

**EREN ENERJİ TERMİK SANTRALİ UÇUCU KÜLLERİNİN ÇİMENTO KATKI  
MADDESİ OLARAK KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI**

**Barış AKKAYA**

**Bülent Ecevit Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Maden Mühendisliği Anabilim Dalında**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Olarak Hazırlanmıştır**

**ZONGULDAK**

**Eylül 2013**

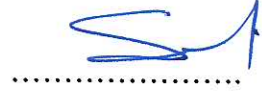
**KABUL:**

Bariş AKKAYA tarafından hazırlanan "EREN ENERJİ TERMİK SANTRALİ UÇUCU KÜLLERİNİN ÇİMENTO KATKI MADDESİ OLARAK KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI" başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek, Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 20/09/2013

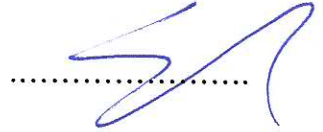
Başkan: Prof. Dr. İhsan TOROĞLU (BEÜ)



Üye : Prof. Dr. Ayhan Ali SİRKECİ (İTÜ)



Üye : Prof. Dr. Sait KIZGUT (BEÜ)



---

**ONAY:**

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım .../.../2013



Prof. Dr. Şadi ŞEN  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*



Barış AKKAYA

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **EREN ENERJİ TERMİK SANTRALİ UÇUCU KÜLLERİNİN ÇİMENTO KATKI MADDESİ OLARAK KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI**

**Barış AKKAYA**

**Bülent Ecevit Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Maden Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. İhsan TOROĞLU**

**Eylül 2013, 65 sayfa**

Bu çalışmada, Eren Enerji Zonguldak termik santralindeki, yakma prensibi olarak pulverize kömürün yakıldığı, 2. ve 3. ünite kazanlarına bağlı elektrostatik toz tutma sistemlerinden (ESP) toplanan uçucu küllerin, çimento katkı maddesi olarak kullanımının beton dayanımına etkisi incelenmiştir. İlk olarak toplanan uçucu küllerin boyut dağılımı ve kızdırma kaybı değerleri arasındaki ilişki araştırılmıştır. Boyut dağılımı açısından 3. ünite ESP gözlerinde toplanan uçucu küllerin, daha büyük boyut dağılımına sahip olduğu gözlenmiştir. Buna karşılık, 3 ünite ESP gözlerinden elde edilen uçucu küllerin kızdırma kaybı değerleri ortalama % 2,55 iken 2. ünite ESP gözlerinden elde edilen uçucu küllerin kızdırma kaybı değerleri % 3,05 dir. Uçucu küllerin boyut dağılımı ile uçucu küllerin çimentoya ikamesi ile hazırlanan beton örneklerinin dayanım değerleri arasındaki ilişkilendirme yapılmıştır. Daha büyük boyutlu olan üçüncü ünite uçucu külleri ile hazırlanmış beton örneklerinin ortalama dayanım değerleri 2 ve 7 günlük kür sürelerinde sırasıyla 22,03 ve 28,3 Mpa'dır. Bu değerler, ikinci ünite için 2 ve 7 günlük kür sürelerinde 22,9 ve 29,5 Mpa ölçülmüştür. 28 günlük

## **ÖZET (devam ediyor)**

dayanımlarda ise üçüncü ünite ESP gözlerinden toplanan uçucu külleri ile hazırlanan beton örneklerinin ortalama dayanımları 38,18 Mpa iken, ikinci üniteden toplanan uçucu küller ile hazırlanan beton örnekleri için bu ortalama dayanım değeri 37,65 Mpa olarak ölçülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Termik santral, beton, uçucu kül

**Bilim Kodu:** 607.02.01

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **THE USE OF EREN ENERGY POWER PLANT FLY ASHES AS CEMENT ADDITIVE**

**Bariş AKKAYA**

**Bülent Ecevit University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mining Engineering**

**Thesis Advisor: Prof. İhsan TOROĞLU  
September 2013, 65 pages**

In this study, the effect to concrete strength of varying amount of cement additive fly ash samples taken from electrostatic precipitators engaged second and third unit of Eren Energy coal fired power plant in which pulverized coal is combusted was investigated. Firstly relation between size distribution and loss on ignition of fly ash samples. In terms of size distribution fly ash samples from ESP hoppers of 3 rd unite were observed to be larger size distribution. On the other hand, averages loss of ignition of fly ash samples from 2 nd and 3 rd unite are % 3.05 and %2.55 respectively. Relation between size distribution of fly ash samples and strength of concrete samples prepared as using fly ash as cement additive was carried out. Average strength of 2 and 7 days cure period of concrete samples prepared with 3 rd unite fly ash samples which have larger size distribution is 22.03 and 28.3 Mpa respectively. Strenght of concrete samples prepared with 2 rd unite fly ash samples for 2 and 7 days of cure period is 22.9 adn 29.5 Mpa respectively. For 28 days of cure period, while strength of concrete samples prepared with 3 rd unite fly ashes is 38.18 Mpa, strength of concrete samples prepared with 2 nd unite fly ashes is 37.65 Mpa.

## **ABSTRACT (continued)**

**Key Words:** Thermal power station, concrete, fly ash

**Science Code:** 607.02.01

## TEŞEKKÜR

Yazar; tez çalıőmasının yürütülmesindeki katkılarından dolayı, Tez Danışmanı Prof. Dr. İhsan TOROĞLU'na, tezin őekillenmesinde konu ile ilgili tecrübelerini aktaran Prof. Dr. Sait KIZGUT'a, yazım ve içerikle ilgili düzeltmelerdeki yardımları için Doç. Dr. Dilek ÇUHADAROĞLU' na, tezin bütün oluşum aőamalarında sürekli yazarın kendisiyle fikir alıőveriőı yapan Arő. Gör. Mehmet BİLEN, Uzm. Serdar YILMAZ ve Maden Mühendisi Cemil Emre Yılmaz'a, yazım ve teknik destekleri için Arő. Gör. Özgür YILMAZ, Arő. Gör. Utku SAKIZ ve Arő Gör. Ekin KÖKEN'e, aynı şekilde yine değerli fikirlerini ve tecrübelerini paylaőan Arő. Gör ve Jeoloji Mühendisi Recep Melih AKMAZ'a, Eren Enerji A.Ő. 'nin değerli mühendislerinden Halil GÖNÜL ve Salih GÜNEY' e ve kendisine sürekli moral desteği veren çok kıymetli arkadaőı őefika AKGÜL'e teşekkür eder.





## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET .....	iii
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR .....	vii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xvii
BÖLÜM 1 GİRİŞ VE AMAÇ .....	1
1.1 KONUNUN ÖNEMİ .....	2
BÖLÜM 2 TERMİK SANTRALLER HAKKINDA GENEL BİLGİLER .....	3
2.1 TERMİK SANTRALLERDE YAKMA PRENSİPLERİ .....	4
2.1.1 Pülverize Kömür Yakma Sistemleri .....	5
2.1.2 Akışkan Yatakta Yakma Sistemleri .....	6
BÖLÜM 3 TERMİK SANTRALLERDE OLUŞAN ENDÜSTRİYEL ÜRÜNLER .....	9
3.1.1 Taban Külleri Tanımı ve Özellikleri .....	10
3.1.2.1 Uçucu Küllerin Sınıflandırılması .....	11
3.1.2.2 Uçucu Küllerin Mineralojik Yapısı.....	13
3.1.2.3 Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri .....	15
3.1.2.4 Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri .....	16
3.1.2.5 Uçucu Küllerin Puzolanik Özellikleri .....	17

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
3.2 BACA GAZI KÜKÜRTSÜZLEŞTİRME ÜRÜNÜ (DESÜLFOJİPS) .....	17
3.2.1 Baca Gazı Kükürtsüzleştirme İşlemleri (FGD) .....	18
3.2.1.1 Termik Santrallerdeki Baca Gazı Kükürtsüzleştirme .....	18
<b>BÖLÜM 4 TERMİK SANTRAL YAN ÜRÜNLERİNİN KULLANIM ALANLARI .....</b>	<b>21</b>
4.1 TABAN KÜLÜ KULLANIM ALANLARI .....	21
4.2 UÇUCU KÜLLERİN KULLANIM ALANLARI .....	21
4.2.1 Uçucu Küllerin Beton Üretiminde Kullanımı .....	21
4.2.2 Uçucu Küllerin Yol Yapımında Kullanımı .....	23
4.2.3 Uçucu Küllerin Toprak Islahında Kullanımı .....	23
4.2.4 Uçucu Küllerin Tuğla Yapımında Kullanımı .....	24
4.2.5 Uçucu Küllerin Metal Kazanımında Kullanımı .....	25
4.2.6 Uçucu Küllerin Diğer Kullanım Alanları .....	25
4.3 BACA GAZI KÜKÜRTSÜZLEŞTİRME ÜRÜNÜ KULLANIM ALANLARI .....	25
<b>BÖLÜM 5 TERMİK SANTRALLERDE TOZ TUTMA SİSTEMLERİ .....</b>	<b>27</b>
5.1 ESP (ELEKTROSTATİK ÇÖKTÜRME SİSTEMLERİ) .....	29
5.2 TORBA TİPİ TOZ TUTMA SİSTEMLERİ .....	31
<b>BÖLÜM 6 DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....</b>	<b>33</b>
6.1 NUMUNE ALMA .....	33
6.2 ANALİZLER.....	38
6.2.1 Kimyasal Analizler .....	39
6.2.2 Boyut Dağılımı Analizleri .....	39
6.2.3 Kızdırma Kaybı Analizleri .....	41
6.2.4 Boyut Dağılımı ve Kızdırma Kaybı Değerlerinin Karşılaştırılması .....	42

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
6.2.5 Dayanım Analizleri .....	44
BÖLÜM 7 SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	57
KAYNAKLAR .....	61
BİBLİYOGRAFYA .....	63
ÖZGEÇMİŞ .....	65



## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>		<u>Sayfa</u>
2.1	Bir Termik Santralin Akım Şeması Halinde Genel Çalışma Şekli .....	4
2.2	Eren Enerji Termik Santralinin Genel Görünümü .....	4
2.3	Termik Santrallerde Pulverize Kömür Yakma Sistemleri.....	6
2.4	Dolaşımli Akışkan Yatakta Yakma Genel Çalışma Şekli .....	8
3.1	Uçucu Küllerin Oluşumu.....	11
3.2	Uçucu Küllerin Mikroskopik Görüntüleri .....	14
3.3	Baca Gazı Sıyırma İşlemi .....	19
4.1	Çimento İçinde Oluşan Birincil Reaksiyonlar .....	22
4.2	Çimento İçinde Oluşan İkincil Reaksiyonlar.....	23
5.1	Uçucu Kül Tanelerinin Tutulmasının Genel Prensibi .....	30
5.2	Toz Tutucu Elektotların Konumu .....	31
5.3	Toz Tutma Haznesi Çalışma Şekli ve Kesit Görünüşü .....	31
5.4	Torba Tipi Toz Tutma Sistemleri .....	32
6.1	Tek Bir Ünitenin ESP Sistemi .....	34
6.2	ESP ve Depolama Sistemi İçerisinde Numune Alma Noktaları .....	35
6.3	Tesisteki Genel Örnek Oluşturma Düzeni.....	37
6.4	Malvern Masterseizer S 2000 Cihazı. ....	40
6.5	Seramik Krozelerin Deney Öncesi Fırına Yerleştirilmesi.....	41
6.6	(2. ve 3.) ESP Sıraları Uçucu Külleri Boyut Dağılımı ve Kızdırma Kaybı İlişkisi .....	42
6.7	Silolarda Toplanan Uçucu Küllerin Boyut Dağılımı ve Kızdırma Kaybı İlişkisi .....	43
6.8	Harç Makinesi.....	45
6.9	Standart Beton Kalıbı .....	45
6.10	Sarsma Cihazı. ....	46
6.11	Harç Düzleyici, Büyük, Küçük Yayıcılar ve Kaşık Aparatları. ....	46
6.12	Beton Örneklerinin Su İçerisinde Bekletilmesi. ....	47
6.13	Tek Eksenli Basınç Dayanımı Değerinin Belirlenmesinde Kullanılan Pres. ....	48
6.14	Kırma başlıkları (4x4x1) cm <sup>3</sup> . ....	48
6.15	Tek Eksenli Basınç Dayanımı Ölçme Cihazı. ....	49

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>		<u>Sayfa</u>
6.16	ESP Sıraları Uçucu Kül İkameli Çimento ve Portland Çimentosu Karışımlarının Boyut Dağılımları. ....	52
6.17	Uçucu Küller ile Hazırlanan Beton Örneklerinin Tek Eksenli Basınç Dayanımları. ...	52
6.18	Uçucu Kül İkameli Çimento Karışımlarının 2,7 ve 28 Günlük Puzolanik Aktivite İndeksleri. ....	53
6.19	Silolarda Toplanan Uçucu Küllerin Boyut Dağılımları. ....	54
6.20	Silo Uçucu Külleri ile Hazırlanan Beton Örneklerinin 2,7 ve 28 Günlük Basınç Dayanımı Değerleri. ....	55
6.21	Silo Uçucu Külleri ile ikame edilen Çimento Karışımlarının 2,7 ve 28 Puzolanik Aktivite İndeksleri. ....	56

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>		<u>Sayfa</u>
6.1	Deneyisel Numune İsimlendirmesi. ....	35
6.2	Tek Bir Ünitinin ESP Çıkış Miktarları. ....	36
6.3	Numune Alma Zamanları. ....	38
6.4	Uçucu Kül Örneklerinin ve Portland Çimentosu Örneğinin Kimyasal Analizleri. ....	39
6.5	Uçucu Kül Örneklerinin ve Portland Çimentosu Örneğinin Boyut Dağılımı. ....	40
6.6	Uçucu Kül ve Portland Çimentosu Kızdırma Kaybı Değerleri. ....	41
6.7	Beton Harcı Genel Bileşimi. ....	44
6.8	Uçucu Kül İlaveli Harç Örneklerinin Bileşimi. ....	47
6.9	Sadece Çimento İle Hazırlanan Beton Örneklerinin Tek Eksenli Basınç Dayanımı Değerleri. ....	49
6.10	Çimento Karışımlarının Boyut Dağılımı ve Beton Dayanımı İlişkileri. ....	51





## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Aluminat ( $Al_2O_3$ )
$C_3A$	: Tri-kalsiyum Aluminat ( $3CaO \cdot Al_2O_3$ )
$C_4AF$	: Tetra-kalsiyum Alumina Ferrit ( $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ )
$C_3S$	: Tri-Kalsiyum Silikat ( $3CaO \cdot Si_2O_3$ )
$C_2S$	: Di-Kalsiyum Silikat ( $2CaO \cdot Si_2O_3$ )
Ca-S	: Kalsiyum Silikatlı Bileşikler.
C	: CaO
D01	: Hacimsel Olarak Numunenin % 10'nun Geçtiği Boyut ( $\mu m$ )
D05	: Hacimsel Olarak Numunenin % 50'sinin Geçtiği Boyut ( $\mu m$ )
D09	: Hacimsel Olarak Numunenin % 90'nın Geçtiği Boyut ( $\mu m$ )
kV	: Kilovolt
Mesh	: Bir İnç Uzunluğa Düşen Delik Sayısı
Mpa	: Megapascal.
Mg-S	: Magnezyum Silikatlı Bileşikler
MW	: Birim Zamanda Üretilen Enerji (Güç).
MWe	: Birim Zamanda Üretilen Elektriksel Enerji (Elektriksel Güç).
NOx	: Azot Oksit Bileşikleri
S	: Silikat ( $Si_2O_3$ )
$\mu m$	: Mikrometre
$\Sigma$	: Kümülatif toplam

## KISALTMALAR

ASTM:	: American Society for Testing and Materials
C-A-H	: Kalsiyum Alumina Hidrate Yapıları
C-S-H	: Kalsiyum Silikat Hidrate Yapıları
EİE	: Elektrik İşleri Etüd İdaresi
ESP:	: Elektrostatik çöktürme sistemleri

## **SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- FGD : Gaz Kükürtsüzleştirme İşlemleri  
% KK : Kızdırma Kaybı yüzdesi  
SAF : Serbest silis (SiO<sub>2</sub>) + Alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) + Hematit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) toplam % değeri  
TS : Türk Standartları

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ VE AMAÇ

Enerji hareket ve iştir. Bu olgunun var olduğu dünyamızda enerji eşittir hayat demek yanlış olmaz. Hayatımızı devam ettirmemizin bir şartıdır aslında enerji, bu yüzden tartışılmayacak kadar önemlidir. Enerji üretilmesinin tartışılmazlığı yanında, enerji üretirken doğanın dengesini düşünmek, tartışılmayacak derecede önemli diğer bir konudur.

Enerji üretmenin günümüz teknolojisinde en yaygın yolu fosil kaynaklı yakıtların yakılması ve elde edilen ısının mekanik enerjiye çevrilmesidir. Bu çevrim motorlu taşıtlarda olduğu gibi sıvı yakıtların kullanımı ile mekanik enerjiye çevrim, ya da doğrudan ısı veya elektrik üretimi için sıvı veya katı yakıtlar yakılarak elde edilen buhar ile mekanik enerjiye çevrilmesi vb. durumlar şeklindedir. Her durumda açığa çıkan enerji % 100 enerji verimliliğine ulaşamaz. Enerji elde edilirken kaybolan enerji ısı, ışık, ses ve en önemlisi enerjinin temel hallerinden biri olan madde yani atık kütle olarak kendini gösterir. Fosil kaynaklı yakıtların, yakıldıktan sonra arta kalan maddeler bu atık kütlelerdir ve çok büyük miktarlarda açığa çıkmaktadırlar.

Bu çalışmada fosil kaynaklı katı yakıtların yakılması sonucu elde edilen ve geri kazanılabilecek enerji kayıplarının temel sonuçlarından olan bu atık kütleler ve atık kütlelerin içerdiği uçucu küller incelenmiştir.

Bu geri kullanılabilecek atık kütleler doğrudan üç grupta toplanabilir.

- a) Taban Külü.
- b) Uçucu Kül.
- c) Dolaylı olarak baca gazı kükürtsüzleştirme ürünleri (desülfojips).

Özellikle taban külü ve uçucu külün fiziksel ve morfolojik özellikleri, termik santral kazanı içerisine beslenen kömürün fiziksel ve kimyasal özellikleri ve kazandaki yanma şekli ile çok

yakından ilişki içerisinde. Bu yüzden termik santrallerde kullanılan yakıtın yakılması sistemleri ve bu sistemlerin taban külü ve uçucu küller üzerindeki etkilerine değinilmiştir.

Bu çalışmada Zonguldak Çatalağzı mevkiinde bulunan Eren Holdinge bağlı Eren Enerji A.Ş. bünyesindeki, 1360 MWe gücündeki termik santralin 2. ve 3.'ü ünitesinde; katı yakıtın yanması sonucu oluşan katı atık maddelerden olan uçucu küllerin özellikle çimento sanayinde ve beton yapımında kullanımı incelenecektir.

Diğer taraftan baca gazı içerisindeki SO<sub>2</sub> in baca gazı ile birlikte doğaya salıverilmesini engellemek için kurulan özel sistemler ile kireç taşı ile muamele edilerek jips elde edilmesi işlemlerine de gereken vurgu yapılmıştır.

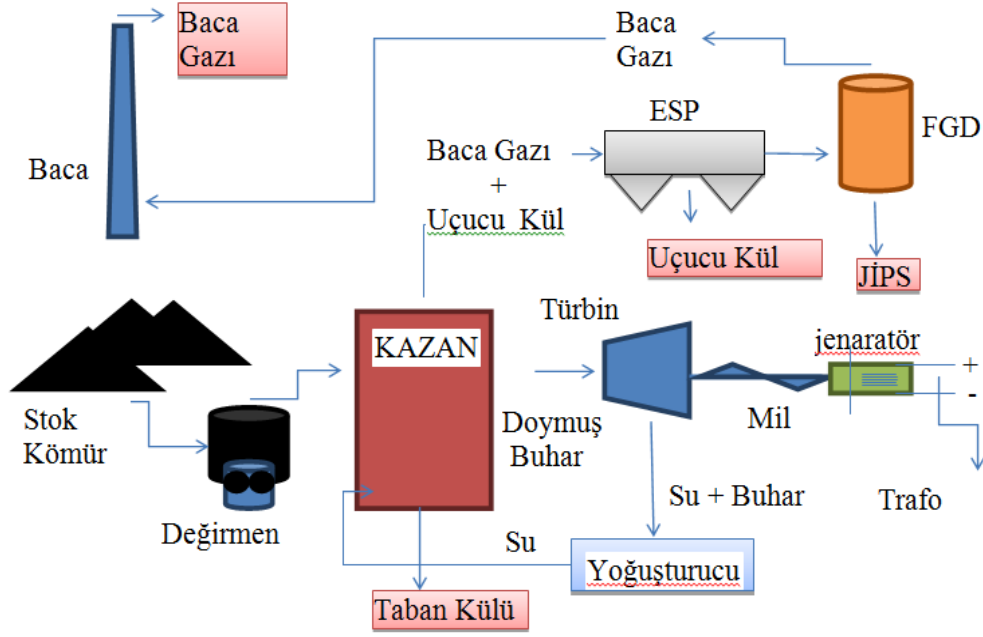
## **1.1 KONUNUN ÖNEMİ**

Termik santrallerde, her yıl milyonlarca ton katı atık meydana gelir. Bu katı atık maddelerin ekonomiye yeniden kazandırılması, hem ilave gelir hem de oluşabilecek çevresel etkilerin azaltılması açısından büyük bir öneme sahiptir. Türkiye de her yıl fosil kaynaklı yakıtların yakılmasından kaynaklanan katı atık miktarı 20 milyon ton' u bulmaktadır (Güler vd. 2005). Bu miktarın depolanması, çok geniş ölçeklerde toprak alanlarının işgaline neden olmaktadır. Kül içeriğindeki zenginleşen çözümler tuzlar ve As, Ba, Cd, Pb, Hg, Se gibi elementler, bu büyük kütlelerin farklı bir dezavantajını da beraberinde getirir. Özellikle tarım arazileri için zararlı olabilecek potansiyel zehirleyici maddelerin oluşumu sorunu ortaya çıkmaktadır. Gelişmiş ülkelerde, bu sorunun üzerine çok gidilmektedir. Çünkü enerji üretimi son derece hayati bir konudur. Fosil kaynaklı yakıtların yakılması ile elde edilen enerjinin, daha uzun yıllar cazibesini koruyacağı da oldukça belirgin olduğundan, katı atıklar ile mücadele etme sorunu önemini kaybetmeyecektir. Gelişmiş bazı ülkelerde, oluşan bu katı atıklar neredeyse % 100' e yakın oranda ekonomiye geri kazandırılmaktadır. Ülkemizde bu oran % 10' un altındadır. Ülkemizdeki çevre bilinci öncelikle toplumsal olarak gelişmeli ve bunun yansıması olan bazı öncü kuruluşlar vasıtası ile kalıcı çözümlere dönüştürülebilmelidir. Bunun için öncelikle enerji üretiminin neden önemli olduğu olgusu iyi kavranmalıdır. Mevcut enerji üretim yöntemleri çok iyi değerlendirilmeli ve oluşacak yan etkilerin azaltılması kalıcı, yenilikçi ve yaratıcı çözümler getirilerek çözülmeye çalışılmalıdır.

