içerisindeki yanmamış karbon oranı arttıkça rengi koyulaşır. Bunun yanı sıra demir oksit içeriği de uçucu külün rengini etkiler. Yüksek demir oksit içeriği siyaha yakın bir renk verir. Linyit uçucu külü taş kömürü uçucu külünden daha koyu renktedir [52].



Şekil 6. 7 Uçucu küllerin görünüşü [52]

6.4.1.2 Partikül Morfolojisi

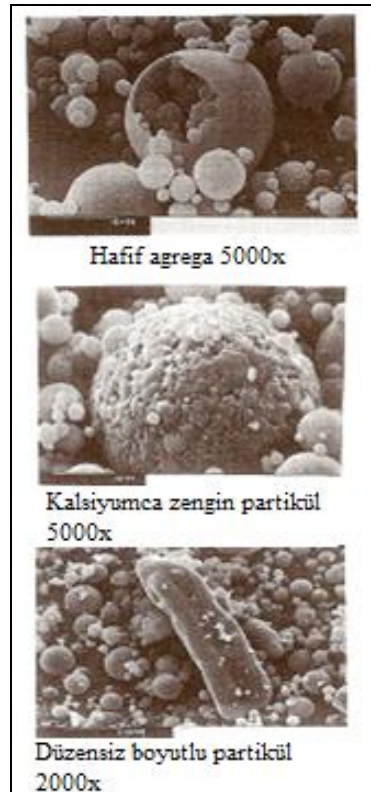
Bir çok araştırmacı taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Enerji Yayımlı X-Işını Analizi (EDXA)'yı kullanarak farklı uçucu küllerin partikül şekillerini ve yüzey karakteristiklerini incelemişlerdir [44].

Fischer ve Natusch (1979) uçucu kül içindeki tanelerin 11 temel morfolojik yapıda olduğunu tanımlamışlardır [53].

Bunlar:

- Şekilsiz, saydam taneler
- Şekilsiz, opak taneler
- Şekilsiz, opak ve saydam karışık taneler
- Yuvarlak, kabarcıklı, saydam taneler
- Yuvarlak, kabarcıklı, opak ve saydam karışık taneler
- Köşeli, delikli, opak taneler
- İçi gaz dolu küresel taneciklerle dolu küresel taneler
- İçi küresel taneciklerle dolu küresel taneler
- Saydam, katı küresel taneler
- Opak, küresel taneler
- Yüzeyinde veya içinde kristal oluşumlu küresel taneler [54].

Şekil 6.8’de farklı uçucu kül partiküllerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri göstermektedir. Şekiller genel anlamda uçucu kül partiküllerinin küresel şekilde ve bazılarının da içlerinin boş olduğunu göstermektedir. İçi boş küresel partiküller cenospheres olarak adlandırılır ve bu partiküller çok hafif ve suyun yüzeyinde kalma eğilimindedirler. Uçucu küller içlerinde camsı küreler bulunduran pherosphere adı verilen küçük küresel partiküllerden oluşabilir. Düşük kalsiyum oksitli uçucu küllerin boşluklu küresel tanecikleri vardır ve katının dış yüzeyi yüksek kalsiyum oksitli uçucu küllerin yüzeyinden genelde daha pürüzsüzdür [44].



Şekil 6. 8 Farklı uçucu kül partiküllerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri [44]

6.4.1.3 Partikül Boyutu (İncelik)

Uçucu küllerin partikül boyutları öncelikle kullanılan kömürün cinsine ve öğütülme derecesine bağlıdır. Taşkömürü uçucu küllerinin partikül boyutu linyit uçucu küllerinin partikül boyutlarından daha küçüktür. Partikül boyutuna (inceliğine) etki eden diğer bir faktör de, bacada kullanılan filtredir. Bacadan toz olarak kaçan kısım azaldıkça partikül

inceliği artar. Elektro filtrelerde tutulan uçucu küller siklonlarda tutulandan daha ince tanelidir [55].

Uçucu külün tanecik boyutları genellikle 0,5-200 µm arasında değişmektedir. % 16-25'i 80 µm'lik elekte, % 26-40'i 50 µm'lik elekte kalmaktadır. 40 µm'den küçük taneciklerin elekten ayrılması olanaksızdır. Spesifik yüzey alanları ise 2800–3800 cm²/gr arasındadır [56]. Uçucu külün yaklaşık % 68'i 53 µm'den daha küçük taneciklerden meydana gelmiştir. Bu incelik bazı fiziksel parametreleri de etkilemektedir. Örneğin külün su geçirgenliği çok düşüktür (0,01–71 cm/gün arasında değişir). Bu da kül içeriğinin yeraltı sularına taşınmasını güçleştirir. Kül parametrelerinin içinin kısmen boş ve yüzeylerinin aktif olması adsorpsiyon özelliği göstermesini sağlar. Ayrıca yine külün inceliği, özellikle toplam yüzey alanını, aktifliğini ve bazı zehirli metallerin yüzeydeki derişimini değiştirebilir. Bu nedenle çevreyi kirletme potansiyelinin tespitinde ve tutma ve çöktürme sistemlerinin geliştirilmesinde bu faktör dikkate alınmalıdır [26]. Uçucu külün inceliği puzolanik aktiviteyi de önemli ölçüde etkileyen parametrelerin başında gelmektedir [34]. Uçucu küller ne kadar ince ve karbon içeriği ne kadar düşük olursa puzolanik aktivitenin o kadar yüksek olacağı söylenebilir [57].

6.4.1.4 Yoğunluk

Yoğunluk ile ilgili büyüklüklerden bahsetmeden önce kullanılan yoğunluk deyimlerinin tanımlanması, bu konudaki çelişkilere açıklık getirmesi açısından çok önemlidir. Yoğunlukla ilgili terimlerin toz teknolojisindeki sözlük anlamları;

- a) Görünür yoğunluk (doğal); serbest olarak dökülen tozun, bu haldeki ölçülen görünür yoğunluğu.
- b) Görünür yoğunluk (sıkıştırılmış); tozun, belirtilen ölçülerdeki kaplarda, belirli şartlar altında vibrasyonla veya sıkıştırılmasıyla oluşan tabakanın görünür yoğunluğudur.
- c) Gerçek yoğunluk; partikülün açık ve kapalı gözenekleri ihmal edilerek kütlelerinin hacmine oranı olarak tarif edilir [40].

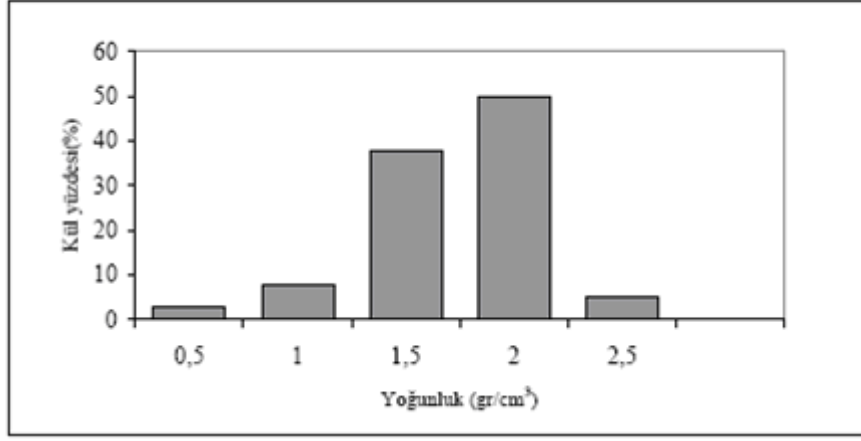
Uçucu küllerin yoğunluğu küldeki demir, silika, alümin ve karbon miktarı ile değişmektedir. Yüksek demir içeriği uçucu külün yoğunluğunun yüksek olmasına,

yüksek miktarlarda alümin, silika ve karbon ise daha düşük bir yoğunluğa neden olur [58]. Uçucu küllerin yoğunluğu mineralojik yapısına göre de değişmektedir. İçi dolu küresel tanelerden oluşan uçucu küllerin yoğunlukları yüksek iken, süngerimsi tanelerden oluşanlar daha düşüktür. İçi dolu küresel tanelerden meydana gelen uçucu küllerin mutlak yoğunluğu 2,2 – 2,7 gr/cm³ arasındadır [52]. Yoğunluğun yüksekliği uçucu külün inceliği ile de ilgilidir. Uçucu küllerin incelikleri arttıkça yoğunlukları da artmaktadır. Çizelge 6.5'de inceliğe göre yoğunluk değişimi görülmektedir [55]. İri taneli uçucu küllerin yoğunlukları boşluklu yapıya sahip olmalarından ötürü ince tanelerden oluşmuş küllerin yoğunluğuna göre daha azdır. C sınıfı uçucu küllerin daha ince taneciklere ve daha az boşluğa sahip olmalarından ötürü özgül ağırlıkları F sınıfı uçucu küllere göre daha yüksektir [59].

Çizelge 6. 5 İncelikle hacimsel yoğunluk değişimi [60]

Spesifik Yüzey (cm ² /g)	Yoğunluk (g/cm ³)
690	1.64
740	1.74
1080	1.77
1110	1.82
1180	1.83
2690	2.08
3720	2.19
3990	2.28
4740	2.33
5280	2.42

Uçucu kül içerisinde farklı yoğunlukta küller vardır. Bunların miktarları da birbirinden farklıdır. Şekil 6.9'da uçucu kül içerisindeki farklı yoğunluktaki uçucu küllerin yüzdeleri görülmektedir [60].



Şekil 6. 9 Uçucu kül içerisindeki farklı yoğunluktaki tanecik yüzdesi [60]

6.4.1.5 Karbon Miktarı

İyi yanma olan termik santrallerde yanmamış karbon miktarı çok düşük olmaktadır. Eski tip santrallerde bu oran % 10'a yükselmekte iken, yeni tip santrallerde bu oran % 3' ün altında kalmaktadır. Uçucu külün karbon miktarı yanma kaybından az olmalıdır. Yanma kaybı değeri ampirik olarak 0,9 ile çarpılarak yaklaşık yanmamış karbon miktarı bulunabilmektedir. Uçucu küllerdeki karbon, yanıcı olan tanelerin üzerinde ince karbon tabakası veya ayrı taneler olarak bulunmaktadır. Uçucu küllerdeki karbon tanelerinin tane boyutu çoğu zaman diğer tanelerden daha büyüktür [43].

6.4.1.6 Manyetik Özellik

Uçucu kül içerisinde bir mıknatıs daldırıldığında bir miktar uçucu külün mıknatısa yapıştığı görülür. Manyetik özelliği olmadığı halde yapışan tanecikler hafif bir hava akımı ile uzaklaştırılır. Yapılan deneyler sonucu uçucu küllerin yaklaşık % 25'i mıknatısta kaldığı görülmüştür. Kimyasal analizlerde mıknatıs tarafından tutulan numunenin % 63'nün Fe_2O_3 olduğu tespit edilmiştir [56].

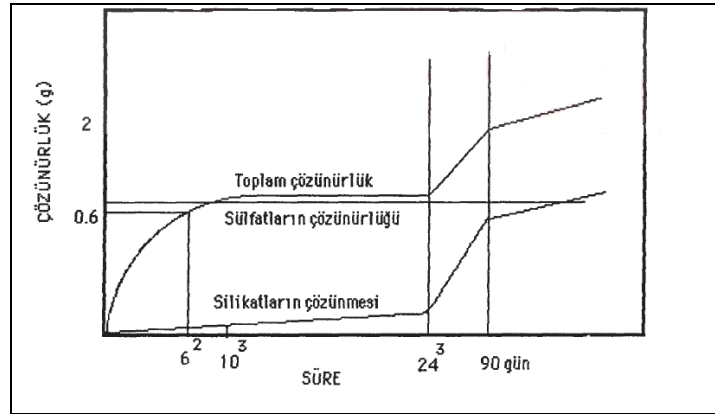
6.4.1.7 Mekanik Dayanım

Uçucu külün mekanik dayanımları bünyesindeki boşluklu malzeme yüzdesine bağlı olarak değişmektedir. Bilyeli değirmede ezilen uçucu külün yoğunluğunda ve spesifik yüzeyinde artış görülmüştür. Örneğin uçucu külü ilk 15 dakika $1,90 \text{ g/cm}^3$ olan

yoğunluğu ve $2400 \text{ cm}^2/\text{g}$ olan özgül yüzeyi, ezmeden sonra sırasıyla $2.4 \text{ g}/\text{cm}^3$ ve $4500 \text{ cm}^2/\text{g}$ 'a yükselmektedir. Yoğunluğun $2,67 \text{ g}/\text{cm}^3$ 'e çıkması için 4 saate gereksinim vardır. Bu arada özgül yüzeyde $12000 \text{ cm}^2/\text{g}$ olmaktadır [40].

6.4.1.8 Suda Çözünürlük

Uçucu kül bol miktarda saf su içine konup karıştırıldığında birkaç saat sonunda SO_3 'ün hemen hemen tamamı ve toprak alkali metal bileşikleri kısmen suda çözünür. Aynı süre içerisinde SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , Na_2O_3 , Fe_2O_3 ise suda çok az çözünür. Uçucu kül içerisindeki amorf ve camsı silis oda sıcaklığında ve saf suda çok az çözünür ancak sıcaklığın artması ile çözünürlükte belirgin bir artış izlenir. Bu durum puzolanik özellik istenen karışımlar için iyi olmayan bir özelliktir. Şekil 6.10'da uçucu külün zamana bağlı olarak su içerisindeki çözünürlüğü verilmiştir.



Şekil 6. 10 Uçucu külün zamanın fonksiyonu olarak su içerisindeki çözünürlüğü [55]

6.4.1.9 Ergime

Uçucu külün ergime sıcaklığı, elde edildiği şartlara, uygulanan prosesin maksimum ve minimum sıcaklıklarına bağlı olarak değişir. Yapılan bir deneyde yarı yükseltgen yarı indirgen bir ortamda ergimeye başlamasıyla, $900\text{--}1100 \text{ }^\circ\text{C}$ arasında hafif bir çökme, $1100\text{--}1200 \text{ }^\circ\text{C}$ arasında belirgin bir şişme göze çarpmakta, tam ergime ve sıvılaşma ise $1250\text{--}1400 \text{ }^\circ\text{C}$ arasında meydana gelmektedir. İlk çökme kolay ergiyen bileşiklerini gösterir. Şişme olayı gaz çıkışından (Fe_2O_3 , FeO , SO_3 ve CaSO_4 bozunması) meydana

gelir, bu durumda malzeme dövülebilir hale gelmektedir. Yükseltgen bir ortamda, 600°C de yanıcı maddeler uzaklaşmakta, ergime 1380°C dolaylarında başlamakta ve kül genişlemektedir. Uçucu kül tuğla rengine dönüşür, ısıtma ergime sıcaklığından önce kesildiğinde uçucu kül taneleri birbirine yapışarak aglomera olur [40].

6.4.1.10 Elektrik İletkenliği

İki iletken arasına konulmuş bir uçucu kül örneği iki farklı potansiyeldeki plaka arasına yerleştirildiğinde, bir elektrik akımının geçtiği saptanmıştır. Sıcaklık 600°C'ye çıktığı zaman çok düşük voltajda da akımın geçtiği görülmüştür. Bu yöntem ile uçucu külü kolayca aglomere etmek mümkündür [55].

6.4.1.11 Dayanım aktivite indisi

Dayanım aktivite indisi uçucu külün puzolanik reaksiyon ve dayanım kazandırma kapasitesini gösterir. Dayanım aktivite indisi ASTM C 311'e göre belirlenir. Uçucu kül için bu değer 28 günde % 75'ten daha az olmamalıdır [61].

6.4.1.12 Üniformaluluk (Homojenlik)

Uçucu kül tanelerinin boyutları ve dağılımı belli bir üniformaluluğa sahip olmalıdır. Uçucu külün üniformaluluğu inceliğinin ve yoğunluğunun belirlenmesi ile kontrol edilir [61].

6.4.2 Uçucu küllerin kimyasal özellikleri

Uçucu külün kimyasal bileşimi kullanılan kömürün yapısı, jeolojik orijini ve proses koşullarına (kömür hazırlama, yanma, toz toplama, desülfürizasyon gibi) bağlıdır.

Uçucu külde bulunan başlıca bileşenler silika (SiO_2), alümina (Al_2O_3), demir oksit (Fe_2O_3) ve kalsiyum oksit (CaO) olup, MgO , SO_3 , alkali oksitler (Na_2O , K_2O) de minör bileşen olarak bulunmaktadır. Bunların miktarları uçucu külün tipine göre değişmektedir. Ayrıca yanmamış karbon ve bunun yanı sıra titanyum, fosfor, mangan ve molibden de uçucu küldeki eser bileşenleri oluşturmaktadır [62].

Uçucu küllerin kimyasal yapılarında temel element olarak; Si, Al, Ca ve S bulunur. Uçucu küllerin matrisi esas olarak alümina silikatlardan ve bunlarla birlikte bulunabilen Fe, Mg, Na, K, Ca, Ti ve nadir toprak elementlerinden oluşur. Uçucu olan veya uçucu oksitleri oluşturan As, Cd, Ga, Mo, Pb, Se ve Zn gibi elementler matrise girme eğilimi göstermezler. Bu elementler derişimleri tane boyutu ile ters orantılı olarak uçucu küllerin yüzeylerinde toplanırlar [36].

Uçucu küldeki temel oksitlerden SiO_2 % 25 – 60, Al_2O_3 % 10 – 30, Fe_2O_3 % 1 – 15 ve CaO % 1-40 oranlarında bulunmaktadır. Bu farklı aralıklardaki değerler uçucu külün tipini karakterize etmekte olup bununla beraber uçucu külün kimyasal yapısı kömürün farklı yerlerinden elde edilmesinden dolayı farklılıklar göstermektedir. Buna rağmen uçucu külün temel bileşikleri silis ve alüminadır [63].

İçermiş oldukları SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 miktarlarına göre ASTM C 618 standardında, uçucu küller, F ve C sınıfı olarak ikiye ayrılmaktadır. F sınıfı uçucu küller, antrasit ve bitümlü kömürün yanmasından, C sınıfı uçucu küller ise linyitin yanmasından elde edilmektedir. Bitümlü ve antrasit kömürünün, linyite oranla daha az kalsiyum içermekte olması, uçucu küller arasında farklı bağlayıcı ve puzolanik özelliklere neden olan bu sınıflandırmayı doğurmuştur. C sınıfı uçucu küller puzolanik özelliklerinin yanı sıra bağlayıcı özelliklere de sahiptirler. F sınıfı uçucu küller ise su ile yalnız başına karıştırıldıklarında nadiren bağlayıcı özellik gösterirler. Uçucu küllerinin sınıflandırılmasının belirlenmesinde kimyasal özellikleri incelenmektedir. C sınıfı uçucu küllerde aktif bileşik, kalsiyum alumino silikatlı camdır. F sınıfı uçucu küllerde ise aktif bileşik silisli camdır. SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 olmak üzere üç ana bileşenin toplamı F sınıfı uçucu küllerde % 70 ve üzerinde, C sınıfı uçucu küllerde % 50 ve üzerindedir. Bu bileşimlerin C sınıfı küllerde % 50 oranında kalmasının nedeni C sınıfı küllerin % 10 ve üzerinde CaO içermesidir. CaO oranı % 10 ve üzerinde olan küller yüksek kireçli, % 10'nun altında CaO içeren küller ise düşük kireçli uçucu kül olarak adlandırılmaktadır [64].

Çizelge 6. 6 Uçucu küllerin ASTM C-618 ve TS 639 standartlarına göre sınır değerleri [65]

Bileşen	ASTM C-618 (%)		TS 639 (%)
	F Sınıfı	C Sınıfı	
$\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$	Min. % 70	Min. % 50	Min. % 70
MgO	Max.% 5	Max. % 5	Max.% 5
SO_3	Max.% 5	Max.% 5	Max.% 5
$\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$	Max.% 1,5	Max.% 1,5	-
Nem	Max. 3	Max.3	Max.3
Kızdırma Kaybı	Max.% 12	Max.% 6	Max.% 10

Diğer oksitlerden MgO en fazla % 5, alkali oksitler ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) % 5'in altında bulunmaktadır. SO_3 ise genellikle % 2-2,5 arasında bir değerde bulunmakla birlikte, kömürün yapısı ve proses koşullarına göre % 10'a kadar yükselebilmektedir. Ancak TS EN 450-2 standardı SO_3 değerini en fazla % 3 olarak sınırlandırmaktadır. Kızdırma kaybı esas olarak kömürdeki yanmamış karbona karşılık gelmekle birlikte, kömürdeki hidratlar veya karbonatların bozulması ile ortaya çıkan bağlanmamış su veya CO_2 kaybını da içine almaktadır. TS EN 450-2 standardında kızdırma kaybı % 5 olarak sınırlandırılmıştır [49].

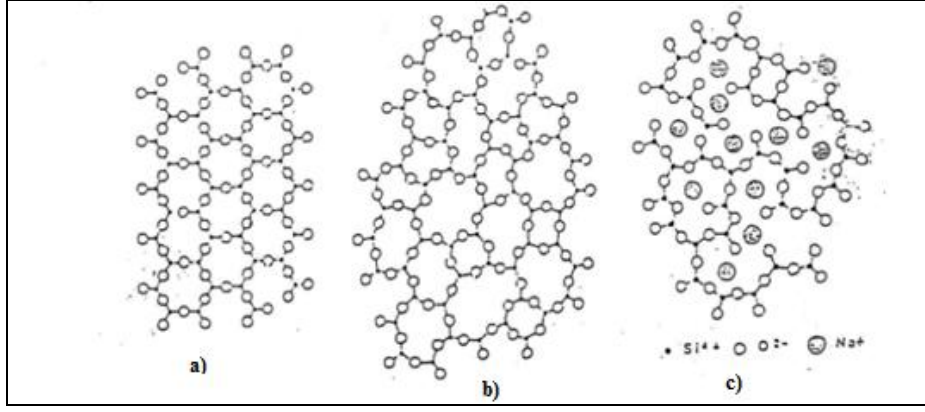
Çizelge 6. 7 Çeşitli uçucu küllerden elde edilen sonuçlara göre F ve C sınıfı uçucu küllerinin yaklaşık kimyasal bileşiklerinin yüzdesi [61]

Bileşen	F Sınıfı Uçucu Kül (%) (CaO<% 10)	C Sınıfı Uçucu Kül (%) (CaO>% 10)
SiO ₂	43,6-64,4	23,1-50,5
Al ₂ O ₃	19,6-30,1	13,3-21,8
Fe ₂ O ₃	3,8-30,1	3,7-22,5
CaO	0,7-6,7	11,5-29,0
MgO	0,9-1,7	1,5-7,5
Na ₂ O	0-2,8	0,4-1,9
C (Kızdırma kaybı)	0,4-7,2	0,3-1,9

6.4.3 Uçucu Küllerin Minerolojik Özellikleri

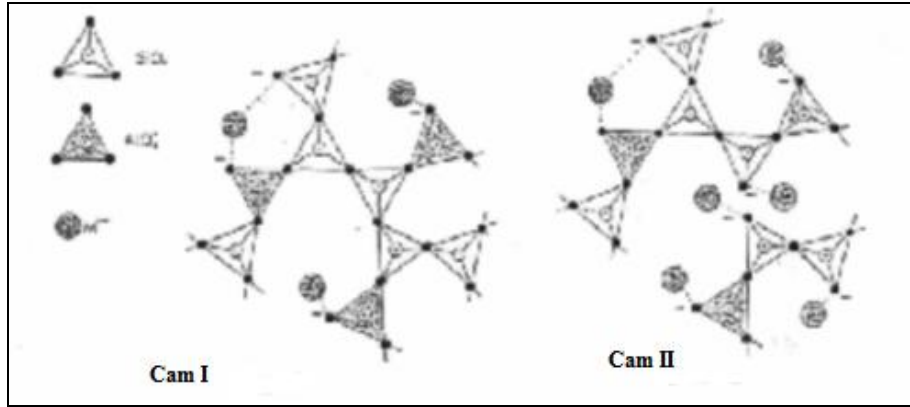
Uçucu küllerin minerolojik bileşimleri, kömürde bulunan minerallere (kil, kuvars, pirit, alçıtaşı, karbonatlar (Ca, Mg, Fe)) ve proses koşullarına (kömür hazırlama ve yanma gibi) bağlıdır. Uçucu külün minerolojik yapısı, külün tipine göre değişen dağılımda olmak üzere camsı (kristalsiz) ve kristal yapıli bileşenlerden oluşmaktadır.

Kimyasal olarak uçucu küller başlıca camsı aluminosilikatlardan oluşur. Camlar, "Kristallenme olmaksızın katı halde soğuyan silisli inorganik maddeler" olarak tanımlanır. Bunlar gerçek katı değildir ve izotropik yapılarından dolayı çok viskoz sıvılar oldukları düşünülebilir. Şekil 6.11'de silika kristali, camsı silika ve silika cam yapıları verilmiştir.



Şekil 6. 11 (a) Silika kristali, (b) Camsı silika, (c) İkili bir silika camı yapılarının iki boyutlu gösterimi [40]

Uçucu küllerde Cam I ve Cam II olmak üzere iki tip cam yapısı vardır ve bunların kimyasal yapıları Şekil 6.12'de gösterilmiştir.



