



**Teknik Not  
(Technical Note)**

## Uçucu Kül Bölüm II: Kimyasal, Mineralojik ve Morfolojik Özellikler

**Gökhan GÖRHAN\***, **Erhan KAHRAMAN\***, **M. Serhat BAŞPINAR\*\***, **İsmail DEMİR\***

\*Afyon Kocatepe Üniversitesi. Tek. Eğt. Fak. Yapı Eğt. Böl. Afyonkarahisar/TÜRKİYE

\*\*Afyon Kocatepe Üniversitesi. Tek. Eğt. Fak. Metal Eğt. Böl. Afyonkarahisar/TÜRKİYE

idemir@aku.edu.tr

### Özet

Toz kömürün termik santrallerde yakılması sırasında (yaklaşık 1200 °C'de) baca gazları ile sürüklenen ve hızlı bir biçimde soğurken elektrofiltreler yardımıyla bacalarda tutulan ve genellikle boyutları 100 µm'den daha küçük inorganik uçucu kül tanecikleri ortaya çıkmaktadır. Uçucu külün üretimi ve karakteristikleri; santral tipi, işletim biçimi, yakılan kömürün cinsi, yanma biçimi, kömür kompozisyonu ve yakma sistemine göre değişmektedir. Uçucu külün özellikleri aynı santralde bile gün içerisinde yapılan yüklemelerden dolayı değişebilmektedir. Uçucu kül, son yıllarda yapılan çok sayıda araştırmayla çimento ve beton üretiminde yaygın olarak değerlendirilen, puzolanik özellikleri olan bir maddedir. Uygun oranlarda ve doğru kullanımı halinde betonun birçok özelliğini olumlu yönde etkilediği ve özellikle kimyasal etkilere dayanıklılığını arttırdığı bilinmektedir. Uçucu küllerin boyutları genellikle 0,5 ile 200 µm arasında değişen, camsı ve çoğunlukla küresel karakterdeki parçacıklardır. Özgül yüzeyleri ortalama 2800 – 3800 cm<sup>2</sup>/gr dolayındadır. Uçucu külün yoğunluğu; inceliğine ve mineralojik yapısına bağlıdır. İçi dolu küresel tanelerden meydana gelen uçucu küllerin mutlak yoğunluğu ortalama 2,4 gr/cm<sup>3</sup>'dür. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, uçucu külün puzolanik reaksiyonunu hızlandırmak için farklı yaklaşımlar kullanılmış ve bu yaklaşımlarla uçucu kül aktifleştirilerek yapı malzemelerinde önemli bir katkı malzemesi olarak kullanımının yolu açılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Uçucu kül, Yapı Malzemesi, Kimyasal Özellik, Mineralojik Özellik, Morfolojik Özellik.

## Fly Ash Part II: The properties of Chemical, Mineralogy and Morphology

### Abstract

Fly ash is inorganic waste product which is generated during the firing of (nearly at 1200 °C) powder coal particles in thermal power stations and collected from chimney by electrostatic filters during cooling period. They have particle size usually less than 100 µm. Characteristics of the fly ash depends on several factor; type of power plant, coal type, burning process, chemical composition of the coal and burning system. Properties of the fly ash may even change during the same production day due to the loading conditions. In recent years, fly ash find an important application fields especially in cement and concrete manufacturing as a pozzolanic material. When it was used in proper ratios and environments, it improves several properties of the concrete and especially durability against chemicals. Fly ash usually have particle size between 0,5 to 200 µm and spherical shape. Their mean specific surface areas are between 2800 and 3800 cm<sup>2</sup>/gr. Density of the fly ash depends on the fineness and mineralogical structure. Density of the solid spherical particles of fly ash is around 2,4 gr/cm<sup>3</sup>. Several different approach is exist to increase the pozzolanic reaction of fly ash in recent years. These efforts made fly ash more active and increase the usage in construction material industry.

**Key Words:** Fly ash, construction material, chemical properties, mineralogical properties, morphological properties

*Bu makaleye atf yapmak için*

Görhan G., Kahraman E., Başpınar M.S, Demir İ. " Uçucu Kül Bölüm II: Kimyasal, Mineralojik ve Morfolojik Özellikler" Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi 2009, 5(2) 33-42

*How to cite this article*

Görhan G., Kahraman E., Başpınar M.S, Demir İ., " Fly Ash Part II: The properties of Chemical, Mineralogy and Morphological" Electronic Journal of Construction Technologies, 2009, 5 (2) 33-42

\* İletişim, E-mail: [idemir@aku.edu.tr](mailto:idemir@aku.edu.tr), (İsmail Demir)

## 1. GİRİŞ

Ülkemizin temel enerji kaynağını oluşturan düşük ısıl değerli linyitler, termik santral kazanlarında ince tane boyutuna getirilerek yakılmaktadır. Bu kazanlarda yakılan kömürlerden inorganik katı artıklar olan uçucu küller elde edilmektedir. Cüruflardan farklı olarak bu atıkların partikül büyüklükleri 1 – 200 µm arasındadır. Toz kömürün yakılması sırasında (yaklaşık 1200 °C’de) baca gazları ile sürüklenen ve hızlı bir biçimde soğurken elektrofiltreler yardımıyla bacalarda tutulan ve genellikle boyutları 100 µm’den daha küçük uçucu kül tanecikleri ortaya çıkmaktadır. Artan enerji ihtiyacına bağlı olarak artan kömür tüketimi, kömürün yanması sırasında atık olarak elde edilen kül miktarının da artmasına neden olmaktadır [1-7].