## BÖLÜM 2

### TERMİK SANTRALLER HAKKINDA GENEL BİLGİLER

Termik santraller, belli bir verimle ısı enerjisini dolaylı yoldan elektrik enerjisine çevirir. Ana hatları ile bir kazan, kazana yakıtın beslenmesi sistemleri, su soğutma sistemleri, türbin, jeneratör ve trafodan oluşmaktadırlar. Öncelikle kazan yaklaşık 10-15 m genişliğinde ve 35–40 m. uzunluğunda çeperleri 50-55 cm kalınlıkta çelikten yapılmış bir yakma kutusudur. Bu kutunun ya dört köşesinden ya da karşılıklı yüzeylerine konuşlandırılmış yakma tabancalarında oluşturulan alev ile yakıtın besleme sistemlerinden gelen kömür, kazan ortasında bir ateş topu oluşturacak şekilde yakılır. Öyle büyük bir radyasyon yayılır ki, kazan duvarlarına yerleştirilmiş su boruları içerisindeki su buharlaşır. Suyun iyice buharlaşması istendiği için, su karışık olarak aşağı yukarı yerleştirilmiş borular içinde kazan boyunun 4-5 katı mesafede dolaştırılır ve kazan üst kısmında bulunan buhar üreticine gönderilir. Buhar üreticinde henüz tam buharlaşma yani doymuş buhar üretimi gerçekleşmemiştir. Buhar üreticinde buhar oluşumu içerisindeki yoğunlaşma halindeki su, yoğunluğu nedeniyle üreticinin alt kısmından kazan altındaki su girişi kanallarına geri gider ve kapalı bir sistemde kazan içerisindeki çevrim devam eder. Buhar, düşük yoğunluğu nedeniyle kazan üst kısmından süper ısıtıcı sistemlere ulaşır ve burada ilave ısı ile yapısındaki su moleküllerinden tamamen kurtulur. Bu işlem öyle bir basınçta yapılır ki süper kritik sıcaklıklara kadar erişilebilir ve ortamda su kalma ihtimali sıfırdır. Su termik santrallerde, özellikle türbinlerde buhar ile birlikte temas halinde büyük problemleri de beraberinde getirmektedir. Buhar süper ısıtıcılardan yüksek basınç türbinlerine gönderilir. Burada türbinden elde edilen kinetik enerjiye destek olması için türbinden çıkan ve enerjisini bir miktar kaybeder. Tekrar ısıtıcı ünitelerden geçirilerek orta ve alçak basınç türbinlerinden geçirilir. Böylece elde edilen kinetik enerji verimi arttırılır. Çevrim sürekli devam ettirilir. Alçak basınç türbininden çıkan buhar yeniden kullanılmak için yoğunlaştırma bölümüne gönderilir (URL-1 2013). Şekil 2.1’de Termik santralin akım şeması halinde genel çalışma şekli ve Eren Enerji Termik Santralinin genel bir görünümü Şekil 2.2’ de verilmektedir.



Şekil 2.1 Bir Termik Santralin Akım Şeması Halinde Genel Çalışma Şekli.



Şekil 2.2 Eren Enerji Termik Santralinin Genel Görünümü (URL-2 2013).

## 2.1 TERMİK SANTRALLERDE YAKMA PRENSİPLERİ

Kömürün çok değişken özellikte olması nedeniyle, farklı yakma uygulamaları mevcuttur. Farklı kömür türleri için, farklı tane boyutlarında yakma işlemleri önem kazanabilmektedir. Örneğin yüksek kül içerikli bir linyit kömürünü değerlendirebilmek için onun öğütülüp yakılması çok daha verimli olacaktır. Çünkü boyut küçültme ile linyit kömürü içerisinde daha fazla yanabilen kısım serbest kalır ve yanabilir. Farklı yakıt yakma sistemlerinden dolayı çok

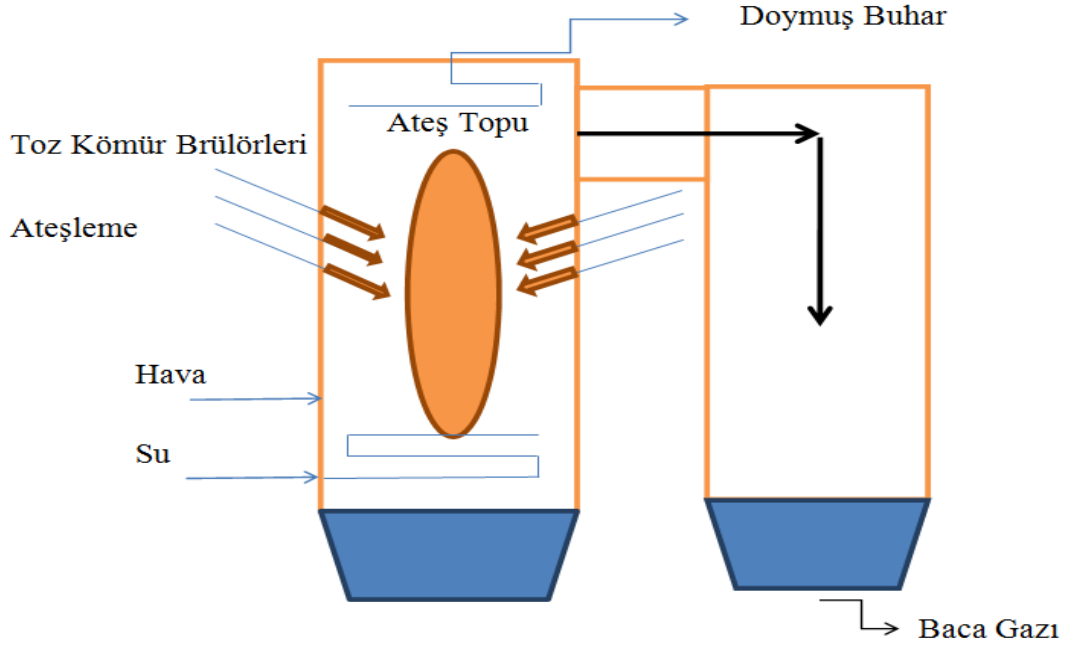
farklı termik santral tasarımları bulunmaktadır. Termik santrallerde temel olarak yakma prensipleri (URL-3 2013).

- a.) Pülverize Kömür Yakma Sistemleri,
- b.) Akışkan yatakta yakma sistemleri.

### **2.1.1 Pülverize Kömür Yakma Sistemleri**

Kömürün uygun pulverize değirmenlerinde çok ince toz haline getirilip kazan içerisine püskürtme yolu ile beslenmesinin yapıldığı sistemlerdir. Genel olarak kazan içerisine beslenen kömürün boyutu, uygun dönen silindirik valsli değirmenler ile % 70'i 200 mesh (0,075 mm.) tane boyutunun altına öğütülerek, toz kömür brülörleri ile kazan içerisine beslenecek şekilde hazırlanır. Kömür püskürtülmesi sırasında başlangıçta toz kömür brülörü ucundaki uygun püskürtme ünitesinden, LPG yakıtı ile pilot alev oluşturulur, ardından fuel oil devresi açılır. Sıcaklık kazan içerisinde 900 °C' ye ulaştığında fuel oil püskürtmesi durdurulur ve kömür yukarıda belirtilen boyutlarda kazan içerisine yaklaşık 200 m/sn hız ile püskürtülür. Sonuçta Şekil 2.3' de gösterilen kazanın orta noktasında bir ateş topu oluşturulur. Kararlı bir yanma ve kuvvetli bir alev oluşturulması için gerekli oksijen, yanma reaksiyonlarında sabit oranlar yasasına göre hesaplanan teorik miktardan fazla olmalıdır, aksi halde tam olarak yanma gerçekleştirilemez. Bunun için iki hava akımı kullanılır. Birincil hava kömürün taşınması için kullanılan havadır, ikincil hava ise gazlaşmanın başladığı noktalar üzerine gönderilen ve çok daha verimli bir yanmayı mümkün kılan ilave havadır (URL-3 2013).





Şekil 2.3 Termik Santrallerde Pulverize Kömür Yakma Sistemleri.

### 2.1.2 Akışkan Yatakta Yakma Sistemleri

Evsel atıkların yakılarak bertaraf edilmesi için geliştirilen akışkan yataklı yakma teknolojisi, zaman içerisinde gelecek için temiz enerji sloganıyla günümüze kadar büyük gelişmeler kaydetmiştir. 1970'li yılların başında geliştirilmesinden bu zamana, çeşitli endüstriyel uygulamalarda kabul görmüştür. Akışkan yataklı yakma teknolojisinin en önemli özelliği kalori değeri düşük, kül ve nem oranı yüksek olan düşük kaliteli yakıtları yakma yeteneği ve verimliliğidir. Ayrıca yakıt esnekliği, düşük emisyon, tehlikeli olmayan yan ürünlerin yeniden kullanılabilmesi ve diğer yakma teknolojilerine sahip sistemlere kolayca uygulanabilir olması diğer önemli avantajlarıdır. Zaman içerisinde akışkan yataklı yakma teknolojilerinde önemli gelişmeler kaydedilmiş ve çeşitlilik sağlanmıştır. Bu çeşitliliği akışkanlaşma koşulları ve basınç mertebelerine göre aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

Kömürün çok ince öğütülmesine gerek duyulmadan yakılabilmesi prensibine dayanan bir yakma sistemidir. Özellikle termik santrallerde sabit bir yüzey üzerindeki püskürtme deliklerinden hava gönderilerek yüzey üzerindeki akışkan yatak maddelerinin (Kireçtaşı, kum vb. taşıyıcı, hava gibi yakıcı ve kırılmış kömür gibi yanıcı maddelerin) birlikte havada asılı kalması sağlanır. Bu sistemlerde yakılacak kömürün kazana besleme boyutu (-25+6) mm'dir.

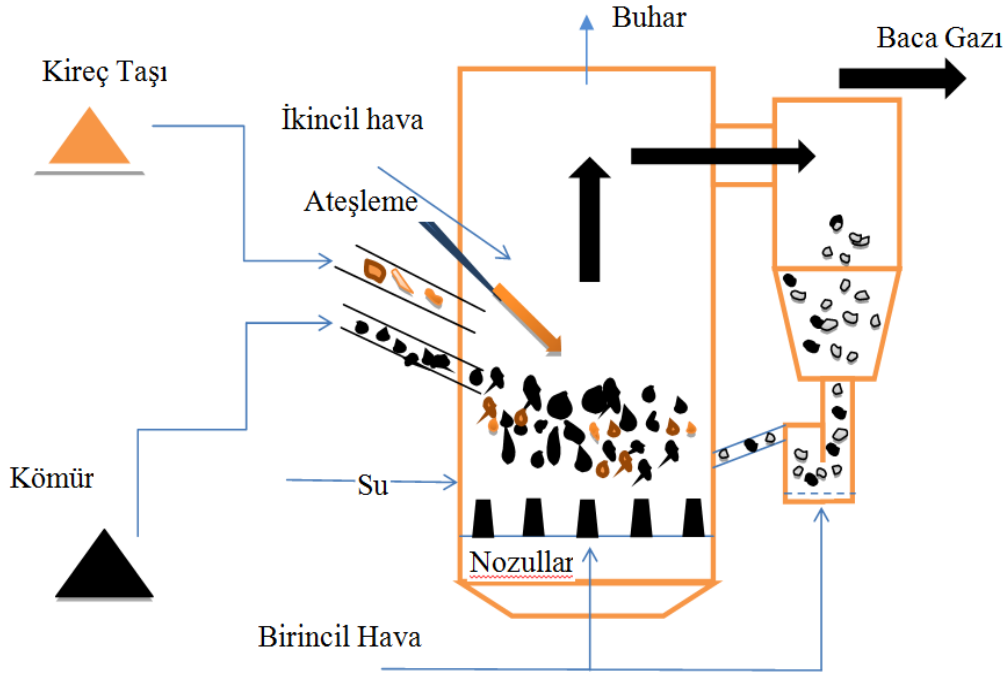
Kazana hava akımı yardımı ile toz kömür üflenip alttan üflenen hava ile de yatak hareketli tutulmak suretiyle kömürün diğer sistemlere nazaran daha iyi yanması sağlanır. Küller de diğer taraftan, hava akımı ile dışarı atılır. Kükürdü yüksek toz kömürler yakıldığı zaman, çevre sorunları bakımından, yanma sonucu çıkan SO<sub>2</sub>'yi zararsız hale getirmek için kazana kömürle birlikte kalker tozu da verilir

Uygulanan hava akımının hızı arttırıldıkça parçacıklara uygulanan kaldırma kuvveti de arttırılmış olur. Hava akımının arttırılmasına, parçacıklara uygulanan kaldırma kuvveti ile yerçekimi arasında denge oluncaya kadar devam edilir. Denge durumunda ise yukarı doğru akış halindeki havanın içerisinde parçacıklar asılı kalırlar ve akışkan özelliklerini sergilemeye başlarlar. Bu duruma minimum akışkanlaşma koşulu, bu aşamadaki havanın hızına ise minimum akışkanlaşma hızı denir (URL-4 2013).

Minimum akışkanlaşma fazından sonra, hava akımının hızı arttırılmasına devam edilirse, yatak içindeki parçacıkların, sıvıların kaynamasına benzer bir formda olduğu ve hareket ederek yatağı terk ettiği görülür. Hareket halindeki parçacık-hava karışımı hacmi, sabit yatak hacmine göre hızla artar. Ancak bu artışa rağmen sabit yatak yüzeyi rahatlıkla gözlenebilir. Eğer uygulanan havanın hızı biraz daha arttırılırsa, kabarcıkların büyüdüğü ve birleşerek büyük boşluklar oluşturduğu gözlenir. Bu duruma türbülanslı akışkan yatak denir. Türbülanslı akışkan yatak şartlarında, parçacıklar yüksek katı derişimi ne sahip ve birbirine bağlı gruplar halinde döngüde dolaşmaya başlarlar ki bu duruma dolaşımli akışkan yatak adı verilir.

Kırma işlemine tabi tutulduktan sonra istenilen parçacık boyutuna getirilmiş olan yakıt ve kireçtaşı parçacıkları, kazanın yakıcı kısmına gönderilir. Bu parçacıklar, yatağın alt bölümündeki dağıtıcı plakadan yanma odasına doğru yukarı yönde akmakta olan hava akımı içerisinde asılı kalırlar. Minimum akışkanlaşma koşulunun sağlanmasından sonra hava akımının hızı arttırılarak yatak içerisinde kabarcıklar meydana getirilir. Kabarcıkların yatakta dolaşımının sağlanmasıyla, katı yakıt parçacıklarının maksimum şekilde karışımı sağlanır. Yanma sonrasında meydana gelen küller hava akımıyla sürüklenir. İri tanecikli olanlar siklon bölümünde tutulur ve gerektiğinde yatağa geri gönderilerek yeniden yakma prosesine gönderilir. İnce tanecikli küller ise kazandan sonraki elektrostatik ya da bez filtrelerde tutulur. Siklonda tutulan ve yatağa geri gönderilen küllerin yeniden yanma prosesine girmesi, yanma ve kükürt tutma verimlilik oranlarını arttırır. Kazan boruları, baca gazlarından en fazla istifade edilecek şekilde yerleştirilmiştir (URL-4 2013).

Yakıtın tanecik boyutu daha küçük, uygulanan hava akımının hızı ise çok daha yüksektir. Bu sebeplerden dolayı, parçacıklar hava akımıyla rahatlıkla sürüklenerek yatak ve derişimin düşük olduğu bölgeler ayrı olmaksızın yanma işleminin bütün kazan boyunca sürdürülmesi sağlanır. Sisteme yanma havası iki aşamada uygulanır. İlk yanma havası sisteme, yatağın altından yukarıya doğru uygulanır ki bu noktada uygulanan hava miktarı, toplam hava miktarının 60-75%' i kadardır. 35-40% oranındaki hava miktarı ise sisteme ilk noktaya göre daha yukarıdaki bir seviyeden uygulanır. Şekil 2.4' de sistemdeki yanma ısısı 800-900 °C arasında bir değerdir. İnce tanecikler yanma havasıyla birlikte yanma odası çıkışına yerleştirilen siklon kısmında tutulur ve sonrasında yanma odasına geri gönderilerek dolaşım sağlanır (URL-4 2013).



Şekil 2.4 Dolaşimli Akışkan Yatakta Yakma Genel Çalışma Şekli.

## BÖLÜM 3

### TERMİK SANTRALLERDE OLUŞAN ENDÜSTRİYEL ÜRÜNLER

Termik santrallerde, maddenin bütün temel hallerinden (katı, sıvı ve gaz ) atık malzemeler oluşmaktadır. Kendi içlerinde mevcut teknolojik şartlara göre değerlendirilebilecek veya değerlendirilemeyecek olmalarına göre de sınıflandırılabilirler. Belirtilmiş olan termik santral atıkları gelişen teknoloji ile birlikte, sanayinin yan ürünleri olabilecekleri kullanım alanları bulmaktadırlar. Çalışmamızın bu bölümünde teknik koşullarda kullanım alanı bulabilen termik santral oluşumları değerlendirilmiştir.

Termik santrallerde oluşan ve mevcut teknolojik şartlara göre kullanım alanı bulabilen başlıca atık maddeler şunlardır;

- a.) Küller,
- b.) Baca gazı kükürtsüzleştirme ürünleri (desülfojips).

#### 3.1 KÜL VE TANIMI

En kolay tanımı ile kül, kömür yandığında kalan atık bakiyedir. Kömür içerisinde yanma sonucu külü meydana getiren oluşumlar safsızlık olarak değerlendirilir ve miktarı arttıkça kömürün ısı değeri ve kalitesi düşer (URL-5 2013).

Oluşacak külün oluşumunda, kömürün türü de çok önemli bir rol oynamaktadır. Çünkü kömürün türüne göre farklı miktarlarda kül oluşur. Örneğin linyit kömürleri genç kömürler oldukları için kömürün bünyesindeki yanabilen hidrokarbon oluşumlar daha az miktardadır ve daha çok yanmayan kısım (kül) meydana gelir. Bu tür genç kömürler, daha fazla dış kaynaklı (sedimanter ve tektonik nedenlerden dolayı) olduklarından yapılarındaki inorganik maddeler, yaşlı kömürlere göre daha fazla miktardadır. Bu da küllerin sınıflandırılmasında önemli parametrelerden biridir. Termik santrallerde oluşan kül oluşumları;

- a.) Taban Külü,
- b.) Uçucu Küllerdir.

### **3.1.1 Taban Külleri Tanımı ve Özellikleri**

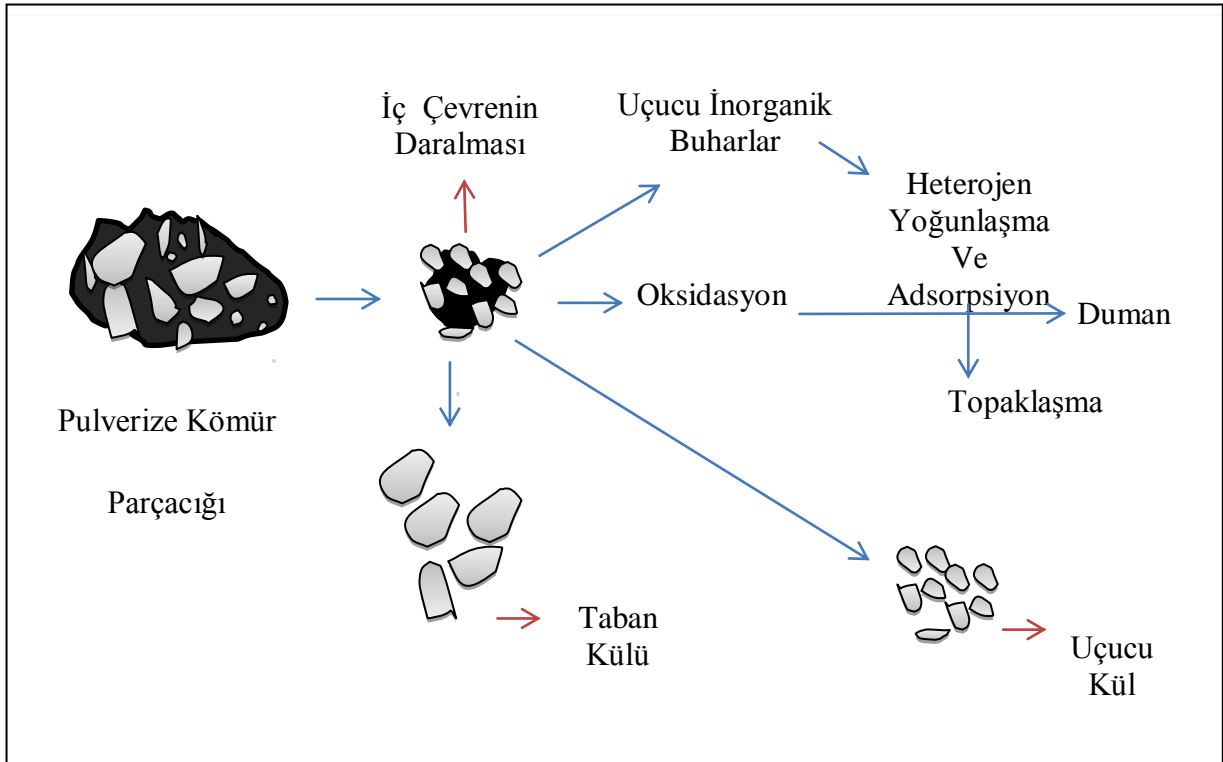
Kömür, heterojen ve yanıcı bir kayadır. Bu yüzden farklı kömür yataklarından hatta aynı damardan elde edilen kömürlerin bile kimyasal özelliklerinde farklılıklar görülür (Güler vd 2005). Bu nedenle fiziksel veya kimyasal işlemler karşısında, kömürün farklı kısımları farklı tepkiler gösterir. Kömürün yanmayan, kimyasal olarak daha kuvvetli bağlanmış kısımlarının ergime noktaları, molekül ve özgül ağırlıkları daha yüksektir. Bu kısımlar, yanma esnasında sistemdeki ısı enerjisine, bu özellikleri daha düşük olan kısımlara göre daha fazla direnç gösterirler. Bunlar yanma sırasında sistemdeki ısı enerjisine, yerçekiminden etkilenme eğilimleri ve ergime noktaları daha büyük olduğu için kazanı çok ince toz halinde katı veya gaz fazında terk edemezler. Topaklaşmış iri parçalar halinde kömürün iri taneli atık bakiyesi olarak kalır ve kazanın altında toplanırlar. Su yardımı ile ıslatılıp belirli bir akışkanlık ve taşıma kolaylığı ile kazan tabanından bantlar vasıtası ile uzaklaştırılırlar. Taban külleri toplam kömürün yanmayan kısmının yaklaşık % 15-20'lik kısmını oluşturur. Tane boyutları genel olarak (-15+1 mm.) arasındadır (Güler vd 2005).

### **3.1.2 Uçucu Küllerin Tanımı ve Özellikleri**

Uçucu kül, termik santrallerde pulverize kömürün yanması sonucu meydana gelen baca gazları ile taşınarak siklon veya elektro filtrelerde toplanan önemli bir yan üründür. Kömürün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucu meydana gelen nispeten hafif atık bakiye, soğuyarak, gaz akışı ile kısmen veya tamamen küresel şekilli kül taneciklerine dönüşmektedir. Bu kül tanecikleri çok ince (0,5-200 µm.) olup, baca gazları ile sürüklenmeleri nedeniyle, uçucu kül olarak adlandırılmaktadırlar.