Şekil 6. 12 Uçucu küllerde cam yapıları arasındaki yapısal farklılıkların gösterilmesi [40]

Uçucu külün mineralojik bileşimi (camsı fazın durumu, kristal yapıları) külün puzolanik özelliklerini etkilemektedir. Özellikle de camsı fazın durumu uçucu külün reaktivitesinden etkin olmaktadır. Düşük kireçli uçucu küldeki camsı fazın yapısı, SiO₂ açısından zengin ve yüksek oranda polimerize silisli veya alüminyum da içeren alümino silikat bileşimindedir. Silisli veya alümino silikat camsı fazı, düşük kireçli külün reaktif bileşeni olup, su ve kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek küle puzolanik özellik kazandırmaktadır [42].

Yüksek kireçli külden ise, aktif bileşen içinde silisyum da içeren kalsiyum alüminat camsı fazının yanı sıra aktif kristalize faz (serbest kireç, anhidrit, kalsiyum alüminat gibi) da

vardır. Burada saf silika camı Ca ve Al iyonları ile modifiye olmuştur. Yüksek kireçli külün camsı ve kristalize fazları, külün puzolanik özelliğinin yanı sıra kısmen bağlayıcı özelliğe de sahip olmasını sağlamaktadır [62].

Genellikle, düşük kalsiyum oksit (CaO) içeren uçucu küller başta camsı faz ve minör olarak da kuvars (SiO_2), mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), manyetit (Fe_3O_4), hematit (Fe_2O_3) içermekte; yüksek kalsiyum oksit (CaO)'li uçucu küller ise kuvars (SiO_2), hematit (Fe_2O_3), anhidrit (CaSO_4), serbest kireç (CaO), trikalsiyum alüminat C_3A ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$), dikalsiyum silikat C_2S (Ca_2SiO_4), CS ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$), melilit, ($\text{Ca}_2(\text{Mg},\text{Al})(\text{AlSi})_2\text{O}_7$), merwinit ($\text{Ca}_3(\text{Mg})(\text{SiO}_4)_2$) gibi mineraller ve camsı faz içermektedir. Bu bileşenlerin yanı sıra yüksek kireçli küllerde kalsit, portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), trisülfoalüminat ($4\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$), mullit, plajiyoklaz, feldspat gibi kalsiyum silikatlar da bulunabilmektedir. Her iki külde de, alkali feldispatlara rastlanmaktadır [66].

Çizelge 6. 8 Düşük kireçli F sınıfı uçucu küleriyle yüksek kireçli C sınıfı uçucu küllerinin içerdikleri camsı ve kristal yapılar [44]

Uçucu kül sınıfı ve kodu	İsim	Kapalı formül
Düşük kireçli/F sınıfı		
Hm	Hematite (Hematit)	Fe_2O_3
Mu	Mullite (Mullit)	$Al_6Si_2O_{13}$
Qz	Quartz (Kuvars)	SiO_2
Yüksek kireçli/C sınıfı		
Ah	Anhydrite (Anhidrit)	$CaSO_4$
C_2S	Dicalcium silicate (Dikalsiyum silikat)	Ca_2SiO_4
C_3A	Tricalcium aluminate (Trikalsiyum alüminat)	$Ca_3Al_2O_6$
Hm	Hematite (Hematit)	Fe_2O_3
Lm	Lime (Serbest kireç)	CaO
Ml	Melilite (Melilit)	$Ca_2(Mg,Al)(Al,Si)_2O_7$
Mu	Mullite (Mullit)	$Al_6Si_2O_{13}$
Mw	Merwinit (Merwinit)	$Ca_3Mg(SiO_4)_2$
Pc	Periclase (Magnezyum oksit)	MgO
Qz	Quartz (Kuvars)	SiO_2

Çizelge 6.9'da ise Türkiye'deki bazı uçucu küllerin mineralojik kompozisyonları verilmiştir.

Çizelge 6. 9 Türkiye’deki bazı uçucu küllerin mineralojik kompozisyonları [67]

Mineral (%)	Uçucu kül					
	Afşin-Elbistan	Çatalağzı	Seyitömer	Soma B	Tunçbilek	Yatağan
Mullit	1,0	18,1	1,2	4,3	8,8	6,0
Kuvartz	4,5	10,9	5,6	5,1	13,9	22,4
Manyetit	0,8	0,2	2,5	0,6	4,1	2,9
Hematit	4,0	0,1	6,0	2,0	3,0	7,0
Anhidrit	12,2	-	9,3	7,4	-	-
Serbest CaO	18,6	0,7	5,5	9,8	0,9	1,0
Plajiyoklaz	~28	-	~15	~20	-	~25
Camsı ve amorf faz	~30	~70	~50	~50	~70	~35

6.4.4 Uçucu küllerin puzolanik özelliği

ASTM C 618’e göre kendi kendine bağlayıcılık özelliği çok az olan veya hiç olmayan ancak uygun rutubet şartlarında ve normal ortam sıcaklığında kireç ile reaksiyona girip bağlayıcı özelliği olan ürünler açığa çıkaran, ince toz halindeki silisli veya silisli ve alüminli maddelere puzolan denir. Puzolanlar esasen reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3)’den oluşmuştur. Geri kalan kısım demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer oksitleri içermektedir. Reaktif SiO_2 miktarı kütlece % 25’den az olmamalıdır [68].

Puzolanlar ilk olarak eski Romalılar devrinde, bundan yaklaşık olarak 2000 yıl öncesinden itibaren söndürülmüş kireç ile birleştirilerek hidrolik bağlayıcı olarak kullanılan ve adını ilk olarak kullanıldığı İtalya’daki Vezüv yanardağı eteklerindeki puzzouli kasabasından puzolan olarak alan volkanik küllerdir [39].

Puzolanlar elde edilmişlerine göre doğal ve yapay puzolanlar olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Her bir gruba giren puzolan türleri Şekil 6.13’te verilmektedir.

PUZOLANLAR



Şekil 6. 13 Pozolanların sınıflandırılması

Uçucu küller, pozolanik özellikleri nedeni ile pozolan olarak kullanılabilen malzemelerdir [69]. Uçucu küller, baca gazları ile sürüklenir ve hava ile temas ederek ani soğuma ile pozolanik özellik kazanırlar. Uçucu küller çoğunlukla kendi başlarına bağlayıcı özelliği olmayan ancak sulu ortamda kireçle birleştirildiklerinde bağlayıcılık özelliği kazanan pozolanik malzemelerdir. Kireç ve su ile karıştırıldıktan sonra artan

süre ile birlikte uçucu küllerin puzolanik özellikleri artmaktadır. Ayrıca CaO miktarı yüksek uçucu küller daha iyi puzolanik özellik göstermektedir [70]. Uçucu külün puzolanik aktivitesinin, içinde barındırdığı amorf karakterli silikat ve alüminatlar nedeniyle meydana geldiği düşünülmektedir. Bu nedenle katkı çimento üretiminde kullanılır. Bu ise uçucu külün en geniş değerlendirilme alanını oluşturur [69].

Uçucu küldeki puzolanik etki külün bileşimine ve inceliğine bağlı olarak değişmektedir. Puzolanik özelliği etkileyen faktörleri şöyle sıralayabiliriz:

- Uçucu kül içerisindeki SiO_2 ve Al_2O_3 miktarının artması ve bu bileşiklerin amorf yapıda olması puzolanik etkiyi artırır.
- Kül içinde bulunan CaO, SO_3 ve alkali oksitlerin, puzolanik özelliği ne şekilde etkilediği tam olarak bilinmemektedir.
- Külde yanmamış karbon miktarının artması puzolanik özelliğin azalmasına neden olur. Uçucu küldeki karbon boşluklu bir yapıya sahiptir. Dayanımı düşüktür ve karışım su ihtiyacını artırır.
- Uçucu küllerin puzolanik özelliği ve mekanik dayanımı incelikle birlikte artmaktadır.

Uçucu külün puzolanik malzeme olarak kullanılabilirliği, fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır. Oluşan değişiklikler sadece uçucu külü meydana getiren mineral bileşimin değişen miktarından değil, kömürün yakıldığı kazanın çalışma sisteminden, kömürün yanmadan önceki öğütülme inceliğinden ve hava kirliliği kontrolü için kömürle karıştırılan katkı maddelerinden de meydana gelir. Küldeki bu değişiklik puzolanik aktiviteyi de etkiler [70].

6.5 Uçucu Küllerin Kullanım Alanları

Uçucu küller üzerinde yapılan araştırmalar son 30 yıl içerisinde büyük hız ve önem kazanmıştır. Önceleri daha çok uçucu külün genel yapısı ve özellikleri ile kullanım olanaklarına yönelik çalışmalar yapılırken, zamanla laboratuvar ve arazide yapılan analizler artmış, bunun sonucu olarak da uçucu külün inşaat alanında, özellikle de yol yapımında kullanımıyla, termik santrallerde büyük miktarlarda atık madde olarak oluşan bu maddenin uzaklaştırılması veya değerlendirilmesi sağlanmıştır.

Bu atıkların bertarafının yarattığı çevresel sorunlar ve bu sorunların enerji üretimine paralel olarak artışı, diğer taraftan da uçucu küllerin endüstriyel atık olarak geri kazanılmaya elverişli bir malzeme niteliği taşıması, bu konu üzerine araştırmalar yapılmasına neden olmuştur. Termik santral atıklarının endüstride ve bir çok mühendislik dalında değerlendirilmesiyle, bu atıkların depolama sorunu büyük ölçüde ortadan kalkacağı gibi, çevresel sorunlar da bertaraf edilecek ve özellikle de kısıtlı diğer hammaddelerden tasarruf edilmesini sağlayacaktır [41]. Uçucu küllerin kullanım alanları aşağıda verilmektedir:

a) Beton ve Çimento Üretiminde Kullanılması: Çimento yapımında kullanılan hammaddeler CaO , SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 olmak üzere başlıca dört bileşiği içerirler. Uçucu küllerde de değişik oranlarda aynı bileşikler bulunduğu için çimento üretiminde kullanılmaktadırlar. Puzolanik özellik gösteren uçucu küller, çimento ile birlikte kullanıldıklarında, çimentonun hidrasyonu sırasında ortaya çıkan kalsiyum hidroksit ile kimyasal reaksiyona girerek bağlayıcı özellik kazanırlar [42]. Beton üretiminde, bağlayıcı madde olarak kullanılan Portland çimentosunun bir kısmı yerine mineral katkı maddesi olarak uçucu kül kullanılabilir. Bu şekilde uçucu kül kullanılarak yapılan betonlara uçucu kül katkılı betonlar denir. Ayrıca beton üretiminde kullanılan ince agreganın bir kısmı yerine de uçucu kül kullanılabilir [61].

b) Hafif Agregaların Üretiminde Kullanılması: Hafif agregalar, hem doğal olarak hem de bazı malzemelere uygulanan çeşitli prosesler sonucunda elde edilebilir. Uçucu küller 1100-1200°C'de bir miktar ergime göstererek ve uygulanan sertleştirme yöntemine bağlı olarak yuvarlak veya silindirik taneli agregalar oluşturmaktadır. Doğal agregaya oranla daha hafif olan bu agregaların kullanılması ile hafif beton elde edilmektedir [42].

c) Uçucu Küllerin Tuğla Üretiminde Kullanılması: Tuğla üretiminde kullanılan kiler SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , K_2O , Na_2O ve TiO_2 'den meydana gelmektedir. Uçucu küllerde aynı oksitleri içerdikleri için tuğla üretiminde kullanılabilirler. Uçucu küller çok ince taneli olmaları, sertleştiklerinde yüksek dayanım vermeleri ve kilin yapısındaki oksitleri içermelerinden dolayı tuğla üretiminde kullanılmaya elverişlidir ve tuğla üretiminde yardımcı ve düzeltme maddesi olarak veya esas malzeme olarak kullanılırlar [52].

d) Gaz Beton: Gaz-beton, çimento veya kireç ile uçucu kül karışımından otoklavda hava ya da başka bir gaz geçirilmesiyle elde edilmektedir. Ateşe karşı son derece dayanıklı, hafif ve ısı yalıtımı sağlayabilen gaz betonlar uçucu kül karışımının kullanılması ile daha ucuza mal edilebilirler [71].

e) Geoteknik Uygulamalarda ve Yol Yapımında Kullanılması: Uçucu küllerin yol yapımında ve geoteknik uygulamalardaki kullanımları aşağıdaki gibidir:

- Zemin iyileştirmede iyileştirici katkı malzemesi olarak,
- Enjeksiyon malzemesi olarak,
- Dolgu malzemesi olarak (Kanal kaza dolgu malzemesi, baraj dolgu malzemesi, temel altı dolgusu, istinat duvarı arka dolgusu, yol inşaatında dolgu malzemesi ve iyileştirme malzemesi olarak),
- Atık depolama tesislerinde taban, yan ve üst sızdırmazlık tabakası olarak kullanılır [65].

Uçucu küller sıkıştırıldıkları zaman diğer dolgu malzemelerine nazaran daha düşük bir yoğunluğa sahip olurlar. Bu durum, özellikle sıkıştırılabilirlik özelliği yüksek uçucu küllerin yüksek zeminler üzerinde daha uygun bir dolgu malzemesi olarak kullanılabilmesini gösterir. Böylece, yerleşme nedeniyle oluşan deformasyonlar daha küçük olacak, özellikle yerleşme hareketinin büyük sorunlar yarattığı köprü ayaklarında kullanılması çeşitli yararlar sağlayacaktır. Son zamanlarda uçucu külün çevre geoteknolojisi uygulamalarında kullanım olanakları araştırılmaktadır. Örneğin, zararlı atık veya çöp depolanan sahalarda sızdırmazlık sağlamak amacıyla, sıkıştırılmış kil yerine, sıkıştırılmış uçucu kül veya uçucu kül+kum karışımının kullanılması düşünülmektedir [42].

f) Uçucu Küllerin Seramik ve Cam Üretiminde Kullanımı: Uçucu küller kil ve feldspat ilavesi yapılarak sanatsal seramiklerin üretiminde kullanılmaktadır. Uçucu küller seramik sanayinde kullanıldığında sağladığı avantajlar, tane boyunun küçüklüğü, öğütme masraflarının olmayışı, maliyetinin çok az olması ve içerdiği karbon miktarının pişirme sırasında sağladığı enerji tasarrufudur. Uçucu küllerden aynı zamanda cam seramiklerinin üretiminde de yararlanılmaktadır [52].

g) Uçucu Külün Tarımda Kullanımı: Uçucu kül özellikle fiziksel yapısının bitki yetiştirmeye olan uygunluğu ve içinde makro ve mikro besinleri bulundurması sebebiyle engin bir potansiyele sahiptir. Uçucu kül kullanarak elde edilen tarım ürünlerinin sağladığı kazanç hakkında Hindistan'da ve başka ülkelerde önemli araştırmalar yapılmış ve uçucu kül uygulamasıyla kazancın % 15-25 oranında arttığı saptanmıştır. Ayrıca, bazı durumlarda kazancın % 100 ve hatta daha fazla arttığı rapor edilmiştir. Uçucu külde ağır toksik elementlerinin bulunması kaygı vericidir. Tarımda uçucu kül kullanımında bu elementlerin varsa negatif etkileri göz önünde bulundurulmak zorundadır [41].

h) Bileşiğe Giren Madde Olarak: Uçucu küllerin nikel kaplamacılıkta kullanılmaya başlanmasıyla aşınmaya karşı kaplanan malzemelerin direnci iyileşmiştir. Uçucu kül parçacıklarının ve nikelin birbirlerine çok iyi bağlanmaları yüksek aşınma direncinin sağlanmasına neden olmuştur. Aynı zamanda uçucu küller metal kompozisyona sahip parçaların yoğunluğunun azaltılmasında kullanılmaktadır. İçi boş küresel parçacıklardan oluşmaları nedeni ile uçucu küller parçalara yüzme özelliği sağlar, izolasyonda kullanılırlar [41].

ı) Koagülant ve Adsorban Olarak Kullanımı: Uçucu kül birim hacim başına büyük bir özgül yüzey alana ve çok geniş bir tane dağılımına sahiptir. Uçucu küllerin karbon içeriği %1-60 arasında değişmektedir. Uçucu külün yapısındaki karbon miktarı arttıkça adsorplama kapasitesi de artmaktadır. Uçucu külün içerisindeki silika, alüminyum, kalsiyum, magnezyum ve toprak alkali maddeleri su içinde ya da derişik asit çözeltisi içinde serbest hale gelirler. Böylece ham uçucu kül ile elde edilen çözeltiler su ve atık su arıtma işlemlerinde ya da atık sulardaki ağır metallerin adsorplanmasında önemli rol oynamaktadırlar. Özellikle de adsorpsiyon işlemleri ile ağır metallerin gideriminde ticari kullanımı yaygın ve pahalı olan aktif karbon gibi adsorban maddelerin yerine kullanılabilirler [72].

Belirtilen alanların dışında uçucu küllerin kullanıldıkları diğer alanlar;

- Maden ocaklarında filtre olarak
- Cam üretiminde hammadde olarak

- Harç yapımında
- Isı yalıtım malzemesi olarak
- Bataklık kurutmada
- Metal yüzeylerinin püskürtme ile temizlenmesinde
- Petrol kuyusu sondajlarında
- Kerpiç üretiminde bağlayıcı malzeme olarak
- Baraj, otoyol, nükleer santral gibi yapılarda
- Tarımda sıkı toprağın gevşetilmesi ve nem tutma yeteneğinin artırılmasında
- Döküm kumu olarak
- Dolgu malzemesi olarak çatı malzemeleri, sabun, kağıt, lastik, plastik ve suni gübre sanayinde
- Kömür madenlerinde çökme ve yangın kontrolünde
- Buz kontrolünde
- Emülsiyon üretiminde [26], [42], [73].

6.6 Dünya’da ve Türkiye’de Uçucu Kül

Termik santrallerde elektrik üretiminin yapıldığı ilk yıllarda kömürün yanması sonucunda oluşan ürünler bir atık olarak değerlendiriliyordu. Bu ürünlerin özellikleri üzerine çalışmalar yapılmamış ve kömürün yanması sonucu açığa çıkan ürünlerin neredeyse tümü atık olarak depolanıyordu. Uçucu külün puzolanik özellikleri fark edildikten sonra fiziksel, kimyasal özelliklerini ve yapı malzemesi olarak uygunluğunu anlamak için çalışmalar yapılmıştır. Geçtiğimiz son bir kaç on yıldır termik santrallerde kömürün yanması sonucu açığa çıkan uçucu küller yapı endüstrisinde ve başka alanlarda değerlendirilmektedir [74].

Geçtiğimiz yıllarda artan nüfus sebebiyle, Amerika’da ve diğer tüm dünya ülkelerinde termik santrallerde kömürün yakılmasıyla elektrik enerjisi üretim prosesleri de artmış

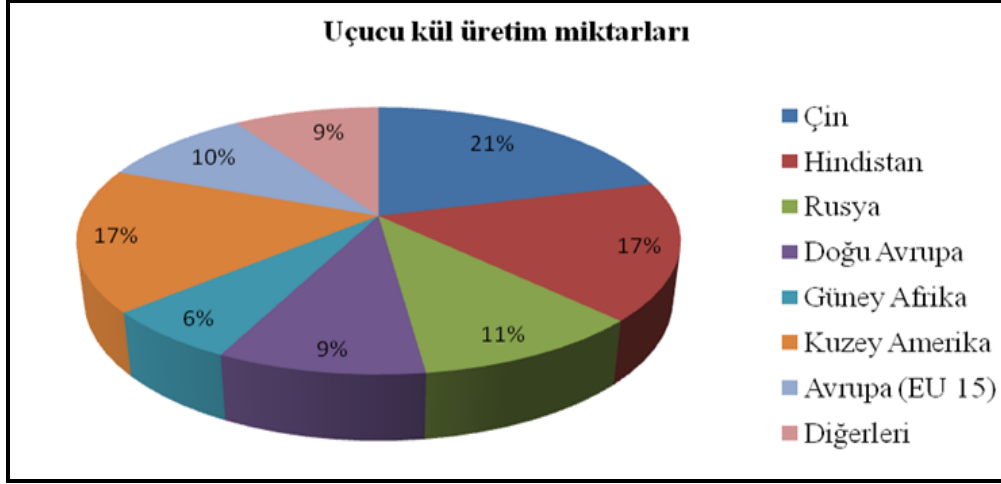
bulunmaktadır. Bu da kömürün yakılması sonucu açığa çıkan atıkların da artmasına neden olmuştur [74].

1920'lerde termik santrallerde parça kömürün yakılması yerine pulverize kömürün yakıldığı üretim prosesleri geliştirilmiştir [74]. Kömür rezervlerinin son 200 yıldaki mevcut üretim seviyeleri tahmin edilmektedir. 2002 sonunda 985,000 M ton kömür rezervinin olduğu tahmin edilmektedir. Neredeyse her ülkede mevcut kömür kaynakları bulunmasına rağmen, Dünya'daki en büyük kömür yatakları Amerika Birleşik Devletleri, Rusya ve Çin'de bulunmaktadır [75]. Elektrik üretimi için temel olarak kömürü kullanan ülkeler Çizelge 6.10'de verilmiştir.

Çizelge 6. 10 Elektrik üretimi için temel olarak kömürü kullanan ülkeler [75]

Ülke	Kömürün yanması ile üretilen elektrik enerji yüzdesi (%)
Polonya	94,8
Güney Afrika	93,0
Hindistan	78,3
Avustralya	76,9
Çin	76,2
Çek Cumhuriyeti	66,7
Yunanistan	62,3
Almanya	52,0
Amerika Birleşik Devletleri	49,9
Danimarka	47,3
İngiltere	32,9
EU 15	27,2

2000 yılında yedi ülke veya bölgedeki çoğunlukta olan uçucu kül kaynaklarının, ~480 M ton uçucu kül üretildiği tahmin edilmektedir [75].



Şekil 6. 14 2000 yılına ait uçucu kül üretim miktarları [75]

Çin’de 1949 yılından beri yaklaşık 2.2 milyar ton uçucu kül yaklaşık 300 kilometre kare alanda biriktirilmiştir. Son yıllarda kömürün yakılmasıyla elektrik enerjisinin üretildiği tesislerde uçucu kül üretimi belirgin bir şekilde büyümüş ve 160 milyon ton seviyelerine ulaşmıştır. 2005 yılında bu seviyenin 250-260 M ton, 2010 yılında 320-380 M ton ve 2020 yılında ise 320-380 M tonlara ulaşması beklenmektedir. Hükümetin de bu soruna çözüm arayışa geçmesinden sonra 2002 yılında üretilen 150 M ton uçucu külün 100 M tonu kullanılmıştır. Hükümetin uçucu külün birçok alanda kullanımını desteklemesiyle uçucu kül kullanımının 2005 yılına kadar % 65 oranında artacağı tahmin edilmektedir [75].

Hindistan’da uçucu kül kullanımı 2000 yılından önce % 10’ların altındayken 2002 yılında belirgin bir artışla % 26’ya yükselmiştir. 19 milyon ton uçucu kül çimentoda kullanılmıştır [75].

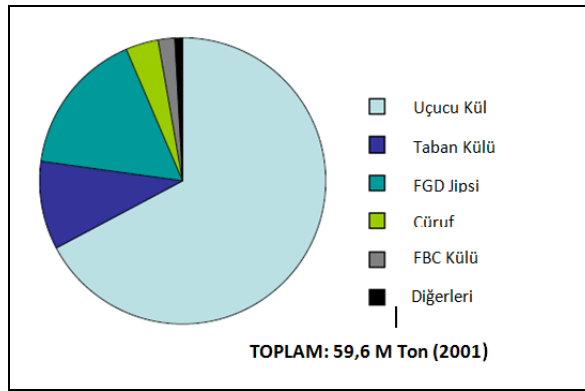
Rusya 173 milyar ton kömür rezervleriyle dünyada ikinci sırada yer almaktadır. Rusya’da yılda kömürün yanmasıyla oluşan uçucu kül atıkları 75 M tondur ve bunun sadece % 11’i kullanılmaktadır [75].

Doğu Avrupa’da 2000 yılındaki en büyük kömür/linyit uçucu külü üreticileri Letonya (23,3 M ton), Çek Cumhuriyeti (10,4 M ton), Polonya (10,3 M ton) ve Romanya (6,4 M ton)’dır. Polonya’daki 15 milyon ton uçucu külün 2001 yılında %70’inin kullanıldığı gözlenmektedir [75].

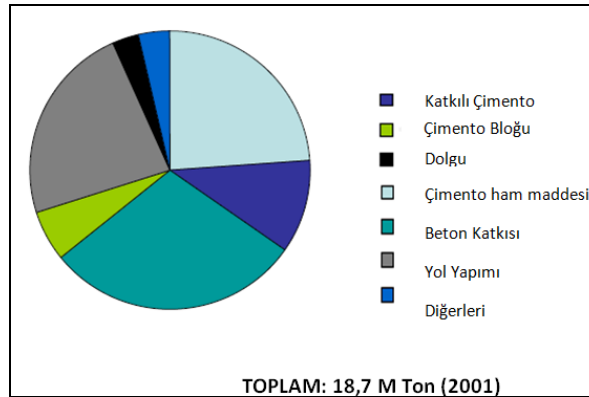
Amerika Birleşik Devletleri'nde 2002 yılında kömürün yanması sonucu oluşan ürünlerin toplam miktarı 128,7 milyon ton olup bunun yaklaşık % 35,4'ü olan 45,5 milyon tonu kullanılmıştır. 76,5 milyon tonluk uçucu külün yıllık 12-13 milyon tonluk kısmı Portland çimentosunda kullanılmıştır[75].