Termik santralin 1 kWh’lik enerji üretiminde yaklaşık 110 g kül atık madde olarak açığa çıkmaktadır. 1000 MW’lık bir santralden yılda yaklaşık 650.000 ton uçucu kül ve taban külü elde edilmektedir. Dolayısıyla bu küllerin santrallerden uzaklaştırılması ve depolanması çevre kirliliğinin yanı sıra işletme, enerji üretim kaybı vb. konularda parasal ve teknik sorunlar yaratabilmektedir [7]. Bu malzemenin çok az bir kısmı çimento ve diğer yapı malzemeleri üretimlerinde bir bileşen olarak uygulama alanı bulabilmektedir [8]. Bununla birlikte uçucu külün hafif beton blok üretimi, yapı tuğlası üretimi, zemin iyileştirilmesi uygulamalarında vb. uygulamalarda kullanımı giderek artmaktadır [9-16].

Uçucu külün üretimi ve karakteristikleri; santral tipi, işletim biçimi, yakılan kömürün cinsi, yanma biçimi, kömür kompozisyonu ve yakma sistemine göre değişir [5, 17]. Uçucu külün özellikleri aynı santralde bile gün içerisinde yapılan yüklemelerden dolayı değişebilmektedir. Homojen özelliklere sahip olmayan uçucu kül ciddi dezavantajlara sahiptir ve bazen geniş çaplı üretimlerde katkı olarak büyük ölçeklerde verimli olarak kullanılamaması temel bir sorundur [18]. Uçucu külün fiziksel, kimyasal, mineralojik ve puzolanik özelliklerinin en belirgin ortak yanı, bu özelliklerin yöreden yöreye, hatta aynı yörede dahi değişkenlik göstermeleridir [17]. Uçucu kül, son yıllarda yapılan çok sayıda araştırmayla çimento ve beton üretiminde yaygın olarak değerlendirilen, puzolanik özellikleri olan bir maddedir. Uygun oranlarda ve doğru kullanımı halinde betonun birçok özelliğini olumlu yönde etkilediği ve özellikle kimyasal etkilere dayanıklılığını arttırdığı bilinmektedir [7].

Yapılan bu literatür çalışmasında, uçucu küllerin özellikleri ve bu özelliklerin malzeme özelliklerine etkileri araştırılmıştır.

## 2. UÇUCU KÜLÜN SINIFLANDIRILMASI

Uçucu küllerin sınıflandırılmasında, kimyasal bileşen yüzdesine göre esas olarak ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartları baz alınmaktadır.

ASTM C 618 standardına göre uçucu küller F ve C sınıflarına ayrılırlar. F sınıfına, bitümlü kömürden üretilen ve toplam  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  yüzdesi % 70’den fazla olan uçucu küller girmektedir. Aynı zamanda bu küllerde CaO yüzdesi % 10’un altında olduğu için düşük kireçli olarak da adlandırılırlar. F sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğe sahiptirler. C sınıfı uçucu küller ise, linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilen ve toplam  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  miktarı % 50’den fazla olan küllerdir. C sınıfı uçucu küllerde CaO > % 10 olduğu için bu küller yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğın yanı sıra bağlayıcı özelliğe de sahiptirler [19].

TS EN 197-1’e göre yapılan sınıflandırmada uçucu küller silissi (V) ve kalkersi (W) olmak üzere iki gruba ayrılırlar. V sınıfı uçucu küller, çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerden meydana gelen ince bir toz olup; esas olarak reaktif silisyum dioksit ( $\text{SiO}_2$ ) ve alüminyum oksitten ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) oluşan; geri kalanı demir oksit ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının % 10’dan az, reaktif silis miktarının % 25’den fazla olması gerekmektedir. W sınıfı küller ise, hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup; esas olarak reaktif kireç (CaO), reaktif  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ’den oluşan; geri kalanı demir oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif

kireç (CaO) oranının % 10'dan fazla, reaktif silis miktarının da % 25'den fazla olması gerekmektedir [20].

Tablo 1. Örnek uçucu kül kimyasal analiz değerleri [7].

Oksit	Silikoalüminöz UK	Sülfokalsik UK	Silikokalsik UK
SiO <sub>2</sub>	50,0	18,2	38,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30,0	12,0	22,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,0	7,0	4,0
CaO	2,6	67,0	24,0
MgO	1,8	1,8	5,0
SO <sub>3</sub>	0,5	6,0	1,0
K <sub>2</sub> O	5,0	6,0	2,0
Na <sub>2</sub> O	0,8	8,2	1,0
Diğer	3,0	1,2	3,0