Taban külü oluşumlarına göre daha az yoğun ve düşük ergime noktasına sahip olan bu hafif atık bakiye, taban külüne nispeten çok daha ince boyuta sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı kazan içerisindeki yoğun hareketten çok etkilenir ve taban külüne oranla daha fazla yol alır. Bu nedenle kazanı ve tüm güç ünitesini terk etme eğilimindedir. Ancak santrali terk etmesi ciddi çevre sorunlarını da beraberinde getirir. Bu yüzden bazı toz tutucu sistemler ile tutulması gerekmektedir. Bunun için en uygun yöntem elektrostatik toz tutucu sistemlerdir

(ESP). Bu sistemlerde baca gazı ile katı, sıvı (eriyik) ve gaz fazlar arasında kararsız oluşumlar halinde ilerleyen uçucu kül taneleri, kazan çıkışında çok yüksek bir ısı düşüşüne maruz kalırlar. Bu durumda aniden katı faza geçerler, ciddi miktarda bir morfolojik değişime uğrarlar, kristal yapıları düzensizleşir ve amorf bir hal alırlar. Bu durum özellikle bahsedilecek puzolanik özellik için çok önemlidir. Yakma işlemlerinin şekline göre 1100-1600 °C sıcaklıkta yakılan kömürlerden oluşan kül miktarının % 75–80’i uçucu kül oluşumu halinde toz tutucu sistemlerde tutulur (Güler vd 2005). Şekil 3.1’ de uçucu külün oluşumu akım şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Uçucu Küllerin Oluşumu (Yiğit vd. 2000).

### 3.1.2.1 Uçucu Küllerin Sınıflandırılması

Uçucu küller, genel olarak kimyasal kompozisyonlarına göre sınıflandırılmaktadır. Buna göre değişik sınıflandırma şekilleri bulunmaktadır. Uçucu külün puzolanik özelliğini doğrudan ilgilendiren analitik CaO miktarına bağlı sınıflandırma şekli bunlardan biridir (Aruntaş 2006). Kimyasal ve mineralojik yapılarına göre beraber sınıflandırma da en yaygın kullanılan sınıflandırma şekillerinden biridir. Son yıllarda kullanılan sınıflandırma şekilleri ise sırasıyla ASTM C 618 ve ülkemizde TS EN 197-1’e göre yapılan sınıflandırmalardır.

### **Genel sınıflandırmaya göre uçucu küller;**

- a.) CaO miktarı % 10'dan az olanlar düşük kireçli veya kalsiyumlu uçucu kül,
- b.) CaO miktarı % 10'dan fazla olanlar ise yüksek kireçli veya kalsiyumlu uçucu kül olarak sınıflandırılır.

### **Kimyasal ve mineralojik yapılarına göre uçucu küller;**

SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarının belirli bir % değerinde uçucu külün yapısında bulunması prensibine göre yapılan genel bir sınıflandırmadır.

- a.) Esas olarak siliko aluminatlardan meydana gelen SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (S+A+F) miktarının toplamının tüm oluşum içerisinde % 70 oranını geçtiği ve köken olarak taş kömürünün (bitümlü kömür) yakılması sonucu oluşan siliko aluminöz uçucu küller,
- b.) Genellikle birinci maddede belirtilen SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (S+A+F) miktarının % 70 ile % 50 arasında değiştiği ve nispeten yüksek silika ve kireç miktarına sahip olan linyit kökenli silika-kalsik grubu uçucu küller,
- c.) % 50 ile % 70 oranlarında (S+A+F) içerikli fakat farklı olarak SO<sub>3</sub> ve kireç miktarlarının nispeten fazla olduğu genellikle linyit kömürlerinin yakılması sonucu oluşan sülfö-kalsik grubu uçucu küller (Aruntaş 2006).

### **ASTM C 618' e göre sınıflandırma uçucu küllerin sınıflandırılması aşağıdaki şekilde yapılmaktadır;**

SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarına da bağlı olmakla beraber uçucu külün yapısındaki CaO miktarını da esas alan bir Amerikan standardıdır.

- a.) Taş kömüründen elde edilen S+A+F toplam içeriğinin % 70'in üzerinde ve CaO oranı % 10'un altında olan F sınıfı uçucu küller. CaO oranı % 10'un altında olduğu için düşük kireçli küller grubuna girerler ve puzolanik özelliğe sahiptirler.

b.) Genellikle yarı bitümlü kömürlerin ya da linyit kömürlerinin yakılması sonucu oluşan % 50 ile % 70 arasında S+A+F içerikli C sınıfı uçucu küller. Bu grup uçucu küllerde CaO oranı % 10'un üzerinde olduğu için bu küller genel sınıflandırmada yüksek kireçli uçucu küller grubuna girerler ve yüksek kireç içeriğinden dolayı puzolanik özelliğın yanı sıra bağlayıcı özelliğe de sahiptirler (Aruntaş 2006).

### **TS EN 197-1' e göre sınıflandırma ise;**

a.) V sınıfı (silissi) uçucu küller, çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerden meydana gelir. İnce bir toz halinde, esas olarak reaktif silisyum dioksit ( $\text{SiO}_2$ ) ve alüminyum oksitten ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) oluşur. Geri kalan kısmı demir oksit ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç oranının % 10'dan az, reaktif silis miktarının % 25' den fazla olması gerekmektedir.

b.) W sınıfı (kalkersi) uçucu küller, puzolanik ve bağlayıcı özelliği olan, esas olarak reaktif kireç ( $\text{CaO}$ ), ( $\text{SiO}_2$ ) ve ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )' den oluşan geri kalanı demir oksit ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif CaO miktarı %' de 10' dan fazla, reaktif silis miktarı ise %' de 25' den fazla olmalıdır (Aruntaş 2006).

### **3.1.2.2 Uçucu Küllerin Mineralojik Yapısı**

Kömürün yanması sonucu yapısındaki mineraller ısı faz dönüşümleri sonucu, camsı, boşluklu veya dolu küresel tanecikler, süngerimsi parçacıklar şeklinde oluşurlar. Kısmen kazan sıcaklığının üzerinde ergime derecelerine sahip kısımlar bir dönüşüme uğramaz. Bu kısımlar, demir oksit ve feldspat oluşumları şeklinde uçucu kül yapılarında bulunurlar (Yiğit vd. 2000).

Uçucu küllerin içerisindeki bu oluşumlar:

- a.) İçi boşluklu camsı kürecikler (Senosfer)
- b.) İç içe geçmiş camsı kürecikler (Plerosfer)
- c.) Yanma sonucu yapısal bozunmaya uğramış kaba kürecikler
- d.) Yanma sonucu fazla bir değişime uğramamış kristalize yapısını büyük ölçüde korumuş oluşumlar.
- e.) Diğer Mineraller (bazı As, Cd, Ga, Ge, Pb, Sb, Se, Sn, Mo, Ti ve Zn gibi iz elementler ve ağır metaller).

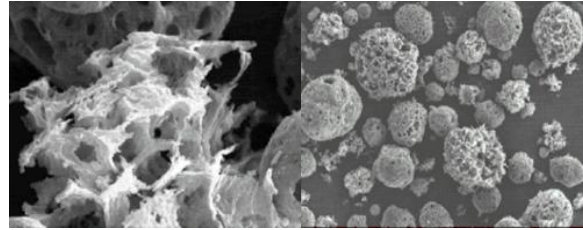


Uçucu kül içerisindeki silisin bir kısmı kuvars kristalleri olarak (feldspat), diğer bir kısmı ise alüminyuma bağlı olarak mullit halinde bulunur, geri kalanı ise camsal yapıdadır. Demir; manyetit ve hematit şeklinde kristal yapısını koruyarak uçucu kül içerisinde bulunur (Yiğit vd. 2000).

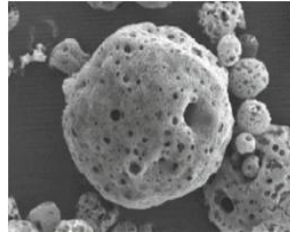
Çizelge 3.1 Uçucu Külün Genel Olarak Mineralojik Bileşimi.

% Bileşim	Genel Mineralojik Bileşim
65-90	Camsal faz olarak, amorf oluşumlar halinde bulunmaktadır.
35-10	Düzenli Kristal oluşumlar halinde ( $Fe_2O_3$ , $Fe_3O_4$ , $SiO_2$ (Feldspat), $2SiO_2$ , $3Al_2O_3$ (Mullit).

Uçucu kül'ün mineralojik yapısı genel olarak Çizelge 3.2' de belirtildiği gibi % 65–90'ı düzensiz kristal yapı (camsı-Amorf), geri kalan % 35–10 oranında ise düzenli kristal yapılar halindedir. Kristalize olmuş içi boş küresel tanelere senosfer, daha küçük boyutlu, ince duvarlı ve içi daha küçük partiküller ile dolu, iç içe geçmiş parçacıklara plerosferler denir. Bu taneler uçucu külün genel morfolojik yapısının % 97'sini oluşturur.



a)Ufalanmış ve Küresel tanecikler



b)Gözenekli Tanecikler

Şekil 3.2 Uçucu Küllerin Mikroskobik Görüntüleri (Volkan 2006).

### 3.1.2.3 Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri

Uçucu küllerin fiziksel özellikleri genel olarak dış görünüş özellikleri (tane boyutu, renk, şekil), ve yoğunluk olmak üzere iki ana grupta toplanabilir. Uçucu küllerde tane boyutu, termik santrallerdeki toz tutma sistemine bağlı olarak değişir. Uçucu kül boyutuna en çok etki eden parametrelerden biri; uçucu külün baca gazından çıkmasının engellenmesidir. Bu geciktirme ne kadar artarsa uçucu kül boyutu azalır (Güler vd. 2005). Toz tutma sisteminin şekli de uçucu kül boyutuna etki eder. Torba tipi toz tutucularda tane boyutu daha iri fakat daha fazla birbirine yakın boyuttadır. ESP sistemlerinde uçucu külü bacadan dışarı atma süresi daha fazla dolayısı ile çok daha fazla tane inceliği yakalanması söz konusudur. Ancak tane boyut dağılımı daha geniş aralıkta olmaktadır.

Uçucu küllerin oluştuğu fiziksel ortamlar, uçucu külün fiziksel özelliğini büyük ölçüde etkiler. Örneğin çok ani sıcaklık düşmesi, kazanın yanması ve baca gazının kazan içerisinden çok hızlı tahliyesi gibi durumlarda, bu uçucu kül tanecikleri üzerinde büyük baskı ve yüzey gerilmeleri oluşmaktadır. Buna bağlı olarak uçucu küllerin farklı şekil oluşumları meydana gelmektedir. Bu baskılar ve mineralojik yapı faktörleri sonucu, atık bakiye olan bu kısımlar, heterojen yapılarının da etkileri ile farklı şekil yapılarına sahip olurlar. Camsı özelliği baskın olan kısımlar, baskı ve yüzey gerilmelerinin etkisi ile küresel bir şekil alma eğilimi gösterirler. Çok yüksek ergime dereceli kısımlar ise, daha çok düzensiz kristaller şeklinde bulunma eğilimi gösterirler.

Yüksek kireçli uçucu küllerin mikro yapıları içerisinde, yüksek CaO içeriği ve buna karşılık daha az camsı faz içeriği vardır. Buna bağlı olarak, hem küresel hem de düzensiz şekilli taneciklerin bir arada bulunması sonucu homojen olmayan bir şekil dağılımı ve iri tane boyutlu olma özelliğine sahiptir.

Düşük kireçli uçucu küllerde ise camsı fazın yüksek olması nedeniyle küresel oluşumlar daha fazladır. Çünkü ortamdaki şartlara gösterebileceği minimum direnci gösterir. Aynı hacim için en düşük yüzey alanını gösterme eğiliminde olacağı küresel şekiller alırlar.

Uçucu küllerin yoğunluğu inceliğe ve mineralojik bileşime göre değişir. Uçucu küllerin içinde hiç boşluk kalmayacak şekilde öğütülmesi sonucu belirlenen mutlak yoğunluğu  $2,6-2,8 \text{ gr/cm}^3$  arasında değişirken, orijinal boyutta belirlenen yoğunluğu  $1,9-2,4 \text{ gr/cm}^3$  arasında değişir.

Uçucu küllerin boyutları 0,5–200 mikron arasında değişir. Özgül yüzeyleri 1800- 5000 cm<sup>2</sup>/gr arasında değişmekle birlikte, ortalama 2800 – 3800 cm<sup>2</sup>/gr dolayındadır. Ağırlığının yaklaşık % 5'i, hacminin % 20'si içi boş parçacıklardan oluşur ve bu boşluklar N<sub>2</sub> veya CO<sub>2</sub> ile doludur.

Genel olarak kömür özelliğine ve yanma koşullarına bağlı olarak gri renkte bulunurlar, kömür gençleştikçe veya yeterli yanmanın oluşmaması durumunda bu renk daha da koyulaşabilir (Güler vd. 2005).

### 3.1.2.4 Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri

Uçucu küllerin kimyasal bileşimleri, yakılan kömürün türüne ve yakma şekline bağlı olarak çok büyük bir çeşitlilik gösterir. Ancak, bütün uçucu kül oluşumları, ağırlıklı olarak hem kristal hem de amorf yapılar halinde SiO<sub>2</sub> ve CaO içerir. Özellikle endüstrinin istediği bazı özellikleri gösterebilmesi için kimyasal bileşimler yönünden bazı oranlara sahip olmalıdırlar. Özellikle puzolanik özellik için reaktif yani amorf silisi miktarı % 25 den aşağıda olmamalıdır.

Uçucu külde bulunan başlıca bileşenler, silika (SiO<sub>2</sub>), alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), demir oksit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ve kireç (CaO)'dir. Bu ana bileşenlerin miktarı, uçucu külün türüne göre değişmektedir (Güler vd 2005). Uçucu kül içerisinde bulunan yanmamış karbon miktarı kömür türüne ve yakma işlemine göre değişmektedir, Ayrıca MgO ve SO<sub>3</sub> gibi alkali oksitlerde minör bileşen olarak uçucu kül bünyesinde bulunmaktadır. Uçucu küldeki bu ana bileşimlerin yüzde değişimleri şu şekildedir; SiO<sub>2</sub> : %25- 60, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : % 10-30, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : % 1-15 ve CaO : % 1- 40. Bu farklı değerler uçucu külün türünü belirler. Bununla beraber uçucu külün kimyasal yapısı, kömürün farklı yerlerden elde edilmesinden dolayı farklılıklar göstermektedir. Ama uçucu küller genel olarak silis ve alümina temel bileşiklerinden oluşur (Güler vd. 2005).

Temel kimyasal yapıları alümina silikatlardan oluşan uçucu küller, bu yapılarla birlikte Fe, Mg, Na, K, Ca, Ti ve nadir toprak elementlerinden oluşur. Ergime noktaları çok yüksek olmadıkları için sıcaklık ve basınç etkisi ile uçucu kül yapısına kimyasal olarak nüfuz edebilirler. Uçucu olan veya uçucu oksitleri oluşturan As, Cd, Ga, Mo, Pb, Se, Zn gibi elementler ise uçucu külün kimyasal yapısına giremezler. Bu elementler, miktarları uçucu külün tane boyutu ile ters orantılı olacak şekilde uçucu kül yüzeyinde toplanırlar (Güler vd. 2005).

### 3.1.2.5 Uçucu Küllerin Puzolanik Özellikleri

“Puzolanik özellik”, kendi başına çok az ya da hiç bağlayıcılık özelliği göstermeyen malzemelerin, çok ince toz haline getirildiklerinde, uygun sıcaklık ve nem koşullarında bağlayıcılık özelliği kazanabilmesidir. Bu özelliğe sahip olan malzemelere de “puzolan” adı verilir. Bu özelliği gösterebilmesi girdiği ortam içerisindeki  $\text{Ca(OH)}_2$  ile reaksiyona girip ikincil C-S-H (Kalsiyum-Silikat-Hidrate) veya C-A-H (Kalsiyum-Alümina-Hidrate) bileşikler meydana getirebilmesi yeteneğine bağlıdır. Uçucu külün puzolanik özelliği ile diğer bölümlerde anlatılan özellikleri arasında yakından bir ilgi mevcuttur. Bu konuya, bu ve daha ileriki çalışmalarda ihtiyaç duyulabilecek çok çeşitli varsayımlar için değinmekte yarar bulunmaktadır. Özellikle uçucu külün düzgün olmayan kristolografik yapısı, beton oluşumu esnasında fazladan oluşan sönmemiş kireç ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ile reaksiyona girip ikincil bağlayıcı bileşikler oluşturmasında son derece önemlidir. Düzgün bir kristal yapıya sahip olsaydı kireç ile reaksiyona giremezdi. Bu da yapısındaki amorf yani düzensiz kristalli yapısına bağlı bir olgudur. Bir başka deyişle uçucu külün yapısındaki camsı fazın yüksek miktarda olması puzolanik özellik için çok önemlidir. Uçucu külün oluşumu bahsinde de belirtildiği gibi termik santralin kazanını terk eden baca gazı içerisindeki bu oluşumlar çok yüksek bir ısı kaybına maruz kalmaktadırlar. Bu da onlara, düzensiz kristal oluşumunu veya camsı özelliği vermektedir. Puzolanik reaksiyon, uçucu külün yüzeyinde başlar İncelik artarsa puzolanik özellikte artar. Uçucu külün puzolanik aktivitesi, çimento yerine % 25 oranında ikame edilerek hazırlanan beton kalıplarının tek eksenli basınç dayanımlarının, sadece referans çimentosu kullanılarak hazırlanan kontrol numunelerinin tek eksenli basınç dayanımlarına oranı olarak tarif edilebilir. Bu oranın TS EN 197-1’ e göre minimum % 70 olması gerekmektedir (Balkema 1992).

### 3.2 BACA GAZI KÜKÜRTSÜZLEŞTİRME ÜRÜNÜ (DESÜLFOJİPS)

Kömürün yanması sırasında oluşan ürünlerden, en düşük ergime noktası ve özgül ağırlığına sahip olan ve kazanı gaz formunda terk eden baca gazı, çevre için tehlikeli olabilecek miktarda  $\text{SO}_2$  içermektedir. Kazanın bu gaz oluşumu halindeki atıl ürünü, çeşitli kükürt den arındırma işlemlerine tabi tutulur. Bu arındırma işlemlerinde eğer kireç taşı kullanılmışsa kalsiyum ve kükürtçe zengin  $\text{CaSO}_3$  vb. Ca-S bileşiklerinden oluşan atık maddeler oluşur. Bu atık maddeleri yan ürünlere dönüştürmek, uygulanan kükürtsüzleştirme işlemlerinin maliyetini hafifletmek için önemlidir. Bu dönüştürme yan ürünleri, pazarlanabilir yapay jips

ürünleridir (desülfojips). Arı olmayan bu jips ürünü, alçı üretiminde kullanılabilir (Yiğit vd. 2000).

### **3.2.1 Baca Gazı Kükürtsüzleştirme İşlemleri (FGD)**

Baca gazı kükürtsüzleştirme işlemleri, atık baca gazı içerisindeki ve diğer SO<sub>2</sub> oluşumu meydana getiren sistemlerdeki SO<sub>2</sub>'yi tutmak için geliştirilmiş teknolojileri içerir. En çok kullanılan yöntem temizleme (Wet Scrubbing) yöntemidir: Atıl gaz'ı temizlemek için kireçtaşı, kireç veya deniz suyu vb. alkali temizleyici malzemelerin kullanıldığı yöntemlerdir. Termik santrallerde kullanılan gaz kükürtsüzleştirme işlemlerinde (FGD), gaz içeriğindeki SO<sub>2</sub>'nin % 95'i tutulabilir.

#### **3.2.1.1 Termik Santrallerdeki Baca Gazı Kükürtsüzleştirme**

Termik santrallerdeki gaz kükürtsüzleştirme (desülfürizasyon) işlemleri, temelde iki önemli adımda incelenebilir.

- a.) Uçucu kül tutulması: Toz tutma sistemleri,
- b.) Kükürt dioksit tutulması: SO<sub>2</sub> Tutma Sistemleri-(Absorber).

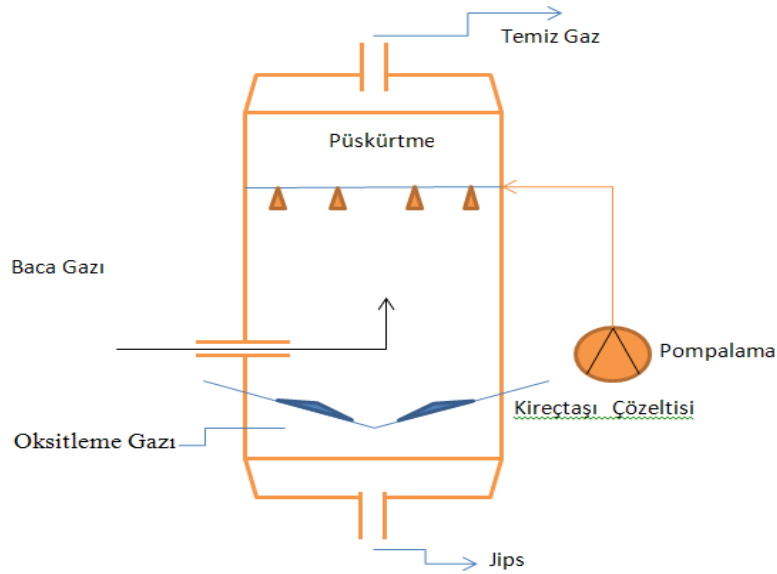
Geleneksel yöntemde termik santral kazanını terk eden baca gazı içerisindeki hem katı taneleri (uçucu kül) hem de kükürt dioksit oluşumlarını aynı anda, aynı tekne içerisinde sıyırma işlemlerini yapan (a ve b adımlarını birlikte yapan) geleneksel yöntem. Yaş sıyırma yöntemlerinde ise önce baca gazı uçucu kül tutma sistemlerine yani elektrostatik toz tutucu veya yaş toz tutma sistemlerine tabi tutulur. Daha sonra uçucu külden büyük ölçüde arınmış gaz, kükürt dioksit sıyırma işlemlerine gönderilir. Kuru püskürtme yöntemlerinde ise oluşan gaz önce kükürt dioksit ayırma işlemlerine, oradan da toz tutma ünitelerine gönderilir (URL-8 2010).

## Sıyırma İşlemleri Temel Prensipleri;

Gaz içeriğindeki kükürtdioksit (SO<sub>2</sub>) asidik özellik gösteren bir oluşumdur. Bu yüzden belirli sıyırıcı çözelti veya malzeme oluşumları ile gazdan sıyırılmaları mümkündür. Bu ürünler kimyasal etkileşimin doğası gereği bazik karakterli malzemelerdir. Şekil 3.3' de sıyırma işlemi genel çalışma şekli gösterilmektedir.

En fazla uygulanan yöntem olan yaş sıyırma yönteminde kireç taşı (CaCO<sub>3</sub>), Ca(OH)<sub>2</sub>, Mg(OH)<sub>2</sub> çözeltisi kullanılır ve CaSO<sub>3</sub>, MgSO<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O oluşur. Sıyırma işlemlerinde oluşan reaksiyonlar aşağıdaki gibidir (URL-8 2010).