Japonya'da % 82'lik üretim sonucu oluşan uçucu külün 7 M tonluk miktarı kullanılmaktadır. Toplam uçucu külün % 71 (4,89 M ton)'i çimento sektöründe kullanılmaktadır [75].

Avrupa Birliği üyesi 15 ülkenin (EU 15) 2001 yılındaki yaklaşık 60 milyon tonluk uçucu kül miktarının üretimi ve kullanımı aşağıdaki Şekil 6.15 ve Şekil 6.16'da verilmiştir.



Şekil 6. 15 Avrupa Termik Santralleri tarafından üretilen küller [75]

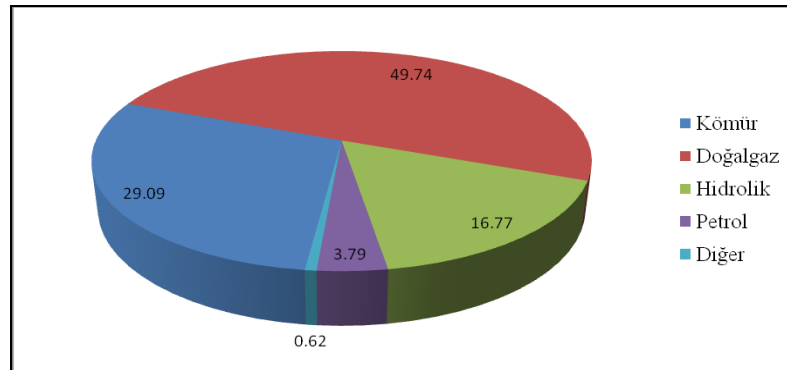


Şekil 6. 16 Avrupa'daki termik santrallerden elde edilen küllerin kullanımları [75]

Ülkelerin ekonomik ölçekte büyüme eğilimi göstermesi enerji tüketimlerinin de artmasına sebep olmaktadır. Enerji tüketimindeki artışlar ve endüstriyel gelişim beraberinde atıkların sebep olduğu çevre kirliliğini meydana getirmektedir. Bunun yanında küresel ısınma ile ilgili problemlerin çözümü için fosil kaynaklı enerjiler yerine

yenilenebilir kaynakların kullanılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Gelişmiş ülkelerde geri dönüşüm konusu büyük önem kazanmış ve bu hammaddelerin kullanımına ilişkin araştırma çalışmaları giderek artan bir ivme kazanmıştır. Türkiye’de de güncelliğini koruyan en önemli konulardan biri enerjiden ve kullanılan hammaddeden tasarruftur.

Türkiye’nin orta ve uzun vadeli enerji üretim politikalarının başında yakıt olarak pulverize kömürün yaygın olarak kullanıldığı termik santraller gelmektedir. Katı fosil yakıtların (linyit gibi) yakıldığı bu ünitelerden ortaya çıkan cüruf ve uçucu kül beraberinde önemli bir çevre problemi de oluşturmaktadır. Özellikle teknolojik ve ekonomik değeri olan uçucu külün değerlendirilmesi maalesef çok düşük seviyede kalmaktadır [36]. Türkiye’de halen sadece kömür ile çalışan 15 tane termik santral faaliyet göstermektedir. Çatalağzı, Çolakoğlu ve Sugözü-İskenderun termik santrali dışındaki tüm santraller, linyit kömürü ile çalışmaktadır. Ülkemizde elektrik enerjisinin halen önemli bir bölümü termik santraller yolu ile üretilmektedir. EPDK’ya göre, Türkiye’de 2007 yılı sonu itibarıyla 40.777,3 MW’a ulaşan toplam kurulu güç kapasitesinin % 31,6’sı doğal gaz, % 25’i kömüre ve % 32,8’i hidrolik kaynaklara dayalıdır. 2007 yılında Türkiye’de toplam elektrik enerjisi üretimi, bir önceki yıla göre % 8,4 oranında artarak 191,2 milyar kWh olarak gerçekleşmiştir. 2007 yılı elektrik üretiminde doğal gaz yakıtlı santrallerin payı % 48,6, hidroelektrik santrallerin payı % 18,7 ve linyit yakıtlı termik santrallerin payı % 20 olarak gerçekleşmiştir [76]. Şekil 6.17’de ise 2008 yılı Türkiye elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı verilmektedir [77].



Şekil 6. 17 2008 yılı elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı [77]

TÜİK'a göre, Türkiye' de termik santrallerde 2003 yılında 11.84 milyon ton, 2004 yılında 13.34 ton ve 2006 yılında 16.01 ton atık açığa çıkmıştır. 2003-2006 yılları arasında oluşan atığın ortalama % 10' u tesis dışında geri kazanılmış, % 90' ı ise bertaraf edilmiştir. Bertaraf edilen atığın ortalama % 79' u kül dağı/barajında toplanmıştır. Termik santrallerin atık bileşimi içindeki en büyük pay, mineral atıklardan (kül, cüruf, uçucu kül ve alçıtaşı) meydana gelmiştir[78].

Termik santrallerde, 2008 yılında 25,62 milyon ton atık oluşmuştur. 2008 yılında oluşan atığın % 79'u kül dağı/kül barajına atılmış, % 16'sı gömülmüş ya da maden sahasında depolanmış, % 3'ü ise satılmış ya da geri kazanım amacı ile başka firmalara verilmiştir. Termik santrallerin atık bileşimi içindeki en büyük payı, %99,4 ile mineral atıkların (kül, cüruf, uçucu kül ve alçıtaşı) oluşturduğu görülmüştür [79].

Türkiye'de 2020 yılına kadar yıllık uçucu kül miktarının 50 milyon tonu geçmesi beklenmektedir [36].

Çizelge 6. 11 2006 Yılı Termik Santral Temel Çevre Göstergeleri [78]

	2006
Temin edilen su miktarı (bin m ³ /yıl)	2 719 919
Kullanılan soğutma suyu miktarı (bin m ³ /yıl)	2 686 797
Deşarj edilen atık su miktarı (bin m ³ /yıl)	2 658 513
Katı atık miktarı (ton/yıl)	16 009 871
Tesis dışında geri kazanılan	1 304 825
Bertaraf edilen	14 705 046

Çizelge 6. 12 2008 Yılı Termik Santral Temel Çevre Göstergeleri [79]

	2008
Çekilen su miktarı (bin m ³ /yıl)	4 546 668
Kullanılan soğutma suyu miktarı (bin m ³ /yıl)	4 491 256
Deşarj edilen atık su miktarı (bin m ³ /yıl)	4 446 678
Aritılan atık su miktarı (bin m ³ /yıl)	10 570
Atık miktarı (ton/yıl)	25 622 233
Tehlikeli	24 439
Tehlikesiz	25 597 794

Ülkemizde uçucu kül kullanımının yeterince yaygınlaşmamasının başlıca nedenleri;

- Üretici ve tüketiciler olarak konunun yeterince kavranmaması ve termik santrallerde baca külü ile taban külünün karıştırılması, depolama ve sınıflandırmada gerekli özenin gösterilmemesi,
- İnşaat sektörünün tutucu yapısı,
- Bilgilendirme eksikliği ve uçucu külün yeterince tanınmaması,
- Külün santral koşullarından ve kömürün yapısından kaynaklanan homojenliğinin olmaması,
- Çimento sanayinin tutumu,
- Uçucu külün çevresel etkileri,
- Bazı uçucu küllerde radyoaktivite bulunması, olarak belirtilebilir [65].

PELETLEME

Peletleme, ince boyutlu demir cevheri veya genellikle konsantrelerin, uygun bir bağlayıcı ve gerekli su katkısı ile özel cihazlarda, belirli boyutlarda yaş küreler haline getirilmesi, ardından dayanıklılık kazandırmak amacıyla 1200-1300°C sıcaklıklarda pişirilmesi işlemini kapsayan bir aglomerasyon yöntemidir. Peletleme işlemi özellikle demir cevherlerine ve bunların dışında krom cevherleri, kurşun cevherleri gibi bazı demir dışı metal cevherlerine de uygulanabilmektedir [80].

Peletler sert ve küresel hammaddelerdir. Yüksek fırında kullanılabilmesi için aşağıdaki özellikleri taşımaları gerekir [81]:

- Peletler; toz, kırıntı ve ince kısımdan arındırılmış, uygun tane boyunda olmalıdır.
- Taşıma ve stoklama sırasında meydana gelebilecek darbelere dayanıklı olmalıdır.
- Yüksek fırında ısınmaya ve çeşitli reaksiyonlara dayanıklı olmalıdır
- Zamansız ufalanma ve parçalanma göstermemelidir.

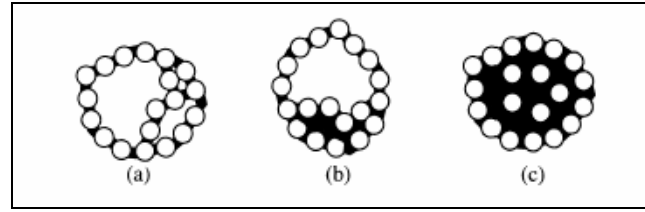
7.1 Peletleme Teorisi

Peletleme teorisi 1940 yılında geliştirilmiştir. Peletleme prosesini etkileyen unsurlar şunlardır [82]:

- Peletlenmiş malzemenin mühendislik özellikleri,
- Ortamdaki nem miktarı,
- Diskin dönme hızı ve çalışma açısı gibi mekanik işlem parametreleridir.

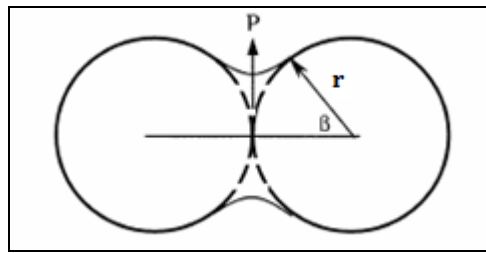
Bu parametreler ile analiz yapılarak mekanik ve kinetik kanun yardımı ile peletleme prosesinin teorisi çıkarılmıştır.

Şekil 7.1'de görüldüğü gibi ince taneli malzemelere nem verildiğinde bu tanelerin yüzeyinde ince sıvı tabaka oluşmakta ve tanecikler birbirlerinin yanına gelerek köprüye benzeyen şekiller ortaya çıkmaktadır. Bu tanecikler bir diskin içinde döndürüldüğünde, tanelerin yapısı, yer çekim ve merkezkaç kuvveti ile ve arasındaki bağ yardımı ile küresel forma gelmektedir.



Şekil 7. 1 Pelet şekillenme mekanizması [82]

Peletin dayanımı, peletleme işleminin parametrelerine ve pelet üzerine uygulanan basıncın büyüklüğüne bağlıdır. Üstelik kılcal kuvvetler ((P), sıvı kolonun yüksekliği tarafından uygulanan yüzey gerilim) peletlerin birbiriyle tutulmasında büyük rol oynamaktadır. Kılcal kuvvet tanecik çapının (R) ve tanecik ve sıvı bağlayıcı arasındaki menisküs açının (β) fonksiyonudur. Yapının bağlanması peletler üzerine uygulanan mekaniksel ve kılcal kuvvetler ile doğru orantılıdır [82].



Şekil 7. 2 Tanecikler arasındaki su köprüsünün yarattığı yüzey gerilim kuvvetinin şematik görüntüsü [82]

H. Rumpf aşağıdaki varsayım ve sadeleştirmeyi yaparak tanecikler üzerinde harcanan kılcal ve kohezyon kuvvetleri formüle etmiş;

- Tüm taneler küresel ve aynı çaptadırlar,
- Bağlanma modeli kürenin her tarafında aynıdır,
- Küredeki tanecikler eşit olarak dağılırlar,
- Bağlanma kuvvetinin etkisi ortalama değer civarında değişir.

Kılcal durumdaki kohezyon kuvveti, yukarıda söylenen varsayımlarına göre (7.1) eşitliği ile ifade edilmiştir [82].

$$P_C = 8 * \frac{(1-\varepsilon)*\sigma}{\varepsilon*D} \quad (7.1)$$

Burada;

σ : Sıvının yüzey gerilimi,

P_C : Kılcal durumdaki yapıya uygulanan kohezyon kuvveti,

ε : Kürenin gözenekliliği,

D : Küresel taneciklerin çapıdır [82].

7.2 Peletleme Hammaddeleri

7.2.1 Cevher

Peletlenecek cevher fiziksel ve kimyasal bazı özelliklere sahip olmalıdır. Yapısına göre % 60 Fe içerikli cevherler peletlenebilmektedir, ancak dünyada genellikle % 65'ten daha fazla Fe içeren cevherler peletlenmektedir. Ham peletin üretilmesinde en önemli etkenlerden biri cevherin özgül yüzey alanıdır. Cevherin yapısına göre bu değer 1500 g/cm² civarında olabilir. Peletlemede beslenen malzemeler, hazırlanış şekline göre, kuru tanelerin yığını veya yaş filtre keki olabilirler. Cevherler bazen kuru öğütülerek bazen da yaş sistemde öğütülerek hazırlanırlar. Daha çok konsantreler filtre keki olarak elde edilirler. Düşük ya da yüksek orandaki nem peletlemeyi olumsuz etkiler [67].

7.2.2 Bağlayıcılar

Ham peletlerin hazırlanması, aglomerasyonun önemli bir basamağı olup hazırlık aşamasında bağlayıcı kullanımı gerektirir. Ham pelet yapısının oluşumunda bağlayıcı

kullanım oranı filtre kekinin nemi ile doğru orantılıdır. Özellikle toprakların büyüme hızı nem ile kontrol edilir. Bu nedenle bağlayıcı olarak kullanılan maddeler suyun akışkanlığını azaltacak nitelikte olmalı, peletlenecek malzemenin yapısal özelliklerini bozmamalı, peletleme işlemindeki diğer bölümlere uyum sağlamalıdır. Ayrıca peletlemede kullanılacak malzemenin seçiminde kolayca ve yeterli miktarda bulunabilmesi ve ekonomik olması en önemli etkenlerdir [81].

Bağlayıcı maddeler üç ana grupta toplanabilir:

1. İnorganik bağlayıcılar
2. Organik bağlayıcılar
3. Bentonit

İnorganik bağlayıcıların tersine, organik bağlayıcıların içinde bulunan bazı maddeler, peletleme işleminin ısıl bölümlerinde yok olmakta, ürün peletlerin yapısında bulunmamaktadır. Dünyada gerek bulunabilirliği gerekse ucuz olması nedeniyle bağlayıcı olarak bentonit kullanımı çok yaygındır. Bentonitin kullanılabilirliği genelde su emme yeteneğinden ileri gelmektedir. Bentonitin katılması ile hem suyun kalış süresi uzatılır, hem de ek bağlayıcı kuvvetler elde edilir [67].

7.2.2.1 Bentonit

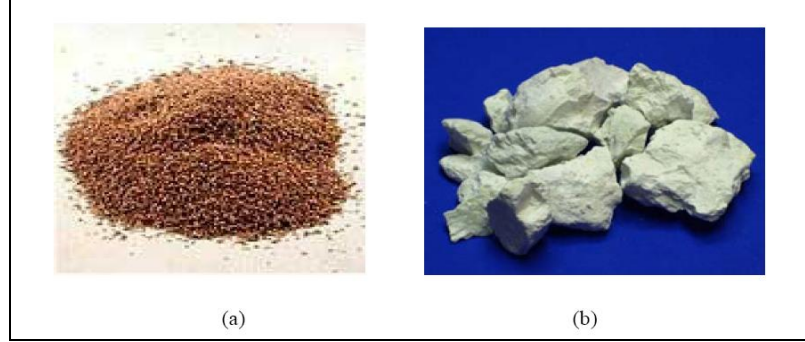
Wyoming'de (ABD) Ford – Benton yakınlarında bulunmuştur. Kolloidal özellik gösteren, plastisitesi yüksek bir kil çeşididir. Amerika'da Bentonit adı altında tanınmıştır. Bentonit volkanik külün yerinde ayrışmasıyla oluşan ve büyük ölçüde montmorillonit kil mineralinden oluşan su emip şişen toprağımsı bir madendir. Kil mineralinin bir çeşidi olan bentonitin genel kimyasal formülü;

$(\text{Na,Ca})(\text{Al,Mg})_6(\text{Si}_4\text{O}_{10})_3(\text{OH})_6 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ şeklindedir [67].

Sodyum bentoniti genelde ağırlıklı olarak sondaj, döküm ve demir konsantrelerinin peletlenmesi gibi işlemlerde kullanılır.

Kalsiyum bentoniti ise özellikle ağartma toprağı olarak işlenir ve kullanılır. Kalsiyum bentoniti su ile teması halinde kendi hacminin 2-3 katı kadar şişer ancak bu oran

sodyum bentonitinde 8-10 kata kadar ulaşabilmektedir. Rengi beyaz, gri, sarı, pembe, yeşil olabilir. Yoğunluğu $2,6 \text{ gr/cm}^3$ 'dür. İyonlaşma kapasitesi yüksektir [67].



Şekil 7. 3 Bentonit türlerinin görüntüleri: (a) Ca-Bentoniti, (b) Na-Bentoniti [67]

Bir kil çeşidi olan bentonit dünyada birçok sanayi dalında kullanılmaktadır. Bunlar;

- Sondajlarda sondaj çamurunu jelleştirme,
- Döküm kumu bağlayıcısı olarak kalıpların hazırlanması,
- Demir cevheri konsantresinin peletlenmesinde, birleştirici ve bağlayıcı olarak,
- İnşaat mühendisliğinde temel ve baraj yapılarında su ve sıvı sızdırmazlığı elde etmede,
- Hayvan yemi yapımı,
- Yemeklik sıvı yağların ağartılması,
- Şarap ve meyve sularının berraklaştırılması,
- İlaç, kağıt, lastik sanayinde dolgu maddesi olarak kullanımı,
- Çimento sanayinde, seramik sanayinde dolgu maddesi olarak kullanımı,
- Evcil hayvanların altlarına yayılacak atıkların kolay temizlenmesi,
- Petrol rafinasyonu,
- Atık suların temizlenmesi,
- Boya sanayinde ve yangın söndürücüler,
- Gübre yapımında ve toprak ıslahıdır.

Türkiye’de ise bentonitin en çok tüketildiği alanlar sondaj, peletleme ve döküm sanayileridir. Ayrıca yağların ağartılmasında kullanıldığı gibi temizlik maddeleri yapımında ve kağıt sanayinde de kullanılmaktadır. Bentonit ham, öğütülmüş yığın, torbalanmış ve aktifleştirilmiş halde satılmaktadır. Türkiye’de faaliyet gösteren bentonit firmalarının yaklaşık yılda 300x10³ ton bir öğütme kapasiteleri vardır. Yıllık bentonit üretimimiz 600 x10³ ton civarındadır [81].

7.3 Peletleme İşlemi

Peletleme işlemi üç aşamada gerçekleştirilmektedir. Bunlar;

- Harmanlama
- Uygun bir cihazda (örneğin peletleme diskinde) malzemeye su ve bağlayıcı maddeler (bentonit, dolomit gibi) ilave edilerek yaş peletlerin üretilmesi,
- Yaş peletlerin uygun bir sıcaklıkta pişirilmesi (termik sertleştirilmesi)

Peletleme, ilk bakışta sinter gibi toplama metodu olarak görülürse de sintere nazaran birçok metalürjik üstünlükleri vardır. Bunların başlıcaları şunlardır:

- a) Peletlerde demir (Fe) yüzdesi yüksek ve cüruf yapıcı maddeler azdır.
- b) Peletler içinde demirin oksitlenmesi fazla, yani Fe₂O₃ hakimdir.
- c) Cüruf yapıcı maddeler, pelet içinde homojen dağılıma olduğundan, peletle, yüksek sıcaklıktaki bir fırında hızlı bir ergime sağlanmaktadır.
- d) Peletler küresel biçimli ve birbirine yakın boyutlu olduklarından, yüksek sıcaklıklı bir fırında daha iyi bir gaz geçirgenliği ve daha düzgün bir gaz dağılışı sağlamaktadırlar.
- e) Sintere nazaran, peletlerin görünür yoğunluğu daha yüksektir (sinterinki 1,5-1,8, peletlerinki ise 2,0-2,4’tür). Dolayısıyla yüksek fırında, birim hacim başına % 10-30 kadar daha fazla demir (Fe) içeren bir yükleme yapılabilmektedir.

Peletleme işlemi ile yüksek demir (Fe) içeren ve aynı zamanda boyut dağılımı dar limitler içerisinde kalan yüksek bir fırın hammaddesi meydana getirilmektedir. Pelet

kullanan yüksek fırınlarda cüruf miktarı azalmakta, kok üretiminde tasarruf sağlanmakta ve pik üretimi kapasitesi de artmaktadır [67].

7.4 Harmanlama

Peletlemenin birinci kademesi karıştırma işlemidir. Karıştırma işleminde filtre keki bağlayıcı ve katkı maddeleri gerekli oranlarda en iyi şekilde karıştırılır. Peletlemede bant konveyörlü ve kanatlı olmak üzere iki tip karıştırıcı kullanılmaktadır [81].

7.5 Yaş Pelet Üretimi

Peletleme işleminde beslenen malzemeler, hazırlanış şekillerine göre kuru tanelerin yığını veya filtre keki olabilirler. Cevherler bazen kuru öğütülerek bazen de yaş sistemde öğütülerek hazırlanırlar. Daha çok konsantreler filtre keki olarak elde edilirler. Eğer kuru cevher parçacığı su ile temas ederse, parçacığın yüzeyi ıslanır. Cevher parçacığı su filmi ile kaplanır. Islanmış parçacıklar diğerlerine değdiğinde, su filminin yüzey gerilimi nedeniyle, sıvı köprüler oluşur. Parçacıkların yuvarlanma ünitesinin içindeki hareketi ve su damlacıklarının birleşmesi sonucunda, cevher taneleri birleşerek topaklanma oluşur [67].

7.6 Pişirme İşlemleri

Pişirme makinelerinde hava akışı malzeme akışına ters yöndedir. Peletlenmeden elde edilen yaş peletler bir veya birkaç bölmeli kurutma bölgesinde önce yüzey neminden, sonra kılcal sulardan arıtılır. 350-400°C'de hidratlar bozularak hem peletin yapısını terk eder, daha yüksek sıcaklıklarda karbonat sülfat bileşikleri bozular, sülfür ortamdan uzaklaşır ve oksitlenme başlar, 1250-1350°C'de manyetit cevheri gerekli direnci kazanır. Hematit cevherinin peletlenmesi, manyetite göre değişiklik gösterir. Hematitten üretilen pelet, direncini kristal büyümesinden ve yeniden kristalleşmeden kazanır [81].

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

8.1 Malzemelerin Karakterizasyonunda Kullanılan Enstrümental Analiz Cihazları

Hammaddelerin karakterizasyon çalışmalarında XRD, XRF, SEM, FT-IR, BET ve ICP-OES kullanılmıştır.

8.1.1 X-Işını Difraktometresi (XRD)

X-Işını Difraksiyon Spektroskopisi malzemenin içerdiği kristal fazları belirlemede kullanılan bir cihaz olup, örneğin üzerine havası boşaltılmış bir tüp içerisinde üretilen X ışınları gönderilmesi ve bu ışınların örneğe çarpmasının ardından kırılma ve dağılma verilerinin toplanması prensibine göre çalışır. XRD'yi çok kullanışlı yapan etken ise, kristal yapılardan parmak izi hassaslığında veri alınabilmesidir.



Şekil 8. 1 XRD cihazı

Deneysel çalışmalarda kullanılan Orhaneli ve Çatalağzı uçucu kül numunelerinin kristal yapı analizi, Philips Panalytical-X'Pert Pro X-ışını difraktometre cihazıyla incelenmiştir (Şekil 8.1). Cihazda X-ışınları 45 kV ve 40 mA değerlerinde CuK α tûpünde üretilmektedir.

8.1.2 X-ışınları Floresans Spektroskopisi (XRF)

Elementel analiz yapılmasını sağlayan X-ışını floresans spektroskopisi (Şekil 8.2) numunelerin üzerlerine X-ışınlarının gönderilmesi ve numunelerin kendi karakteristik X-ışını floresansını yayması temeline dayanmaktadır. Deneylerde kullanılan hammaddelerin XRF analizi Panalytical-Minipal4 cihazı ile yapılmıştır.

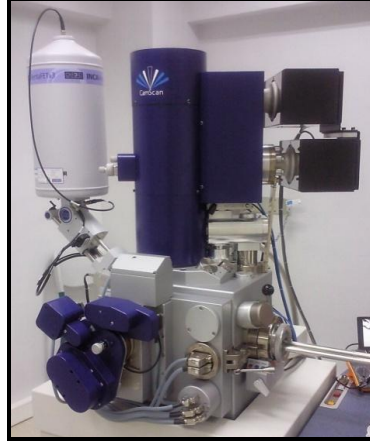


Şekil 8. 2 XRF cihazı

Hammaddelerimizin majör ve eser element dağılımları XRF analiz tekniğı kullanılarak belirlenmiştir. Yapılan testler, standardless programında üç tekrar yapılarak gerçekleştirilmiştir.

8.1.3 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Deneysel çalışmalarda kullanılan hammaddelerin mikro yapıları ve tanecik boyutları CamScan-Apollo 300 cihazı (Şekil 8.3) ile incelenmiştir.



Şekil 8. 3 SEM Cihazı

8.1.4 Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi (FT-IR)

Uçucu küllerin, melasın ve üleksitin içerdiği fonksiyonel grupları belirlemek amacıyla yapılan FT-IR analizinde Perkin Elmer-Spectrum One cihazı (Şekil 8.4) kullanılmıştır.