Uçucu küller (UK), kireç (CaO) ve sülfat (SO<sub>3</sub>) miktarına göre sınıflandırma yapılması durumunda; esas yapısı siliko alüminatlardan meydana gelen ve genellikle taş kömüründen elde edilen uçucu küllere siliko alüminöz uçucu küller denilmektedir. Genellikle linyit kömüründen elde edilen ve diğerlerine oranla daha yüksek miktarda SO<sub>3</sub> ve CaO içeren uçucu küllere sülfokalsik uçucu küller; linyit kömürlerinden elde edilen kireç ve silika miktarı yüksek uçucu küller ise silikokalsik uçucu küller olarak adlandırılırlar [21]. Bu tip uçucu küllere ait örnek bir kimyasal analiz değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Bu sınıflandırmalara ilaveten kül içerisinde bulunan CaO miktarına göre de bir sınıflandırma yapılabilmektedir. Bu sınıflandırma uçucu küllerin aktivitesine göre yapılmakta ve uçucu külün aktivitesi CaO içeriyle tanımlanmaktadır. Uçucu küller aktivitesine göre;

- Çok düşük aktiviteli küller: CaO < %3,5
- Düşük aktiviteli küller: %3,5 < CaO < %7
- Aktif küller: %7 < CaO < %14
- Çok aktif küller: CaO > %14 olmak üzere dört farklı şekilde sınıflandırılmıştır [7].

### 3. UÇUCU KÜLÜN KİMYASAL ve MİNERALOJİK ÖZELLİKLERİ

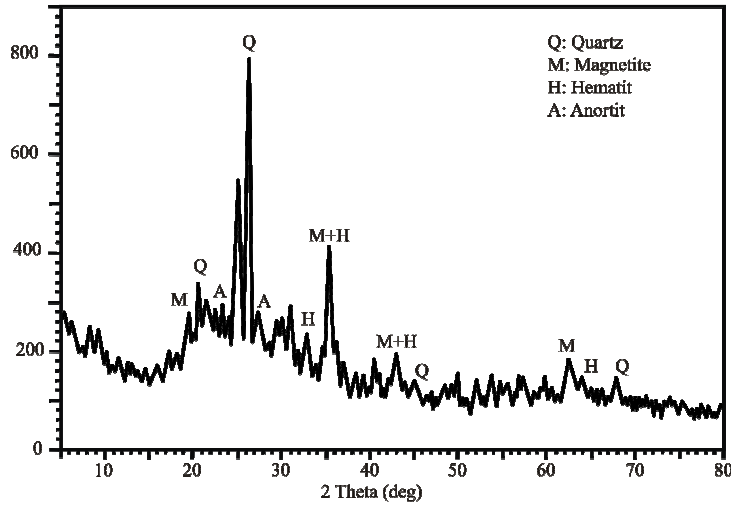
Uçucu külden bulunan başlıca bileşenler; silika (SiO<sub>2</sub>), alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), demir oksit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ve CaO olup bunların miktarları uçucu külün tipine göre değişmektedir [18, 22]. Uçucu kül içinde bulunan karbon miktarı kömür tipine ve yakma işlemine göre değişiklikler göstermektedir [17]. Ayrıca MgO, SO<sub>3</sub> gibi alkali oksitler de minör bileşen olarak uçucu külden bulunmaktadır. Uçucu külden; 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 oranlarında temel oksitler bulunmaktadır. Bu farklı değerler uçucu külün tipini karakterize etmekte [22], bununla beraber uçucu külün kimyasal yapısı kömürün farklı yerlerden elde edilmesinden dolayı farklılıklar göstermektedir. Buna rağmen uçucu külün temel bileşikleri silis ve alüminadır [23, 24]. Tablo 2'de iki farklı uçucu küle ait kimyasal yapı verilmiştir [15].

Tablo 2. İki farklı uçucu küle ait kimyasal yapı.

NUMUNE NO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	KK	TOPLAM
Uçucu kül (A)	51,02	16,61	11,04	5,48	7,45	0,56	1,98	0,80	4,20	99,14
Uçucu kül (B)	52,25	14,79	12,14	5,77	6,94	0,54	1,22	0,75	4,70	99,10

Kimyasal yapılarında temel element olarak; Si, Al, Ca ve S bulunur. Uçucu küllerin matrisi esas olarak alümina silikatlarından ve bunlarla birlikte bulunabilen Fe, Mg, Na, K, Ca, Ti ve nadir toprak elementlerinden oluşur. Uçucu olan veya uçucu oksitleri oluşturan As, Cd, Ga, Mo, Pb, Se ve Zn gibi elementler matrise girme eğilimi göstermezler. Bu elementler derişimleri tane boyutu ile ters orantılı olarak uçucu küllerin yüzeylerinde toplanırlar [17].

C sınıfı uçucu küller % 1'den daha az bir oranda yanmamış karbon içerirler. Bu küllerin tipik kristal fazları; anhidrit ( $\text{CaSO}_4$ ), trikalsiyum alüminat ( $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ ), kireç ( $\text{CaO}$ ), kuvarz ( $\text{SiO}_2$ ), periklas ( $\text{MgO}$ ), mullite ( $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ ), merwinite ( $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$ ) ve ferrite ( $(\text{Mg, Fe})(\text{Fe}_3\text{Al})_2\text{O}_4$ ) dir. F sınıfı uçucu küller ise % 2'den fazla bir oranda yanmamış karbon içerirler. Bu küllerde ana faz olarak; kuvarz ( $\text{SiO}_2$ ), mullite ( $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ ) ve hematite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) bulunmaktadır [18]. Şekil 1'de uçucu küle ait bir X Işınları kırınımı (XRD) grafiği verilmiştir.