- a.)  $\text{CaCO}_3 \text{ (kireç Taşı)} + \text{SO}_2 \text{ (gaz)} \longrightarrow \text{CaSO}_3 \text{ (katı)} + \text{CO}_2 \text{ (gaz)}$   
b.)  $\text{Ca(OH)}_2 \text{ (suda)} + \text{SO}_2 \text{ (gaz)} \longrightarrow \text{CaSO}_3 \text{ (katı)} + \text{H}_2\text{O} \text{ (sıvı)}$   
c.)  $\text{Mg(OH)}_2 \text{ (suda)} + \text{SO}_2 \text{ (gaz)} \longrightarrow \text{Mg(OH)}_2 \text{ (katı)} + \text{H}_2\text{O} \text{ (sıvı)}$



Şekil 3.3 Baca Gazı Sıyırma İşlemi.



## **BÖLÜM 4**

### **TERMİK SANTRAL YAN ÜRÜNLERİNİN KULLANIM ALANLARI**

Termik santrallerde, ekonomik olarak değerlendirilebilecek atık ürünler çok çeşitli sanayi dallarında kullanım alanı bulabilmektedirler. Bu tür atık malzemeler, sanayinin bazı gereksinimlerini karşıladıkları için atık maddelerden çok yan ürün olarak isimlendirilebilirler.

#### **4.1 TABAN KÜLÜ KULLANIM ALANLARI**

Taban külleri, briket, hazır sıva ve blok tuğla üretiminde ham madde olarak kullanılır. Ayrıca çimento üretiminde de puzolan amaçlı katkı maddesi olarak kullanılırlar. Taban külü yapısı ve fiziksel özellikleri itibari ile iyi bir izolasyon görevi yapar. Bu amaçla taban külü katkılı briket ve blok tuğlalar, izolasyon faktörü avantajı nedeni ile inşaat sektöründe tercih nedenidir (URL-5 2013).

#### **4.2 UÇUCU KÜLLERİN KULLANIM ALANLARI**

Uçucu küllerin puzolanik özellikleri, çok ince taneli yapı ve dolayısı ile yüksek özgül yüzey alanına sahip olması, düşük ısı iletkenlik katsayıları, yüksek elektrik yalıtkanlığı gibi çok etkili mühendislik özelliklerinden dolayı değerli bir endüstriyel girdidir. Başlıca kullanım alanları dolgu malzemesi, kauçuk, boya, refrakter, inşaat sektörleridir (Yiğit vd. 2000).

##### **4.2.1 Uçucu Küllerin Beton Üretiminde Kullanımı**

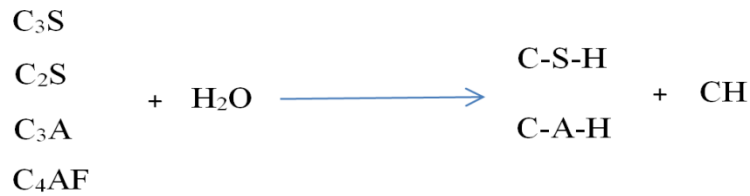
Uçucu küller puzolanik özellik göstermek için son derece uygun düzensiz kristal yapıları, çok ince tane yapıları, yüksek özgül yüzey alanına sahip olmaları, düşük miktarda karbon içermeleri vb. üstün mühendislik nitelikleri ile çimento bünyesine ilave edilerek, üretilecek betonun dayanım özelliklerine etki etmektedirler. Bu etki özellikle betonun 15 – 20 günlük su altında bekletilme sürelerinin ardından gözlenebilmektedir (URL- 8 2010).



Uçucu kül, doğrudan çimento üretiminde klinkere katılarak uçucu küllü çimento üretiminde kullanılabilir gibi, beton yapımında, çimento yerine de ikame edilerek kullanılabilir. Uçucu külleri çimento yerine belirli oranlara kadar ikame ederek kullanmak daha avantajlıdır. Çünkü daha büyük özgül yüzey alanına ve inceliğe sahip olduklarından, ilave bağlayıcı üreteceği için bağlayıcı hacminin artmasına ve çimentonun daha az kullanılarak çimentodan ekonomi yapılmasını sağlarlar. Birim ağırlıkları düşük olduğu için betonun birim ağırlığının da azalmasına neden olurlar. Hidratasyon ısını düşürdükleri için beton içerisinde ısı büzüşme ve çatlama çok azalır. Uçucu küller küresel bir yapıya sahip olduklarından su gereksinimini azaltırlar ve daha düşük su/çimento oranında istenilen işlenebilirlik sağlanabilir. Küresel ve birbirine yakın boyutta taneler olması, içsel sürtünmelerin azalmasını ve daha fazla kendiliğinden akışkanlığın oluşmasını sağlar. Bu da suya olan ihtiyacı azaltır. Sulu ortamlarda fazlalık olan kireci bağladıkları için betonu dış etkilere karşı daha dayanıklı yapar. Su geçirimsizliğini azaltır.

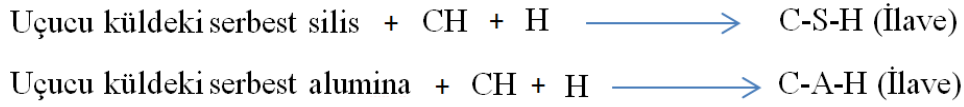
Puzolan malzemelerin, kendi başlarına bağlayıcı olmayan veya çok az olan yeterli nem ve sıcaklık koşullarında ortamdaki kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek bağlayıcı özelliği olan ikincil C-S-H (Kalsiyum-Silikat-Hidrate) bileşiklerini oluşturan malzemeler oldukları belirtilmiştir. Çimento, üretimi sırasında kendi içerisinde oluşan dört adet ana bileşenden oluşur.

Bu bileşenler; C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF terminolojisi ile birlikte belirtilirler. Bu terminolojiye göre; C: CaO (Sönmemiş Kireç), S: SiO<sub>2</sub> (Silika), A: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Alumina), H:H<sub>2</sub>O (Su) moleküllerinin kısaltmalarıdır. Belirtilen bu ana bileşenler, su ile reaksiyona girerek bağlayıcı özellikli C-S-H bileşikleri ile sönmüş kireç (CH=Ca(OH)<sub>2</sub>) oluşumlarını meydana getirirler. Bu durum, Şekil 4.1’deki genel çimento birincil reaksiyonları şemasında belirtilmiştir.



Şekil 4.1 Çimento İçinde Oluşan Birincil Reaksiyonlar (URL-8 2010).

Bu sönmüş kireç oluşumları, ortamda bulunabilecek serbest reaktif ve amorf yapıdaki silika (S) ve alumina (A) ile reaksiyona girerek, çimento içerisindeki ikincil bazı reaksiyonları meydana getirirler. Bu tür ikincil reaksiyonları sağlayabilecek durum, ancak reaksiyon ortamında puzolanik özelliğe sahip ve bu tür serbest reaktif alümina ve silikat oluşumlarını ihtiva eden puzolanik malzemelerin varlığına bağlıdır. Bu puzolanik malzemeler, birincil reaksiyonlar sonucunda ortamda fazladan oluşmuş sönmüş kireç (CH) oluşumları ile ikincil reaksiyonları meydana getirirler. Şekil 4.2’ de çimento ikincil reaksiyonları sonunda ortamda ilave kalsiyum silikat hidrate yapılar meydana gelir (URL-8 2010).



Şekil 4.2 Çimento İçinde Oluşan İkincil Reaksiyonlar (URL-8 2010).

#### 4.2.2 Uçucu Küllerin Yol Yapımında Kullanımı

Uçucu küllerin, tek başlarına yol malzemesi yapımında kullanılması mümkün değildir. Tane boyutlarının inceliği, tane boyut dağılımlarının homojenliği ve bağlayıcı özellikleri dolayısıyla diğer dolgu malzemeleri ile birlikte yol malzemesinin stabilizasyonunu sağlamak amacıyla kullanılabilirler. Yüksek kireçli uçucu küller, kendi kendilerine bağlayıcı özelliklerinden dolayı doğrudan, düşük kireçli küller ise % 5 oranında portland çimentosu ile birlikte karıştırılarak diğer dolgu malzemeleri ile birlikte kullanılırlar (EİE 1982; Baradan 1984; Yiğit vd. 2000).

#### 4.2.3 Uçucu Küllerin Toprak Islahında Kullanımı

Uçucu küllerin bünyesinde var olan potansiyel zehirleyici elementlerin, belirli oranlarda kalma şartıyla, toprağın içinde bitkiler için gerekli bazı elementleri içermesi amacıyla kullanılabilirler. Uçucu küllerin kullanımı ile ayrıca pH dengesinin kurulabilmesi mümkün olmaktadır. Uçucu küllerin ihtiva ettiği ve belirli oranlarda kalması gereken bazı ağır metal elementleri; kadmiyum (Cd), kurşun (Pb), molibden (Mo), bor ( $B_2O_3$ ), Selenyum (Se)’dur. Bu ağır metallerin toprak vasıtası ile canlıların besin zincirlerine karışma ihtimalleri önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir (Furr et al. 1975; Vassilev 1994; Yiğit 2000). Uçucu küller toprağın nem tutabilme yeteneğini arttırmaktadır. Nem tutabilme özelliği fazla olan toprak

sıkı bir şekilde bağı olduğu kil vb. maddelerden serbest hale gelerek gevşeme özelliği kazanabilir (Yiğit vd. 2000).

#### **4.2.4 Uçucu Küllerin Tuğla Yapımında Kullanımı**

Uçucu küller, çok ince ve homojen dağılımlı tane boyutu özelliği gösterirler. Bu özellik ona su tutma özelliğini de beraberinde getirmektedir. Tuğla imalinde, su tutabilme ve tuğla içerisindeki kilin şişmesi reaksiyonlarını imalat süresince stabil hale getirebilmesi, uçucu külün tuğla sektöründe önem kazanmasını sağlamıştır.

Tuğla imali, tuğla malzemesi olarak adlandırılan doğrudan kilin veya killi toprağın, su ve kum ile karıştırılıp yoğrulması, sonra preslenmesi ve bu preslenmiş ürünün pişirilmesi evrelerini içerir. Bu işlemler esnasında tuğla malzemesinden beklenen özellikler; suyla yoğrulduğunda kolayca şekil alabilmesi ve içindeki suyu kaybettiği zaman bu halini koruyabilmesidir. Şekillendirilerek kurutulan bu malzeme, pişirme öncesindeki şekil yapısını koruyabilmelidir. Bu da yoğurma sırasında şişme özelliği gösterecek killi yapının, su ile homojen bir temas halinde olmasına bağlıdır. İşte bu noktada uçucu kül çok ince, küresel ve homojen tane boyutu dağılımı ile mevcut katı karışımının, su ile teması homojenizasyonunu kolaylaştırır. Karışımın su tutma özelliğini arttırması da karışımın şişmesi işlemini stabilize eder ve sonuç olarak kurutma işlemlerinin ardından suyun uzaklaşp geride kalan katının stabil bir özellik gösterme eğilimine katkıda bulunabilir (Ediz 1995; Erdoğan 1993; Tokyay 1990; Yiğit vd. 2000).

Uçucu kül, tuğla malzemesine % 50'ye varan değişik oranlarda katılabilir. Doğaya verilerek çevre kirliliğine neden olma ihtimali olan uçucu külün tuğla üretiminde kullanılması çevresel bu avantajının yanında;

- a.) Külün ekonomik bir değer kazanması,
- b.) Değirmende öğütme kolaylığı sağlanması,
- c.) Kalıplama ve presleme için daha az güç gereksinimi,
- d.) Kolay kuruma ve bunlara bağlı olarak, sınırlı da olsa enerjiden tasarruf vb. avantajlar elde edilecektir (Tokyay 1991; Yiğit vd. 2000).

#### **4.2.5 Uçucu Küllerin Metal Kazanımında Kullanımı**

Uçucu küllerden metal kazanılmasında, liç, manyetik ayırma, flotasyon ve gravite yöntemleri uygulanabilmektedir. Uçucu küllerden kazanılabilecek elementler; demir, alüminyum, germanyum, titanyum, vanadyum ve uranyumdur. Bu konudaki çalışmalar ile henüz endüstriyel olarak verimli bir şekilde metal kazanımı yapılamamakta, ancak bunun ileride daha önemli olabilecek bir potansiyel olduğu da düşünülmektedir (Egemen 1993; EİE 1979; Ferriola et al. 1991; Yiğit vd. 2000).

#### **4.2.6 Uçucu Küllerin Diğer Kullanım Alanları**

Uçucu küller hafif yapı elemanları üretiminde, petrol kuyu sondajlarında, maden ocaklarında yangın barajlarının inşasında, metal yüzeylerinin temizlenmesinde, duvar harçlarında, akustik bloklarda, dolgu malzemesi olarak çatı malzemelerinde, kağıt, lastik, suni gübre sanayinde, çevresel amaçlı deterjan benzeri çeşitli zararlı maddelerin tutulmasında absorban olarak kullanılabilmektedir (EİE 1979; Morrison 1977; Tokyay 1993; Yiğit 2000).

### **4.3 BACA GAZI KÜKÜRTSÜZLEŞTİRME ÜRÜNÜ KULLANIM ALANLARI**

Baca gazı kükürtsüzleştirme ürünü yapay alçıtaşı (desülfojips), çimento sanayinde prizlenmeyi geciktirici, nikel izabesinde ergimeyi kolaylaştırıcı, bira sanayinde mayalandırma işlemlerinde, tıpta; cerrahi ve dişçilik alanlarında, porselen ve kiremit üretiminde kullanılmaktadır. Son yıllarda sıcak ve soğuk yalıtım malzemesi üretiminde, ses izolatörü ve rutubet düzenleyici olarak kullanım alanları da bulmaya başlamıştır (Yiğit vd. 2000).



## BÖLÜM 5

### TERMİK SANTRALLERDE TOZ TUTMA SİSTEMLERİ

Termik santrallerde filtreleme ve elektrostatik ayırma prensibine dayalı toz tutma işlemleri yapılır. Fakat endüstride kullanılan diğer toz tutma prensiplerinin de dikkate alınması, geliştirilebilecek yeni yaklaşımlar için yararlı olabilir.

Termik santrallerde toz tutma işlemleri genelde Elektrostatik ve torba tipi toz tutucular ile yapılmaktadır. En yaygın olarak kullanılan toz tutma sistemlerinin başında elektro filtreler (ESP) gelir. 19. yüzyılın başlarında geliştirilen bu sistem, % 99' un üzerinde toz tutma verimliliği ile yaklaşık yüz yıldır kullanılmaktadır. Uçucu külün elektrik rezistansı, yanmamış karbon oranı, baca gazının elektro filtreler içerisindeki homojen dağılımı elektro filtre verimliliğini etkileyen başlıca faktörlerdir. Günümüzde termik santraller için elektro filtre toz tutma teknolojisinin tek farklı seçeneği, torba tipi toz tutma filtreleridir.

Torba filtre toz tutucular, binlerce silindir şekle sahip hücrelerden oluşan bir yapıya sahiptirler. Filtre malzemesi olarak genelde teflon, fiberglas, polyester, cam elyafı ya da uygulamaya özel seçilebilecek diğer malzemeler kullanılabilir.

Uygun olarak dizayn edilmiş bir torba filtrenin dizayn edilen şartlar altında çalıştırılması durumunda % 99,9' un üzerinde bir toz tutma verimliliğine ulaşılabilir. Özellikle, küçük toz parçacıkların tutulmasında torba filtreler Elektro filtrelere göre daha etkindirler.

Torba filtrelerin yüksek verimlilik değerlerine ulaşmasına rağmen uygulanması durumunda sebebiyet verebileceği ilave basınç düşümü göz önünde bulundurulmalıdır. İşletme ve bakım sorunları da daha fazladır (URL-9 2013).

Endüstride kullanılan toz toplama işlemleri dört temel ilkeye bağlı olarak sınıflandırılırlar bunlar;

- a.) Dinamik etki ilkesi,
- b.) Filtreleme ilkesi,
- c.) Tanelerin birbirleri ile birleştirilmesinden sonra gazlardan ayrılması ilkesi,
- d.) Elektrostatik ayırma ilkesine dayanırlar (URL-9 2013).

### **Dinamik Etkiye Dayanan Toz Toplayıcılar;**

Yerçekimi, merkezkaç kuvveti ve besleme hızı vb. yaygın fiziksel parametrelere bağlı çalışan toz toplayıcılarıdır. En yaygın olanları, siklon tipi toz tutucularıdır.

#### **a.) Siklon tipi toz tutucular**

Tozların ayrımı, gaz akımına bir dönme hareketi verilerek sağlanmıştır. Böylece toz taneleri merkezkaç kuvveti etkisiyle toplayıcının çeperinde birikir. Dönmeye devam eden toz taneleri, yerçekimi ile toz çıkışından dışarı atılır.

#### **b.) Palet tipi toz toplayıcılar**

Bir gaz akımı eğimli bir ızgaradan geçmeye zorlanırsa, birçok küçük akımlara bölünür. Bunlardan her biri ani yön değişikliklerine uğrarlar. Eylemsizlik ilkesine bağlı olarak, tozların yönleri değişmez ve çoğunlukla eski hareket yönünde devam ederler. Böylece tozlar gaz akımından ayrılmış olurlar.

### **Filtreleme Esaslı Toz Toplayıcılar;**

Filtreleme esaslı toplayıcılarda gaz akımı, sıkı dokulu bir filtreden süzülür ve tozlar bu filtre üzerinde birikir. Bu filtrelere genellikle torba ya da bez filtreler denir.

### **Tanelerin Birbirleri İle Birleştirilmesinden Sonra Gazlardan Ayrılması İlkesine Göre;**

Atom enerjisi kavramının modern dünyaya girmesi ile birlikte, bu tür toz tutma sistemlerinin de önem kazandığı bir gerçektir. Eksoz ve baca gazları, radyoaktif toz içerdiklerinden kusursuz bir biçimde temizlenmelidirler.

Son derece küçük toz tanelerinin, herhangi bir toz toplayıcısına verilebilmesi için tanelerin birbirleri ile birleştirilerek yeteri kadar büyütülmesi gerekir.

Gaz akımı buharla, etilen glikolle püskürtülen su dumanı ya da ultrasonik titreşim kullanılarak yapılır. En yaygın kullanılan yöntemler; su püskürtülmesine ve ultrasonik titreşim prensibine dayananlardır.

Su püskürtmesine dayanan sistemlerde, gaz akımı büyük su damlaları ile temas ettirilerek, içerisindeki toz oluşumlarının yakalanması amaçlanmaktadır. Bu işlemlerde güç tüketimi yüksek olduğu için sadece bazı özel durumlarda kullanılırlar.

Ultrasonik ayırıcılar da ise toz tanelerinin birleştirilmesi, gaz akımını yüksek frekanslı ses dalgalarına maruz bırakmakla başarılmıştır. Gaz akımı içerisindeki çok küçük toz tanecikleri, gazla yaklaşık aynı genlikte salınımına sahip olmaktadır. Daha büyük toz taneleri ise düşük genlikte salınım yaparlar. Nispeten çok büyük olan taneler ise hemen hemen hiç hareket etmezler. Bu salınım farklılıklarından yararlanarak tozların birbirleri ile teması ve ilave olarak yerçekimi etkisi ile kazanılabilecek büyük taneler haline gelmeleri sağlanmaktadır.

### **Elektrostatik ayırma ilkesine göre ise toz tutucular;**

Bu tür toz tutucular, farklı elektrik yükü ile yüklenmiş elektrotların arasından geçen gaz akımı içerisindeki toz halindeki tanelerin, negatif elektrik yükü ile oluşturulan elektrik alan içerisinde, pozitif yöne doğru saptırılması ilkesine dayanmaktadır.

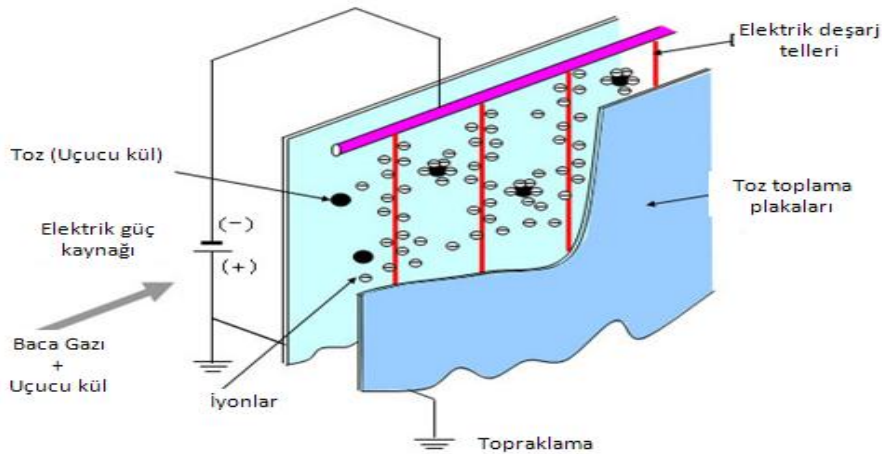
Termik santraller için kullanılan iki prensipten biri olan elektrostatik ayırma ilkesine göre çalışan toz tutma sistemi prensibi, en yaygın kullanım alanı bulan toz tutma prensibidir (URL-9 2013).

### **5.1 ESP (ELEKTROSTATİK ÇÖKTÜRME SİSTEMLERİ)**

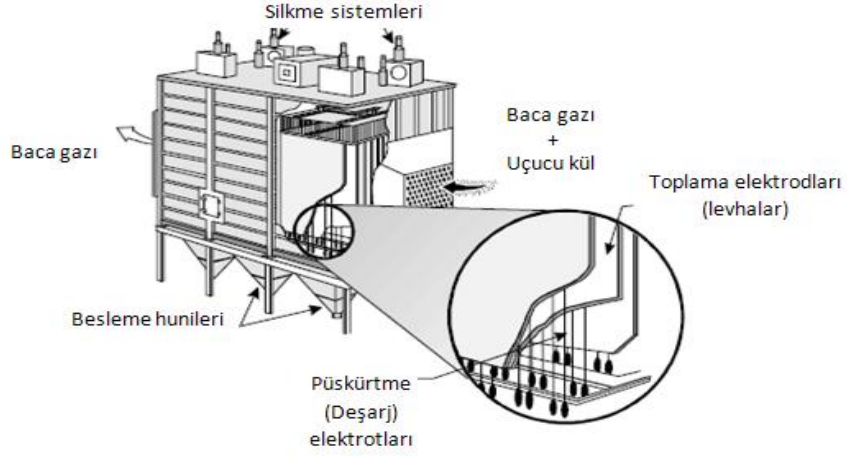
ESP sisteminde kullanılan filtrelerde iki tür elektrot bulunmaktadır. Bunların ilki, çökeltme elektrotları, diğerleri de püskürtme elektrotlarıdır. Püskürtme elektrotları aynı zamanda yüksek voltaj elektrotlarıdır. Çökeltme elektrotları ise birbirlerine yaklaşık 10 cm aralıklarla dizilmiş levhalardır. Bu püskürtme veya yüksek voltaj elektrotları 10-70 kV' luk bir



kaynaktan beslenirler ve elektriksel alan meydana getirirler. Bir dönüştürücü (redresör) sistemi ile buradaki alternatif akım doğru akıma çevrilir. Püskürtme elektrotları (- yüklü) katot elektrotunu başka bir ifade ile elektron kaynağını, levhalar ise (+ yüklü) topraklanmış anot elektrotunu oluştururlar. Oluşan elektriksel alan gaz akımını iyonize edebilecek kadar yüksektir. Püskürtme elektrotundan çıkan elektronlar, püskürtme elektronları etrafından geçen gaz akımını iyonize ederler. Püskürtme elektrotundan çıkan elektronlar, gaz akımı içerisindeki bazı moleküllerin yapısındaki elektronları püskürtme elektrotundan daha da uzağa iter. Bir başka deyişle gaz moleküllerinin bazıları pozitif yükü iyonize olurken, bir kısmı da negatif elektrik yükü ile iyonize olmaktadır. Negatif yükü iyonize olan gaz iyonları partiküller üzerinde toplanmaya başlarlar. Örneğin 1 mikrondan daha ince bir partikül 10 adet gaz iyonunu toplayabilir. Aynı şekilde 10 mikrondan daha büyük bir toz tanesi on binlerce gaz iyonunu üzerinde toplayabilir. Böylece gaz akımı içerisinde hareket eden bu taneler negatif elektrik yükü ile yüklenirler. Negatif elektrik yüküne doymuş hale gelen tane pozitif elektrik ile yüklenmiş olan anot plakasına doğru saptırılır. Bu işlem o kadar hızlı olur ki taneler çoğu zaman yer çekimi etkisi ile besleme hunisi içerisine düşmeye fırsat bulamaz ve anot plakası üzerinde birikme eğilimi gösterirler. Bu durumda da hem levhalarda hem de püskürtme elektrotları üzerinde birikme eğilimi gösterebilecek bu tanelerin besleme hunisine düşürülebilmesi için belirli bir sarsma ve çekiçleme işlemi uygulanmaktadır. Buradan, genellikle havalı sistemlerle ilgili ana silolara taşınır. Elektrostatik toz tutma işleminin temel prensibi ve toz tutma elektrotlarının durumu sırası ile Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’ de belirtilmiştir (URL –10 2013).