Şekil 8. 4 FT-IR Cihazı

8.1.5 Yüksek Çözünürlüklü Yüzey Alanı ve Mikro Gözenek Boyut Analizi Cihazı (BET)

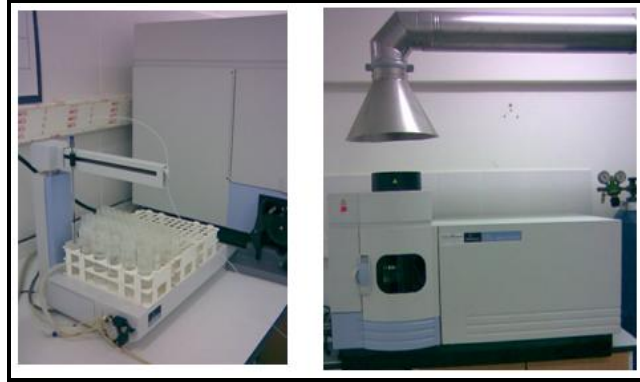
BET cihazı, katı veya toz numunelerde fiziksel adsorpsiyon yöntemiyle yüzey alanı ölçümleri, mikro, mezo ve makro gözenek boyutunu ve gözenek boyut dağılımını düşük basınçlarda ve yüksek çözünürlükte tespit edebilmektedir. Cihaz numune yüzeyini tek bir moleküler tabaka ile kaplamak için gerekli gaz miktarını tayin etmekte ve Brauner-Emmett-Teller teorisini kullanarak yüzey alanını hesaplamaktadır. Analizler, Micrometrics-ASAP 2020 yüzey alanı ve porozite ölçüm cihazında (Şekil 8.5) gerçekleştirilmiştir.



Şekil 8. 5 BET Cihazı

8.1.6 İndüktif Eşleşmiş Plazma-Optik Emisyon Spektrometresi(ICP-OES)

Adsorplama deneyleri sırasında sentetik atık sulardan alınan numunelerin elementel analizi Perkin Elmer-Optima 2100 DV optik emisyon spektrometresiyle (Şekil 8.6) gerçekleştirilmiştir.



Şekil 8. 6 ICP-OES cihazı

8.2 Deneysel Sistem ve Hammaddeler

8.2.1 Etüv

Deneysel çalışmalarda kullanılan Orhaneli ve Çatalağzı uçucu kül numunelerinin nem giderilme işlemleri, 300°C'ye kadar ısıtma yapabilen Binder-ED53 marka etüvde (Şekil 8.7) gerçekleştirilmiştir.



Şekil 8. 7 Etüv

8.2.2 Yüksek sıcaklık fırını

Uçucu küllerin peletleme işleminden sonra pişirilme işlemleri 1600°C sıcaklığa kadar çıkabilen Protherm marka yüksek sıcaklık fırınında (Şekil 8.8) gerçekleştirilmiştir.



Şekil 8. 8 Yüksek Sıcaklık Fırını

8.2.3 pH metre

Hazırlanan sentetik atık suyunun pH ayarlaması sırasında pH metre 620 Lab cihazından faydalanılmıştır (Şekil 8.9).



Şekil 8. 9 pH metre

8.2.4 Mekanik Elek

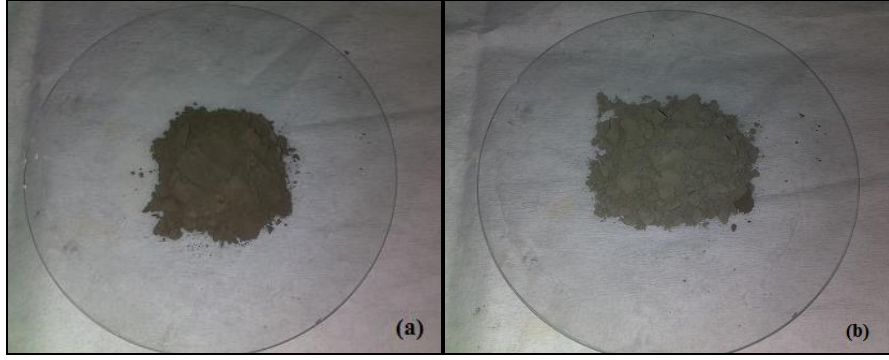
Uçucu küllerin partikül boyut dağılımlarını belirlemek amacıyla Fritsch-Analysette 3 Spartan marka mekanik elek (Şekil 8.10) kullanılmıştır.



Şekil 8. 10 Mekanik Elek

8.2.5 Uçucu kül

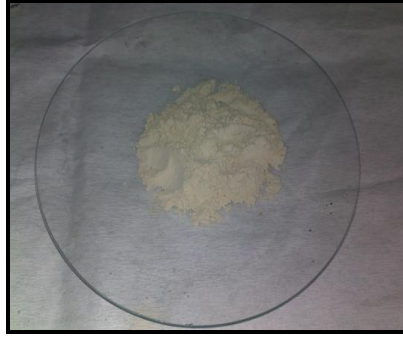
Bu çalışmada Ares Çimento İnşaat San. ve Tic. A.Ş.'den temin edilen Orhaneli ve Çatalağzı uçucu külleri (Şekil 8.11) kullanılmıştır.



Şekil 8. 11 Uçucu kül örnekleri: (a) Orhaneli, (b) Çatalağzı

8.2.6 Bentonit

Peletleme denemelerinde bağlayıcı olarak genel kimyasal formülü $(Na,Ca)(Al,Mg)_6(Si_4O_{10})_3(OH)_6.nH_2O$ olan bentonit (Şekil 8.12) kullanılmıştır.



Şekil 8. 12 Bentonit

8.2.7 Üleksit

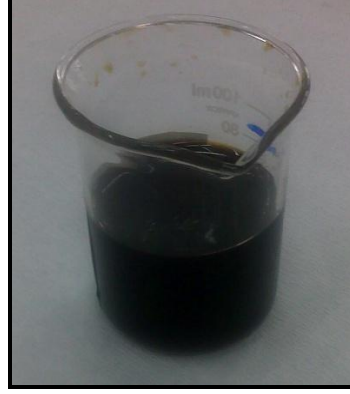
Peletleme deneylerinde bağlayıcı olarak bentonitin yanında $Na_2O.2CaO.5B_2O_3.16H_2O$ kimyasal formülüne sahip bir bor bileşiği olan üleksit de kullanılmıştır (Şekil 8.13).



Şekil 8. 13 Üleksit Minareli

8.2.8 Melas

Peletleme denemelerinde bağlayıcı olarak bentonitin yanında, şeker sanayi atığı olan melas çözeltisi, % 50 melas, % 50 su oranlarında kullanılmıştır (Şekil 8.14).



Şekil 8. 14 Melas çözeltisi

8.2.9 Diğer maddeler

100 ppm Zn ve 5 ppm Pb sentetik atık su çözeltilerini hazırlamak için $ZnCl_2$ (Sigma Aldrich, analitik saflıkta) çözeltisi ile 1000 mg/L'lik Pb stok çözeltisi (Inorganic Ventures) kullanılmıştır. Hazırlanan sentetik atık suların pH'larını ayarlamak için 0,1 N NaOH (Sigma Aldrich, analitik saflıkta) ve 1 M H_2SO_4 (Merck, % 98'lik) çözeltileri hazırlanmıştır.

8.3 Karakterizasyon Çalışmaları

8.3.1 Uçucu Kül Numunelerinin Karakterizasyonu

Orhaneli ve Çatalağzı uçucu kül numunelerinin karakterizasyonunda XRD, XRF, SEM, FT-IR ve BET analiz yöntemleri kullanılmıştır. Ayrıca elek analizi, CaO tayini (%), nem tayini (%) ve kızdırma kaybı tayini (LOI) (%) yapılmıştır.

8.3.1.1 XRD Analizi

DeneySEL çalışmalarında kullanılan hammaddelerin kristal özellikleri 0–90° aralığında değişen difraksiyon açılarında gerçekleştirilen X-ışını analiziyle incelenmiştir. Bu

çalışmada her bir uçucu kül numunesinden yaklaşık 1 g ağırlığında örnekler alınıp, XRD cihazında analizleri yapılmıştır.

8.3.1.2 XRF Analizi

XRF analizi için Orhaneli ve Çatalağzı termik santrallerinden alınan uçucu kül numunelerinden hidrolik pres makinesinde 1'er tane silindirik pelet basılmıştır. Pelet işlemi için her bir uçucu kül numunesinden 5'er gram tartılıp içine 0,5 g wax konulmuş ve ardından homojen bir karışım elde etmek amacıyla havanda karıştırılmıştır. 10:1 oranında hazırlanan uçucu kül + bağlayıcı (wax) toz karışımı peletleme işleminin yapılacağı hidrolik prese (Şekil 8.15) konulduktan sonra 25 MPa basınçta 3 dakika boyunca bekletilmiştir. 3 dakikanın sonunda XRF analizi için gerekli olan silindirik peletler (Şekil 8.15) elde edilmiştir.



Şekil 8. 15 Hidrolik pres makinesi

XRF analizine başlamadan 1 gün önce cihaz açılır ve böylece X ışınları kararlı hale getirilir. XRF analizi için basılan peletler (Şekil 8.16) cihaza konmadan önce cihazın içindeki peletlerin yerleştirileceği numune kapları alkolle silinerek, peletler cihazın içine yerleştirilmiş ve analiz başlatılmıştır.



Şekil 8. 16 XRF analizi için basılan peletler

8.3.1.3 SEM Analizi

Kullanılan hammaddelerin mikro yapıları ve tanecik boyutları SEM cihazı ile incelenmiştir. Hammaddeden alınan örnekler yapışkan bant yardımıyla cihazın örnek kabına sabitlenerek altın ile kaplanmış ve iletken hale getirildikten sonra analiz için hazır hale getirilmişlerdir. Orhaneli, Çatalağzı uçucu küllerine, üleksit ve bentonit numunesine x100 ve x1000 büyütme uygulanmıştır.

8.3.1.4 FT-IR Analizi

Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrofotometresi cihazı bir molekül veya bileşik yapısında bulunan bağlar hakkında tanımlayıcı bilgiler vermektedir. Analizler, $4000-650\text{ cm}^{-1}$ dalga sayısı aralığında Zayıflatılmış Toplam Yansıma (ATR) yöntemiyle dört tekrar yapılarak gerçekleştirilmiştir.

8.3.1.5 BET Analizi

Hammaddelerin ve elde edilen peletlerin yüzey alanı ölçümlerini belirlemek amacıyla BET yüzey alanı analizi gerçekleştirilmiştir.

8.3.1.6 Elek Analizi

Orhaneli ve Çatalağzı uçucu küllerinin peletleme işlemine geçilmeden önce, tane boyutu dağılımlarını görmek için 0.841 mm, 0.250 mm, 0.15 mm ve 0.075 mm elekler kullanılarak elek analizi yapılmıştır.

8.3.1.7 Serbest CaO Tayini (%)

Orhaneli ve Çatalağzı uçucu küllerinden 1.0000±0,01 g numuneler alınarak iki farklı beherdeki 50 ml etilen glikol içinde çözündürülmüştür. Çözelti süzülerek 30 ml etilen glikol ile yıkanmıştır. Alınan süzüntü içine 2-3 damla bromkrezol yeşili indikatörü damlatılmış ve 0,1 N HCl ile renk zümrüt yeşili olana kadar titre edilmiştir. Sarf edilen hacimden faydalanılarak serbest kalsiyum oksit içeriği yüzde olarak (8.1) nolu eşitlikteki gibi hesaplanmıştır [48].

$$\text{CaO (\%)} = 0.28 * V * F / M \quad (8.1)$$

Eşitlikte; V, F ve M sırasıyla sarf edilen 0,1 N HCl hacmi (ml), 0,1 N HCl faktörü (~0,98) ve numune kütlesi (g) dir.

8.3.1.8 Kızdırma Kaybı Tayini (LOI)

Orhaneli ve Çatalağzı uçucu küllerinden 1±0,05 g numuneler alınarak önceden kızdırılıp tartımı alınmış krozelere konulmuştur. Ağız kapatılmış kroze 975±25°C'de kül fırınına konulmuş ve sabit kütleye gelene kadar 15'şer dakikalık kızdırmalar yapılmıştır. Her seferinde numune soğutulup tartılmıştır. Sabit kütleye, birbiri ardından yapılan iki tartım arasındaki fark 0.0005 g'dan az olduğunda ulaşılmıştır. Kızdırma kaybı yüzde olarak (8.2) nolu eşitlikteki gibi hesaplanmıştır [48], [83].

$$\text{LOI (\%)} = [m_1 - (m_2 - m_3)] * 100 / m_1 \quad (8.2)$$

Eşitlikte; m_1 numunenin kütlesi (g), m_2 pişirme işleminden sonra numunenin kütlesi (g) ve m_3 krozenin kütlesidir (g).

8.3.1.9 Nem Tayini

Orhaneli ve Çatalağzı uçucu küllerinden 1±0,05 g numuneler alınarak etüvde 105-110°C'de sabit tartıma gelene kadar kurutulmuştur. Numuneler desikatöre alınmış ve soğutulup tartılmıştır. Nem tayini yüzde olarak (8.3) nolu eşitlikteki gibi hesaplanmıştır [48].

$$\text{Nem (\%)} = [B - A] * 100 / A \quad (8.3)$$

Eşitlikte; A ve B sırasıyla, kurutulmuş numunenin kütlesi (g) ve nemli numunenin kütlesidir (g).

8.4 Peletleme Çalışmaları

Karakterizasyon çalışmaları yapılan uçucu küllerin peletlenmesi için iki yöntem kullanılmıştır.

8.4.1 Birinci Yöntem

İlk olarak, 1 kg uçucu kül numunesi 105°C'de etüvde kurutulmuş ve nemi uzaklaştırılmıştır. Döner peletleme diskinde (Şekil 8.17) 1 kg uçucu kül numunesine bağlayıcı olarak bentonit ve üleksit katılarak küresel peletler yapılmıştır.



Şekil 8. 17 Döner peletleme diski

Elde edilen peletlere yağ düşme ve yağ basma dayanımı testleri uygulanmıştır. Daha sonra; peletler 105°C'de kurutulmuş ve elde edilen kuru peletlere kuru düşme ve kuru basma dayanımı testleri uygulanmıştır. Kuru peletler sıcaklığın kademeli olarak artırılmasıyla 1200°C'de pişirilmiştir. Pişirilmiş peletlere pişmiş pellet düşme ve basma testleri uygulanmıştır (Şekil 8.18).



Şekil 8. 18 Pelet görüntüleri: a) Yaş küresel peletler b) Pişmiş küresel peletler

Yapılan küresel peletleme deneylerinin sonucunda adsorpsiyonun gerçekleşmediği görülmüştür. Ardından; ilk olarak bentonit ve melas, ikinci olarak üleksit, bentonit ve melas, silindirik pelet haline getirilmiş, ancak buralarda da adsorpsiyondan istenen verim elde edilememiştir. Üleksit eklenerek elde edilen peletlerin diğer peletlere oranla su içinde daha çabuk dağıldığı ve adsorpsiyonunun başarısız olduğu gözlenmiş ve bu sebeple daha sonraki çalışmalara ikinci yöntem kullanılarak devam edilmiştir.

8.4.2 İkinci Yöntem

Bu yöntemde, 10 gr uçucu kül numunesine bağlayıcı olarak bentonit (uçucu kül üzerinden ağırlıkça % 0, 1, 5 ve 10'u kadar) ve melas (0, 0.25, 0.5, 0.75 ml) katılmış ve homojen bir karışım elde etmek için uçucu kül, melas ve bentonit karışımı havanda iyice karıştırılmıştır. Daha sonra laboratuvar tipi peletleme makinesinde (Hidrolik pres makinesi) 30 MPa basınç altında, 4 cm çapında silindirik peletler elde edilmiştir. Elde edilen peletler etüvde 105°C'de kurutularak ardından fırında kademeli olarak 1200°C'ye kadar pişirilmiştir (Şekil 8.19).



Şekil 8. 19 Fırında pişen silindirik peletler

8.5 Küresel Peletlere Uygulanan Testler

8.5.1 Basma Dayanımı Testi

Malzemelerin ezilme yükleri altındaki davranışlarını belirlemek için yapılan bir test yöntemidir. Numune sıkıştırılır ve çeşitli yüklerdeki deformasyonu kaydedilir. Yapılan çalışmalarda elde edilen küresel peletlere uygulanacak yaş pelet, kuru pelet ve pişmiş pelet basma testleri için AVK MH-1 plastik eğme makinası (Şekil 8.20) kullanılmıştır. Bunun için öncelikle aynı çapa sahip 5'şer tane pelet seçilmiştir ve belli bir basma yükü uygulanarak dayanabildikleri maksimum basma dayanımları ölçülerek, beş peletin basma dayanımlarının ortalaması alınmıştır.



Şekil 8. 20 Plastik eğme makinası

8.5.2 Düşme Testi

Peletleme diskinden elde edilen yaş peletlerin, pişirme işleminin uygulanacağı bölgeye kadar taşınması sırasında kırılmaması için gerekli dayanımda olup olmadığının kontrolü için yapılır. Beş adet pelet alınıp parçalanıncaya kadar 45 cm'den serbest halde bırakılmış ve aynı işlem her pelet için tekrar edilmiştir. Parçalanmanın olduğu sayı yaş pelet düşme sayısıdır [82], [84], [85].

8.6 Adsorpsiyon Deneyleri

Elde edilen küresel ve silindirik peletler kullanılarak atık sudan ağır metallerin adsorpsiyonu gerçekleştirilmiştir. Bunun için öncelikle 100 ppm Zn atık su çözeltisi ve 5 ppm Pb atık su çözeltisi hazırlanmıştır. Hazırlanan 1 L'lik sentetik atık sular 2 saat boyunca manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Sentetik suların pH'ı pH metre yardımıyla ölçülmüş ve 1 M H₂SO₄ ve 0,1 N NaOH çözeltileri yardımıyla pH değişiklikleri ayarlanmıştır.

300 rpm karıştırma hızında, oda sıcaklığında gerçekleştirilen adsorpsiyon deneyleri Şekil 8.21'de görüldüğü gibi manyetik karıştırıcıda gerçekleştirilmiştir. 30., 60., 90., 120. ve 150. dakikalarda numuneler alınarak ICP-OES cihazında elemental analizleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 8. 21 Adsorpsiyon deney düzeneği

SONUÇLAR VE TARTIŞMA**9.1 Hammaddeler İçin Yapılan Karakterizasyon Sonuçları****9.1.1 Uçucu küllerin elek analizi sonuçları**

Uçucu kül numunelerinin boyut dağılımlarını tespit etmek ve peletleme aşaması için optimum boyutu belirlemek amacıyla elek analizleri yapılmıştır. Elek analizleri sonuçlarına (Çizelge 9.1) göre her iki kül numunesi içinde 60 mesh elek aralığına sahip eleğin üzerinde kalan miktarın fazla olduğu görülmüştür. Buna bağlı olarak; 60 mesh elek aralığına sahip eleğin üstünde kalan küller kullanılmıştır, böylelikle küllerin boyutsal homojenliği sağlanmıştır.

Çizelge 9. 1 Uçucu küllerin elek analizi sonuçları

Hammadde	Elek aralığı	Miktar (g)
Orhaneli	20 mesh elek üstü (0.841 mm)	0.071
	60 mesh elek üstü (0.250 mm)	651.0
	150 µm elek üstü (0.150 mm)	183.0
	75 µm elek üstü (0.075 mm)	148.0
	75 µm elek altı (0.075 mm)	17.93
Çatalağzı	20 mesh elek üstü (0.841 mm)	1.800
	60 mesh elek üstü (0.250 mm)	958.8
	150 µm elek üstü (0.150 mm)	24.80
	75 µm elek üstü (0.075 mm)	12.80
	75 µm elek altı (0.075 mm)	1.800

9.1.2 Uçucu küllerin CaO (%) tayini sonuçları

Uçucu küllerin içerdiği serbest CaO (%) değerleri Çizelge 9.2’de görülmektedir. Küllerin içerdiği CaO (%) miktarına bakılarak; ASTM C-618’e göre Çatalağzı ve Orhaneli uçucu küllerinin C sınıfı olduğu görülmüştür.

Çizelge 9. 2 Uçucu küllerin CaO (%) tayini sonuçları

Numune Adı	Titrasyon Sarfiyatı (ml)	Serbest CaO (%)
Orhaneli	1,43	39,23
Çatalağzı	0,28	7,68

9.1.3 Uçucu küllerin nem tayini sonuçları

Uçucu küllerin nem tayini sonuçları Çizelge 9.3’te verilmiştir. Bu sonuçlara bakılarak; uçucu küllerin ASTM C-618 ve TS 639 standartlarına göre uçucu kül nem sınır değerlerine [65] uyduğu görülmüştür.

Çizelge 9. 3 Uçucu küllerin nem tayini sonuçları

Hammadde	Rutubetli numune ağırlığı (g)	Kurutulmuş numune ağırlığı (g)	Nem (%)
Orhaneli	1	0.9986	0.0014
Çatalağzı	1	0.9979	0.0021

9.1.4 Uçucu küllerin kızdırma kaybı tayini (LOI) sonuçları

Uçucu küllerin kızdırma kaybı tayinine ait deney sonuçları Çizelge 9.4’te verilmiştir. Yapılan kızdırma kaybı deney sonuçlarına göre Orhaneli ve Çatalağzı uçucu küllerinin ASTM C-618’e göre C sınıfı uçucu kül kategorisinde olduğu belirlenmiştir. TS EN 450-1’e göre A kategorisinde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçların TS 639 standartlarına göre uçucu kül sınır değerlerine [65] uyduğu görülmüştür.

Çizelge 9. 4 Uçucu küllerin kızdırma kaybı tayini sonuçları

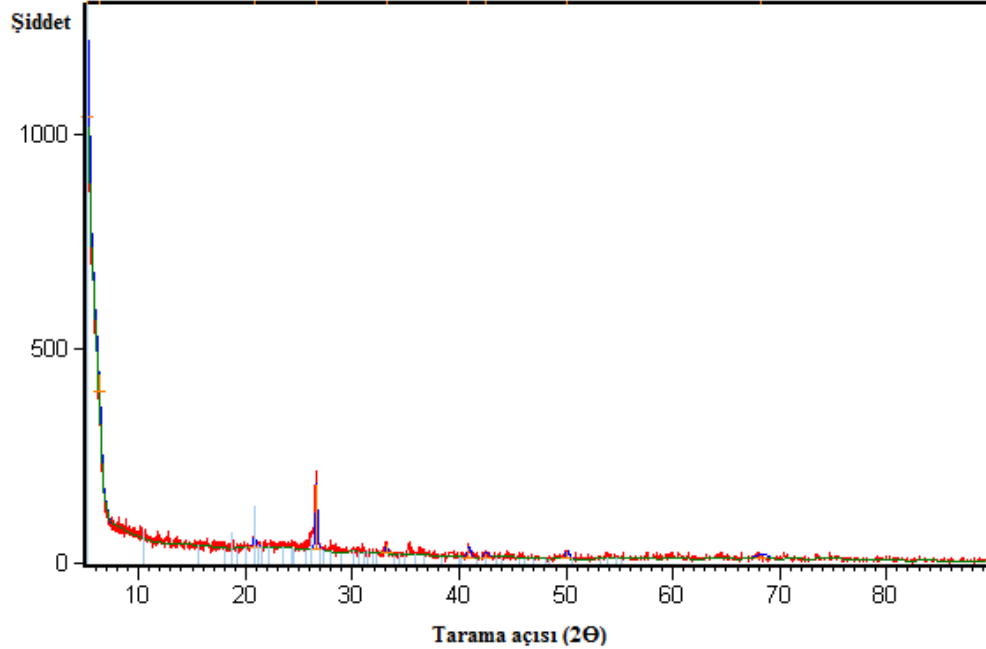
Kızdırma Sonrası Boş Kroze Ağırlığı (g)	Numune	Kızdırma öncesi numune ağırlığı (g)	Kızdırma Sonrası Toplam Ağırlık (g)	Kızdırma Kaybı (%)
13.8084	Çatalağzı	1.0002	14.7923	% 1.630
12.9330	Orhaneli	1.0013	13.9271	% 0.719

9.1.5 Uçucu küllerin XRD analizi sonuçları

Çatalağzı termik santraline ait uçucu külün kristal fazlarını belirlemek amacıyla XRD analizi gerçekleştirilmiş (Şekil 9.1) ve ana fazın kuartz (SiO_2) olduğu belirlenmiştir. Ana fazın yanında silimanit (Al_2SiO_5) ve demir (Fe) yapılarına da rastlanılmıştır (Çizelge 9.5).