Şekil 1. Uçucu küle ait bir XRD grafiği [15].

Uçucu kül, kireç ve suyun bir arada bulunduğu durumda reaktiftir. Bu reaktivlik büyük oranda uçucu külün camı yapısına dayanmaktadır. Uçucu kül içerisindeki camı (amorf) yapının % 50-90 arasında olduğu belirtilmektedir [5].

İnceliğinden ve amorf yapıya sahip mineralojisinden dolayı uçucu kül puzolanik bir malzeme olup aynen ince taneli doğal puzolanlar gibi, puzolanik özellik göstermektedirler; kalsiyum hidroksitle sulu ortamda birleştiklerinde, hidrolik bağlayıcılığa sahip olmaktadır. O nedenle, hem portland-puzolan tipi çimento üretiminde, hem de beton katkı maddesi olarak doğrudan kullanılmaktadırlar. Genellikle, beton katkı maddesi olarak çok büyük miktarlarda kullanılabilirler. Beton karışımının içerisinde yer alan uçucu kül miktarı, çimento ağırlığının % 15 - % 50'si civarında değişebilmektedir [2, 18].

Uçucu külün yoğunluğu bünyesinde bulunan kimyasal bileşenlerin oranlarına ve porozitesine bağlıdır. Bazı uçucu kül bileşenlerinin yoğunlukları Tablo 3'de verilmiştir [18].

Tablo 3. Uçucu kül bileşenlerinin yoğunlukları.

Bileşen	Yoğunluk $\text{gr/cm}^3$
$\text{SiO}_2$	2,65
$\text{Al}_2\text{O}_3$	3,4-3,6
$\text{CaO}$	3,3-3,4
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	5,3-5,4
$\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$	2,8-3,0
$\text{Fe}_3\text{O}_4$	5,1-5,2
Kömür	0,64-0,93

Özgül ağırlıkları 1,9-2,4 gr/cm<sup>3</sup> arasında değişen uçucu küllerin gevşek birim hacim ağırlıkları 800 kg/m<sup>3</sup> dolaylarındadır. İri tanelerin boşluklu yapılarından dolayı ince tanelerden oluşmuş küllerin yoğunluğu daha fazla olmaktadır. Yoğunluk değerlerinde büyük farklar varsa karışım hesaplarında bu yoğunluk farkının göz önünde bulundurulması gerekir. Yüksek demir içerikli uçucu küllerin yoğunluğu fazla, yüksek alümin, silika ve karbon içerikli küllerin yoğunluğu ise daha düşüktür [7].

Termik santral fırınında, uçucu külün kalma süresinin, uçucu külün vitrifikasyon derecesinde ve alkali içeriğinde değişikliklere sebep olduğu belirtilmektedir. Kuzey Amerika da üretilen yüksek ve düşük kireçli küllerin kimyasal kompozisyonları incelendiğinde düşük kireçli kül ile yüksek kireçli küller karşılaştırıldığında benzer alümina içeriğine sahip oldukları bunun yanında düşük kireçli uçucu küllerin çok daha az bir oranda demir oksit içerdiği belirlenmiştir [5].

Düşük kireçli uçucu küllerdeki ana aktif bileşen silika ve alüminadan oluşan amorf veya camsı fazdır. Bu tür uçucu küller rutubetli ortamda kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek bağlayıcı özelliklere sahip bileşenler meydana getirirler. Diğer bir deyişle, düşük kireçli uçucu küller puzolanik özelliğe sahiptirler. Yüksek kireçli uçucu küller ise puzolanik özellik gösterirken, içerdikleri serbest kireç, anhidrit, C<sub>3</sub>A, amorf silika ve amorf alümina v.b nedeniyle de kendi başlarına bir miktar bağlayıcı özelliğe sahip olabilirler [25].

Uçucu küllerin çoğu, özellikle de F sınıfı uçucu küller, oksijen ile bağ oluşturan tetrahedral silikatlarla yüksek derecede polimerizasyon oluşturmaya rağmen oda sıcaklığında aktiviteleri çok yavaştır [26]. Daha ince uçucu kül ve daha az karbon içeriği puzolanik aktiviteyi arttırmaktadır. Aynı işlenebilirliğe sahip betonda dayanıma daha büyük katkı yaptığı bununla birlikte oda sıcaklığındaki puzolanik reaksiyon oranının çok az olduğu ve kimyasal reaksiyonun 40-50 °C sıcaklıkta puzolanik reaksiyonu başarıyla gerçekleştirdiği belirtilmektedir [27].

Mineraller aynı kompozisyonla farklı aktivite gösterdikleri için puzolanik aktivite sadece kimyasal bileşim ile ilgili değildir [28]. Uçucu kül içeren betonların erken yaştaki dayanımlarını arttırmak için Ca(OH)<sub>2</sub> ve uçucu kül arasında puzolanik reaksiyonu hızlandırmak için farklı metotların kullanıldığı belirtilmekte ve uçucu külün inceliği arttıkça puzolanik aktivitenin de artacağı belirtilmiştir. Ayrıca uçucu küllü betonların erken dayanımlarını arttırmak için de kür sıcaklığının artırılmasının faydalı olacağı belirtilmiştir. Doğal puzolanların puzolanik reaksiyonlarını arttırmada kimyasal aktivatörlerin etkili bir biçimde reaksiyonu hızlandırdığı belirtilmiştir [29].