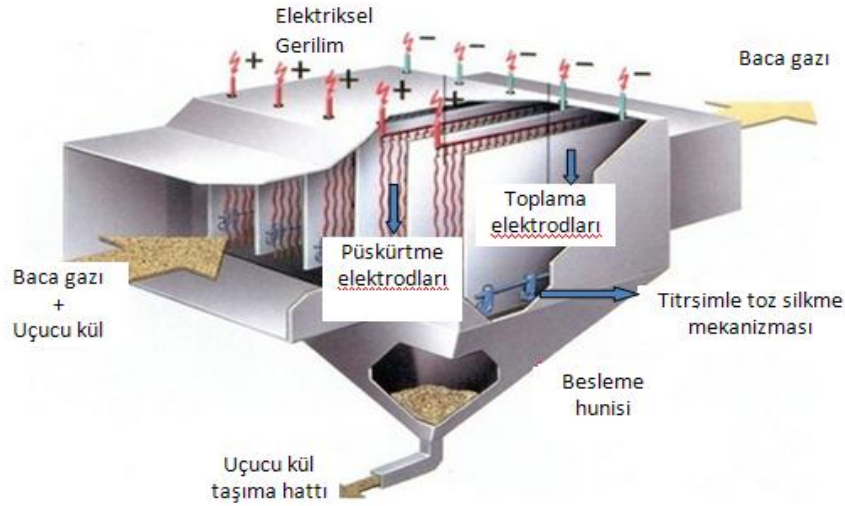


Şekil 5.1 Uçucu Kül Tanelerinin Tutulmasının Genel Prensibi (URL–11 2013).



Şekil 5.2 Toz Tutucu Elektrotların Konumu (URL-10 2013).

Genel olarak baca gazı içerisindeki uçucu külün toplanması işleminin tek bir ESP toz tutma haznesi için uygun bir kesit görüntüsü Şekil 5.3’ de belirtilmiştir (URL-10 2013).

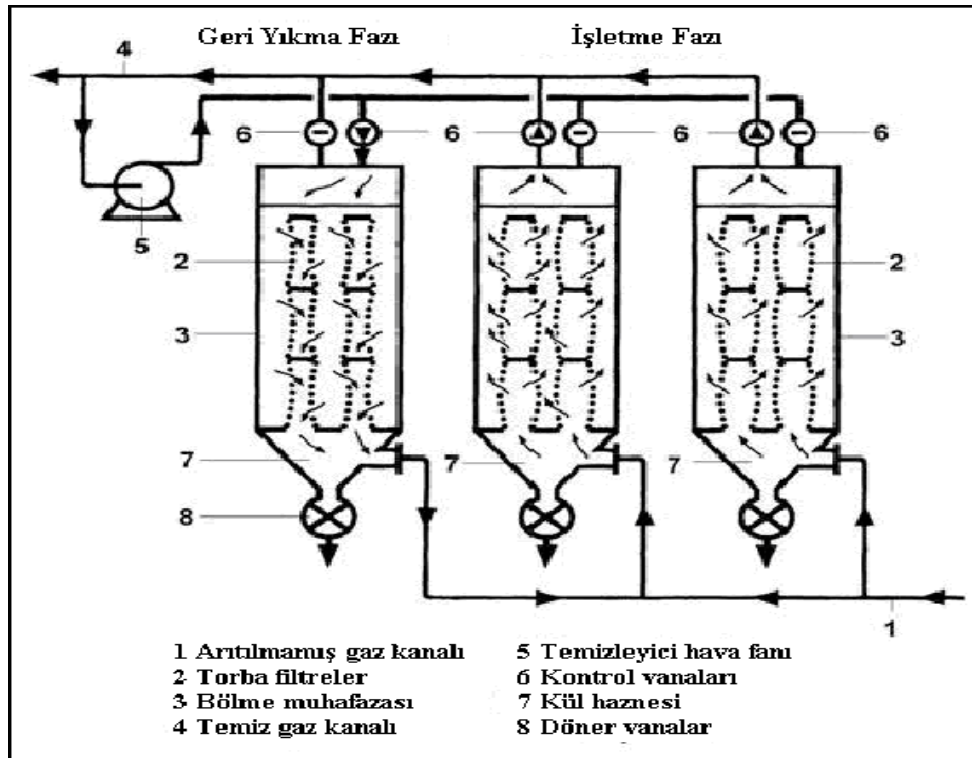


Şekil 5.3 Toz Tutma Haznesi Çalışma Şekli ve Kesit Görünüşü (URL-13 2013).

## 5.2 TORBA TİPİ TOZ TUTMA SİSTEMLERİ

Bir torba filtre ünitesi, kumaştan torba şeklinde yapılmış, alt tarafı açık, üst tarafı kapalı olan filtrelerin bir metal kabin içinde sıralanmasından meydana gelir. Torba filtrelerin genel şekli şematik olarak Şekil 5.7’ de gösterilmektedir. En sağdaki iki ünite partiküllerin toplanmasını, en soldaki tek ünite de toplanan partiküllerin torba yüzeylerinden temizlenmesini göstermektedir. Partikül yüklü gaz, öncelikle ünitenin alt kısmından girer, torbaların içine

doğru akar ve torbanın yapıldığı kumaş malzemenin gözeneklerinden geçer. Taşıdığı partikül maddeler kumaş torbanın iç kısmında kalır. Dış kısmına ise temiz gaz geçer. Temiz gaz akımı ünitenin üst kısmında toplanır ve daha sonra atmosfere atılır. Torbalar temizleneceği zaman, temiz gazdan alınan bir miktar basınçlı gaz, bu kez ters yönde torbaların dışından içine doğru verilir. Torbaların içinden dökülen partiküller, ünitenin alt tarafından toplanarak alınır. Filtreler uzun süreli filtreleme ve kısa süreli temizlik programlarında değişimli olarak çalıştırılır. Temizlik sırasında torbalarda biriken toz, kumaş filtre yüzeyinden alınır ve atılmak üzere bir haznede depolanır. Torba filtreleri diğer gaz filtrelerinde ayıran en önemli işletim özelliği, temizlik sırasında filtre yüzeyini periyodik olarak kontrol edebilme fırsatıdır. Filtre yüzeyinden tozun düzenli olarak alınması filtrenin verimi ve işletim ömrü açısından önemlidir. En yaygın temizleme metotları ters hava akımı, mekanik sallama/boşaltma, titretme ve tazyikli hava püskürtmedir. Akustik kornalarda, ayrıca torbaları temizlemek için kullanılabilir (URL -12 2013).



Şekil 5.4 Torba Tipi Toz Tutma Sistemleri (URL -12 2013).

## BÖLÜM 6

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalarımız için, termik santralin 600'er MWe gücündeki 2. ve 3. ünitelerine bağlı toz tutma (ESP) sistemlerinde ve bunlara bağlı depolama noktalarında toplanan uçucu küllerden belirli bir düzende numuneler alınmıştır. Deneysel çalışmaların en önemli kısmı numune alınması işlemidir. Bu işlem tüm deneysel çalışmaların temelidir. Uçucu kül numunelerinin alınış sistematığının ifade edilebilmesi için genel olarak depolama ve ESP sistemi iyice anlaşılmalıdır.

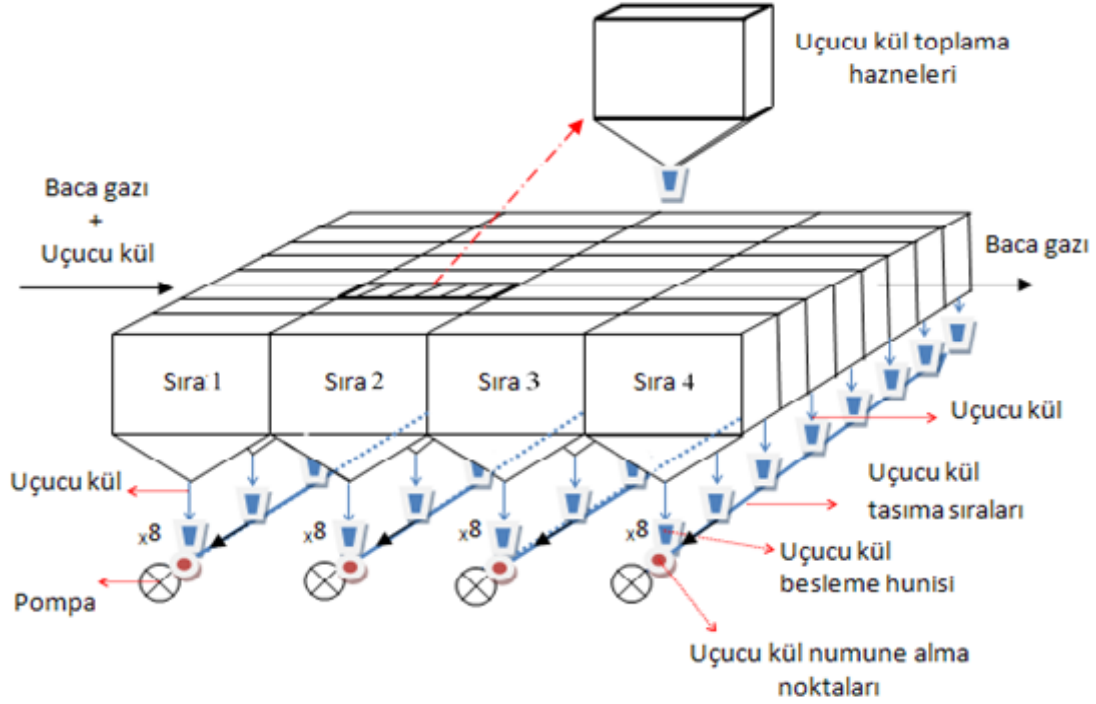
#### 6.1 NUMUNE ALMA

Termik santralin 2. ve 3. ünitelerinin kazanları birbirlerine paralel ESP sistemlerine sahiptir. Numune alma işlemleri, ESP (elektrostatik toz tutma) sistemleri ve uçucu kül depolama noktalarından yapılmıştır. Her bir ESP sisteminin dört' er ayrı uçucu kül taşıma sırasından ve depolama sistemine ait Silo 1 ve Silo 3' den numune alınmıştır. Depolama sistemine ait Silo 2' den geçici yaşanan bazı aksaklıklar nedeniyle numune alınmamıştır.

Her bir uçucu kül taşıma sırası, kazan çıkışından baca yönüne doğru olacak şekilde küçükten büyüğe numaralanır. Her bir uçucu kül taşıma sırası, sekiz adet uçucu kül toplama haznesine sahiptir. Her bir toz toplama haznesi, bunlara alttan bağlantılı besleme hunilerinden meydana gelir. Uçucu küller, besleme hunileri ve havalı taşıma sistemleri vasıtasıyla ilgili silolara taşınır. Bu durum her iki ünite kazanına bağlı ESP sistemleri için küçük farklılıklar göstermesi dışında aynıdır.

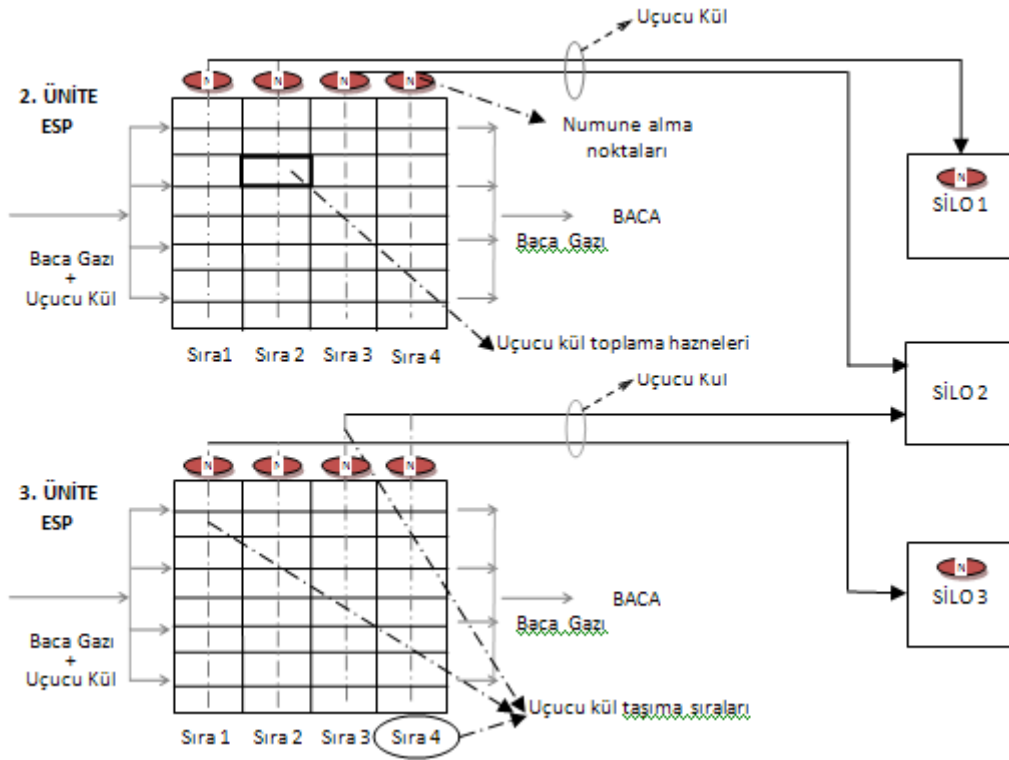
Uçucu kül taşıma sırası boyunca tüm uçucu kül besleme hunilerinde toplanan uçucu külleri temsil edecek uçucu kül numunesi alınmıştır. Böylece ESP sisteminin, baca gazı akış yönünde ilerleyen uçucu kül toplama haznelerinde veya başka bir deyişle baca yönüne doğru ilerleyen elektrik alanlarında performansı ölçülmeye çalışılmıştır. Her bir uçucu kül taşıma sırası, baca

gazı hareket yönü boyunca ilerleyen uçucu kül toplama haznelerinin uçucu kül bileşimini ve bunlara bağlı elektrik alanlarını temsil etmektedir. Herhangi bir uçucu kül taşıma sırasının tamamını temsil edebilecek bir uçucu kül numunesinin alınabilmesi için, bu taşıma sırasına toplanan uçucu külleri besleyen sekiz besleme hunisinin de ilgili ESP sistemini terk ettiği nokta seçilmelidir. Uçucu kül taşıma sıraları, uçucu kül toplama hazneleri ve uçucu küllerin numune olarak alındığı bölgeler tek bir üniteye bağlı ESP sistemi için şekil 6.1’ de belirtilmiştir.



Şekil 6.1 Tek Bir Ünitenin ESP Sistemi.

Genel olarak ESP sistemlerinin anlatıldığı bölümlerde belirtildiği gibi, numunelerin alındığı noktalar çalışmanın kavranmasında genel olarak bir avantaj sağlayacaktır. Bu amaçla ESP ve depolama sistemlerinin genel akım şemasına dikkat etmek gerekmektedir. Şekil 6.2’ de Genel olarak ESP ve depolama sistemlerinin hangi noktalarından numunelerin alındığı belirtilmiştir. Böylece baca gazı ilerleme yönü boyunca sıra ile toplanan uçucu küllerin bu yön boyunca farklı özelliklerinden dolayı gösterebilecekleri farklı davranışlar değerlendirilebilecektir. Aynı şekilde farklı ESP sistemlerinden elde edilen uçucu kül örneklerinin ayrı olarak değerlendirilebilmesi için farklı silolardan da numune alınmıştır. Numunelerin sistemde hangi noktalardan alındığının anlaşılması çalışmanın faydalı olabilmesi için kilit öneme sahiptir. Örneklerin alındığı noktalar genel olarak ESP ve depolama sisteminin üst plan görüntüsü üzerinden Şekil 6.2’ de belirtilmiştir.



Şekil 6.2 ESP ve Depolama Sistemi İçerisinde Numune Alma Noktaları.

DeneySEL çalışmalarında test edilecek gerek yerinden alınmış gerekse de hazırlanmış örneklerin isimlendirilmesi önem taşımaktadır. Bu nedenle her bir test numunesinin isimlendirilmesi işlemi yapılmıştır, bu durum Çizelge 6.1’ de belirtilmiştir.

Çizelge 6.1 DeneySEL Numune İsimlendirmesi.

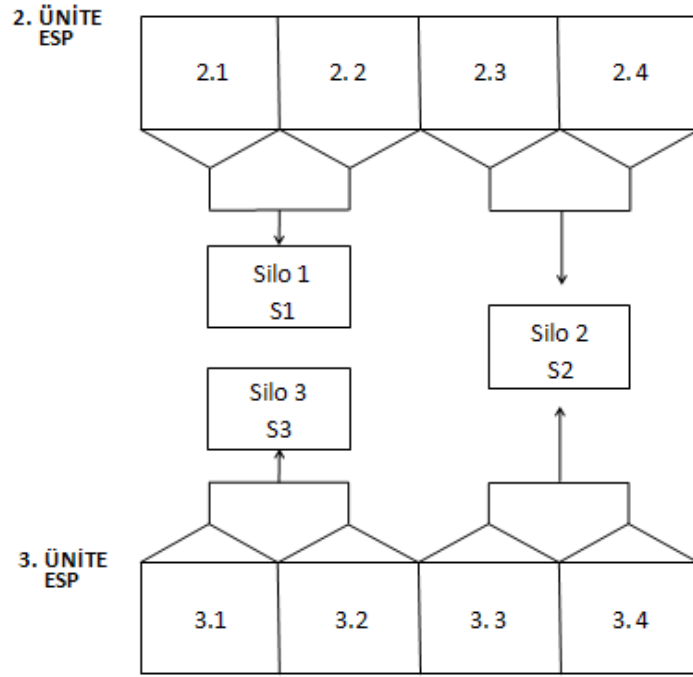
Numune Kod’u	Numune’nin alındığı nokta
2,1	2. Ünite, sıra 1
2,2	2. Ünite, sıra 2
2,3	2. Ünite, sıra 3
2,4	2. Ünite, sıra 4
3,1	3. Ünite, sıra 1
3,2	3. Ünite, sıra 2
3,3	3. Ünite, sıra 3
3,4	3. Ünite, sıra 4
S 1	1. Silo
S 2	2. Silo
S 3	3. Silo
PÇ	Portland Çimentosu

Silo 2 ‘ den numune alınmadığı için bu siloyu temsil edecek numune her iki ünitenin üçüncü ve dördüncü sıralarından alınan numunelerin üretim şartlarındaki miktarları dikkate alınarak yapay olarak hazırlanmıştır. Her iki ünitenin ESP sıralarından elde edilen uçucu küllerin sıralara göre miktarları yaklaşık olarak birbirinin aynı olduğu kabul edilmektedir. 1. ve 2. sıralardan elde edilen uçucu kül miktarları, 3. ve 4. sıralardan elde edilen uçucu kül miktarlarına göre kıyaslanmayacak ölçüde fazladır. Ünitelerin 1. ve 2. Uçucu kül taşıma sıraları sırasıyla Silo 1 ve Silo 3’ e ayrılarak toplanırken, 3. ve 4. uçucu kül taşıma sıraları Silo 3’ e gittiği için bu miktarların silolara giriş dağılımları da kendi içlerinde ayrı olarak değerlendirilmiştir. Tek bir ünite için ESP sıralarından elde edilen uçucu kül miktarlarının yaklaşık değerleri Çizelge 6.2’ de verilmektedir.

Çizelge 6.2 Tek Bir Ünitenin ESP Çıkış Miktarları.

ESP Sıraları	t/h	%	$\Sigma\% \downarrow$ (Tüm Sıralar)	% (1.ve2.) Sıralar	% (3.ve4.) Sıralar
1. Sıra	23,80	85,83	85,83	87,65	0
2. Sıra	3,35	12,09	97,92	12,35	0
3. Sıra	0,50	1,80	99,72	0	86,54
4. Sıra	0,076	0,28	100,00	0	13,46
	27,73	100,00		100,00	100,00

ESP ve bunlara bağlı silolardan elde edilen numunelerin isimlendirilmesinin ardından. Silo 1’de ikinci üniteye bağlı birinci ve ikinci sıradan havalı taşıma sistemi ile alınan uçucu küllerin karışımı toplanmaktadır. Silo 3’ de toplanan uçucu kül ise üçüncü üniteye bağlı birinci ve ikinci sıradan toplanan uçucu küllerin karışımıdır. Her iki ünitenin de üçüncü ve dördüncü sıraları ikinci siloya boşaltılmaktadır. Numune alımında takip edilen düzen, bu prensibe göre Şekil 6.3’ de ki numune alma, hazırlama ve isimlendirmenin yapıldığı düzenekte belirtilmiştir.



Şekil 6.3 Tesisteki Genel Örnek Oluşturma Düzeni.

İki ayrı ESP sisteminin dört' er ayrı uçucu kül taşıma sırasından oluştuğu ele alındığında, sadece ESP ünitelerinden (2 ünite x 9 vardiya x 2 numune x 4 ESP taşıma sırası) 144 adet numune alınmıştır. Silo 1 ve Silo 3 den de aynı şartlarda alınan (2 silo x 9 vardiya x 2 numune) 36 adet numune ile birlikte toplam (144 + 36) 180 adet numune elde edilmiştir.

Elde edilen numuneler, her bir ESP uçucu kül taşıma sıraları ve kül depolama siloları için ayrı ayrı olacak şekilde dikkatli bir biçimde karıştırılmış ve tasnif edilmiştir. Böylece genel olarak her iki ünitenin ESP uçucu kül taşıma sıralarını (toplam 4+4=8 adet) ve silolarını (Silo 1 ve Silo 3) (toplam 2 adet) temsil eden 10 adet temsili numune alınmıştır. Bunun yanında Silo 2' de toplanan uçucu külü temsil edecek ve tesis şartlarına göre hazırlanmış örnek ile deneysel çalışmalarda incelemeleri yapılacak toplam 11 adet örnek bulunmaktadır. Bir başka deyişle her bir ESP uçucu kül taşıma sırasını ve siloları (Silo 1 ve Silo 3) yapılacak analizlerde temsil edecek temsili numune o ESP kül taşıma sırası ve silodan farklı gün, vardiya ve saatlerde alınan 18 farklı numunenin temsili karışımlarıdır.