Çizelge 9. 5 Çatalağzı uçucu kül numunelerinin kristal fazları

PDF no	Bileşen Adı	Kimyasal Formül
01-085-1780	Kuartz	SiO_2
00-022-0018	Silimanit	Al_2SiO_5
01-089-7194	Demir	Fe

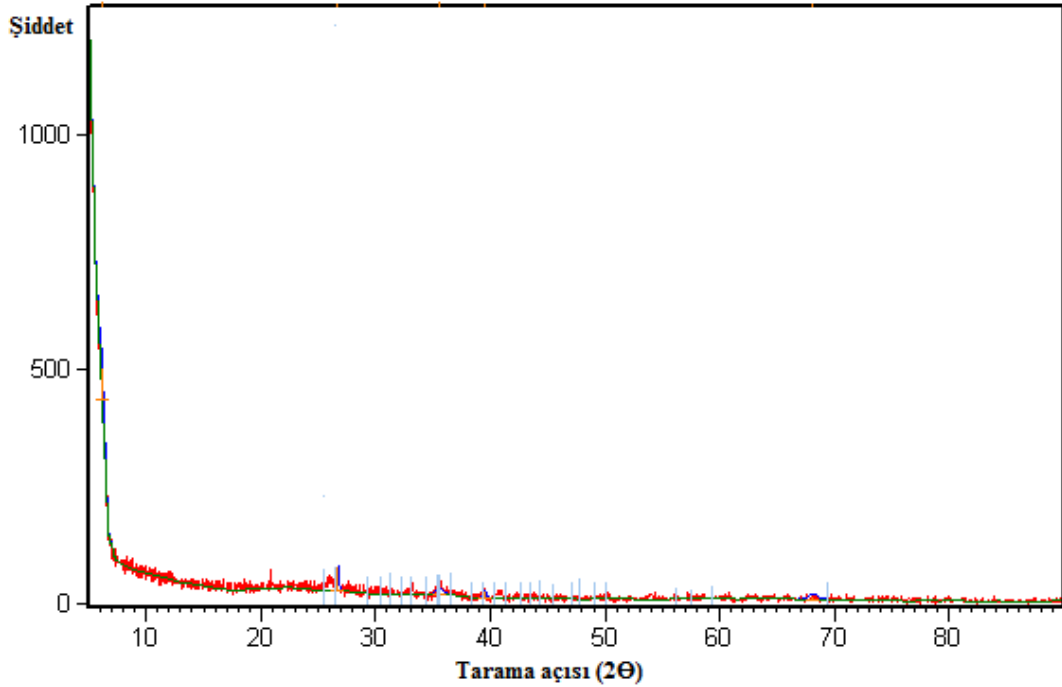


Şekil 9. 1 Çatalağzı termik santraline ait uçucu külün XRD paterni

Orhaneli termik santraline ait uçucu külün kristal fazlarını belirlemek amacıyla XRD analizi gerçekleştirilmiş (Şekil 9.2) ve ana fazın kuartz (SiO_2) olduğu belirlenmiştir. Ana fazın yanında, hematit (Fe_2O_3) ve silimanit (Al_2SiO_5) yapılarına da rastlanılmıştır (Çizelge 9.6).

Çizelge 9. 6 Orhaneli uçucu kül numunelerinin kristal fazları

PDF no	Bileşen Adı	Kimyasal Formül
01-089-1961	Kuartz	SiO_2
01-073-0603	Hematit	Fe_2O_3
01-083-1566	Silimanit	Al_2SiO_5



Şekil 9. 2 Orhaneli uçucu külüne ait XRD paterni

9.1.6 Uçucu küllerin XRF analizi sonuçları

Çatalağzı termik santraline ait uçucu külün XRF analizi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Çizelge 9.7’de verilmiştir. Çatalağzı uçucu külünün XRF analizi sonuçlarına göre bileşiminde SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 bileşenlerinin yüzdesinin fazla olduğu görülmüştür.

Çizelge 9. 7 Çatalağzı uçucu kül numunelerinin majör ve minör bileşen yüzdeleri

Bileşen	İçerik (%)
SiO ₂	57.5
Al ₂ O ₃	29.2
Fe ₂ O ₃	4.85
K ₂ O	3.44
MgO	2.2
TiO ₂	1.03
CaO	0.95
Na ₂ O	0.5
SO ₃	0.28

Orhaneli uçucu külünün XRF analizine ait sonuçlar; Çizelge 9.8 'de verilmiştir. Orhaneli uçucu külünün XRF analizi sonuçlarına göre bileşiminde SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ ve CaO bileşenlerinin yüzdesinin fazla olduğu görülmüştür.

Çizelge 9. 8 Orhaneli uçucu kül numunelerinin majör ve minör bileşen yüzdeleri

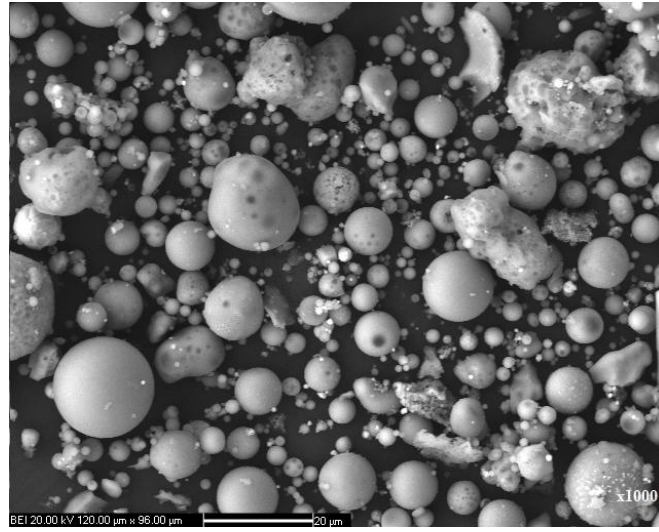
Bileşen	İçerik (%)
SiO ₂	52.9
Al ₂ O ₃	25.5
Fe ₂ O ₃	8.7
CaO	4.75
MgO	3.1
SO ₃	2.1
K ₂ O	2
TiO ₂	0.63
Na ₂ O	0.4

Çatalağzı ve Orhaneli uçucu küllerine ait XRF sonuçları karşılaştırıldığında; Çatalağzı uçucu külünün içerdiği SiO₂ ve Al₂O₃ yüzdesinin Orhaneli uçucu külünün içerdiği

yüzdeden fazla olduğu, Orhaneli uçucu külünün içerdđđ CaO, MgO ve Fe₂O₃ yüzdesinin Çatalađđı uçucu külünün içerdđđ miktardan daha fazla olduğu görölmüştür.

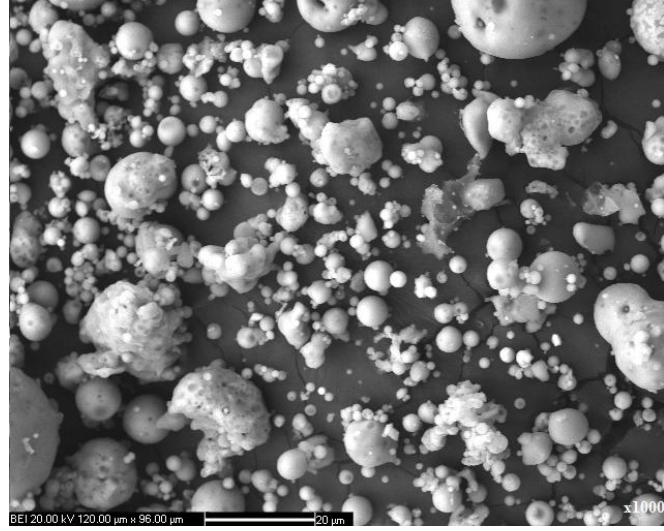
9.1.7 Hammaddeler için SEM analizi sonuçları

Orhaneli uçucu külünün SEM görüntüsü incelendiğinde; yuvarlak, opak ve farklı büyüklükte tanelerden oluştuğu görölmüştür. Taneciklerin dış yüzeyinin genelde pürüzsüz olması, kalsiyum oksit oranının yüksek olduğunu göstermiştir. Ayrıca, tane boyutu dağılımlarının 1.12-18.30 µm arasında deđđiştđđi görölmüştür (Şekil 9.3).



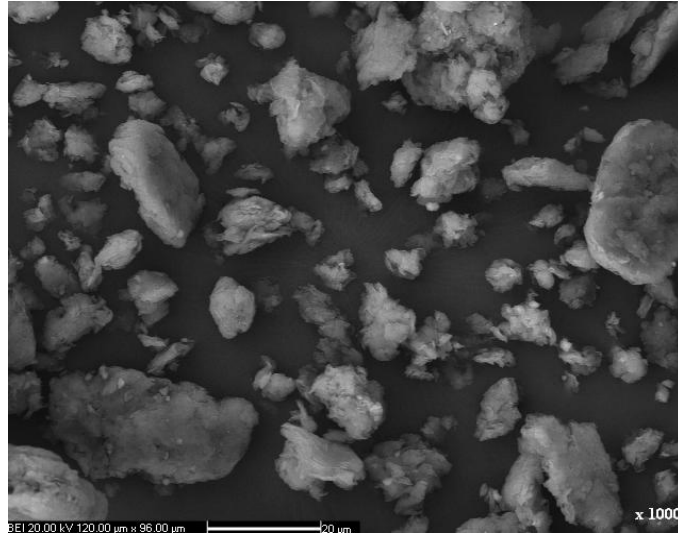
Şekil 9. 3 Orhaneli uçucu külünün SEM görüntüsü (×1000)

Çatalađđı uçucu külünün SEM görüntüsü incelendiğinde; şekilsiz ve opak taneleri içerdđđi görölmüştür. Taneciklerin dış yüzeyinin genelde pürüzlü olması, kalsiyum oksit oranının düşük olduğunu göstermiştir. Ayrıca tane boyutu dağılımlarının 1.46-5.67 µm arasında deđđiştđđi görölmüştür (Şekil 9.4).



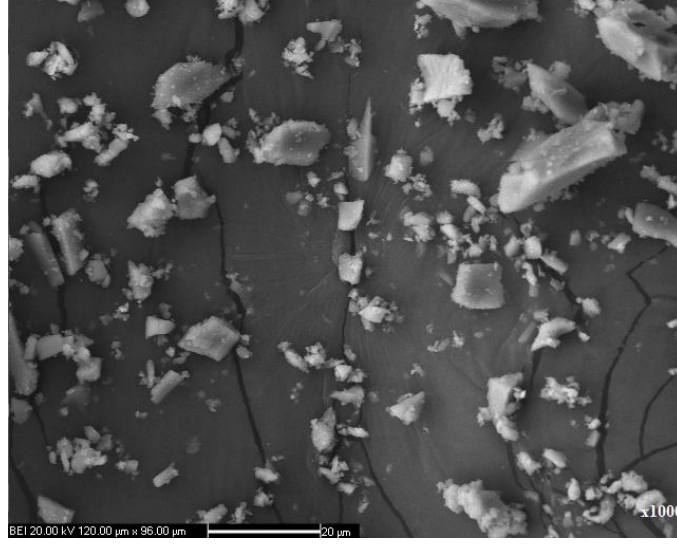
Şekil 9. 4 Çatalağzı uçucu külünün SEM görüntüsü (×1000)

Bentonitin SEM görüntüsü incelendiğinde, parçacıklar, geniş kitleler halinde düzensiz bir dağılım göstermiştir (Şekil 9.5). Tane boyutu dağılımlarının ise 4.56-22.38 µm arasında değiştiği görülmüştür.



Şekil 9. 5 Bentonitin SEM görüntüsü (×1000)

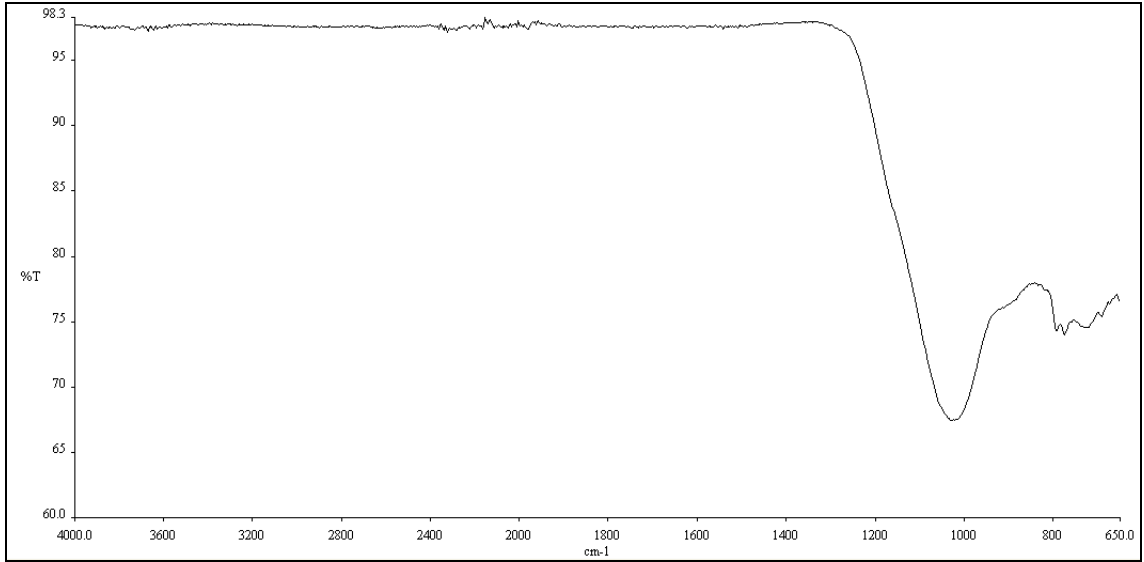
Üleksitin SEM görüntüsü incelendiğinde, parçacıkların mikron boyutunda düzensiz bir dağılım gösterdiği ve tane boyutu dağılımlarının 3.56-10.82 µm arasında değiştiği görülmüştür (Şekil 9.6).



Şekil 9. 6 Üleksitin SEM görüntüsü (×1000)

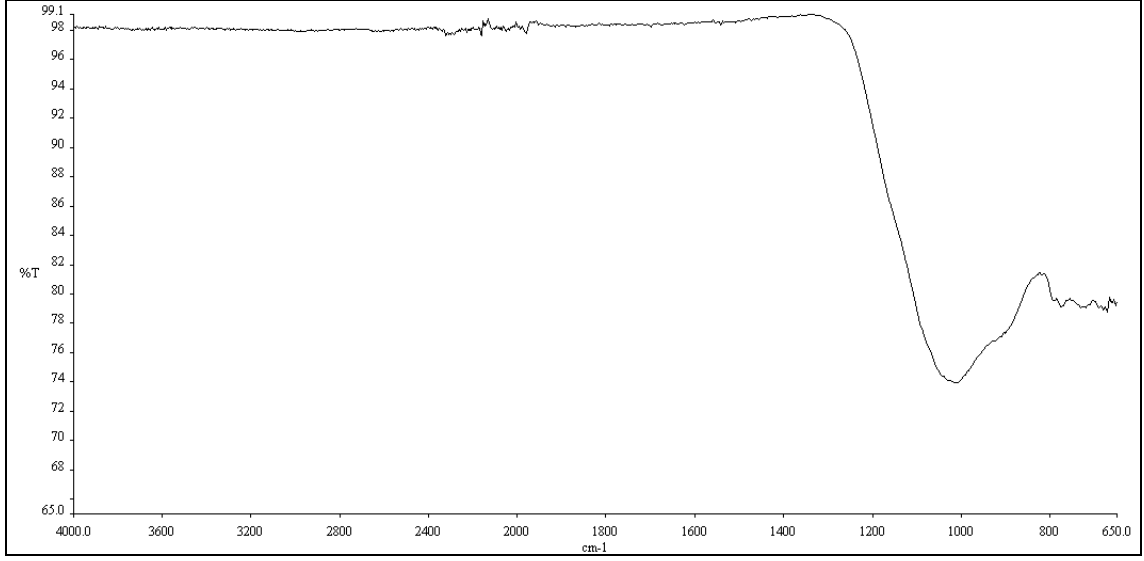
9.1.8 Hammaddeler için FT-IR analizi sonuçları

Çatalağzı uçucu külüne ait FT-IR spektrumu (Şekil 9.7) incelendiğinde; 776 cm^{-1} 'de gözlenen pikin SO_4^{-2} gruplarından kaynaklandığı, 1023 cm^{-1} 'de gözlenen pikin Si-O-Si bağından kaynaklandığı görülmüştür.

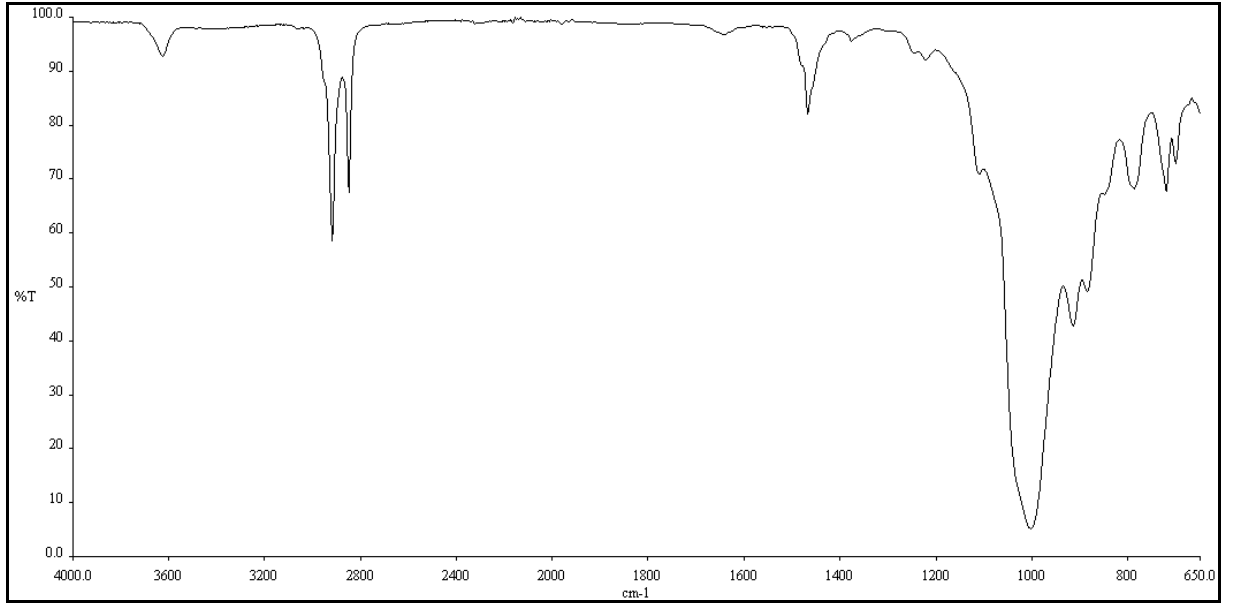


Şekil 9. 7 Çatalağzı uçucu külünün FT-IR spektrumu

Orhaneli uçucu külüne ait FT-IR spektrumu (Şekil 9.8) incelendiğinde; 1015.35 cm^{-1} 'deki karakteristik pik Si-O-Si asimetrik bağından kaynaklanmıştır [86].

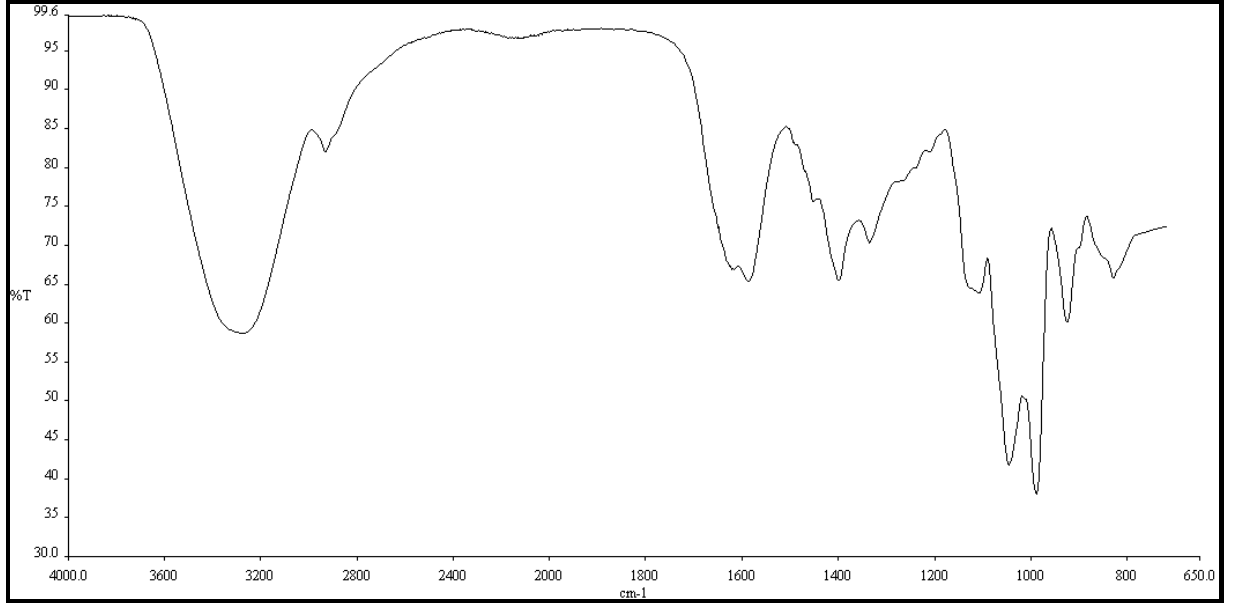


Şekil 9. 8 Orhaneli uçucu külünün FT-IR spektrumu



Şekil 9. 9 Bentonitin FT-IR spektrumu

Bentonitin FT-IR spektrumunda (Şekil 9.9) 3605 cm^{-1} 'de Si-O yüzeyine zayıf olarak hidrojen bağı ile bağı su moleküllerinin gerilim titreşim bandı gözlenmiştir. 1010 cm^{-1} dolaylarında gözlenen oldukça büyük pik, Si-O-Si gruplarının Si-O gerilim titreşimiyle ilgilidir. Son olarak 900 cm^{-1} ile 760 cm^{-1} 'de gözlenen bantlar sırasıyla oktahedral Si-O-Al ve Si-O-Si bükülme titreşimlerinin varlığını göstermektedir.



Şekil 9. 10 Melasın FT-IR spektrumu

Melasın FT-IR spektrumu (Şekil 9.10) incelendiğinde; daha önce yapılan çalışmalarla da uyumlu olan, 3278 cm^{-1} gözlenen karakteristik pikin O-H bağından kaynaklandığı görülmüştür [87].

9.1.9 Uçucu Küllerin BET analizi sonuçları

Orhaneli ve Çatalağzı uçucu küllerinin yüzey alanları Çizelge 9.9'de gösterilmiştir. Orhaneli uçucu külünün yüzey alanının Çatalağzı uçucu küline göre daha yüksek olduğu görülmüştür; adsorpsiyon sonuçları göz önüne alındığında Orhaneli uçucu külden yapılan peletlerin adsorplama kapasitesinin yüksek olması da bu durumla ilgilidir.

Çizelge 9. 9 Uçucu küllerin yüzey alanları

Numune Adı	Yüzey alanı (m^2/g)
Orhaneli uçucu külü	0.7995
Çatalağzı uçucu külü	0.1683

9.2 Peletler için Yapılan Karakterizasyon Sonuçları

Peletleme işleminden sonra elde edilen peletlerin adsorpsiyon aşamasında dağılmaması ve kırılmaması için dayanım testleri yapılmıştır. Ayrıca peletlerin dayanımını artırmak ve uçucu maddeyi yapıdan uzaklaştırıp, gözenekliliği artırmak amacıyla kül fırınında pişirme işlemi de uygulanmıştır.

9.2.1 Küresel ve Silindirik Peletlerin Basma Dayanımı Testi Sonuçları

Küresel peletlerin basma dayanım testi sonuçları Çizelge 9.10-9.11'da verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde; yaş pelet basma dayanımlarının, kuru pelet basma dayanımlarından düşük olduğu görülmüştür. Bu durumda peletlerin kurutulmasının basma dayanımlarını arttırdığını göstermektedir. Ayrıca aynı boyuttaki peletlerin, farklı basma dayanımlarına sahip olması gözenekliliğin homojen olarak dağılmadığını göstermiştir.

Çizelge 9. 10 Çatalağzı uçucu külüne ait küresel peletlerin basma dayanımı testi sonuçları

Elek aralığı (mesh)	Bentonit miktarı (%)	Üleksit miktarı (%)	Pelet boyutu (cm)	Yaş pelet basma dayanımı (N)	Kuru pelet basma dayanımı (N)
60	0.5	0.5	0.80	3.096	14.014
60	0.5	0.5	0.85	2.646	11.270
60	0.5	0.5	0.90	3.136	13.916

Çizelge 9. 11 Orhaneli uçucu külüne ait küresel peletlerin basma dayanımı testi sonuçları

Elek aralığı (mesh)	Bentonit miktarı (%)	Üleksit miktarı (%)	Pelet boyutu (cm)	Yaş pelet basma dayanımı (N)	Kuru pelet basma dayanımı (N)
60	0.5	0.5	1.0	3.3516	19.430
60	0.5	0.5	1.1	3.5280	19.600
60	0.5	0.5	1.2	2.5676	18.620

Çatalağzı ve Orhaneli uçucu küllerine ait pişmiş küresel ve silindirik peletlerin basma dayanımları Çizelge 9.12-9.13'te verilmiştir.

Çizelge 9. 12 Çatalağzı ve Orhaneli uçucu küllerine ait pişmiş küresel pelet basma dayanımı testi sonuçları

Uçucu kül adı	Elek aralığı (mesh)	Pelet çapı (cm)	Basma dayanımı (N)
Orhaneli	60	1.3	270
Çatalağzı	60	1.3	250

Çizelge 9. 13 Çatalağzı ve Orhaneli uçucu küllerine ait pişmiş silindirik pelet basma dayanımı testi sonuçları

Uçucu kül adı	Elek aralığı (mesh)	Basma dayanımı (N)
Optimum bileşimde Orhaneli uçucu kül peleti (Zn adsorpsiyonu)	60	53.000
Optimum bileşimde Çatalağzı uçucu kül peleti (Zn adsorpsiyonu)	60	60.000
Optimum bileşimde Orhaneli uçucu kül peleti (Pb adsorpsiyonu)	60	54.000
Optimum bileşimde Çatalağzı uçucu kül peleti (Pb adsorpsiyonu)	60	58.000

9.2.2 Küresel Peletler İçin Yapılan Düşme Testi Sonuçları

Küresel peletlere yapılan düşme testi sonuçları Çizelge 9.14 ve 9.15'te verilmiştir. Çatalağzı uçucu külüne ait yaş peletlerin düşme sayısının kuru peletlerin düşme sayısından yüksek olduğu görülmüştür.