Uçucu külün puzolanik reaksiyonunu hızlandırmak için farklı yaklaşımlar kullanılmakta ve bu yaklaşımlar uçucu kül içeren betonların erken dayanımlarını arttırmaktadır. Bu yaklaşımlar içersinde; öğütme, kürü hızlandırma (otoklav kürü) ve kimyasal aktivasyonlar bulunmaktadır. Şu ana kadar yapılan birkaç çalışmada uçucu külün aktifleştirilmesi amacıyla alkali ve sülfat aktivasyonu içeren farklı aktifleştirme metotları kullanılmıştır.

Xu ve Sarkar (1991), % 30'dan % 60'a kadar değişen oranlarda düşük kalsiyumlu uçucu kül içeren çimento pastalarına, % 3'den % 6'a kadar değişen oranlarda jips katkısı yapıldığına örneklerin dayanımlarında belirgin bir artış olduğunu belirtmişlerdir.

Shi (1996, 1998) yaptığı çalışmalarda, kimyasal aktivatör olarak NaSO<sub>4</sub> ve CaCl<sub>2</sub>'ün etkinliğini karşılaştırmış ve elde ettiği bulgulara göre; NaSO<sub>4</sub>'ün erken, CaCl<sub>2</sub>'ün ise uzun dönemde kireç-uçucu kül pastasının dayanımını arttırdığını bulmuştur.

Poon vd. (2001) uçucu kül-çimento sistemlerinde aktivatör olarak CaSO<sub>4</sub> kullanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda kürün hızlandırılmasıyla erken yaşlarda büyük miktarda ettringit oluştuğunu belirlemiştir. 3 günlük kür işlemlerinde kontrol örneklerine oranla % 70'e kadar dayanım artışı gerçekleştirdiği de belirtilmiştir [30].

Bouzoubaa ve Fournier (2003), yaptıkları çalışmada iki farklı uçucu kül kullanmışlardır. Kullanılan malzemelerin kimyasal ve fiziksel analizlerine göre daha yüksek oranda kireç içeren (CaO, %13,4) uçucu külün 7 ve 28 günlük puzolanik indeksi, düşük kireçli (CaO, % 4,2) diğer uçucu küle göre yaklaşık olarak % 15 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Yüksek kireçli uçucu külün kızdırma kaybı % 0,3 iken, düşük kireçli uçucu küle bu oran % 2,4 olarak tespit edilmiştir. İnce uçucu külün (~3000 cm<sup>2</sup>/g), çimentoya %50 oranında ikame edilebileceği, iri uçucu külün (~2000 cm<sup>2</sup>/g) ise çimentoya ikame oranının % 30-40 arasında yapılabileceği belirtilmiştir [31].

Feldman vd. (1990), yüksek hacimli uçucu kül /çimento pastalarında uçucu külün Ca(OH)<sub>2</sub> ile 3 – 7 gün arasında reaksiyona başladığını fakat önemli miktardaki Ca(OH)<sub>2</sub> ve uçucu külün 91 gün sonrasında hala reaksiyona girmeden kaldığını bulmuştur. Reaksiyon esasen kalsiyum silikat hidrat (CSH) formundadır ve düşük kalsiyum/silika oranına sahiptir.

Berry vd. (1990), erken yaşlarda uçucu külün boşluk doldurucu bir fiziksel etkiye sahip olduğunu ve ettringit formasyonu ile ilgisi olduğunu uzun dönemde ise silika alüminat bağlayıcıları olarak hidrasyon reaksiyonunda bulduklarını göstermiştir [32].

Düşük kalsiyumlu F sınıfı uçucu kül, normal ve yüksek dayanımlı betonlarda, çimentoya ikame olarak geniş çaplı kullanıma sahiptir. Normal dayanımlı betonlarda % 50 den daha fazla ikame kullanılabilirken, yüksek dayanımlı betonlarda bu oranın % 15–25 ile sınırlandırıldığı belirtilmiştir [33].

Tishmack vd. (1999), ettringit oluşumuna küllerin etkisini belirlemiştir. Çalışma sonucuna göre ettringit yerine monosülfat tercih edilen çimentolu sistemlerde yüksek kireçli küllerin kullanılması gerektiğini belirtmiştir [34].