Örnek olarak 2.1 kod'u ile numaralandırılmış ve hazırlanmış deney numunesi 2. Ünitenin 1. uçucu kül taşıma sırası üzerindeki kül toplama haznelерinin tümünü temsil edecek noktadan farklı gün, vardiya ve saatlerde alınan 18 farklı numunenin birleşimidir.



Dört gün boyunca belirlenen saatlerde, her vardiyadan her bir ESP sisteminin uçucu kül taşıma sıralarından ve tesiste kullanımdaki uçucu kül silolarından (Silo 1 ve Silo 3) 2’şer adet numune alınmıştır. Numune alma gün, vardiya ve saatleri Çizelge 6.3’ de belirtilmiştir.

Çizelge 6.3 Numune Alma Zamanları.

Günler	I.Gün	II.Gün	III.Gün	IV.Gün
Vardiya	Saat	Saat	Saat	Saat
1.Vardiya	-	01:30	01:30	01:30
	-	06:30	06:30	06:30
2.Vardiya	09:30	09:30	09:30	-
	14:30	14:30	14:30	-
3.Vardiya	17:30	17:30	17:30	-
	21:30	21:30	21:30	-

## 6.2 ANALİZLER

Numune alma işlemlerinin ardından gerekli analiz işlemlerine geçilmiştir. Ünitelerin ESP sistemlerinde toplanan uçucu küllerin sistem içerisinde oluşan fiziksel koşullara, kendi fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre farklı tepki vermesinden kaynaklanan bir sınıflanma oluşmaktadır. Bu sınıflanmanın belirlenebilmesi için ESP sistemlerinin baca gazı yönünde konumlandırılmış olan kül toplama haznelere sahip olduğu önceden belirtilmişti. Bu kül toplama haznelerinin oluşturduğu uçucu kül taşıma sıralarını temsil edecek örneklerin gösterdikleri farklı tepkilerin irdelenebilmesi bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerin analizi ile mümkündür. Bunun içinde bu alınan ve hazırlanan 11 örnek sırasıyla boyut dağılımı, kızdırma kaybı, kimyasal bileşimi ve bunlara büyük ölçüde bağlı olan ve çalışmanın temel olarak üzerinde durduğu inşaat sektöründe kullanılabilirliğini analiz etmekte yararlanılabilecek puzolanik özelliklerinin tespiti için bir dizi analizler yapılmıştır. Ayrıca uçucu kül örneklerine ilave olarak puzolanik etkinin birlikte inceleneceği portland çimentosu da aynı analizlere tabi tutulmuş ve gerekli karşılaştırmalar ilgili çizelgelerde yapılmıştır.

## 6.2.1 Kimyasal Analizler

Tasnif edilen örneklerin X ışını uyarımlı ışınma yönteminin kullanıldığı XRF (X-Ray Fluorescence) cihazı ile bileşimindeki, özellikle SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarı olmak üzere kireç ve diğer alkali oluşumların %'si belirlenmiştir. Çizelge 6.4' deki sonuçların incelenmesi ile görüleceği üzere numunelerin SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toplam miktarları % 70'in üzerindedir. Bu durumda elde edilen uçucu küller genel olarak F sınıfı uçucu küller olarak değerlendirilebilirler.

F sınıfı uçucu küller, Çizelge 6.4' de görüldüğü gibi düşük kireç (CaO) oranına sahiptir. Bu tür uçucu küllerde kireç oranı % 10' un altındadır ve yüksek camsı yapı göstermektedirler. Camsı yapı, uçucu küllerin karışımına katıldıkları oluşumlar içerisinde serbest haldeki moleküllerle bağ yapıp, karışıma ilave bağlayıcı özellikler kazandırabilmeleri için çok önemlidir.

Çizelge 6.4 Uçucu Kül Örneklerinin ve Portland Çimentosu Örneğinin Kimyasal Analizleri.

Bileşen	Ürünlerin Kimyasal Bileşimi (%)					
	2.1	3.1	S1	S2	S3	PÇ
SiO <sub>2</sub>	57,74	57,87	56,60	57,57	57,88	16,13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,24	22,21	21,67	22,17	22,13	4,54
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,95	9,02	9,82	9,14	8,98	3,87
CaO	2,08	2,15	2,38	2,19	2,18	67,64
MgO	1,95	1,96	1,97	1,95	2,00	1,57
Na <sub>2</sub> O	1,24	1,23	1,21	1,22	1,23	0,38
SO <sub>3</sub>	1,11	0,90	1,41	1,00	0,93	4,18
Diğer	4,69	4,66	4,94	4,76	4,67	1,69
ΣToplam	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

## 6.2.2 Boyut Dağılımı Analizleri

Yukarıdaki deneysel numune alma çalışmalarına göre alınan numuneler Malvern Master-Seizer S 2000 cihazında boyut dağılımı analizine tabi tutulmuştur. Bu cihazda temel olarak D01, D05, ve D09 değerlerine bakılmıştır. D01 değeri ürünlerin hacimsel olarak %10' nun

geçtiği boyut (d10), D05; Hacimsel olarak % 50'sinin geçtiği boyut (d50) ve D09; Hacimsel olarak % 90' nın geçtiği boyut (d90) olup  $\mu$  (mikron) cinsinden ifade edilmektedir. Yapılan çalışmada termik santral de en sık kullanılan, örneğin % 90' ının geçtiği tane boyutu d09 terimi elde edilen verilere dayanarak çalışmada verilmiştir. Elde edilen ürünlerin boyut dağılımlarının belirlenmesinde kullanılan Malvern Master Seizer S 2000 cihazının görüntüsü Şekil 6.4' de yapılan boyut dağılımı analizi sonuçları ise Çizelge 6.5' de belirtilmiştir.



Şekil 6.4 Malvern Masterseizer S 2000 Cihazı.

Çizelge 6.5 Uçucu Kül Örneklerinin ve Portland Çimentosu Örneğinin Boyut Dağılımı.

Ürünler	d90 ( $\mu\text{m}$ )	d50 ( $\mu\text{m}$ )	d10 ( $\mu\text{m}$ )
2.1	99,51	21,69	0,98
2.2	93,89	19,87	0,88
2.3	95,99	20,45	0,86
2.4	94,46	20,13	0,84
3.1	93,35	19,92	0,83
3.2	106,57	23,06	1,02
3.3	115,84	23,64	1,08
3.4	105,60	23,04	0,99
S1	97,83	21,26	0,96
S2	104,66	23,50	1,06
S3	95,96	46,47	15,87
PÇ	59,07	16,27	0,72

### 6.2.3 Kızdırma Kaybı Analizleri

Kızdırma kaybı analizleri, yaklaşık 0,5 gr ölçülmüş örneklerin seramik krozelerde 850 °C sıcaklıkta iki saat süre ile bekletilmesi ile yapılmaktadır. Şekil 6.5’ de uçucu kül örneklerinin ve Portland çimentosu örneğinin kızdırma kaybı analizlerinde kullanılan fırın gösterilmektedir.



Şekil 6.5 Seramik Krozelerin Deney Öncesi Fırına Yerleştirilmesi.

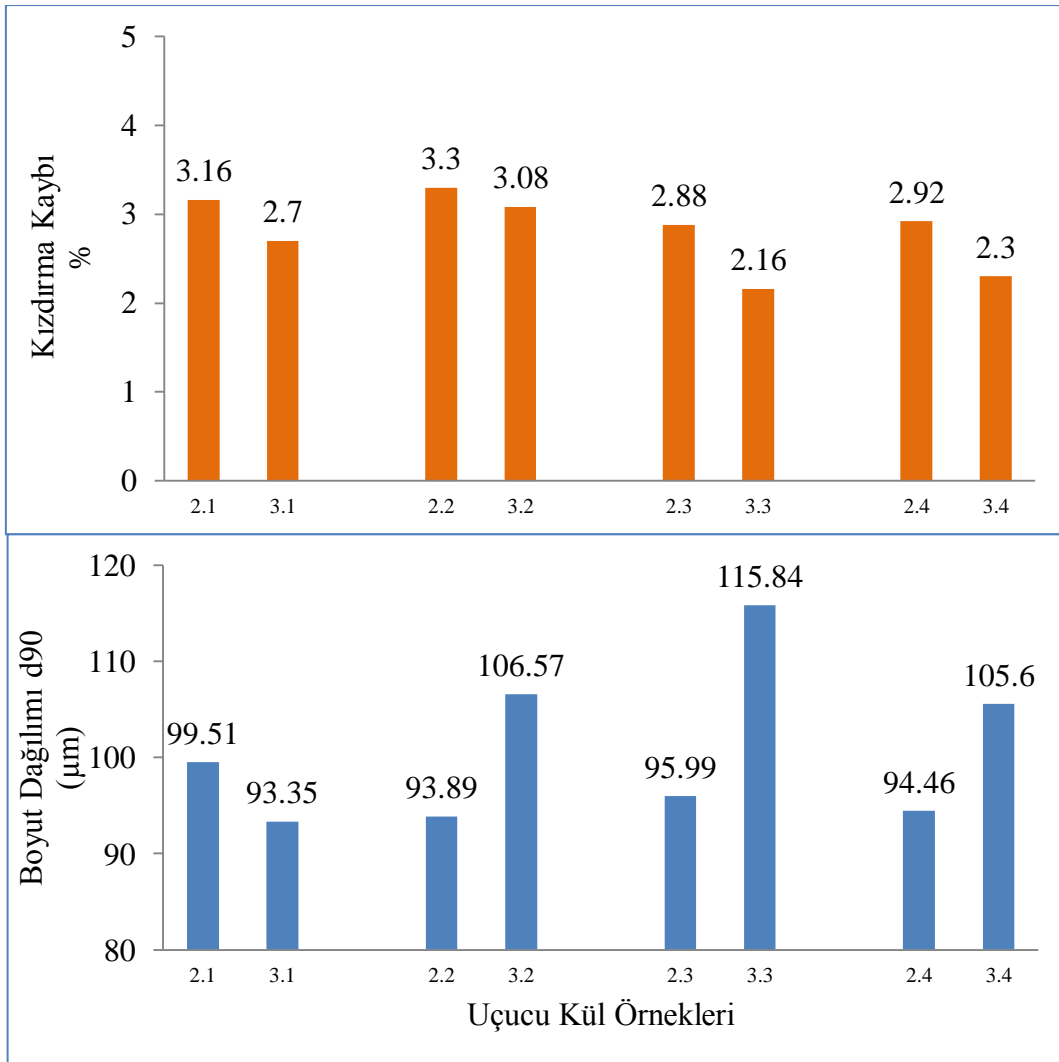
Çizelge 6.6’ da her bir ESP sırasını ve Portland çimentosunu temsil eden örneklerin ayrı ayrı kızdırma kaybı değerleri verilmiştir. Analizler sonucunda üçüncü ve dördüncü sıranın yüksek yanmamış karbon içeriğine sahip olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 6.6 Uçucu Kül ve Portland Çimentosu Kızdırma Kaybı Değerleri.

	<b>2. Üniteden Alınan Tüm Ürünler</b>			
<b>2. Ünite</b>	<b>2.1</b>	<b>2.2</b>	<b>2.3</b>	<b>2.4</b>
K.K%	3,16	3,30	2,88	2,92
<b>3. Ünite</b>	<b>3.1</b>	<b>3.2</b>	<b>3.3</b>	<b>3.4</b>
K.K%	2,70	3,08	2,16	2,30
<b>Silolar</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>PÇ</b>
K.K%	3,04	2,55	2,79	3,32

## 6.2.4 Boyut Dağılımı ve Kızdırma Kaybı Değerlerinin Karşılaştırılması

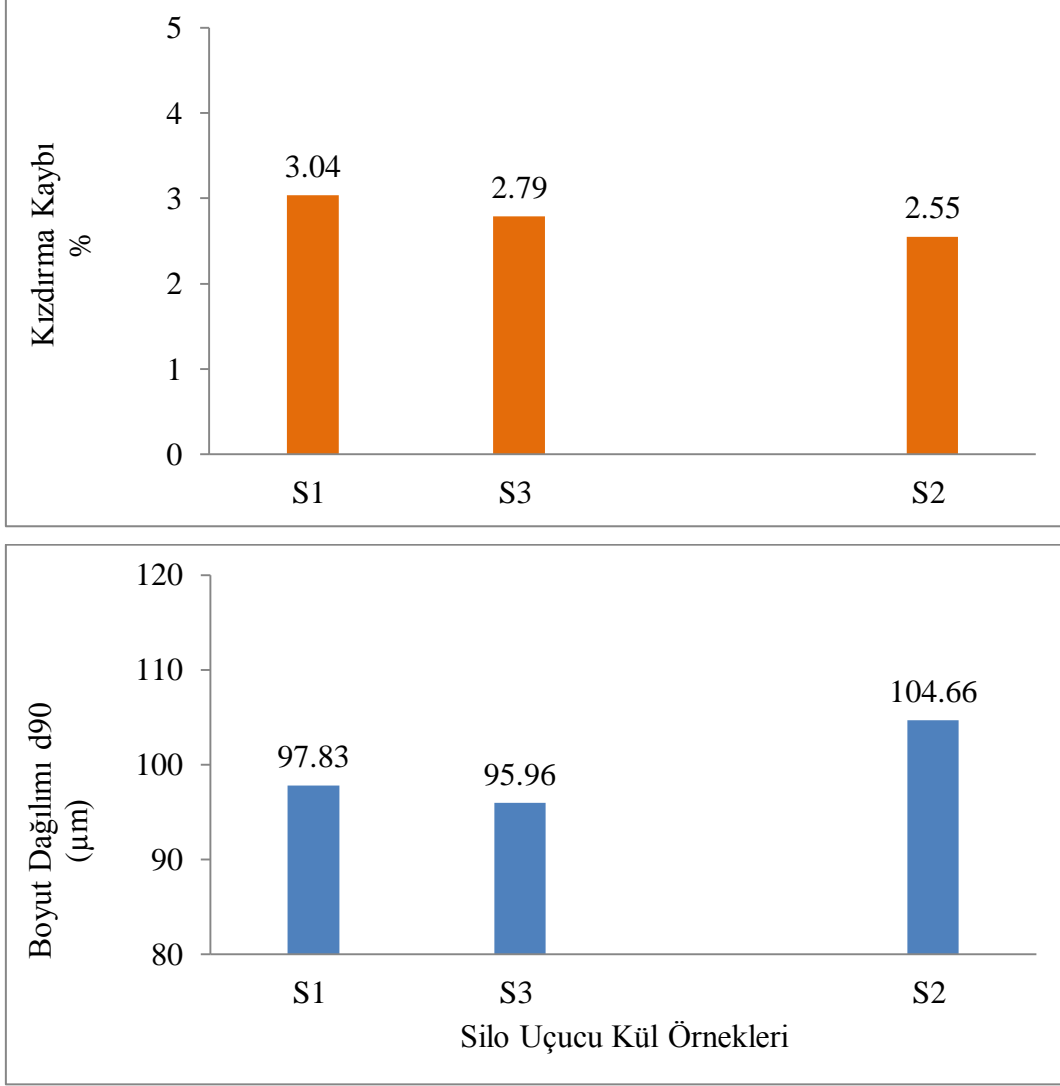
Çalışmanın bu bölümünde ESP sıralarından elde edilen uçucu kül örnekleri, boyut dağılımı ve kızdırma kaybı yönünden ayrı olarak karşılaştırılmıştır. Bunun ardından uçucu kül silolarında depolanan uçucu küllerin kendi içlerinde aynı özelliklere göre karşılaştırılması yapılmış ve kızdırma kaybı ve boyut dağılımı arasındaki ilişki incelenmeye çalışılmıştır. Şekil 6.6'da yer alan grafikte, 2. Ünite ESP sıralarında toplanan uçucu küllerin hacimsel olarak % 90'ının geçtiği boyutlar gösterilmiştir.



Şekil 6.6 (2. ve 3.) ESP Sıraları Uçucu Külleri Boyut Dağılımı ve Kızdırma Kaybı İlişkisi.

Şekil 6.6' da görüldüğü üzere 2. ünite ESP sisteminden toplanan uçucu kül örneklerinin hacimsel olarak % 90'ının geçtiği boyut 93,89 ile 99,51 µm arasında değişmektedir.

Buna karşılık uçucu 3. Ünite de uçucu kül örneklerinin boyut dağılımları 93,35 ile 115,84  $\mu\text{m}$   $d_{90}$  değerlerine sahiptir. Kızdırma kaybı değerleri ise % 2,16-3,08 arasında görülmektedir. Uçucu küllerin kızdırma kayıpları ile boyut dağılımları arasındaki ters orantı görülmektedir.



Şekil 6.7 Silolarda Toplanan Uçucu Küllerin Boyut Dağılımı ve Kızdırma Kaybı İlişkisi.

Şekil 6.7 de uçucu kül depolama sistemine bağlı uçucu kül silolarında toplanan uçucu kül örneklerinin hacimsel olarak % 90'ının geçtiği boyut 95,96 ile 115,84  $\mu\text{m}$  arasında değiştiği görülmektedir. Uçucu kül örneklerinin kızdırma kaybı değerleri ise % 2,55 ile 3,04 arasında değişmiştir. Kızdırma kayıpları ile boyut dağılımları arasındaki ters orantı burada da görülmektedir.

### 6.2.5 Dayanım Analizleri

Çalışmanın temel amacı uçucu külün inşaat sektöründe kullanılabilirliğini araştırmak olduğu için deneysel kısımların en çok vurgu yapılması gereken bölümü, uçucu külün çimento ile birlikte kullanılması ve çimento ile birlikte kullanılarak hazırlanan betonun mekanik özelliklerinin belirlenmesidir. Diğer deneysel çalışmalar ile mekanik özelliklerin testi için yapılan deneysel çalışmalar arasındaki ilişkinin iyi kurulması son derece önemlidir. Uçucu küller beton yapımında çimento yerine ikame edilerek kullanıldıkları için, kullanılan çimentonun özellikleri tek başına referans değer olarak alınmalı ve uçucu küllü çimento karışımlarının dayanım özellikleri ile karşılaştırılmalıdır. Bu karşılaştırmanın yapılabilmesi için çimentonun ve uçucu küllü çimentonun ayrı ayrı dayanım analizlerinin yapılması gereklidir. Sadece çimento kullanılarak hazırlanan referans örneği harçlarının bileşimleri Çizelge 6.7’de belirtilmiştir.

Çizelge 6.7 Beton Harcı Genel Bileşimi.

Beton Bileşenleri	Miktar	Miktar
Su	0,5 Kısım	225 ml. (gr.)
Çimento	1 Kısım	450 gr.
Agrega	3 Kısım	1350 gr.

Oluşturulan karışımlar Şekil 6.8’ de gösterilen harç makinesinde TS EN 196-1 standartlarına göre hazırlanmıştır. Karıştırma işleminde önce su karıştırma kabına konur. Harç karışımlarında kullanılan su saf sudur. Makine çalıştırılır ve ardından çimento su üzerine ilave edilir. 30 sn sürelik karıştırmanın ardından karıştırma devam ederken, tekrar 30 sn. içerisinde agrega olarak kullanılan rilem kumu karışıma ilave edilir. Kumun ilavesinin hemen ardından makine hızlı çalıştırma durumuna getirilir ve 30 sn daha bu yüksek hızda çalıştırılır. Daha sonra, 90 sn süre ile makine durdurulur ve karışımın herhangi bir kaşık aparatı ile karıştırma kabının kenarlarına savrulmuş olan kısımları tekrar kabın ortasına toplanır. Tekrar 60 sn süre ile yüksek hızla karıştırmanın ardından kalıp dökme işlemlerine hazır hale gelir.



Şekil 6.8 Harç Makinesi.

Kalıp çıkarma işlemleri, beton kalıbı cihazlarında yapılır. Bu işlem için kullanılan kalıplar, standartta uygun olup  $(16 \times 4 \times 4) \text{ cm}^3$  lüktür ve 3 ayrı gözden oluşur. Harç hazırlama işlemlerinin ardından, hazırlanan harçlar Şekil 6.9’ da görülen standart beton kalıbının üç ayrı gözüne eşit miktarda gelecek şekilde yerleştirilir. Hazırlanan her karışım için 3 adet kalıp dökülmüştür.



Şekil 6.9 Standart Beton Kalıbı.

Harcın yerleştirilme işlemi iki kademedede yapılır. İlk kademedede karıştırma kabında hazırlanan harcın yarısı kalıp cihazının üç ayrı gözüne eşit miktarda (Yaklaşık 300 er gr.) ilave edilecek şekilde yerleştirilir. Ardından kalıp içerisindeki miktar kalıbın yaklaşık yarısını dolduracağından büyük yayıcı aparatı ile kalıbın sarsma öncesi mümkün olduğunca düzleştirilmesi sağlanır. Daha sonra sarsma cihazı ile bir dakikada 60 kez olacak şekilde sarsma işlemine tabi tutulur Şekil 6.10’de kullanılan sarsma cihazı gösterilmektedir.





Şekil 6.10 Sarsma Cihazı.

İkinci kademedeki karıştırma kabındaki harcın kalan kısmı kalıp gözlerine yerleştirilir ve bu sefer küçük yayıcı aparatı ile yayma işlemi yapılır. Bu işlemlerde yayıcılar kalıp içerisindeki harca dik bir şekilde daldırılıp tüm yüzeyi boyunca, sarsma işlemi öncesi, düzgün bir yayma işlemi yapılması sağlanır. Sarsma cihazı ile ikinci defa aynı sürede 60 kez sarsma işlemi yapılır. Bu arada harcın tamamı kalıp boşluklarının hacmini aşacağından uygun bir düzleyici ile taşan kısımlar alınır ve düzgün bir kalıbın oluşması sağlanır. Şekil 6.11’de düzgün bir kalıp alınması için kullanılan düzleyici, büyük yayıcı, küçük yayıcı ve kaşık aparatı gösterilmektedir.



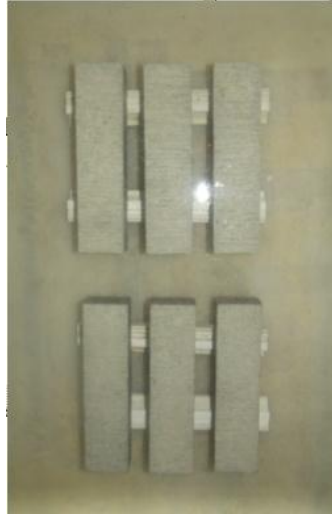
Şekil 6.11 Harç Düzleyici, Büyük, Küçük Yayıcılar ve Kaşık Aparatları.

DeneySEL çalışmalarda uçucu kül varlığının beton dayanımına etkisini belirlemek için uçucu küllü çimento karışımları hazırlanmıştır. Bu amaçla uçucu külün çimento yerine ikame edilmesi ile hazırlanan bileşimde kullanılan miktarlar Çizelge 6.8’ de belirtilmiştir.

Çizelge 6.8 Uçucu Kül İlaveli Harç Örneklerinin Bileşimi.