Çizelge 9. 14 Çatalağzı uçucu külüne ait düşme testi sonuçları

Elek aralığı (mesh)	Bentonit miktarı (%)	Üleksit miktarı (%)	Pelet boyutu (cm)	Yaş pelet düşme sayısı	Kuru pelet düşme sayısı
60	0.5	0.5	0.80	2	1
60	0.5	0.5	0.85	3	1
60	0.5	0.5	0.90	2	1

Orhaneli uçucu külüne ait düşme sonuçları incelendiğinde; yaş ve kuru pelet düşme sayısının eşit olduğu kurutmadan kaynaklı pelet dayanımının değişmediği görülmüştür.

Çizelge 9. 15 Orhaneli uçucu külüne ait düşme testi sonuçları

Elek aralığı (mesh)	Bentonit miktarı (%)	Üleksit miktarı (%)	Pelet boyutu (cm)	Yaş pelet düşme sayısı	Kuru pelet düşme sayısı
60	0.5	0.5	0.8	1	1
60	0.5	0.5	1.0	1	1
60	0.5	0.5	1.2	1	1

9.2.3 Küresel ve Silindirik Peletler için Yüzey Alanı Analizi Sonuçları

Küresel peletlerin yüzey alanı analiz sonuçları Çizelge 9.16'te verilmiştir. Çatalağzı uçucu külünden yapılan peletlerin, Orhaneli uçucu külünden yapılan peletlere göre daha büyük bir yüzey alanına sahip olduğu görülmüştür. Uçucu küllerin yüzey alanı sonuçları ile küresel peletlerin yüzey alanları karşılaştırıldığında; uçucu küllerin yüzey alanının peletleme işlemiyle azaldığı görülmüştür.

Çizelge 9. 16 Küresel peletler için yapılan yüzey alanı analizi sonuçları

Uçucu Kül Adı	Yüzey Alanı (m ² /g)
Orhaneli	0.1214
Çatalağzı	0.1517

Uçucu küllerin yüzey alanı sonuçları ile silindirik peletlerin yüzey alanları karşılaştırıldığında; uçucu küllerin yüzey alanının peletleme işlemiyle arttığı görülmüştür (Çizelge 9.17).

Çizelge 9. 17 Silindirik peletler için yapılan yüzey alanı analiz sonuçları

Uçucu Kül Adı	Yüzey Alanı (m ² /g)
Optimum bileşimde Orhaneli uçucu kül peleti (Zn adsorpsiyonu)	0.9884
Optimum bileşimde Çatalağzı uçucu kül peleti (Zn adsorpsiyonu)	0.8543
Optimum bileşimde Orhaneli uçucu kül peleti (Pb adsorpsiyonu)	0.9034
Optimum bileşimde Çatalağzı uçucu kül peleti (Pb adsorpsiyonu)	0.8942

9.3 Adsorpsiyon Sonuçları

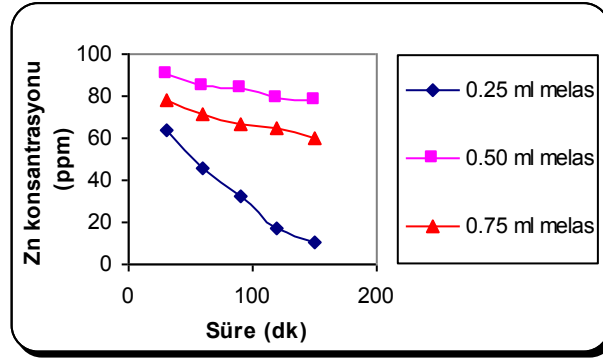
Orhaneli ve Çatalağzı uçucu külü ve bağlayıcılardan elde edilen peletlerin Zn ve Pb atık sularında adsorban malzeme olarak kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla manyetik karıştırıcıda; oda sıcaklığında, 5.5 pH'da, 300 rpm karıştırma hızında adsorpsiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir.

9.3.1 Zn Adsorpsiyon Sonuçları

Hazırlanan 100 ppm ZnCl₂ çözeltisinden Zn adsorpsiyonu sırasında farklı bentonit ve melas oranlarına sahip peletler kullanılarak, bentonit ve melas oranının adsorpsiyon verimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Proses koşulları, oda sıcaklığı, pH:5.5, karıştırma hızı:300 rpm'dir.

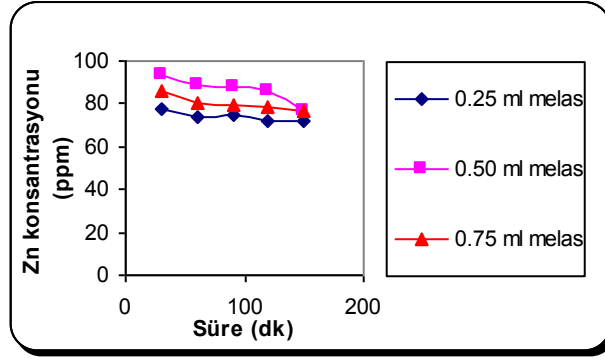
9.3.1.1 Orhaneli uçucu külünün Zn (100 ppm) adsorpsiyon sonuçları

Orhaneli uçucu külünden elde edilen peletlerin, Zn adsorpsiyonunda adsorban malzeme olarak kullanılabilmesi görülmüştür. Bentonit ve melas oranının adsorpsiyon verimi üzerindeki etkisini inceleyebilmek için farklı oranlara sahip peletler, adsorpsiyonda kullanılmıştır.



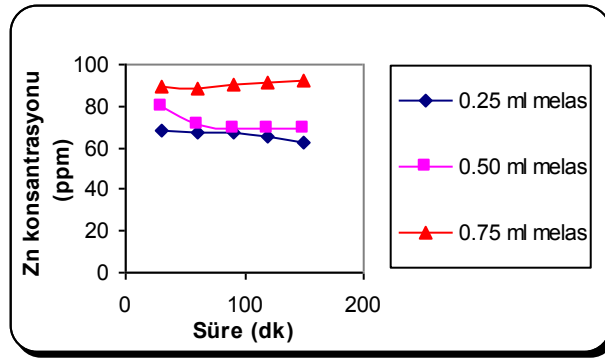
Şekil 9. 11 Orhaneli uçucu külü için melas oranının atık sudaki Zn konsantrasyonu üzerindeki etkisi (10 gr uçucu kül, % 0 Bentonit)

Bentonit kullanılmadan farklı melas oranlarında elde edilen peletlerin adsorpsiyon sonuçları (Şekil 9.11) incelendiğinde; melasın 0.25 ml oranında kullanıldığı peletin, atık sudaki Zn konsantrasyonunu daha hızlı düşürdüğü, diğer melas oranlarını içeren peletlere göre daha yüksek adsorplama kapasitesine sahip olduğu görülmüştür.



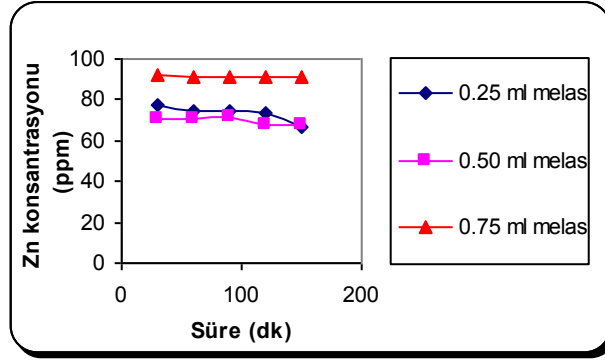
Şekil 9.12 Orhaneli uçucu külü için melas oranının atık sudaki Zn konsantrasyonu üzerindeki etkisi (10 gr uçucu kül, % 1 Bentonit)

Bentonitin uçucu kül miktarı üzerinden % 1 oranında kullanılmasıyla farklı melas oranlarında elde edilen peletlerin adsorpsiyon sonuçları (Şekil 9.12) incelendiğinde; melas oranının 0.25 ml olduğu, % 1 oranında bentonit içeren peletin, atık sudaki Zn konsantrasyonunu daha hızlı düşürdüğü görülmüştür.



Şekil 9.13 Orhaneli uçucu külü için melas oranının atık sudaki Zn konsantrasyonu üzerindeki etkisi (10 gr uçucu kül, % 5 Bentonit)

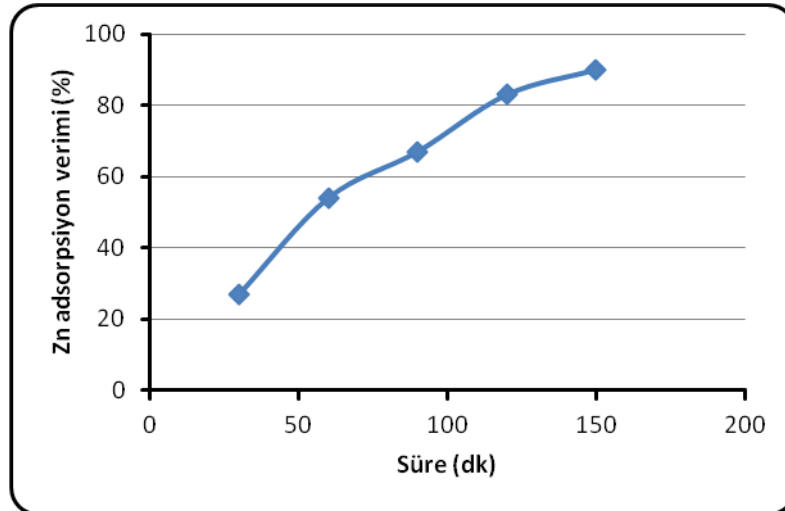
Bentonitin uçucu kül miktarı üzerinden % 5 oranında kullanılmasıyla farklı melas oranlarında elde edilen peletlerin adsorpsiyon sonuçları (Şekil 9.13) incelendiğinde; melas oranının 0.25 ml olduğu, % 5 oranında bentonit içeren peletin, diğer melas oranlarını içeren peletlere göre daha yüksek adsorplama kapasitesine sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 9. 14 Orhaneli uçucu külü için melas oranının atık sudaki Zn konsantrasyonu üzerindeki etkisi (10 gr uçucu kül, % 10 Bentonit)

Bentonitin uçucu kül miktarı üzerinden % 10 oranında kullanılmasıyla farklı melas oranlarında elde edilen peletlerin adsorpsiyon sonuçları (Şekil 9.14) incelendiğinde; melas oranının 0.25 ml olduğu, % 10 oranında bentonit içeren peletin, atık sudaki Zn konsantrasyonunu daha hızlı düşürdüğü, diğer melas oranlarını içeren peletlere göre daha yüksek adsorplama kapasitesine sahip olduğu görülmüştür.

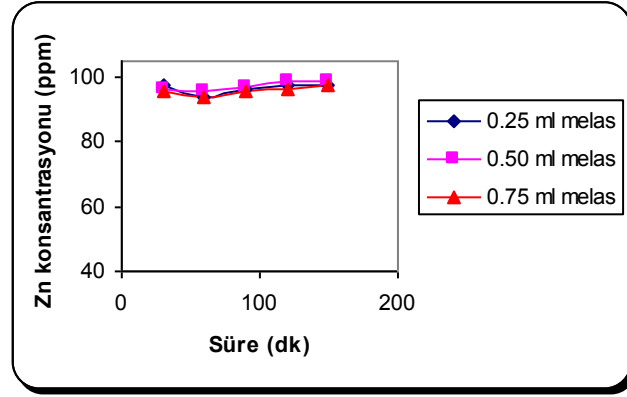
Bentonit oranının sabit tutulmasıyla elde edilen peletlerde en yüksek adsorpsiyon verimlerinin melas oranının 0.25 ml kullanılmasıyla elde edildiği görülmüştür. Optimum pelet bileşiminin belirlenebilmesi için bentonit oranları karşılaştırılmış ve bentonit kullanılmayan, 0.25 ml melas içeren peletin optimum pelet bileşimi olduğuna karar verilmiştir (Şekil 9.15).



Şekil 9. 15 Optimum Orhaneli uçucu kül pelet bileşiminin Zn adsorpsiyon verimi üzerindeki etkisi

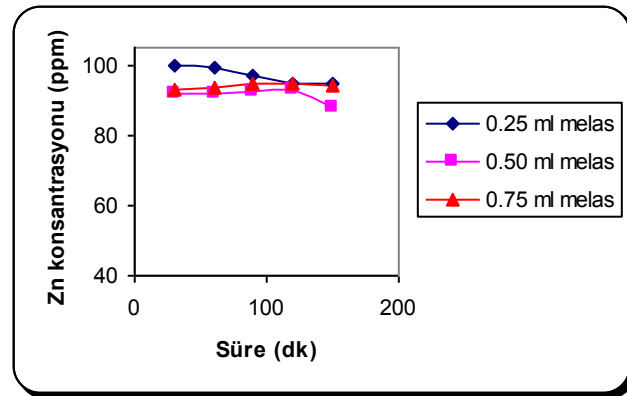
9.3.1.2 Çatalağzı uçucu külünün Zn (100 ppm) adsorpsiyon sonuçları

Bentonit ve melas oranının adsorpsiyon verimi üzerindeki etkisini inceleyebilmek için farklı oranlara sahip peletler adsorpsiyonda kullanılmıştır. Çatalağzı uçucu külünden elde edilen peletlerin Zn adsorpsiyonunda adsorban malzeme olarak kullanılabilceği görülmüştür.



Şekil 9. 16 Çatalağzı uçucu külü için melas oranının atık sudaki Zn konsantrasyonu üzerindeki etkisi (10 gr uçucu kül, % 0 Bentonit)

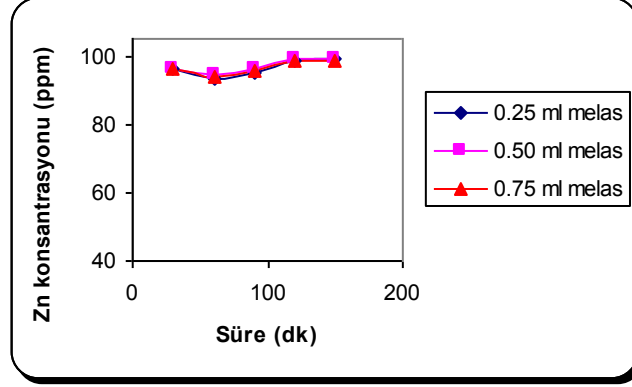
Bentonit kullanılmadan farklı melas oranlarında elde edilen peletlerin adsorpsiyon sonuçları (Şekil 9.16) incelendiğinde; melasın 0.25 ml oranında kullanıldığı peletin, atık sudaki Zn konsantrasyonunu daha hızlı düşürdüğü, diğer melas oranlarını içeren peletlere göre daha yüksek adsorplama kapasitesine sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 9. 17 Çatalağzı uçucu külü için melas oranının atık sudaki Zn konsantrasyonu üzerindeki etkisi (10 gr uçucu kül, % 1 Bentonit)

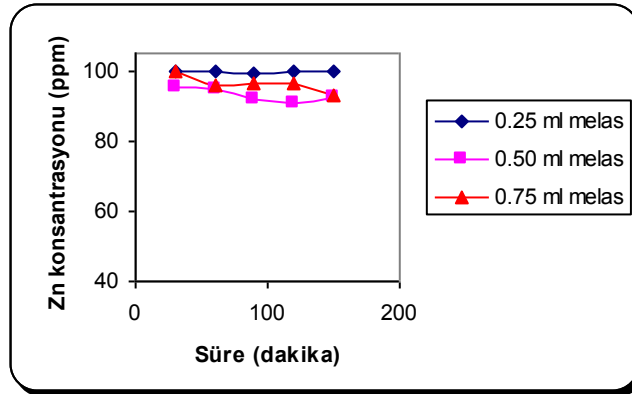
Bentonitin uçucu kül miktarı üzerinden % 1 oranında kullanılmasıyla farklı melas oranlarında elde edilen peletlerin adsorpsiyon sonuçları (Şekil 9.17) incelendiğinde;

melas oranının 0.50 ml olduğu, % 1 oranında bentonit içeren peletin, diğer melas oranlarını içeren peletlere göre daha yüksek adsorplama kapasitesine sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 9. 18 Çatalağzı uçucu külü için melas oranının atık sudaki Zn konsantrasyonu üzerindeki etkisi (10 gr uçucu kül, % 5 Bentonit)

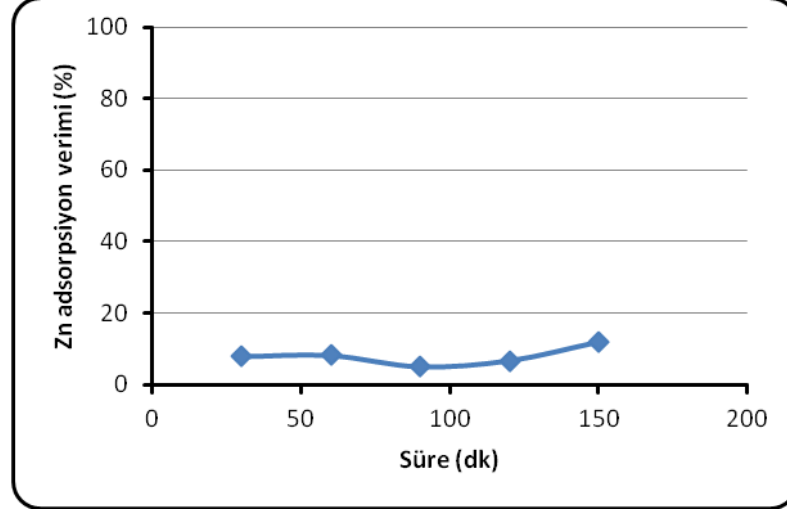
Bentonitin uçucu kül miktarı üzerinden % 5 oranında kullanılmasıyla farklı melas oranlarında elde edilen peletlerin adsorpsiyon sonuçları (Şekil 9.18) incelendiğinde; melas oranının 0.75 ml olduğu, % 5 oranında bentonit içeren peletin, atık sudaki Zn konsantrasyonunu daha hızlı düşürdüğü görülmüştür.



Şekil 9. 19 Çatalağzı uçucu külü için melas oranının atık sudaki Zn konsantrasyonu üzerindeki etkisi (10 gr uçucu kül, % 10 Bentonit)

Bentonitin uçucu kül miktarı üzerinden % 10 oranında kullanılmasıyla farklı melas oranlarında elde edilen peletlerin adsorpsiyon sonuçları (Şekil 9.19) incelendiğinde; melas oranının 0.50 ml olduğu, % 10 oranında bentonit içeren peletin en yüksek adsorpsiyon verimine sahip olduğu görülmüştür.

Optimum pelet bileşiminin belirlenebilmesi için bentonit oranları ve melas oranlarının Zn konsantrasyonuna etkisi incelenmiş ve % 1 bentonit kullanılan, 0.50 ml melas içeren peletin optimum pelet bileşimi olduğuna karar verilmiştir (Şekil 9.20).



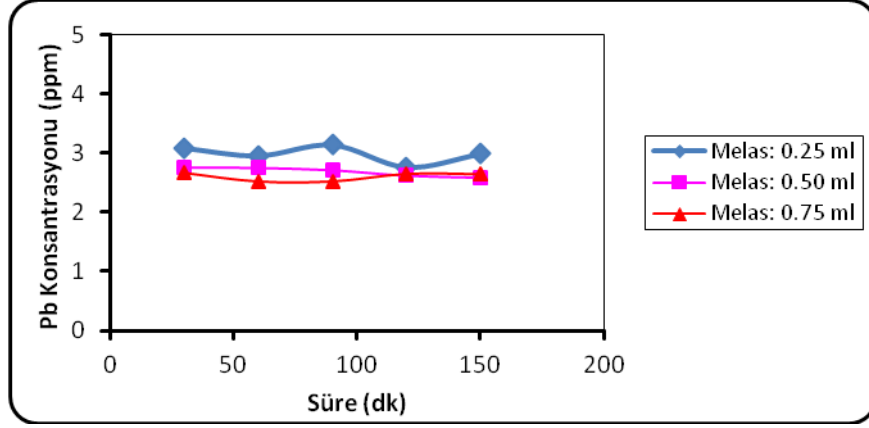
Şekil 9. 20 Optimum Çatalağzı uçucu kül pelet bileşiminin Zn adsorpsiyon verimi üzerindeki etkisi

9.3.2 Pb Adsorpsiyon Sonuçları

Hazırlanan 5 ppm Pb çözeltisinden, Pb adsorpsiyonu sırasında farklı bentonit ve melas oranlarına sahip peletler kullanılarak, bentonit ve melas oranının adsorpsiyon verimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Proses koşulları, oda sıcaklığı, pH:3, karıştırma hızı:300 rpm'dir.

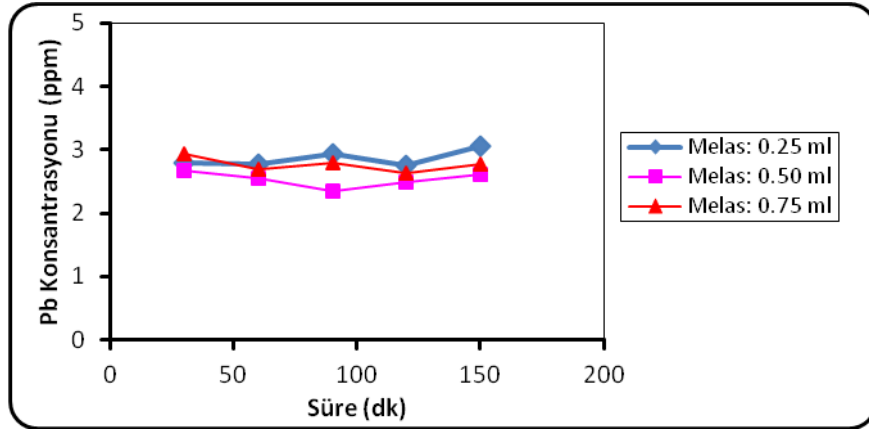
9.3.2.1 Orhaneli uçucu külünün Pb (5 ppm) adsorpsiyon sonuçları

Orhaneli uçucu külünden elde edilen farklı bentonit ve melas oranlarına sahip peletlerin, Pb adsorpsiyonunda adsorban malzeme olarak kullanılabileceği görülmüştür.



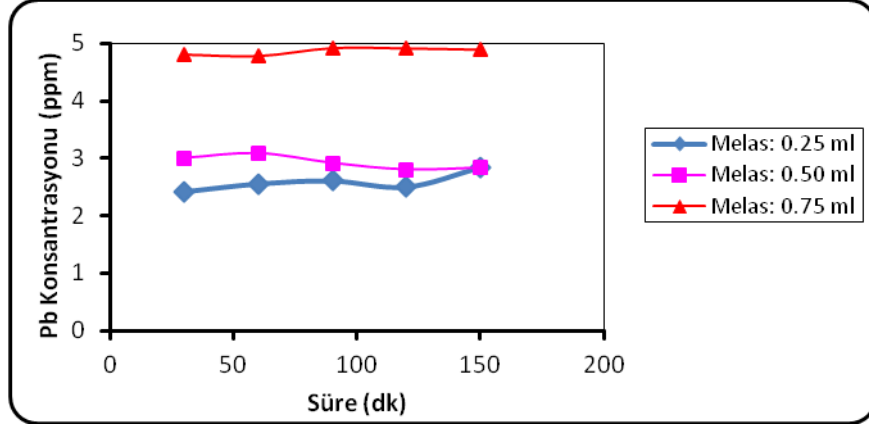
Şekil 9.21 Orhaneli uçucu külü için melas oranının atık sudaki Pb konsantrasyonu üzerindeki etkisi (10 gr uçucu kül, % 0 Bentonit)

Bentonit kullanılmadan farklı melas oranlarında elde edilen peletlerin adsorpsiyon sonuçları (Şekil 9.21) incelendiğinde; melasın 0.75 ml oranında kullanıldığı peletin, atık sudaki Pb konsantrasyonunu daha hızlı düşürdüğü, diğer melas oranlarını içeren peletlere göre daha yüksek adsorplama kapasitesine sahip olduğu görülmüştür.