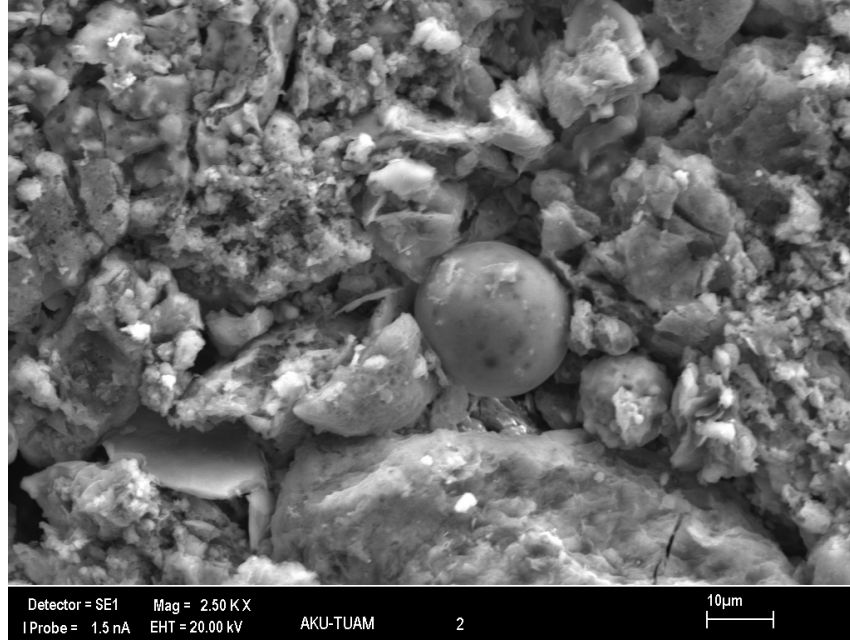
#### 4. UÇUCU KÜLÜN MORFOLOJİK ÖZELLİKLERİ

Uçucu kül, koyu gri renkte, çok ufak taneli bir malzemedir. Renkleri açık griden koyu griye uzanan değişikliktedir. Rengin koyuluğu açıklığı, elde edildiği kömüre ve yanış özelliğine bağlıdır. Yanmanın tam olmadığı durumda oluşan uçucu küle siyah renk veren içindeki yanmamış karbondur. İyi yanma sonucu oluşan uçucu kül diğerine göre daha açık renktedir. Daha çok miktarda karbon içeren küller koyu gri renkte, daha çok demir içerenler ise açık gri renktedir.

Uçucu kül partikülleri, camsı küresel şekilli tanecikler, içi boşluksuz veya boşluklu (senosfer), büyük bir küre içinde küçük küreler kümesi içeren yapılar (plerosfer), yüzeyi düzensiz dağılmış şekilsiz boşluklar içeren yapılar, yüzeyinde sıvı damlacıkları bulunan yapılar, yüzeyi kristal ile kaplanmış yapılar, deforme yapılar ve yüzeyinde şekilsiz birikimler olan yapılar gibi değişik şekillerde bulunabilir [7].

Uçucu külün İnceliği öncelikle kazana verilen kömürün öğütülme derecesine bağlıdır, inceliğe etki eden ikinci faktör, küllerin mümkün olabildiğince bacadan kaçmasına mani olunarak tutulmasıdır. Bacadan kaçan kısım azaldıkça incelik artar. Boyutları genellikle 0.5 ile 200 mikron arasında değişen, camsı ve çoğunlukla küresel karakterdeki parçacıklardır. Özgül yüzeyleri 1800 – 5000 cm<sup>2</sup>/gr arasında değişmekle birlikte, ortalama 2800 – 3800 cm<sup>2</sup>/gr dolayındadır. Uçucu külün yoğunluğu; inceliğine ve mineralojik yapısına bağlıdır. İçi dolu küresel tanelerden meydana gelen uçucu küllerin mutlak yoğunluğu 2.2 - 2.7 (ortalama 2.4) gr/cm<sup>3</sup> arasındadır [2, 17]. Uçucu küle ait bir SEM görüntüsü Şekil 2’de verilmiştir [15].

Uçucu kül taneleri genellikle küresel şekilli katı parçacıklardır. Ağırlığının yaklaşık % 5’i (hacminin % 20’si) içi boş (nitrojen veya karbon dioksitle dolu) parçacıklardan oluşmaktadır [2].



Şekil 2. Uçucu küle ait bir SEM görüntüsü [15].

Mehta (1985), farklı kaynaklardan alınan 11 uçucu külü gözlemlemiş ve kalsiyum içeriğiyle partikül tane boyutunun çimento-uçucu kül karışımının dayanım gelişimini önemli oranda geliştirdiğini belirtmiştir [35].

Slanicka (1991) ve Paya vd. (1995) uçucu külü farklı inceliklerde ayırmış ve daha ince bir fraksiyona sahip olan karışımların, iri fraksiyona sahip örneklerden ve kül bulunmayan şahit örneklerden daha iyi basınç dayanımına sahip olduklarını göstermiştir. Erdoğan ve Türker (1988) de aynı sonuçları yüksek kireçli küllerde göstermişlerdir. Bu yüzden iri fraksiyona sahip uçucu külün yapısal beton işleri için uygun gözükmediği belirtilmektedir.

Berry vd. (1989) iri taneli uçucu külün kristal fazı yüksek oranda içermesinden dolayı düşük puzolanik aktiviteye sahip olduğunu ve bu nedenle betonda kullanılmaması gerektiğini belirtmiştir. Ayrıca uçucu küllü betonların basınç dayanımı uçucu külün öğütülmesiyle gelişebileceği belirtilmektedir.

Yapılan birçok çalışmada, sınıflandırma ve öğütmenin uçucu külün kimyasal kompozisyonuna çok fazla etki yapmadığını belirtmiştir. Son araştırmalarda, iri fraksiyonlu uçucu külün ince fraksiyona sahip uçucu küllerden daha az bir miktarda  $SO_3$  içerdiği belirtilmiştir. Ayrıca, Sybertz ve Wiens (1991) tarafından yapılan başka bir çalışmada ise uçucu kül inceliğinin puzolanik reaksiyonu hızlandırdığı belirtilmiştir [36].