Beton Bileşenleri	Miktar (Kısım)	Miktar(gr.)
Su	0,5	225,0
Çimento	0,75	337,5
Uçucu Kül	0,25	112,5
Agrega	3	1350

Standart beton kalıbında hazırlanan kalıplar kalıptan çıkarılmadan önce 24 saat süre ile en az % 70 bağıl nem'e sahip bir ortamda bekletilmektedir. Daha sonra kalıp çıkarma cihazından çıkarılan kalıplar en az 0,5 cm su seviyesi altında olacak şekilde 20 ( $\pm 1$ ) °C'de 2-7 ve 28 gün süre ile bekletilmiştir. Kür işleminde beton örneklerin bekletildiği su normal çeşme suyudur. Su altında bekletilme işlemi Şekil 6.12' de gösterilmiştir.



Şekil 6.12 Beton Örneklerinin Su İçerisinde Bekletilmesi.

Bu kalıplar standartlara uygun şekilde yanal boyutlarından ikiye bölünerek 8x4x4 cm<sup>3</sup> lük bölünmüş kalıplar haline getirilmiştir. Daha sonra tek eksenli basınç dayanımı belirlenmiştir. Şekil 6.13' de tek eksenli basınç değerlerinin belirlenmesinde kullanılan pres yer almaktadır.



Şekil 6.13 Tek Eksenli Basınç Dayanımı Değerinin Belirlenmesinde Kullanılan Pres.

Yan yüzeylerinden ve ortadan  $4 \times 4 \times 1$  cm<sup>3</sup>'lük Şekil 6.14' de gösterilen kırma başlıkları arasına yerleştirilerek ortalanır.



Şekil 6.14 Kırma başlıkları ( $4 \times 4 \times 1$ ) cm<sup>3</sup>.

Şekil 6.15'de belirtilen tek eksenli basınç dayanımının belirlendiği preste basınca tabi tutulur ve kırılırlar. Kırıldıkları değer KN olarak basınç makinesinden okunur ve kırma başlıklarının ( $4 \times 4$ cm<sup>2</sup>) yüzey alanının bir fonksiyonu olarak Mpa birimine çevrilir. Elde edilen değerler uçucu külün çimento yerine katılmadan hazırlandığı beton örneklerin, tek eksenli basınç dayanımları ile oranlanarak, her bir uçucu kül örneğinin puzolanik aktivite değeri hesaplanır.



Şekil 6.15 Tek Eksenli Basınç Dayanımı Ölçme Cihazı.

Deneylerde kullanılan çimento, özellikle birinci tip portland çimentosudur. Bu amaçla 42,5 R portland çimentosu kullanılmıştır. Bu çimentonun özelliği, standartlara göre hazırlanan çimento kalıbının, bir günlük en az % 70 bağıl nemli ortamda bekletilmesinden sonra, 28 gün su altında bırakılması ve ardından ikiye bölünmüş kalıplarının tek eksenli basınç dayanımlarının minimum 42,5 Mpa olmasının beklendiği çimento olmasıdır. Birinci tip çimento, çimento içerisinde, kalker dışında sadece alçı taşının var olduğu çimentodur.

#### **Dayanım deneyleri sonuçları;**

Çizelge 6.9’da birinci tip portland çimentosundan ve uçucu kül katkısı olmadan hazırlanmış harçlardan elde edilen beton kalıplarının 2,7 ve 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı değerleri verilmiştir. Bu değerler, katkı olarak kullanılacak uçucu küllerin, puzolanik aktivitelerinin hesaplanması işlemlerinde kullanılacaklardır.

Çizelge 6.9 Sadece Çimento İle Hazırlanan Beton Örneklerinin Tek Eksenli Basınç Dayanımı Değerleri.

Tek Eksenli Basınç Dayanımı Değerleri		
2 Günlük (Mpa)	7 Günlük (Mpa)	28 Günlük (Mpa)
30,0	37,3	49,1

Uçucu küllerin puzolanik aktivite değerleri şu şekilde hesap edilir. Yapılan deneysel çalışmalarda tesisten alınan ve tasnif edilen uçucu kül örneklerinin çimento yerine % 25 oranında katılması ile standartlara uygun olarak elde edilen beton kalıbın tek eksenli basınç dayanımının uçucu kül ilavesi olmadan sadece çimento kullanımı ile aynı standartlara uygun olarak hazırlanan referans örneğinin tek eksenli basınç dayanımına oranı uçucu kül örneğinin puzolanik aktivite değeri olarak ifade edilir. Yapılan çalışmalarda Portland çimentosu referans beton örneğinin hazırlanmasında kullanıldığı için puzolanik aktivite indeksi 100 olarak kabul edilmiştir.

Alınan uçucu kül örneklerinin, % 25 oranında çimento yerine ikame edilerek hazırlanan yeni çimento karışımı örneklerinin isimlendirilmesi, kullanılan uçucu kül örneği isminin sonuna (ç) harfi verilerek yapılmıştır. Çalışmanın bu bölümünde, belirtilen oranlarda hazırlanan çimento karışımı örneklerinin boyut dağılımları arasındaki değişimin, çimento karışımları ile hazırlanan beton örneklerinin tek eksenli basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Aynı şekilde sadece çimentonun çimento karışımı olarak kullanılacağı referans örnek ile de gerekli karşılaştırmalar yapılmıştır. Örnek isimlendirme işleminde, hazırlanan çimento ve uçucu kül karışımı ile bu karışım ile hazırlanmış beton örneklerinin ismi aynı kabul edilmiştir. Bütün deneylerde gerek (% 25) olan çimento ve uçucu kül oranı, gerekse de agrega ve su miktarları sabit tutulmuştur. Hazırlanmış çimento ve uçucu kül karışımı olan bağlayıcı kısmın boyut dağılımı, bu bağlayıcı kısım ile hazırlanmış beton örneklerinin 2,7 ve 28 günlük su altında bekletilme sürelerine göre tek eksenli basınç dayanımı ve aynı işlemlerden geçen referans beton örneğinin tek eksenli basınç dayanımına bağlı bir fonksiyonu olan çimento karışımlarının puzolanik aktivite değerleri Çizelge 6.10' da gösterilmektedir.

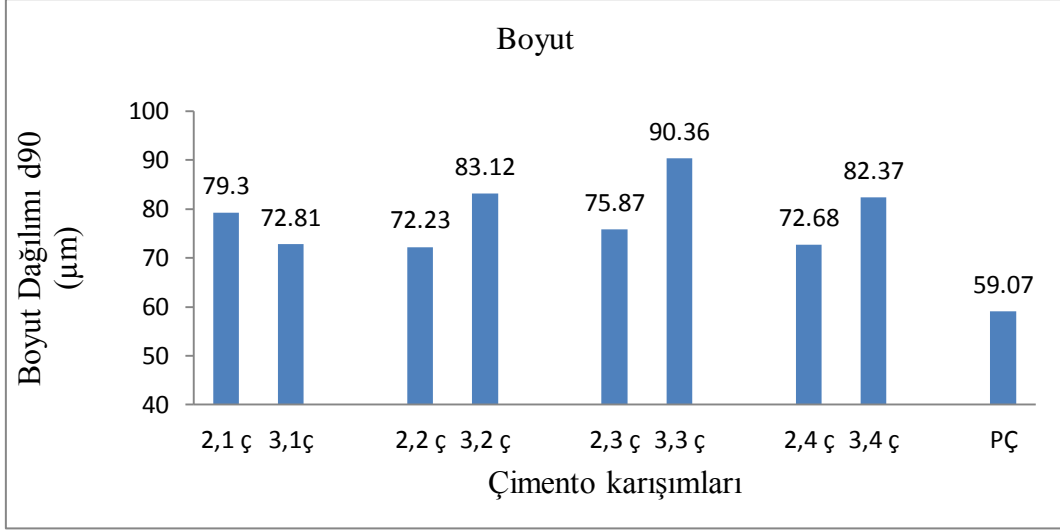
Çizelge 6.10 Çimento Karışımlarının Boyut Dağılımı ve Beton Dayanımı İlişkileri.

Kür Süresi		2 Günlük		7 Günlük		28 Günlük	
Örnekler	Çimento Karışımı	Beton Örneği	Çimento Karışımı	Beton Örneği	Çimento Karışımı	Beton Örneği	Çimento Karışımı
	D90 (µm)	Basınç Dayanımı (Mpa)	Puzolanik Aktivite	Basınç Dayanımı (Mpa)	Puzolanik Aktivite	Basınç Dayanımı (Mpa)	Puzolanik Aktivite
<b>2. ÜNİTE</b>							
2.1ç	79,30	22,7	75,7	28,8	77,2	36,6	74,5
2.2ç	72,23	22,5	75,0	29,5	79,0	37,3	76,0
2.3ç	75,87	23,3	77,7	30,0	80,4	38,3	78,0
2.4ç	72,68	22,7	75,7	29,7	75,7	38,4	78,2
<b>3.ÜNİTE</b>							
3.1ç	72,81	22,5	75,0	26,7	71,6	37,0	75,4
3.2ç	83,12	22,3	74,3	29,3	78,6	39,0	79,4
3.3ç	90,36	21,4	71,3	28,4	76,1	38,5	78,4
3.4ç	82,37	21,9	73,0	28,9	77,5	38,2	77,8
<b>SİLOLAR</b>							
S1ç	76,31	22,1	73,7	30,8	82,6	38,4	78,2
S2ç	81,63	22,8	76,0	29,3	77,9	38,6	78,6
S3ç	74,85	22,5	75,0	26,7	71,6	37,0	75,4
<b>ÇİMENTO</b>							
PÇ	59,07	<b>30,0</b>	100,00	<b>37,3</b>	100,00	<b>49,1</b>	100,00

Puzolanik aktivite değerleri aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır.

$$\text{Puzolanik Aktivite} = \frac{\text{Uçucu Kül Katkılı Betonun Tek Eksenli Basınç Dayanımı}}{\text{Referans Çimento Karışımı Betonun Tek Eksenli Basınç Dayanımı}}$$

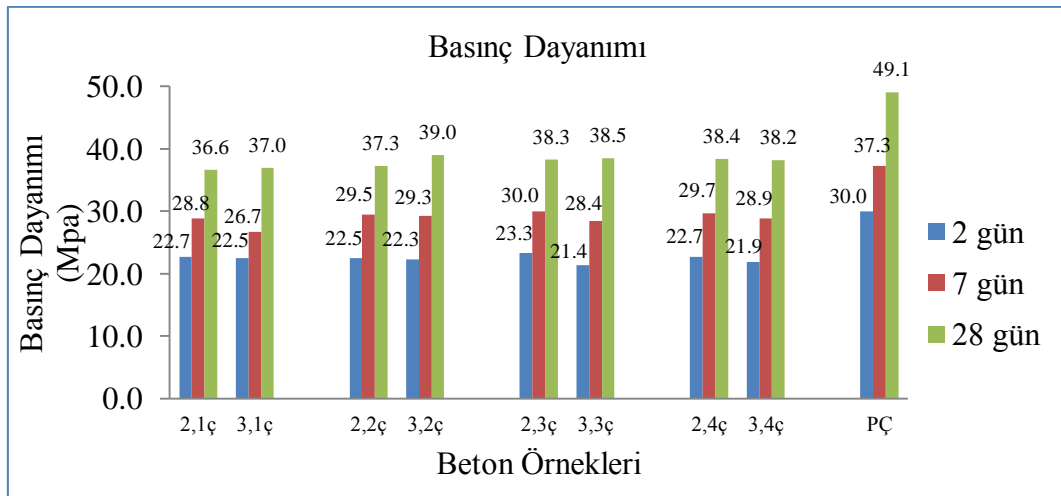
2 ve 3 ünitenin ESP sıralarından toplanan uçucu küller ile ikame edilen çimento karışımlarının boyut dağılımları öncelikle her iki ünitenin aynı toz toplama sıraları ile eşleştirilmiştir. Dolaylı olarak da her iki ünitenin (ESP) toz toplama sistemleri Şekil 6.16' da karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.16 ESP Sıraları Uçucu Kül İkameli Çimento ve Portland Çimentosu Karışımlarının Boyut Dağılımları.

Şekil 6.16' İkinci ünite uçucu külleri ile ikame edilmiş çimento karışımlarının d90 değerleri 72,23 ile 79,30 µm arasında değişmektedir.

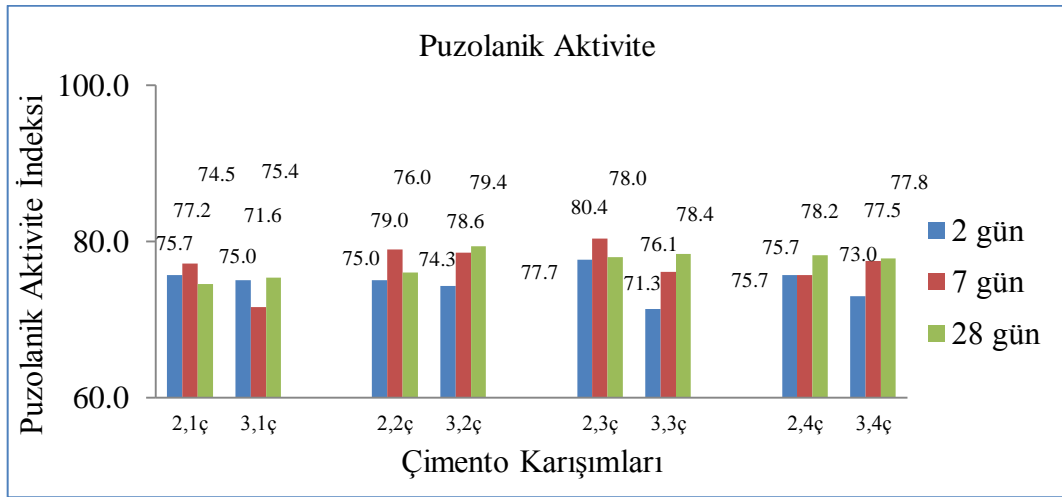
Üçüncü ünite uçucu külleri ile ikame edilmiş çimento karışımlarının d90 değerleri 72,81 ile 90,36 µm arasında değişmektedir. Birinci uçucu kül toplama sırası dışında diğer ESP toz tutma sıraları için üçüncü ünite ESP sıralarından toplanan uçucu küller daha iri boyutludur. Buna karşılık referans çimento karışımı olan PÇ d90 değeri 59,07' µm'dir. Şekil 6.17' de ise aynı çimento karışımları ile hazırlanan beton örneklerinin sırası ile 2,7 ve 28 günlük tek eksenli basınç dayanımları görülmektedir.



Şekil 6.17 Uçucu Küller ile Hazırlanan Beton Örneklerinin Tek Eksenli Basınç Dayanımları.

Şekil 6.17’ de ikinci ünite ESP sıralarından toplanan uçucu küller ile hazırlanan beton örneklerinin tek eksenli basınç dayanımlarının 2 günlük su altında bekletilme süresi (kür süresi) için 22,5 ile 23,3 Mpa, 7 günlük basınç dayanımlarının 28,8 ile 30,0 Mpa ve 28 günlük basınç dayanımlarının 36,6 ile 38,4 Mpa arasında değiştiği görülmektedir.

Üçüncü ünite uçucu külleri ile hazırlanan beton örneklerinin tek eksenli basınç dayanımı değerleri ise 2 günlük su altında bekletilme süresi (kür süresi) için 21,4 ile 22,5 Mpa, 7 günlük basınç dayanımlarının ile 26,7 ile 29,3 Mpa ve 28 günlük basınç dayanımlarının 37,0 ile 39,0 Mpa arasında değiştiği görülmektedir. Şekil 6.18’ de aynı beton örneklerinin aynı kür süreleri için tek eksenli basınç dayanımlarının bir fonksiyonu olan puzolanik aktivite indeksleri belirtilmiştir.



Şekil 6.18 Uçucu Kül İkameli Çimento Karışımlarının 2,7 ve 28 Günlük Puzolanik Aktivite İndeksleri.

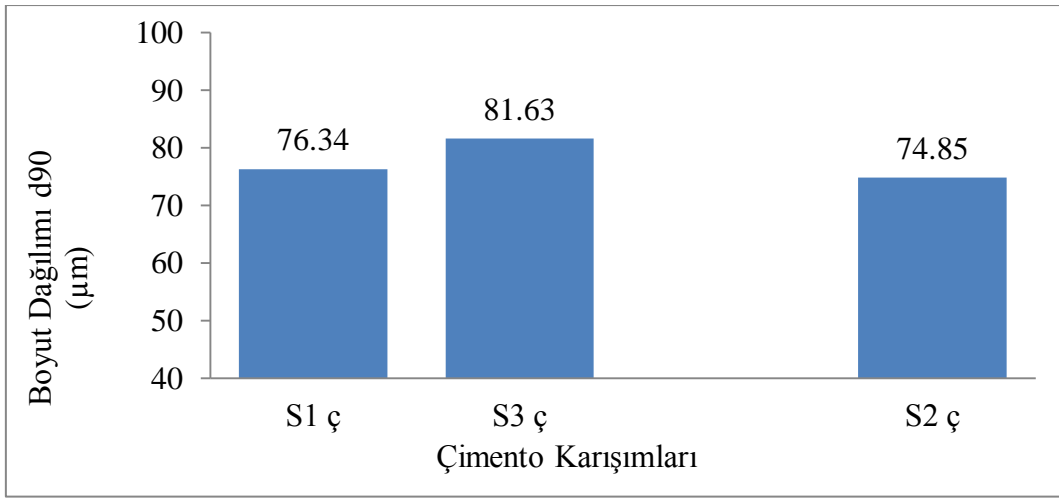
Şekil 6.18’ de ikinci ünite ESP sıralarından toplanan uçucu küller ile hazırlanan çimento karışımlarının puzolanik aktivite indeksleri 2 günlük (kür süresi) puzolanik aktivite indeksi 75,0 ile 77,7, 7 günlük puzolanik aktivite indeksi 75,7 ile 80,4 ve 28 günlük puzolanik aktivite indeksi 74,5 ile 78,2 arasında değişmiştir.

Üçüncü ünite ESP sisteminden elde edilen uçucu küller ile ikame edilen çimento karışımlarının 2 günlük puzolanik aktivite indeksleri 71,3 ile 75,0 Mpa arasında değişmektedir. 7 günlük puzolanik aktivite indeksleri 71,6 ile 78,6 Mpa arasında değişmektedir. 28 günlük puzolanik aktivite indeksi 75,4 ile 79,4 arasında değişmiştir. Üçüncü ünite uçucu külleri ile hazırlanan beton örneklerinin 2 ve 7 günlük basınç



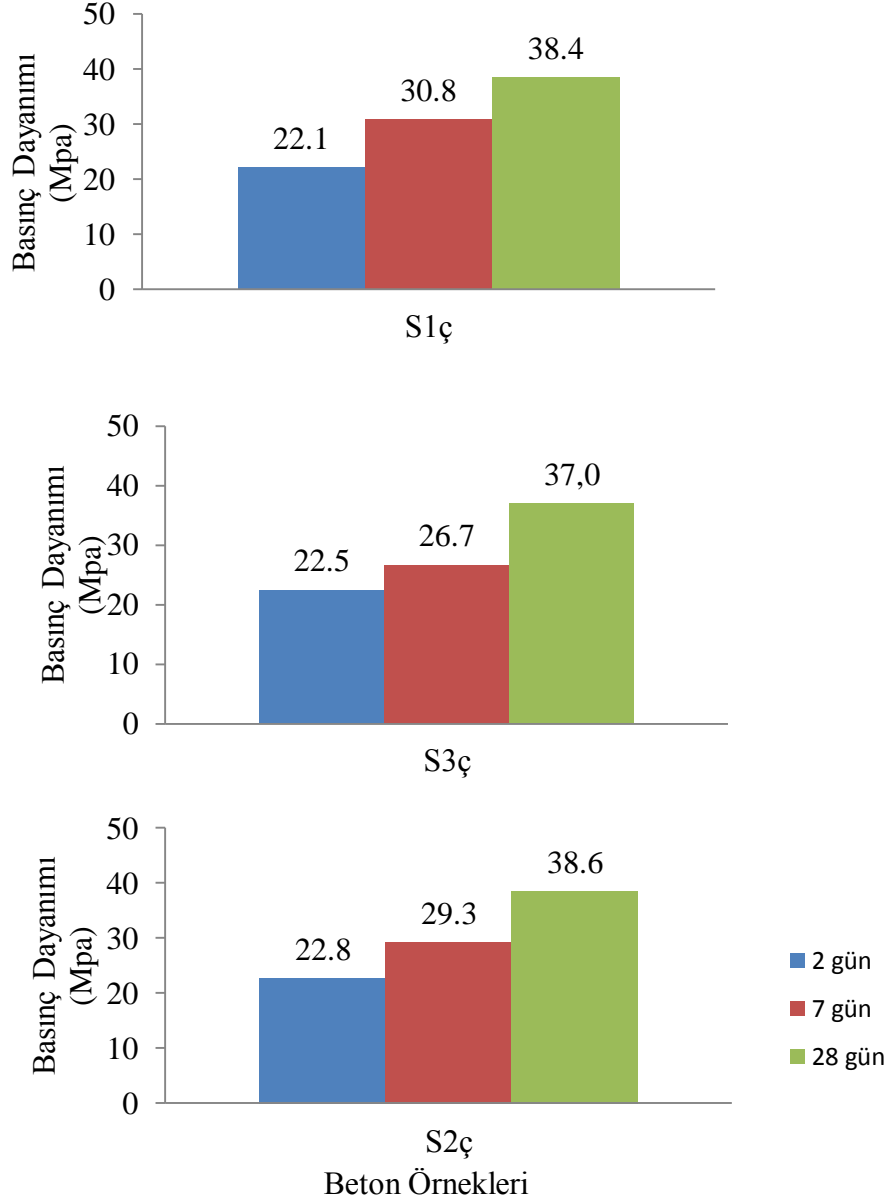
dayanımlarının ikinci ünite uçucu külleri ile hazırlanan beton örneklerine göre daha düşük olduğu fakat 28 günlük basınç dayanımı ve buna bağlı olarak puzolanik aktivitesinin yüksek olduğu görülmektedir.

Silolardan elde edilen uçucu küller ile ikame edilmiş çimento karışımlarının boyut dağılımı değerleri, Şekil 6.19' da belirtilmiştir. Silo 1 ve Silo 3' de toplanan uçucu küller, her iki ünitenin 1. ve 2. sırasından geldiği için bu iki sıranın alt alta karşılaştırılması, genel deneysel çalışmalar kurgusu ile uyuşma göstermektedir.