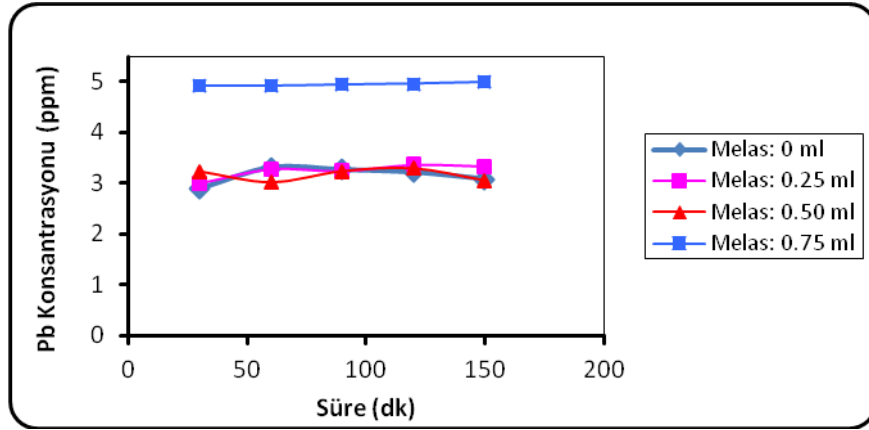
Şekil 9.22 Orhaneli uçucu külü için melas oranının atık sudaki Pb konsantrasyonu üzerindeki etkisi (10 gr uçucu kül, % 1 Bentonit)

Bentonitin uçucu kül miktarı üzerinden % 1 oranında kullanılmasıyla farklı melas oranlarında elde edilen peletlerin adsorpsiyon sonuçları (Şekil 9.22) incelendiğinde; melas oranının 0.50 ml olduğu, % 1 oranında bentonit içeren peletin, diğer melas oranlarını içeren peletlere göre daha yüksek adsorplama kapasitesine sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 9. 23 Orhaneli uçucu külü için melas oranının atık sudaki Pb konsantrasyonu üzerindeki etkisi (10 gr uçucu kül, % 5 Bentonit)

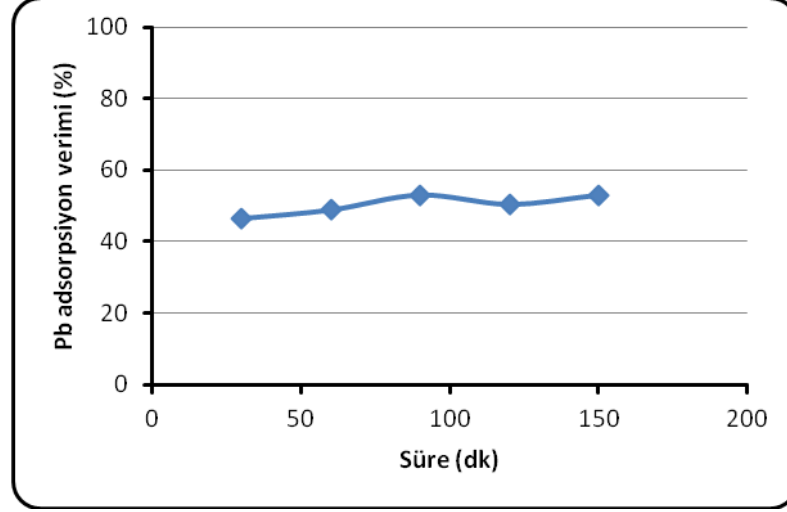
Bentonitin uçucu kül miktarı üzerinden % 5 oranında kullanılmasıyla farklı melas oranlarında elde edilen peletlerin adsorpsiyon sonuçları (Şekil 9.23) incelendiğinde; melas oranının 0.25 ml olduğu, % 5 oranında bentonit içeren peletin, atık sudaki Pb konsantrasyonunu daha hızlı düşürdüğü görülmüştür.



Şekil 9. 24 Orhaneli uçucu külü için melas oranının atık sudaki Pb konsantrasyonu üzerindeki etkisi (10 gr uçucu kül, % 10 Bentonit)

Bentonitin uçucu kül miktarı üzerinden % 10 oranında kullanılmasıyla farklı melas oranlarında elde edilen peletlerin adsorpsiyon sonuçları (Şekil 9.24) incelendiğinde; melas oranının 0.25 ml olduğu, % 10 oranında bentonit içeren peletin, diğer melas oranlarını içeren peletlere göre daha yüksek adsorplama kapasitesine sahip olduğu görülmüştür.

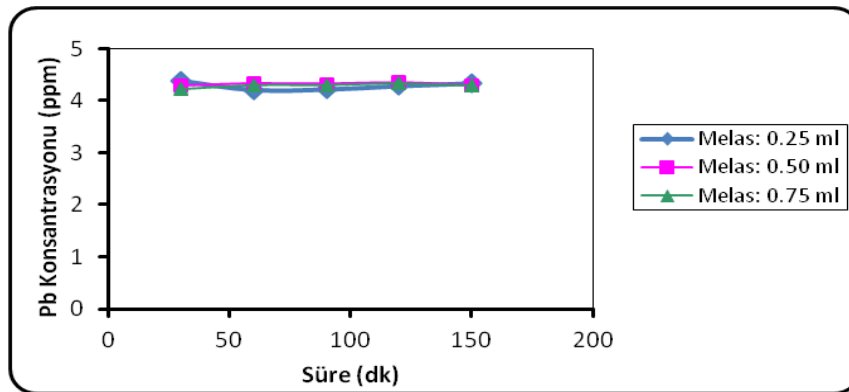
Optimum pelet bileşiminin belirlenebilmesi için bentonit oranları ve melas oranlarının Pb konsantrasyonuna etkisi incelenmiş ve % 1 bentonit kullanılan, 0.50 ml melas içeren peletin optimum pelet bileşimi olduğuna karar verilmiştir (Şekil 9.25).



Şekil 9. 25 Optimum Orhaneli uçucu kül pelet bileşiminin Pb adsorpsiyon verimi üzerindeki etkisi

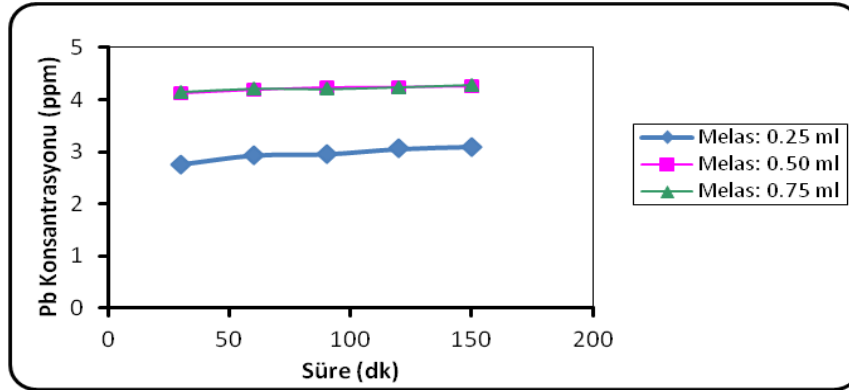
9.3.2.2 Çatalağzı uçucu külünün Pb (5 ppm) adsorpsiyon sonuçları

Çatalağzı uçucu külünden elde edilen peletlerin, Pb adsorpsiyonunda adsorban malzeme olarak kullanılabileceği görülmüştür. Bentonit ve melas oranının adsorpsiyon verimi üzerindeki etkisini inceleyebilmek için farklı oranlara sahip peletler, adsorpsiyonda kullanılmıştır.



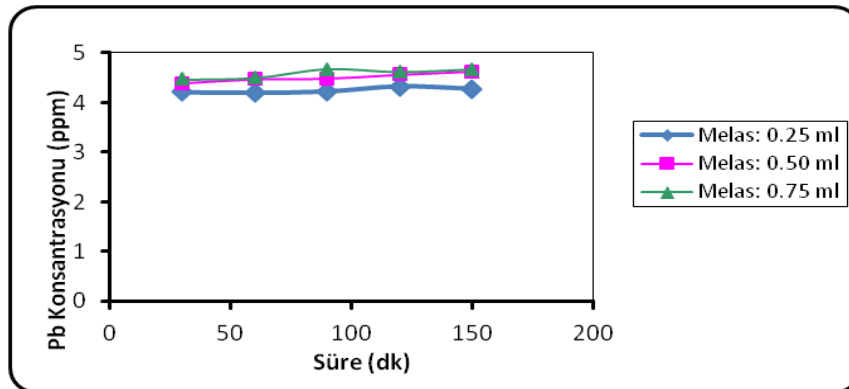
Şekil 9. 26 Çatalağzı uçucu külü için melas oranının atık sudaki Pb konsantrasyonu üzerindeki etkisi (10 gr uçucu kül, % 0 Bentonit)

Bentonit kullanılmadan farklı melas oranlarında elde edilen peletlerin adsorpsiyon sonuçları (Şekil 9.26) incelendiğinde; melasın 0.25 ml oranında kullanıldığı peletin, atık sudaki Pb konsantrasyonunu daha hızlı düşürdüğü, diğer melas oranlarına göre daha yüksek adsorplama kapasitesine sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 9. 27 Çatalağzı uçucu külü için melas oranının atık sudaki Pb konsantrasyonu üzerindeki etkisi (10 gr uçucu kül, % 1 Bentonit)

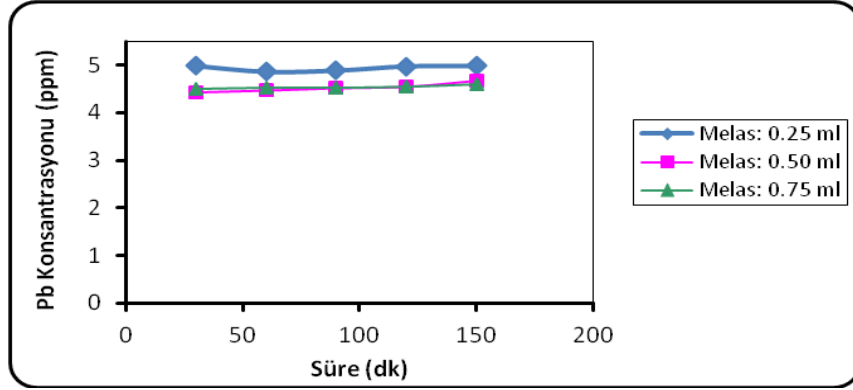
Bentonitin uçucu kül miktarı üzerinden % 1 oranında kullanılmasıyla farklı melas oranlarında elde edilen peletlerin adsorpsiyon sonuçları (Şekil 9.27) incelendiğinde; melas oranının 0.25 ml olduğu, % 1 oranında bentonit içeren peletin, atık sudaki Pb konsantrasyonunu daha hızlı düşürdüğü görülmüştür.



Şekil 9. 28 Çatalağzı uçucu külü için melas oranının atık sudaki Pb konsantrasyonu üzerindeki etkisi (10 gr uçucu kül, % 5 Bentonit)

Bentonitin uçucu kül miktarı üzerinden % 5 oranında kullanılmasıyla farklı melas oranlarında elde edilen peletlerin adsorpsiyon sonuçları (Şekil 9.28) incelendiğinde; melas oranının 0.25 ml olduğu, % 5 oranında bentonit içeren peletin, diğer melas

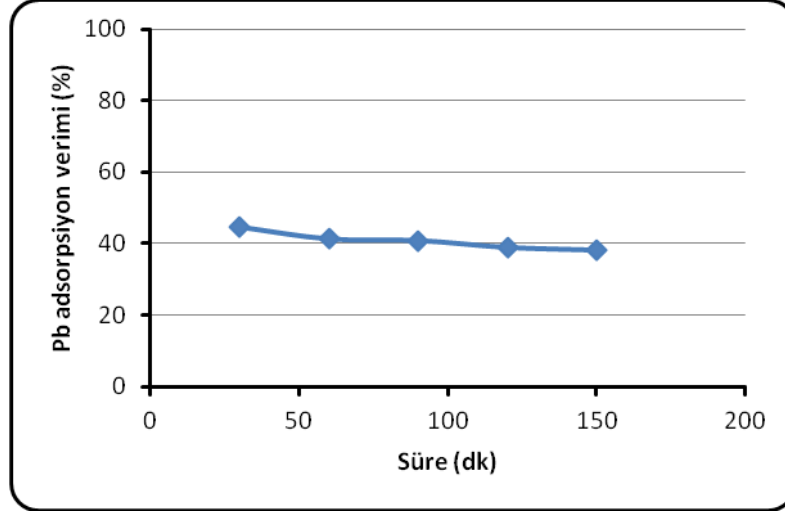
oranlarını içeren peletlere göre daha yüksek adsorplama kapasitesine sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 9. 29 Çatalağzı uçucu külü için melas oranının atık sudaki Pb konsantrasyonu üzerindeki etkisi (10 gr uçucu kül, % 10 Bentonit)

Bentonitin uçucu kül miktarı üzerinden % 10 oranında kullanılmasıyla farklı melas oranlarında elde edilen peletlerin adsorpsiyon sonuçları (Şekil 9.29) incelendiğinde; melas oranının 0.50 ml olduğu, % 10 oranında bentonit içeren peletin, atık sudaki Pb konsantrasyonunu daha hızlı düşürdüğü görülmüştür.

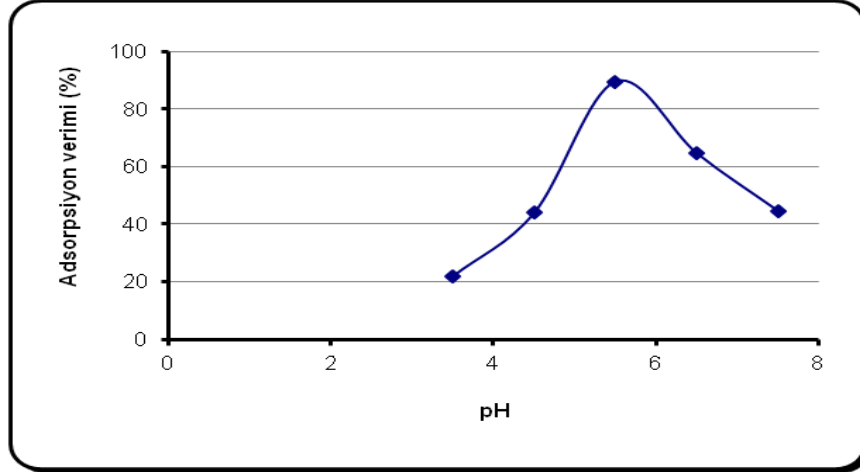
Melas oranının 0.25 ml olduğu peletlerin diğer peletlere göre daha yüksek adsorplama kapasitesine sahip olduğu görülmüş, optimum pelet bileşiminin belirlenebilmesi için bentonit oranları ve melas oranlarının Zn konsantrasyonuna etkisi incelenmiş ve % 1 bentonit kullanılan, 0.25 ml melas içeren peletin optimum pelet bileşimi olduğuna karar verilmiştir (Şekil 9.30).



Şekil 9. 30 Optimum Çatalağzı uçucu kül pelet bileşiminin Pb adsorpsiyon verimi üzerindeki etkisi

9.3.3 pH'ın Adsorpsiyon Verimi Üzerindeki Etkisi

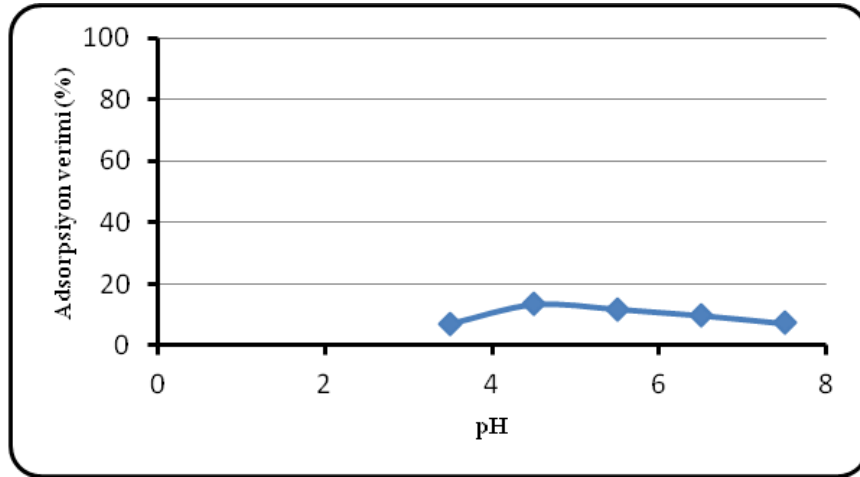
Elde edilen adsorpsiyon verimlerine bakılarak optimum noktalar için pH'ın adsorpsiyon verimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çinko adsorpsiyonu için kullanılan Orhaneli uçucu külüne ait pelet için pH'ın adsorpsiyon verimi üzerindeki etkisi incelendiğinde; pH'ın artışıyla beraber belirli bir noktaya kadar adsorpsiyon veriminin arttığı daha sonra azaldığı görülmüş; optimum pH, 5,5 olarak belirlenmiştir (Şekil 9.31).



Şekil 9. 31 Orhaneli uçucu külü için pH'ın Zn adsorpsiyon verimi üzerine etkisi (10 gr uçucu kül, % 0 Bentonit, 0.25 ml Melas)

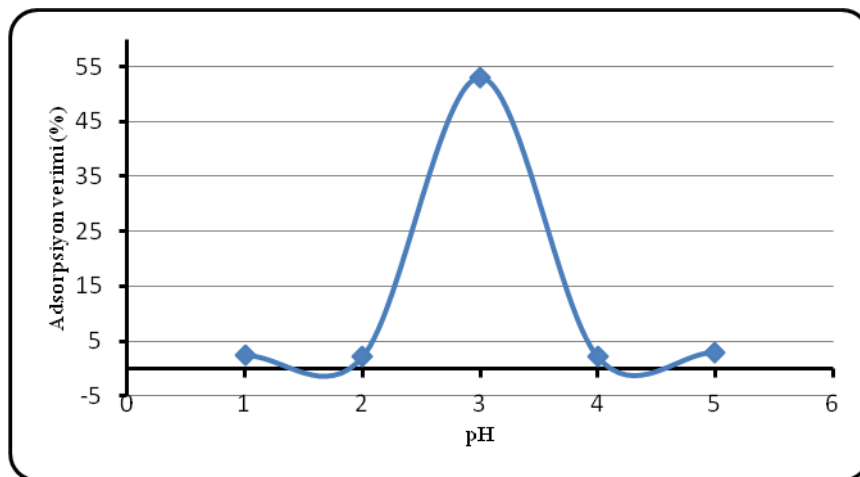
Çinko adsorpsiyonu için kullanılan Çatalağzı uçucu külüne ait pelet için pH'ın adsorpsiyon verimi üzerindeki etkisi incelendiğinde; pH'ın artışıyla beraber belirli bir

noktaya kadar adsorpsiyon veriminin arttığı daha sonra azaldığı görülmüş; optimum pH, 4,5 olarak belirlenmiştir (Şekil 9.32).



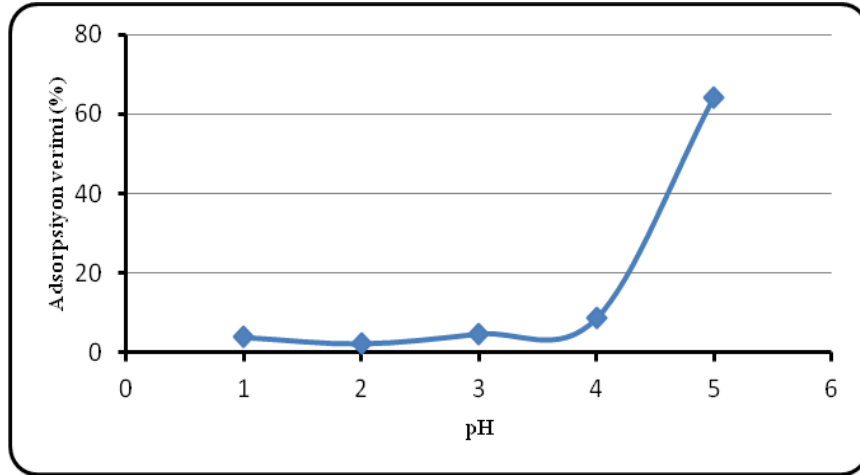
Şekil 9. 32 Çatalağzı uçucu külü için pH'ın Zn adsorpsiyon verimi üzerine etkisi (10 gr uçucu kül, % 1 Bentonit, 0.50 ml Melas)

Kurşun adsorpsiyonu için kullanılan Orhaneli uçucu külüne ait pelet için pH'ın adsorpsiyon verimi üzerindeki etkisi incelendiğinde; pH'ın artışıyla beraber belirli bir noktaya kadar adsorpsiyon veriminin arttığı daha sonra azaldığı görülmüş, optimum pH, 3 olarak belirlenmiştir (Şekil 9.33).Kurşun adsorpsiyonu için kullanılan Orhaneli uçucu külüne ait pelet için optimum pH:3, Çatalağzı uçucu külüne ait optimum pH:5 olarak belirlenmiştir.



Şekil 9. 33 Orhaneli uçucu külü için pH'ın Pb adsorpsiyon verimi üzerine etkisi (10 gr uçucu kül, % 1 Bentonit, 0.50 ml Melas)

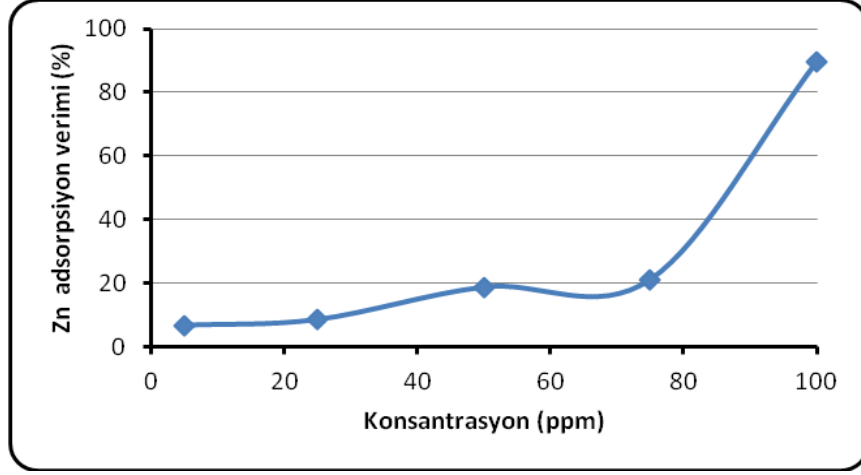
Kurşun adsorpsiyonu için kullanılan Çatalağzı uçucu külüne ait pelet için pH'ın adsorpsiyon verimi üzerindeki etkisi incelendiğinde; pH'ın artışıyla beraber belirli bir noktaya kadar adsorpsiyon veriminin sabit kaldığı daha sonra arttığı görülmüş, optimum pH 5 olarak belirlenmiştir (Şekil 9.34).



Şekil 9. 34 Çatalağzı uçucu külü için pH'ın Pb adsorpsiyon verimi üzerine etkisi (10 gr uçucu kül, % 1 Bentonit, 0.25 ml Melas)

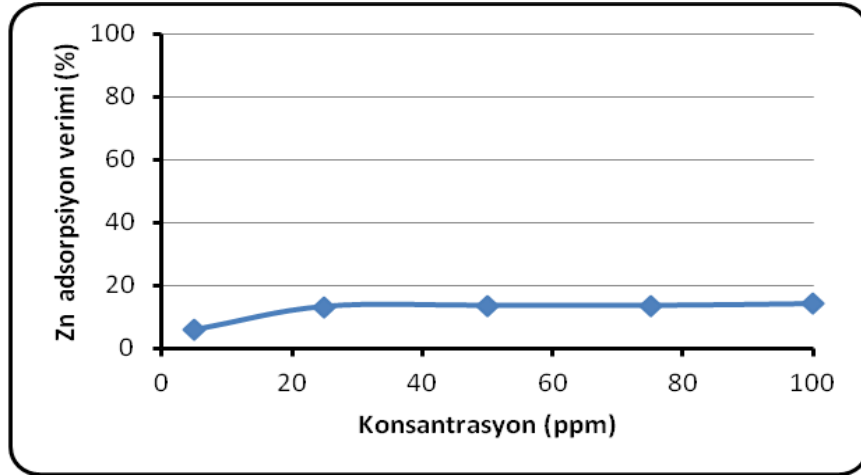
9.3.4 Konsantrasyonun Adsorpsiyon Verimi Üzerindeki Etkisi

Elde edilen adsorpsiyon verimlerine bakılarak optimum noktalar için ağır metal konsantrasyonunun adsorpsiyon verimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çinko adsorpsiyonunda kullanılan Orhaneli uçucu külüne ait pelet için Zn konsantrasyonunun adsorpsiyon verimi üzerindeki etkisi incelendiğinde; Zn konsantrasyonun artışıyla beraber adsorpsiyon veriminin arttığı görülmüş, optimum Zn konsantrasyonu 100 ppm olarak belirlenmiştir (Şekil 9.35).



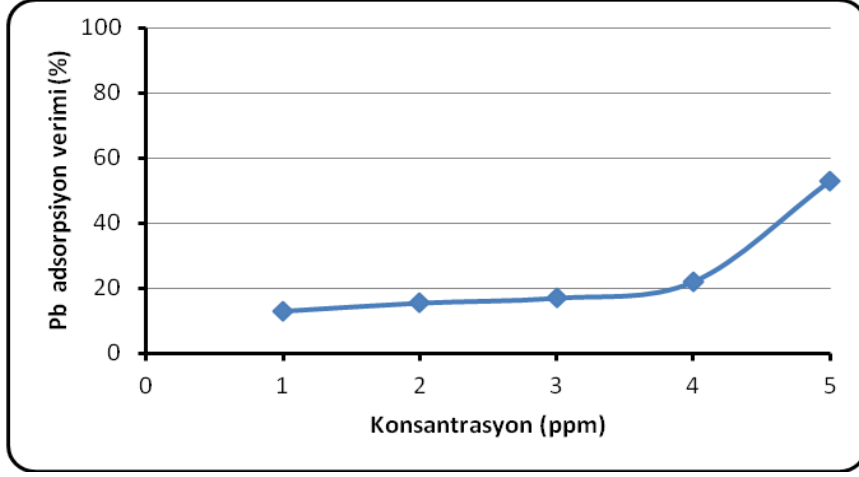
Şekil 9. 35 Orhaneli uçucu külü için konsantrasyonun Zn adsorpsiyon verimi üzerine etkisi (10 gr uçucu kül, % 0 Bentonit, 0.25 ml Melas, pH:5,5)

Çinko adsorpsiyonu için kullanılan Çatalağzı uçucu külüne ait pelet için Zn konsantrasyonunun adsorpsiyon verimi üzerindeki etkisi incelendiğinde; Zn konsantrasyonunun artışıyla beraber adsorpsiyon veriminin belli bir noktaya kadar arttığı daha sonra ufak artışlarla ilerdiği görülmüş, optimum Zn konsantrasyonu 100 ppm olarak belirlenmiştir (Şekil 9.36).