Matsunaga vd. (2002), yaptığı çalışmada şu bulgulara ulaşmıştır. Katı küresel uçucu küllerin yoğunluğu  $2.0-2.5 \text{ gr/cm}^3$ , boşluklu uçucu küllerin yoğunluğu ise  $0.4-0.7 \text{ gr/cm}^3$ 'dür. Katı uçucu küllerin morfolojisi boyutlarına bağlıdır. Küçük katı uçucu küller büyük küllerden şekil olarak daha küreseldir. Fakat boşluklu küller katı uçucu küllerden daha küreseldir ve şekilleri boyutlarına bağlı değildir. Katı uçucu küllerde boşluklu uçucu küllere göre  $Al_2O_3$  içeriği daha azken,  $SiO_2$  içeriği daha fazladır. Katı uçucu külün yoğunluğu, boyutunda artış olduğunda azalmaktadır. Boşluklu uçucu külden ise yoğunluk tane boyutuyla ilgili değildir. Katı uçucu külün ortalama çapı arttığında müllit fazının artması sebebiyle külün kristalliği de artar. Boşluklu uçucu külden ise tane boyutu arttıkça toplam kristalliğin azaldığı belirtilmiştir [24].

## 5. SONUÇ

Günümüzde artan enerji talepleriyle orantılı olarak, termik santrallerden elde edilen ve inorganik bir atık olan uçucu kül miktarlarında artışların olması kaçınılmazdır. Elde edilen bu atık ürünün çevre problemlerine sebep olmaması için kullanım alanları son yıllarda bilim dünyasında çalışılan konuların başında gelmesinin yanında henüz istenilen biçimde yaygın olarak kullanılamamaktadır. Bunun önemli sebeplerinden biri, termik santrallerden elde edilen uçucu küllerin özelliklerinin homojen olmaması ve sürekli olarak değişkenlik göstermesidir.

Uçucu küllerin boyutları genellikle 0,5 ile 200 mikron arasında değişen, camsı ve çoğunlukla küresel karakterdeki parçacıklardır. Özgül yüzeyleri ortalama 2800 – 3800 cm<sup>2</sup>/gr dolayındadır. Uçucu külün yoğunluğu; inceliğine ve mineralojik yapısına bağlıdır. İçi dolu küresel tanelerden meydana gelen uçucu küllerin mutlak yoğunluğu ortalama 2,4 gr/cm<sup>3</sup>'dür.

Uçucu küller homojen olmamasına rağmen temelde içerdiği 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 kalsiyum oksit (CaO) olup bunların miktarları uçucu külün tipine göre değişmektedir. Ayrıca, MgO, SO<sub>3</sub> gibi alkali oksitler de minör bileşen olarak uçucu külde bulunmaktadır. İnceliğinden ve amorf yapıya sahip mineralojisinden dolayı uçucu kül, puzolanik bir malzeme olup aynen ince taneli doğal puzolanlar gibi puzolanik özellik göstermektedirler.

Son yıllarda yapılan çalışmalarda, uçucu külün puzolanik reaksiyonunu hızlandırmak için farklı yaklaşımlar kullanılmış ve bu yaklaşımlarla uçucu kül aktifleştirilerek yapı malzemelerinde önemli bir katkı malzemesi olarak kullanımının yolu açılmıştır. Uçucu kül tüketimini artırmak için yeni ürünlerin üretimi ve yeni kullanım alanları geliştirmek konusunda yoğun çalışmalara ihtiyaç olacaktır.

## 6. KAYNAKLAR

1. Aruntaş, H., Y., 2006, "Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyelleri", Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., 21 (1), 193-203.
2. Erdoğan, T. Y., 2007, "Beton", Metu Press, 2. Baskı, Ankara.
3. Bentli, İ., Uyanık, A.O., Demir, U., Şahbaz, O. ve Çelik, M.S., 2005, "Seyitömer Termik Santrali Uçucu Küllerinin Tuğla Katkı Hammaddesi Olarak Kullanımı", Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, İzmir, 385-389.
4. Aksoy, H. S., Yılmaz, M., Akarsu, E. E., 2007, "Killi Zeminin Tunçbilek Uçucu Külü Kullanılarak Stabilizasyonu", 2. Geoteknik Sempozyumu, Artı ofset, 466-472.
5. Xu, A., 1997, "Fly Ash in Concrete", Part-3, Waste Materials Used in Concrete Manufacturing, Editor: Satish Chandra, Sweden.
6. Tekin, U., 2004, "Kömür Özelliği Değişiminin Termik Santral Verimine Etkileri", Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
7. Yazıcı, H., 2004, "Termik Santral Atığı Yapay Alçı-Uçucu Kül-Taban Külü Esaslı Yapı Malzemesi Geliştirilmesi", Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
8. Iyer, R. S., Scott, J. A., 2001, "Power Station Fly Ash – A Review of Value – Added Utilization Outside of The Construction Industry", Resources, Conservation and Recycling, 31, 217-228.