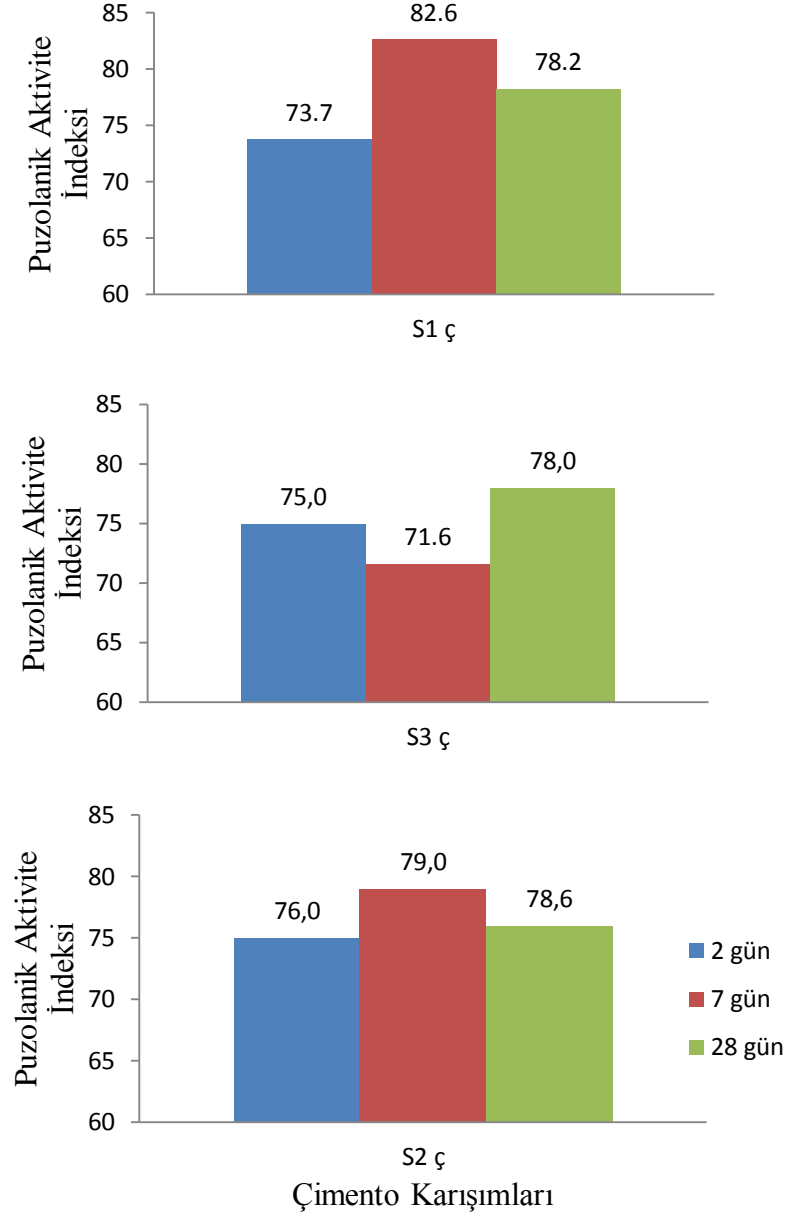
Şekil 6.19 Silolarda Toplanan Uçucu Küllerin Boyut Dağılımları.

Şekil 6.19' da Silolarda toplanan uçucu küller ile ikame edilmiş çimento karışımlarının d90 değerleri Silo 1 uçucu külleri ile ikame edilen çimento karışımları için 76,34 µm, Silo 3 uçucu külleri ile ikame edilen çimento karışımları için 81,63 µm ve Silo 2 uçucu külleri ile hazırlanan karışımlar için 74,85µm arasında değişmiştir. Şekil 6.20' de ise aynı uçucu kül örnekleri ile hazırlanan beton örneklerinin sırası ile 2,7 ve 28 günlük tek eksenli basınç dayanımları görülmektedir.



Şekil 6.20 Silo Uçucu Külleri ile Hazırlanan Beton Örneklerinin 2,7 ve 28 Günlük Basma Dayanımı Değerleri.

Şekil 6.20' de Silolarda toplanan uçucu küller ile hazırlanan beton örneklerinin tek eksenli basma dayanımları, 2 günlük su altında bekletilme süresi (kür süresi) Silo 1, Silo 3 ve Silo 2 için sırasıyla 22,1, 22,5 ve 22,8 Mpa, 7 günlük basma dayanımlarının 30,8, 26,7 ile 29,3 Mpa ve 28 günlük basma dayanımlarının 38,4, 37,0 ile 38,6 Mpa arasında değiştiği görülmektedir. Şekil 6.21' de silo uçucu külleri ile hazırlanmış çimento karışımları ve referans çimento karışımı örneklerinin puzolanik aktivite indeksleri belirtilmiştir.



Şekil 6.21 Silo Uçucu Külleri ile ikame edilen Çimento Karışımlarının 2,7 ve 28 Günlük Pozolanik Aktivite İndeksleri.

Şekil 6.21’ de Silolarda toplanan uçucu küller ile hazırlanan çimento karışımlarının pozolanik aktivite indeksleri, 2 gün için Silo 1, Silo 3 ve Silo 2’ de toplanan uçucu küller için sırasıyla 73,7, 75,0 ve 76,0 arasında değişmiştir, 7 günlük pozolanik aktivite indeksleri 82,6,71,6 ve 79,0 28 günlük pozolanik aktivite indeksleri ise aynı sıra için 78,2, 78,0 ve 78,6 arasında değişmiştir.

## BÖLÜM 7

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan çalışma, tezin amacında da belirtildiği gibi Eren Enerji A.Ş' ne bağlı termik santrali uçucu küllerinin, beton yapımındaki değerlendirilme şartlarının incelenmesidir. Yapılan ilk tespit, deneysel çalışmalar bölümünde uçucu küllerin kızdırma kaybı değerleri ile boyutları arasındaki ilişkiler göz önüne alındığında, uçucu küllerin d90 boyut değerlerinin kızdırma kaybı değerleri ile ters orantılı olmasıdır. Bu durum ikinci ünite, üçüncü ünite ve silo uçucu külleri için ayrı olarak belirtilmiştir. Araştırılan diğer bir olgu ise, tüm uçucu kül örneklerinin çimento ikamesi olarak kullanıldığında hazırlanacak beton örneklerinin dayanımlarının, bu işlemde nasıl etkileneceğidir. Bu amaçla uçucu küllerin çimento ile ikame edilmesi sonucu oluşan yeni çimento karışımlarının boyut dağılımı ile bu karışımlar ile hazırlanan beton örneklerinin farklı kür süreleri sonundaki (2, 7 ve 28 gün) tek eksenli basınç dayanımları arasındaki ilişki incelenmiştir. İkinci ünite uçucu külleri için yapılan incelemede üçüncü ünite uçucu küllerine göre belirli bir inceliğin varlığı görülmektedir.

Şekil 6.16' İkinci Ünite ESP toz tutma sıralarında toplanan uçucu küller ile ikame edilmiş çimento karışımlarının d90 değerleri ESP sıralarına göre 79,30, 72,23, 75,87 ve 72,68  $\mu\text{m}$  arasında değişmektedir. Üçüncü ünite uçucu külleri ile ikame edilmiş çimento karışımlarının d90 değerleri 72,81, 83,12, 90,36 ve 82,37  $\mu\text{m}$  arasında değişmektedir. Birinci uçucu kül toplama sırası dışında diğer ESP toz tutma sıraları için, üçüncü ünite ESP sıralarından toplanan uçucu küller daha iri boyutludur. Buna karşılık referans çimento karışımı olan PÇ d90 değeri 59,07'  $\mu\text{m}$ 'dir.

Her iki ünite uçucu külleri ile hazırlanan çimento karışımları ve % 100 Portland çimentosu ile hazırlanan referans çimento karışımı, gerek kendi içinde boyut dağılımının tespitinde, gerekse de hazırlanan beton örneklerinin tek eksenli basınç dayanımlarının tespitinde karşılaştırılmıştır.

Uçucu küllerin boyut özelliklerinin çimento karışımları içerisindeki en önemli etkisi % 100 çimento ile hazırlanan karışım ile elde edilen referans beton örneğinin tek eksenli basınç dayanımlarının incelenmesi ile görülebilmektedir. Uçucu kül ikamesi ile oluşacak yeni karışımın boyutu, referans çimento karışımının ortalama tane boyutunu belirgin bir şekilde arttırmaktadır. Örneğin 59,07 µm olan referans portland çimentosu d90 değeri, ikinci ünite birinci sırasından elde edilen uçucu külün % 25 oranında ikamesi ile 79,30 µm boyutuna ulaşmıştır. Bu boyut artışı referans çimento karışımının tek eksenli basınç dayanımını % 70-75 değerlerine düşürmektedir. Bu değerler, yeni oluşan çimento karışımlarının puzolanik aktivite indekslerine karşılık gelmektedirler.

Şekil 6.17' de ise aynı çimento karışımları ile hazırlanan beton örneklerinin, sırası ile 2,7 ve 28 günlük tek eksenli basınç dayanımları görülmektedir. Buna göre, ikinci ünite ESP toz tutma sıralarında toplanan uçucu küller ile hazırlanan beton örneklerinin, 2 günlük su altında bekletilme süresi sonunda, ESP sıralarına göre tek eksenli basınç dayanımı değerlerinin 22,7, 22,5, 23,3 ve 22,7 Mpa arasında değiştiği görülmektedir. Üçüncü ünite ESP toz tutma sıralarında toplanan uçucu küller ile hazırlanan beton örneklerinin 2 günlük tek eksenli basınç dayanımı değerlerinin ise 22,5, 22,3, 21,4 ve 21,9 Mpa değerlerinde değiştiği hesaplanmıştır. İki günlük basınç dayanımlarına göre ikinci ünite uçucu külleri ile hazırlanan beton örneklerinin ortalama 0,8 Mpa daha dayanıklı olduğu saptanmıştır.

İkinci Ünitenin ESP uçucu külleri ile hazırlanmış beton örneklerinin, 7 günlük basınç dayanımı değerleri ESP sıralarına göre 28,8, 29,5, 30,0 ve 29,7 Mpa' dır. Üçüncü ünite uçucu külleri için beton örneklerinin tek eksenli basınç dayanımları ölçüldüğünde, sırasıyla 26,7, 29,3, 28,4 ve 28,9 Mpa değerleri bulunmuştur. İkinci ünite ESP uçucu külleri ile hazırlanan beton örnekleri, 7 günlük basınç dayanımı değerlerine göre, üçüncü ünite ESP uçucu külleri ile hazırlanmış beton örneklerine göre ortalama 1,2 Mpa daha dayanıklıdır.

28 günlük dayanımlara dikkat edildiğinde ise, farklı bir durum oluşmuştur. İkinci Ünitenin ESP uçucu külleri ile hazırlanmış beton örneklerinin basınç dayanımları 36,6, 37,3, 38,3 ve 38,4 Mpa olduğu görülmektedir. Buna karşılık, üçüncü ünite ESP'si uçucu külleri ile hazırlanmış beton örneklerinin basınç dayanımlarının 37,0, 39,0, 38,5 ve 38,2 Mpa olduğu görülmüştür. Üçüncü ünite uçucu külleri ile hazırlanan beton örneklerinin dayanımları, ikinci Ünite uçucu külleri ile hazırlanmış beton örneklerinin basınç dayanımlarına göre ortalama 0,5 Mpa daha fazladır. Kısa kür sürelerine göre hazırlanmış beton örneklerinin tersine, 28 günlük

dayanımlar için, üçüncü ünite uçucu küllerinin ikame edildiği çimentonun basınç dayanımına etkisi daha fazla olmuştur. 2 ve 7 günlük basınç dayanımlarında ikinci ünite uçucu külleri ile hazırlanan beton örneklerinin daha dayanıklı olması, bu üniteden toplanan uçucu küllerin üçüncü üniteden toplanan uçucu küllere göre ince olması ile ilişkilendirilebilir. Fakat bu fark 28 günlük basınç dayanımlarında, uçucu külün etkisini zamana bağlı olarak daha fazla göstermesi ile kapanmıştır.

Uçucu kül ikamesi ile hazırlanan çimento karışımlarının puzolanik aktivite değerleri de, hazırlanan beton örneklerinin basınç dayanımı değerlerinin ile referans çimento ile hazırlanan beton örneklerinin basınç dayanımlarına oranlanarak bulunmuşlardır. Üçüncü ünite uçucu külleri ile ikame edilerek hazırlanan çimento karışımlarının puzolanik aktivite değerleri, basınç dayanımlarının bir fonksiyonu olduğu için benzer bir seyir izlemiştir.

Şekil 6.18' de ikinci ünite ESP sıralarından toplanan uçucu küller ile hazırlanan çimento karışımlarının 2 günlük puzolanik aktivite indeksleri, ESP sıralarına göre 75,7, 75,0, 77,7 ve 75,7 değerleri arasında değişmiştir. Üçüncü ünite uçucu külleri ile ikame edilmiş çimento karışımlarında ise 75,0, 74,3, 71,3 ve 73,0 değerlerindedir.

7 günlük puzolanik aktivite indeksi ikinci ünite uçucu külleri ile ikame edilmiş çimento karışımları için 77,2, 79,0, 80,4 ve 75,7 değerleri arasındadır. Üçüncü ünite uçucu külleri ile ikame edilmiş çimento karışımlarında ise 71,6, 78,6, 76,1 ve 77,5 değerlerindedir.

28 günlük puzolanik aktivite indeksi, ikinci ünite uçucu külleri ile ikame edilmiş çimento karışımları için 74,5, 76,0, 78,0 ve 78,2 değerleri arasında iken. Üçüncü ünite uçucu külleri ile ikame edilmiş çimento karışımlarında ise 75,4, 79,4, 78,4 ve 77,8 değerlerindedir. Basınç dayanımları değerlerinin karşılaştırılmasındaki benzerlik burada da gösterilmiştir. Buna göre üçüncü ünite uçucu külleri ile ikame edilen çimento karışımlarının puzolanik aktivite değerleri, 28 günlük değerlerde belirli bir kararlılığa ulaşmıştır. Daha kısa kür süreleri için elde edilen puzolanik aktivite değerlerinde daha ince boyutlu ikinci ünite uçucu külleri daha kararlı bir değişim göstermiştir.

Uçucu küller, eğer mevcut koşullarda toplandıkları boyut dağılımlarının altında elde edilebilirlerse, çimento karışımlarının ortalama tane boyutlarını daha az etkileyeceklerdir. Bu durumda % 25' in üzerinde uçucu kül ikameleri ile elde edilen çimento karışımları da yeterli

tek eksenli basınç dayanımlarını gösterebileceklerdir. Dolayısı ile standartlara uygun puzolanik aktivite indeksleri daha az maliyetle elde edilebilecektir.

Bunun için ilave, boyuta göre kuru ayırma yöntemleri veya uçucu küllerin küresel şekillerini çok fazla etkilemeyecek ufalama yöntemleri önerilebilir.

ESP ünitelerinden elde edilen uçucu küller, ESP sıralarına göre farklı boyut dağılımında ve miktarlardadır. Termik santralin ESP sistemlerinde ilk sırada toplanan uçucu küller Çizelge 6.2' de belirtildiği gibi toplanan uçucu küllerin yaklaşık % 85'ni oluşturmaktadırlar. Bu da uçucu küllerin, genel olarak özelliklerinin ilk sırada toplanan uçucu küllerin özellikleri paralelinde seyredeceği anlamını taşımaktadır. Bu yüzden ESP sisteminin ilk sırasında toplanan uçucu küllerin araştırılmasının önemine dikkat çekmek gerekmektedir.

Uçucu küllerin ani soğumasının, uçucu küllerin puzolanik özelliklerine katkısı, bu tez çalışmasında kuvvet ile vurgulanmıştır. Bu ani soğuma sonucu uçucu kül taneleri camsı bir özellik kazanmaktadır. Camsı özellik puzolanik özellik için çok önemlidir. Camsı özelliği fazla olan uçucu küller, çimento içerisindeki ikincil reaksiyonlar ile fazladan oluşan  $\text{Ca(OH)}_2$  ile birleşerek ilave bağlayıcı (C-S-H ve C-A-H) bileşiklerini oluşturabilir ve kullanıldığı betona ilave dayanım özelliği kazandırabilirler. Ani soğuma şartlarının değiştirilmesinin de, oluşacak uçucu küller üzerindeki etkileri incelemeye değer bir konudur.

## KAYNAKLAR

- Aruntaş H Y** (2006) Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21 (1): 193-203.
- Balkema A A** (1992) *Fly Ash As Addition To Concrete*, Rotterdam/Brookfield, pp. 12-16.
- Görhan G, Kahraman E, Baspınar S ve Demir İ** (2008) Uçucu kül bölüm I: oluşumu, sınıflandırılması ve kullanım alanları, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2 (2): 85-94.
- Görhan G, Kahraman E, Baspınar S ve Demir İ** (2009) Uçucu kül bölüm II: kimyasal, mineralojik ve morfolojik özellikler, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5 (2):33-42.
- Güler G, Güler E, İpekoğlu Ü ve Mordoğan H** (2005) Uçucu küllerin kullanım alanları, *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı*, IMCET, s. 419-423.
- TS EN 196-1** (2009) *Çimento Deney Metotları-Bölüm 1: Dayanım Tayini*, Türk Standartları Ankara.
- URL-1** (2013) [http://tr.wikipedia.org/wiki/Termik\\_santral](http://tr.wikipedia.org/wiki/Termik_santral) Termik Santraller, 12 Şubat 2013.
- URL-2** (2013) <http://img6.mynet.com/yurthaber2/2012/07/zonguldak/eren-enerji-ilk-50de-yby.jpg> Eren Enerji, 7 Ekim 2013.
- URL-3** (2013) <http://www.google.com.tr/scient>, Yakıtlar ve Yanma, 3 Haziran 2013.
- URL-4** (2013) <http://www.nenedir.net/nedir/madencilik/4932-akiskan-yatakli-yakma-sistemi-nedir.html>, Akışkan Yataklı Yakma Sistemi, 12 Haziran 2013.
- URL-5** (2013) <http://www.ekton.com.tr/tabani%20kulu-bottom%20ash-sayfa.html>, Taban Külü, 09 Haziran 2013.
- URL-6** (2013) [http://kisi.deu.edu.tr/kamile.tosun/Yapi\\_Malzemesi\\_II-.ders.pdf](http://kisi.deu.edu.tr/kamile.tosun/Yapi_Malzemesi_II-.ders.pdf), Bağlayıcı Maddeler, 13 Nisan 2013.
- URL-7** (2013) <http://eyupyaylaci.com/ucucu-kul/> Uçucu Küllerin Tanımı ve Sınıflandırılması, 10 Nisan 2013.



## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- URL-8** (2010) [http://www.ntpc.co.in/images/content/environment/books/2010-11/Fly% 20 Ash% 20for% 20Cement% 20Concrete.pdf](http://www.ntpc.co.in/images/content/environment/books/2010-11/Fly%20Ash%20for%20Cement%20Concrete.pdf) Çimento İçinde Oluşan İkincil Reaksiyonlar, 15 Nisan 2013.
- URL-9** (1993) <http://www.ekoloji.com.tr/resimler/8-9.pdf> Toz Tutma Sistemleri, 28 Ağustos 2013.
- URL-10** (1998) [http://yosemite.epa.gov/oaqps/EOGtrain.nsf/66004e7985/\\$FILE/12bles1.pdf](http://yosemite.epa.gov/oaqps/EOGtrain.nsf/66004e7985/$FILE/12bles1.pdf) Electrostatic Precipitator Operation, 28 Ağustos 2013.
- URL-11** (1994) <http://www.hitachipt.com/products/energy/dustcollection.html> Principles of Elektostatic Precipitator, 30 Ağustos 2013.
- URL-12** (2008) <https://docs.google.com/viewer> AB Müktesabatına Uyum Sürecinde Etki Analizi Kapasitesini Güçlendirerek Çevre Başlığında Uygulama ve Farkındalık Yaratma Projesi, 28 Ağustos 2013.
- URL-13** (2013) <https://www.google.com.tr/search?q=electrostatic+precipitator&client> Elektostatic Precipitator, 28 Ağustos 2013.
- URL-14** (2013) <http://www.pullukcukomur.com.tr/komurunsiniflandirilmasi.html> Kömürün Sınıflandırılması, 12 Eylül 2013.
- Volkan S** (2006) Afşin – *Elbistan Termik Santrali Uçucu Küllerinden Yanmamış Karbonun Geri Kazanımı*, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, s.81.
- Yiğit E, Toroğlu İ, Kızgut S, Çuhadaroğlu D, Çolak K, Ünlü T, Kaymakçı E, Pilevneli C.C, Bacak L.K, Özarlan A, Geniş M, Bilir E ve Keskin Y** (2000) *Çatalağzı Termik Santrali Küllerinden Yapı Malzemesi Üretimi ve Zonguldak Çevresinde Kullanım Olanakları*, Nihai Rapor, Proje Kod No 97K122470, Zonguldak, s. 1-25.

## BİBLİYOGRAFYA

- Baradan B** (1984) *Uçucu Küllü Yapı Blok Elemanı Üretimi Ön Çalışmaları ve Fizibilite Etüdü Nihai Raporu*, DEÜ Müh. Mim. Fak. Yayını, İzmir, Türkiye.
- Egemen E** (1993) *Release of Metal Ions From Fly Ash Originating From Coal-Fired Thermal Power Plants*, MSc Thesis in Environmental Engineering, ODTÜ, pp.151.
- EİE İdaresi Genel Müdürlüğü** (1979) Türkiye uçucu küllerinin özellikleri ve kullanım olanakları, *Enerji ve Çevre Sempozyumu*, Mersin.
- Erdoğan T Y** (1993) Atık hammaddelerin inşaat endüstrisinde kullanımı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, s. 1-8.
- Ferraiola G, Zilli M and Converti A J** (1991) Fly ash disposal and utilization, *Journal of Chemical Thecnology and Biotechnology*, 47: 282-305.
- Furr A K, Bache C A, Gutenmann W H and Lisk D J** (1975) Multielement residues in tissues of guinea pigs fed sweet clover grown on fly ash, *Archives of Environmental Health*, 30: 244-248.
- Morrison R E** (1977) A review of fly ash specifications, symposium on fly ash utilization, Pittsburg, USA, pp. 24-31.
- Tokyay M ve Çetin B** (1991) Preslenmiş ve buhar kürü uygulanmış uçucu kül-kireç tuğlalarının dayanım ve su emme özellikleri, *İMO Teknik Dergi*, 2 (4): 385-394.
- Tokyay M, Ramyar K, Turanlı L, Erdoğan T ve Yeğınobalı A** (1990) *Termik Santral Küllerinin Çimento ve Beton katkı Maddesi Olarak Kullanılma Olanaklarının Etüd ve Envanteri*, T.C. Başbakanlık ve Çevre Müsteşarlığı Proje Raporu.
- Vassilev S V and Bache C A** (1994) Trace elements in solid waste products from coal burning at some bulgarian thermoelectric power stations.



## **ÖZGEÇMİŞ**

Barış AKKAYA, 1977 yılında Aydın'da doğdu. İlk öğreniminin ilk iki yılını Aydın'da, diğer ilk ve orta öğreniminin kalan kısmını da İzmir'de tamamlamıştır. 1995 yılında İzmir Dokuz Eylül Üniversitesinde Maden mühendisliği eğitimine başlamış ve 1999 yılında bu öğrenimini tamamlamıştır. 2000 yılında aynı programda DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsünde yüksek lisans programına başlamış fakat bazı nedenlerden dolayı ilgili programı bitirememiştir. 2002 yılında askerlik görevine başlamış ve bu görevi 2003 yılında tamamlamıştır. Yaklaşık bir yıl boyunca özel sektörde mermer fabrikaları ve açık ocak işletmeciliklerinde görev almıştır. Özel sektördeki çalışmaları daha sonraki yıllarda ticari faaliyetler şeklinde devam etmiş ve 2009 yılında (o zamanki adı ile Zonguldak Karaelmas Üniversitesi) Bülent Ecevit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak göreve başlamıştır ve bu göreve halen devam etmektedir.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres : Çaybaşı Mah No: 61 Kat: 4,D: 19  
İncivez/ZONGULDAK

Tel : (535) 707 99 03

E-posta : barisakkaya2010@gmail.com