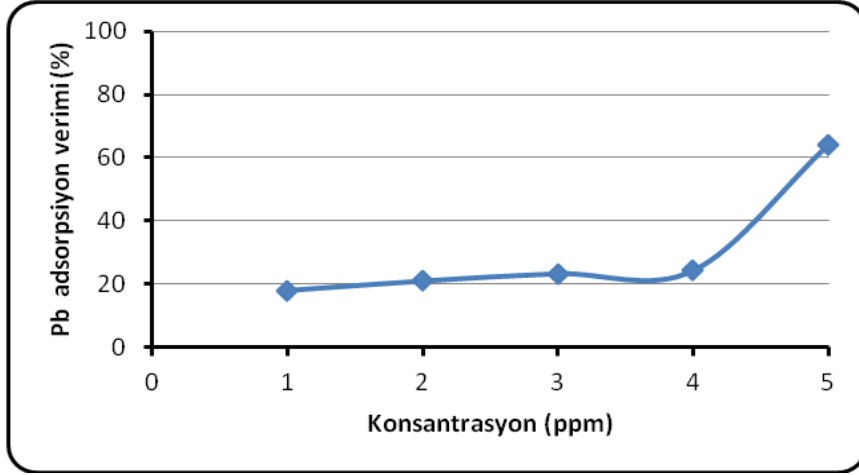
Şekil 9. 36 Çatalağzı uçucu külü için konsantrasyonun Zn adsorpsiyon verimi üzerine etkisi (10 gr uçucu kül, % 1 Bentonit, 0.50 ml Melas pH: 4,5)

Kurşun adsorpsiyonu için kullanılan Orhaneli uçucu külüne ait pelet için Pb konsantrasyonunun adsorpsiyon verimi üzerindeki etkisi incelendiğinde; Pb konsantrasyonunun artışıyla beraber adsorpsiyon veriminin arttığı görülmüş, optimum Pb konsantrasyonu 5 ppm olarak belirlenmiştir (Şekil 9.37).



Şekil 9. 37 Orhaneli uçucu külü için konsantrasyonun Pb adsorpsiyon verimi üzerine etkisi (10 gr uçucu kül, % 1 Bentonit, 0.50 ml Melas, pH:3)

Kurşun adsorpsiyonu için kullanılan Çatalağzı uçucu külüne ait pelet için Pb konsantrasyonunun adsorpsiyon verimi üzerindeki etkisi incelendiğinde; Pb konsantrasyonunun artışıyla beraber adsorpsiyon veriminin arttığı görülmüş, optimum Pb konsantrasyonu 5 ppm olarak belirlenmiştir (Şekil 9.38).



Şekil 9. 38 Çatalağzı uçucu külü için konsantrasyonun Pb adsorpsiyon verimi üzerine etkisi (10 gr uçucu kül, % 1 Bentonit, 0.25 ml Melas, pH:5)

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, özellikle endüstriyel atık sularda önemli miktarlarda bulunabilen, canlı sağlığı ve çevre için tehdit oluşturan ağır metallere kurşun ve çinkonun uçucu kül ile adsorplanabilirliği araştırılmıştır. Termik santrallerde kömürün yakılması sonucu büyük miktarlarda uçucu kül oluşmaktadır. Son yıllarda çevreyi kirletici atık özelliğinden dolayı uçucu külün değerlendirilmesi için çeşitli kullanım alanları araştırılmaya başlanmıştır. Uçucu kül; yüksek karbon içeriği, birim hacmindeki geniş yüzey alanı ve içerdiği Al, Fe, Ca, Mg ve Si gibi elementlerden dolayı birçok organik ve inorganik kirleticiyi uzaklaştırma kabiliyetine sahiptir. Bu nedenle bu çalışmada termik santral atığı uçucu küllerin atık sulardan Pb ve Zn metalini adsorplama kapasitesi araştırılmış ve bu amaçla da uçucu küllerin yüzey alanı artırılıp adsorpsiyon kapasitesini yükseltmek için küller peletme işlemine tabi tutulmuştur.

Çalışmada öncelikle Orhaneli ve Çatalağzı uçucu küllerin karakterizasyonu için XRD, XRF, SEM, FT-IR ve BET analizleri yapılmıştır. Ayrıca elek analizi, serbest CaO (%) tayini, nem tayini (%) ve kızdırma kaybı tayini (%) uygulanmıştır. Orhaneli ve Çatalağzı termik santrallerinden alınan uçucu küllere uygulanan XRF analiziyle uçucu küllerin yapısındaki majör ve eser element dağılımları belirlenmiştir. Orhaneli termik santrali uçucu külünün XRF analizi sonuçlarına göre bileşiminde SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ ve CaO bileşenlerinin yüzdesinin fazla olduğu görülmüştür. Çatalağzı termik santrali uçucu külünün XRF analizi sonuçlarına göre bileşiminde SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ bileşenlerinin yüzdesinin fazla olduğu görülmüştür.

Karakterizasyon çalışmalarından sonra uçucu küllerin yüzey alanını ve gözenekliliği dolayısıyla adsorplama kapasitesini arttırmak amacıyla uçucu küller peletleme işlemine tabi tutulmuştur. Peletleme işlemi için iki yöntem uygulanmış; ancak birinci yöntemden (küresel peletleme) elde edilen peletlerin adsorpsiyonda yetersiz kaldıkları gözlenmiştir. İkinci yöntemde elde edilen silindirik peletler, adsorpsiyon deneylerinde 100 ppm'lik Zn ve 5 ppm Pb sentetik atık sularına ilave edilmiş ve deney süresince 30., 60., 90. ve 120. dakikalarda atık sulardan 10'ar mL'lik numuneler alınmıştır. Alınan atık su numunelerinin elementel analizi ICP-OES cihazında gerçekleştirilmiştir. Bentonit ve melas oranının adsorpsiyon verimi üzerindeki etkisini inceleyebilmek için farklı oranlara sahip peletler, adsorpsiyonda kullanılmıştır. Ayrıca pH ve atık su konsantrasyonunun adsorpsiyon verimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. ICP-OES cihazında yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler aşağıdaki gibidir:

- Orhaneli uçucu külününden elde edilen peletlerin atık sudaki Zn metalini adsorplama deneyi sırasında optimum pelet bileşimi 10 gr Orhaneli uçucu külü, % 0 bentonit ve 0.25 ml melas olduğu tespit edilmiş. Optimum pelet bileşimi için 30., 60., 90., 120. ve 150. dakikalarda sentetik sulardan numuneler alınmıştır ve alınan numunelerin ICP-OES cihazındaki analizi sonucunda sırasıyla 27, 54, 67, 83 ve 90 (%) giderme verimleri elde edilmiştir.

- Çatalağzı uçucu külünden elde edilen peletlerin atık sudaki Zn metalini adsorplama deneyi sırasında optimum pelet bileşimi 10 gr Çatalağzı uçucu külü, % 1 bentonit, 0.50 ml melas olduğu tespit edilmiş. Optimum pelet bileşimi için 30., 60., 90., 120. ve 150. dakikalarda sentetik sulardan numuneler alınmıştır ve alınan numunelerin ICP-OES cihazındaki analizi sonucunda sırasıyla 7.85, 8.15, 5.00, 6.70 ve 11.95 (%) giderme verimleri elde edilmiştir.

- Orhaneli uçucu külününden elde edilen peletlerin atık sudaki Pb metalini adsorplama deneyi sırasında optimum pelet bileşimi 10 gr Orhaneli uçucu külü, % 1 bentonit ve 0.50 ml melas olduğu tespit edilmiş. Optimum pelet bileşimi için 30., 60., 90., 120. ve 150. dakikalarda sentetik sulardan numuneler alınmıştır ve alınan numunelerin ICP-OES cihazındaki analizi sonucunda sırasıyla 46.4, 48.8, 53, 50.4 ve 53 (%) giderme verimleri elde edilmiştir.

•Çatalağzı uçucu külünden elde edilen peletlerin atık sudaki Pb metalini adsorplama deneyi sırasında optimum pelet bileşimi 10 gr Çatalağzı uçucu külü, % 1 bentonit, 0.25 ml melas olduğu tespit edilmiş. Optimum pelet bileşimi için 30., 60., 90., 120. ve 150. dakikalarda sentetik sulardan numuneler alınmıştır ve alınan numunelerin ICP-OES cihazındaki analizi sonucunda sırasıyla 44.8, 41.32, 40.84, 38.82 ve 38 giderme verimleri elde edilmiştir.

•Zn ve Pb ağır metallerinin adsorplama deneyleri sırasında belirlenen optimum peletler kullanılarak pH'ın adsorpsiyon verimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Buna göre; Zn metalinin adsorpsiyonunda Orhaneli uçucu külü için optimum pH 5.5, Çatalağzı uçucu külü için optimum pH 4.5, Pb metalinin adsorpsiyonunda Orhaneli uçucu külü için optimum pH 3, Çatalağzı uçucu külü için optimum pH 5 olarak belirlenmiştir.

•Optimum pelet bileşimi ve optimum pH belirlendikten sonra atık su konsantrasyonunun adsorpsiyon verimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Buna göre; Zn metalinin adsorpsiyonunda Orhaneli uçucu külü için optimum atık su konsantrasyonu 100 ppm, Çatalağzı uçucu külü için optimum atık su konsantrasyonu 100 ppm, Pb metalinin adsorpsiyonunda Orhaneli uçucu külü için optimum atık su konsantrasyonu 5 ppm, Çatalağzı uçucu külü için optimum atık su konsantrasyonu 5 ppm olarak belirlenmiştir.

Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde, Orhaneli uçucu külünün atık sulardan Zn ve Pb giderme veriminin Çatalağzı uçucu külüne göre daha yüksek olduğu görülmüştür.

Yapılan bu çalışmalar kapsamında büyük çevre sorunlarına yol açan termik santral atığı uçucu küllerin ve şeker sanayi atığı olan melasın atık sulardan ağır metalleri adsorplanmada değerlendirilebileceği ve böylece çevresel açıdan olumlu sonuçlar alınabileceği görülmüştür. Bu çalışmanın devamı olarak farklı uçucu küllerin, farklı sanayi atıklarıyla beraber adsorban malzeme olarak kullanılabilirliği araştırılabilecektir. Yapılan deneysel çalışmaların, bu alanda yapılacak daha sonraki çalışmalara ışık tutacağı öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] T.C. Resmi Gazete, Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği. (25687), 31.12.2004.
- [2] Dönmez, R., (2006). Doğal Kil Mineralleri Kullanarak Atık Sulardan Kurşun (II) İyonunun Adsorpsiyonu, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa.
- [3] Tan, A., (2006). Atık Sularda Bazı Kirlilik Parametrelerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Edirne.
- [4] Metcalf ve Eddy, (1991). Wastewater Engineering, Treatment, Disposal and Reuse, McGraw-Hill, 3. Baskı, Amerika.
- [5] Samsunlu, A., (2005). Atıksuların Arıtılması, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [6] Evangelou, V. P., (1998). Environmental Soil and Water Chemistry, Principles and Applications, John Wiley&Sons Inc, New York.
- [7] Avcı, İ., (2002). Sınır Aşan Sularımız, Su Vakfı Yayınları, İstanbul.
- [8] Filiz, E., (2007). Doğal Kaynaklardan Elde Edilen Adsorbanlarla Sulardan Ağır Metal Giderimi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [9] Gönüllü, T., (2004). Endüstriyel Kirlenme Kontrolü, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [10] Pala, A., (2006). Doğal Zeolitlerin Atıksuda Kurşun Gideriminde Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- [11] Türkman, A., Aslan, Ş. ve Ege, İ., (2001). Doğal Zeolitlerle Atıksulardan Kurşun Giderimi, DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 3 (2), 13-19.
- [12] Dikmen, A. (2008). Atık Sulardan Ağır Metallerin Giderilmesinde Doğal Zeolitlerin Kullanılması: Klinoptilolit'in Çinko, Kurşun ve Kadmiyum İçin İyon Değişim Kapasitesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [13] Kahvecioğlu, Ö., Kartal, G., Güven, A. ve Timur, S., Metallerin Çevresel Etkileri-1, http://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi136/d136_4753.pdf, 3 Ekim 2010.
- [14] Güneren, E., (2010). Sulu Çözeltilerdeki Kurşun ve Bakır İyonlarının Bentonit ile Adsorpsiyonu, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

- [15] Akgül, E., (2009). Demir Çelik Endüstrisi Yüksek Fırın Cürufu ve Zeolit Kullanılarak Atıksulardan Kurşun Giderimi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [16] Wikipedia, Çinko, <http://tr.wikipedia.org/wiki/%C3%87inko>, 17 Ocak 2011.
- [17] Ferrocom Madencilik, <http://ferrocom.com.tr/tr/madenler/cinko/item/5-%C3%A7inko.html>, 18 Ocak 2011.
- [18] Tok, S., (2009). Doğal Zeolit (Klinoptilolit) ile Bakır Adsorpsiyonu, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [19] Perry, H.J., (1963). Chemical Engineerings' Handbook, Mc Graw-Hill, Tokyo.
- [20] McKay, G., (1996). Use of Adsorbents for the Removal of Pollutants from Wastewaters, CRC Baskı, Amerika.
- [21] Erdoğan, Y.A., (2005). Atıksulardan Çeşitli Adsorbanlarla Arsenik Giderimi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [22] Coşkun, S., (1998). Sulardan Kurşunun Kil Mineralleri Kullanılarak Adsorpsiyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [23] Şahin, A., (2006). Farklı Adsorbanların Ağır Metal İyonlarını Tutma Kapasitelerinin Tartışılması, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa.
- [24] Etcı, Ö., (2008). Ağır Metal İçeren Atıksulardan Doğal Kil Minerali Beydellit ile Kadmiyum ve Kurşun Giderimi, Yüksek Lisans Tezi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü, Gebze.
- [25] Bayat, C., (2005). Bazı Doğal Kil Minerallerinin Aktivasyonunun Ağır Metal İyonu Tutma Kapasitesine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- [26] Ulubaş, T.,(2000). Uçucu Küllerin Ağır Metal (Cu²⁺, Pb²⁺) Gideriminde Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [27] Dinçyürek, Ö., (2006). Termik Santral Uçucu Kül Tiplerinin Atıksulardaki Fenolün Adsorpsiyon Yöntemi ile Giderim Etkinliklerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- [28] Gürbüz, E., (2009). C Tipi Uçucu Küllerin Etkinliği, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [29] Çiçekli, O., C., (1996). Uçucu Kül İnceliğinin Yüksek Dozajlı Betonun Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [30] Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğınobalı, A., (2004). Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğı (TÇMB), Ankara.
- [31] Yeğınobalı, A., (1971). Uçucu Kül, Tras ve Yüksek Fırın Cürufunun Betonda Katkı Maddesi Olarak Kullanılması ve Optimum Uçucu Kül Karışım Oranlarının Tayini, TÜBİTAK Projesi, Mag-157/A, Ankara.

- [32] Çağlar, G., A., (2007). Endüstriyel Atık Malzemelerin Karayollarında Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [33] Davutoğlu, C., (2008). Termik Santral Baca Gazı Arıtma Tesisi Kaynaklı Koagülasyon Çamurunda Florür Giderimi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- [34] Balkema, A., A., (1992), Fly ash as addition to concrete, Brookfield, Rotterdam.
- [35] Kara, İ., (2008). Seyitömer Ucucu Külünün Farklı Yapı Malzemeleri Olarak Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.
- [36] Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar, S. ve Demir, İ., (2008). Uçucu Kül Bölüm I: Oluşumu, Sınıflandırılması ve Kullanım Alanları, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 2, 85-94.
- [37] Mercan, N., (2007). Uçucu Kül Katkısıyla Üretilen Harçların Dayanım ve Dayanıklılığının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- [38] Alataş, T., (1996). Afşin-Elbistan Termik Santrali Uçucu Külünün Yol Stabilizasyonunda Çeşitli Malzemelerle Birlikte Kullanımı Üzerine Bir Araştırma, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- [39] Ataç, A., (2001). Çayırhan Uçucu Külü ile Üretilen Betonlarda Kür Koşullarının Beton Özellikleri Üzerine Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [40] Volkan, S., (2006). Afşin-Elbistan Termik Santrali Uçucu Küllerinden Yanmamış Karbonun Geri Kazanımı, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- [41] Kantürk, E., (2006). Ege Bölgesi Uçucu Küllerinden Sentetik Zeolit Üretim Parametrelerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- [42] Özdemir, O., (2007). Uçucu Külün Yapı Malzemelerinde Bağlayıcılığa Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [43] Alkaya, D. (2009). Uçucu Küllerin Zemin İyileştirmesinde Kullanılmasının İncelenmesi, Yapı Teknolojileri Elektrik Dergisi, 5(1):61-72.
- [44] Joshi, R., C. ve Lohtia, R., P., (1997). Fly Ash in Concrete, Production, Properties and Uses, Overseas Publishers Association (OPA), Alberta, Kanada.
- [45] Aruntaş, H., Y., (2006). Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21(1), 193-203.
- [46] TS 639, (1975). Uçucu Küller, TSE, Ankara
- [47] TS EN 197-1, (2002). Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, TSE, Ankara.
- [48] TS EN 450-1, (2008). Uçucu Kül-Betonda Kullanılan-Bölüm 1: Tarif, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, TSE, Ankara.

- [49] TS EN 450-2, (2008). Uçucu kül-betonda kullanılan- Bölüm 2: Uygunluk Değerlendirmesi, TSE, Ankara.
- [50] TS EN 451-1, (2008). Uçucu Kül-Deney Metodu- Bölüm 1: Serbest Kalsiyum Oksit Muhtevasının Tayini, TSE, Ankara.
- [51] Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü. ve Mordoğan, H., (2005). Uçucu Küllerin Özellikleri ve Kullanım Alanları, Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, IMCET2QO5, İzmir.
- [52] Kaya, G., (2010). Farklı Konsantrasyonlarda Uçucu Kül Kullanımının Çimento Özellikleri Üzerine Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat.
- [53] Fischer, G.L. ve Natusch D.F.S., (1979). Size Dependence of the Physical and Chemical Properties of Coal Fly Ash, In Analytical Methods for Coal and Coal Products, 3, Aca.
- [54] Türkmenoğlu, M., (2010). Uçucu Küllerin Liç Karakteristiklerinin ve Çevreye Etkilerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- [55] Yıldız, T., (1998). Uçucu Kül ve Polipropilen Atıklarının Değişik Kombinasyonlarda Kompozit Malzeme Üretiminde Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- [56] Doğan, Ö., (2007). Afşin-Elbistan Termik Santrali Uçucu Küllerinden Çöktürülmüş Kalsiyum Karbonat ($CaCO_3$) Kazanım Koşullarının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- [57] Karahan, O., (2006). Liflerle Güçlendirilmiş Uçucu Küllü Betonların Özellikleri, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- [58] Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar, S. ve Demir, İ., (2009). Uçucu Kül Bölüm II: Kimyasal, Mineralojik ve Morfolojik Özellikler”, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 5(2), 33-42.
- [59] Karateke, S., K., (2009). F Tipi Uçucu Kül Kullanılmış Betonların Kül Etkinlik Katsayıları, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [60] Yıldız, T. ve Yıldız, C., (2002). Soma Termik Santrali Uçucu Kül ve Polipropilen Atıklarının Yeni Bir Malzeme Üretiminde Değerlendirilmesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9(2), 163-169.
- [61] Öksüz, K., (2006). Afşin-Elbistan Termik Santrali Uçucu Külünün Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- [62] Erdoğan, E., (2006). Çimentoya Bor Katkısı, Uçucu Kül, Yüksek Fırın Cürufu İlavesiyle Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [63] Demir, İ., (2009). Aynı Oranlarda İkame Edilen Silis Dumanı ve Uçucu Külün Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi, International Journal of Engineering Research and Development, 1(2), 1-7.

- [64] Tuygun, C., S., (2002). Çayırhan Uçucu Külünün Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi ve Etkinlik Faktörünün İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [65] Aytekin, S., (2009). Uçucu Küllerinin Killi Zeminlerin İslahında Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- [66] Özmal, F., (2005). Bor Endüstri Atıkları, Uçucu Kül, Taban Külü ve Alünit Mineralinin Çimento Üretiminde Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya.
- [67] Üstün, N. (2006). Uçucu Küllerin Peletlenmesi, Çinko, Bakır ve Krom Adsorpsiyonunda Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [68] Gündeşli, U., (2008). Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Yüksek Fırın Cürufunun Beton ve Çimento Katkısı Olarak Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- [69] Özyurt, Z., (2006). Termik Santral Atıklarındaki İz Elementlerin Çevresel Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.
- [70] Alkaya, D., (2002). Uçucu Kül Katkısının Dolgu Zeminlerin Stabilitesine Etkisi, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- [71] İbiş, R., Y., (2010). Termik Santral Uçucu Külünün Atıksulardan Arsenik Uzaklaştırmada Etkinliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- [72] Altunay, V., (2010). Boyar Maddelerin Gideriminde Değişik Adsorbanların Kullanımının Araştırılması: Zeolit ve Uçucu Kül, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- [73] Ulusoy, A., (2008). Uçucu Kül-Tekstil Fabrikası Atık Külü ve Bazaltik Pomzanın Tuğla Üretiminde Katkı Olarak Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş.
- [74] We Energies Coal Combustion Products Utilization Handbook, Background and History of We Energies Coal Combustion Products (CCPs), http://www.we-energies.com/environmental/ccp_handbook_ch1.pdf, 24 Mayıs 2011.
- [75] United Kingdom Quality Ash Association, Ash Utilisation from Coal-Based Power Plants, http://www.ukqaa.org.uk/Papers/AshTechB01AshUtilisationfromCoalBasedPowerPlantsBarnes_Sear.pdf, 25 Mayıs 2011.
- [76] Enerji Piyasası Denetleme Kurulu, <http://www.epdk.gov.tr/documents/10157/bf4e8476-fd60-4e3d-bb51ea277b3f8587>, 25 Mayıs 2011.
- [77] Enerji Piyasası Denetleme Kurulu, 2010 Elektrik Piyasası Raporu, <http://www2.epdk.org.tr/Belgeler/ElektrikPiyasasiRaporu2010.pdf>, 24 Mayıs 2011.
- [78] Türkiye İstatistik Kurumu, Termik Santral Su ve Atık İstatistikleri, 2000-2006 <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=1943>, 20 Mayıs 2011

- [79] Türkiye İstatistik Kurumu, Termik Santral Su, Atıksu ve Atık İstatistikleri, 2008, <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=6171>, 20 Mayıs 2011
- [80] Tuğrul, N., Möröydor Derun, E., Pişkin, M., B. ve Pişkin, S., (2004). Pelletization of Pyrite Ash Wastes for Utilization in Iron Production Industry, Journal of Engineering and Natural Sciences, Sigma 2005/3.
- [81] Tuğrul, N., (2005). Bandırma Etibank Sülfürik Asit Fabrikasından Çıkan Kalsine Pirit Külünün Yüksek Fırın Hammaddesi Olarak Değerlendirilmesi ve Pik Demir Üretiminde Kullanılması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [82] Lkhagva, T.,(2006). Uçucu Küllerin Agregata Olarak Beton Üretiminde Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [83] TS EN 1744-1, (2000). Agregaların Kimyasal Özellikleri için Deneyler, Bölüm 1: Kimyasal Analiz, TSE, Ankara.
- [84] Ripke, S.J. ve Kawatra S.K., (2000). Can Fly Ash Extend Bentonite Binder for Iron Ore Agglomeration, İnt. J. Miner. Process, 60, 181-198.
- [85] Ripke, S.J. ve Kawatra S.K., (2002). Effect of Bentonite Fiber Formation in Iron Ore Pelletization, İnt. J. Miner. Process, 65, 141-149.
- [86] Çelik, Ö., Damcı, E. ve Pişkin, S. (2008). Characterization of fly ash and its effects on the compressive strength properties of Portland Cement, Indian Journal of Engineering and Materials Sciences, 15, 433-440.
- [87] Keshk, S. M. A. S., Razek, T. M. A. ve Sameshima, K. (2006). Bacterial cellulose production from beet molasses, African Journal of Biotechnology, 5 (17), 1519-1523.

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Şeyma KÖLEMEN
Doğum Tarihi ve Yeri :İslahiye 11.06.1988
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta :seymakolemen@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Kimya Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2010
Lise	Sayısal	O/PET Anadolu Lisesi	2006

YAYINLARI

Bildiri

1. Kipcak, A.S., Baran Acarali, N., Kolemen, S., Tugrul, N., Moroydor Derun, E. Piskin, S., (2012) . Study on Characterization of Tuncbilek Fly Ash, ICESE 2012: International

Conference on Environmental Science and Engineering, 25-26 Temmuz, 67, 700-704, Amsterdam.

Proje

1. Farklı Bölgelerden Alınan Uçucu Küllerin Ağır Metal İyonlarının Adsorbansı Üzerinde Etkilerinin İncelenmesi', 2011-07-01-KAP01 numaralı KAP Projesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü, Yıldız Teknik Üniversitesi.