9. Demir, İ., Başpınar, M. S., 2008, "Effect of silica fume and expanded perlite addition on the technical properties of the fly ash-lime-gypsum mixture", *Construction and Build Mater.*, 22, 1299-1304.
10. Demir, İ., 2005, "Uçucu Külün Hafif Yapı Malzemesi Üretiminde Kullanılması", *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, (1) 1, 21-24.
11. Demir, İ., Başpınar, M. S., Görhan, G., Kahraman, E., 2008, "Seyitömer uçucu külü ve Afyonkarahisar yöresi volkanik tüflerinin puzolanik özelliklerinin belirlenmesi", *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4 (1), 39-46.
12. Demir, İ., Erten, Ö., Başpınar, M. S., Orhan, M., 2005, "Uçucu külün tuğla kullerinin sinterleme özelliklerine etkisi", 4. Uluslar Arası Toz Metalürjisi Konferansı, Sakarya, 1141-1149.
13. Kahraman, E., Demir, İ., 2005, "Uçucu Külün Yapı Blokları Üretiminde Kullanılmasının Araştırılması", 4. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Konya, 1074-1077.
14. Demir, İ., Başpınar, M.S., Görhan, G., Kahraman, E., 2008, "Seyitömer Uçucu Külünün Yapı Tuğlası Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması", VII. Uluslararası Katılımlı Seramik Kongresi, 26-28 Kasım, 327-331.
15. Demir, İ., (Proje yürütücüsü), "Uçucu Külün Yapı Tuğlası Üretiminde Kullanımının Araştırılması", (TUBİTAK: Proje no:106M002).
16. Çokça, E., 2001, "Use of Class C Fly Ashes for the Stabilization of an Expansive Soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127 (7), 568-573.
17. Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü., Mordoğan, H., 2005, "Uçucu Küllerin Özellikleri ve Kullanım Alanları", Türkiye 19. Uluslar arası Madencilik Kongresi ve Fuarı, 419-423, İzmir.
18. Gikunoo, E., 2004, "Effect of Fly Ash Particles on the Mechanical Properties and Microstructure of Aluminium Casting Alloy A534, Master of Science, University of Saskatchewan, The College of Graduate Studies and Research, Saskatchewan, Canada.
19. ASTM C 618, 2000, "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, Annual Book of ASTM Standard, No. 04.02
20. TS EN 197-1, 2002, Çimento-Bölüm 1: "Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
21. Açıkgöz, Y., 2008, "Uçucu Küllerin Beton Kilitli Parke Taşı Üretiminde Kullanımının Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
22. Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğınobalı, A., 2003, "Türkiyede Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri", TÇMB, Ankara.
23. Satapathy, L.N., 2000, "A Study on The Mechanical, Abrasion and Microstructural Properties of Zirconia-Flyash Material", *Ceramics International*, 26, 39-45.
24. Matsunaga, T., Kim, J.K., Hardcastle, S., Rohatgi, P.K., 2002, "Crystallinity and Selected Properties of Fly Ash Particles", *Materials science & Engineering*, 333-343.

25. Çelik, Ö., 2004, “Farklı İnceliklerdeki Tras ve Uçucu Külün Çimento Dayanımlarına Etkisi, Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10 (3), 333-337.
26. Min, W. B., Jiu, L. W. 2004, “Development of Studies and Applications of Activation Techniques of Fly Ash”, Proceedings of The International Workshop on Sustainable Development & Concrete Technology”, 159-169, Beijing-China.
27. Karlhans, W., 1990, “Fly Ash in Concrete”, ISBN: 0419157905, Spon Pres., 18-19.
28. Mary S.J.G., 1997, “Cement and Concrete”, ISBN: 0412790505, Spon Press UK.
29. Poon, C.S., Kou, S.C., Lam, L., Lin., 1999, “An Innovative Method in Producing High Early Strength PFA Concrete”, Modern Concrete Materials; Binders, Additions and Admixtures, 131-138, ISBN: 0727728229, Thomas Telford Pres.
30. Poon, C. S., Kou, S. C., Lam, L., Lin, Z. S., 2001, “Activation of Fly Ash/Cement Systems Using Calcium Sulfate Anhydrite (CaSO<sub>4</sub>)”, Cement and Concrete Research, 31, 873-881.
31. Bouzoubaa, N., Fournier, B., 2003, “Optimization of Fly Ash Content in Concrete Part I: Non-Air-Entrained Concrete Made without Superplasticizer”, Cement and Concrete Research, 33, 1029-1037.
32. Lam, L., Wong, Y. L., Poon, C. S., 2000, “Degree of Hydration and Gel/Space Ratio of High-Volume Fly Ash/Cement Systems, Cement and Concrete Research, 30, 747-756.
33. Poon, C. S., Lam, L., Wong, Y. L., 2000, “A Study on High Strength Concrete Prepared with Large Volumes of Low Calcium Fly Ash, Cement and Concrete Research, 30, 447-455.
34. Antiohos, S., Tsimas, S., 2005, “Investigating The Role of Reactive Silica in The Hydration Mechanisms of High-Calcium Fly Ash/Cement Systems, Cement & Concrete Composites, 27, 171-181.
35. Mehta, P. K., 1985, “Influence of Fly ash Characteristics on The Strength of Portland-Fly ash Mixtures”, Cement and Concrete Research, 669-674.
36. Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C., Songpiriyakij, S., Chutubtim, S., 2001, “A Study of Ground Coarse Fly Ashes with Different Fineness from Various Sources As Pozzolanic Materials, Cement & Concrete Composites, 23, 335-343.