TÇMB

TÜRKİYE ÇİMENTO MÜSTAHSİLLERİ BİRLİĞİ

TÜRKİYE'DEKİ UÇUCU KÜLLERİN SINIFLANDIRILMASI ve ÖZELLİKLERİ

Hazırlayanlar:

- Pelin TÜRKER
- Bahadır ERDOĞAN
- Fehime KATNAŞ
- Asım YEĞİNOBALI

TÇMB / AR-GE / Y03.03

TÇMB

TÜRKİYE ÇİMENTO MÜSTAHSİLLERİ BİRLİĞİ

TÜRKİYE ÇİMENTO MÜSTAHSİLLERİ BİRLİĞİ

TÜRKİYE'DEKİ UÇUCU KÜLLERİN SINIFLANDIRILMASI ve ÖZELLİKLERİ

TÇMB / AR-GE / Y03.03

Pelin TÜRKER, Bahadır ERDOĞAN

Fehime KATNAŞ, Asım YEĞİNOBALI

Temmuz 2009, ANKARA

1. BASKI, EKİM 2003
2. BASKI, AĞUSTOS 2004
3. BASKI, NİSAN 2007
4. BASKI, TEMMUZ 2009

ISBN 975-8136-18-6

TÇMB / AR-GE ENSTİTÜSÜ

Yerleşim Adresi:
Cyberpark, Cyberplaza C Blok Zemin, Kat 1 ve 2
Bilkent/ANKARA

Yazışma Adresi:
P.K. 2 Bakanlıklar 06582 ANKARA

Tel: (0312) 444 50 57 • Faks: (0312) 265 09 06

www.tcma.org.tr • info@tcma.org.tr

FERSA MATBAACILIK

Ostim 36. Sokak 5/C-D Yenimahalle/ANKARA

www.fersaofset.com • info@fersaofset.com

Kaynak göstermek kaydıyla bu kitaptan alıntı yapılabilir.

İÇİNDEKİLER

1. GİRİŞ 5

2. UÇUCU KÜLLERİN SINIFLANDIRILMASI ve ÖZELLİKLERİ 9
   2.1. Uçucu Küllerin Sınıflandırılması..... 9
   2.2. Uçucu Küllerin Özellikleri 10
   2.3. Yapılan Analizler 16

3. KİMYASAL, MİNERALOJİK ve MORFOLOJİK ANALİZ SONUÇLARI 19
   3.1. Afşin-Elbistan Termik Santralı Uçucu Külü..... 19
   3.2. Orhaneli Termik Santralı Uçucu Külü 25
   3.3. Çatalağzı Termik Santralı Uçucu Külü..... 32
   3.4. Seyitömer Termik Santralı Uçucu Külü 38
   3.5. Yatağan Termik Santralı Uçucu Külü 43
   3.6. Tunçbilek Termik Santralı Uçucu Külü 49
   3.7. Soma Termik Santralı Uçucu Külü 58
   3.8. Kangal Termik Santralı Uçucu Külü 66
   3.9. Yeniköy Termik Santralı Uçucu Külü 75
   3.10. Kemerköy Termik Santralı Uçucu Külü..... 83
   3.11. Çayırhan Termik Santralı Uçucu Külü 89

4. GENEL DEĞERLENDİRME 95

5. FİZİKSEL ve MEKANİK ANALİZ SONUÇLARI..... 99
   5.1. Özgül Ağırlık ve İncelik Test Sonuçları..... 99
   5.2. Puzolanik Aktivite Deney Sonuçları 100

6. ÇİMENTO ve BETONDA KATKI MADDESİ OLARAK UÇUCU KÜL 103

7. KAYNAK 109

1. GİRİŞ

Uçucu kül, kömürle çalışan termik elektrik santrallarında ortaya çıkan bir atık üründür. Termik santrallarda çok ince öğütülerek yakılan kömürden aşağıda belirtilen üç farklı külün elde edilmesi mümkündür;

* Göreceli olarak iri taneli olup baca gazları ile taşınamayan ve kazan tabanına düşen "taban külü",
* Siklon tipi ocaklarda yakılan kömürün suda soğutularak uzaklaştırılması ile elde edilen "ham kül" ve
* Çok ince taneli olup baca gazları ile taşınan "uçucu kül".

Çevreyi olumsuz olarak etkileyecekleri için, uçucu küllerin santral bacasından çıkarak havaya karışmaları önlenir. Bu amaçla, küller mekanik ve elektrostatik yöntemle toplanarak santral çevresinde veya başka uygun yerlerde depolanır. Zamanla biriken küller geniş alanları kapsamaya başlar ve santral idaresi için bir problem olur.

Bu gün Dünya'da ortaya çıkan uçucu kül miktarı yılda 600 milyon ton civarındadır.

Türkiye'de halen Afşin-Elbistan, Çatalağzı, Çayırhan, Kangal, Kemerköy, Orhaneli, Seyitömer, Soma, Tunçbilek, Yatağan ve Yeniköy santralları olmak üzere 11 termik santral faaliyet göstermektedir. Bu santrallardan yıllık uçucu kül üretimi ortalama 13 milyon kadar olmakta, ancak doğalgaz santrallarının devreye girmesi ile yıldan yıla değişmektedir. Ülkenin enerji üretiminde dışa bağımlılığını azaltmanın bir yolu da, endüstrinin diğer kesimlerinde yararlanılamayan düşük kalorili linyit kömürlerini termik santrallarda kullanmaktan geçmektedir. Dolayısıyla yıllık uçucu kül miktarlarının gelecekte daha fazla artacağı tahmin edilmektedir.

Her endüstriyel atık gibi uçucu külden de yararlanma olasılıkları araştırılmıştır. Bunların başında çimento ve betonda katkı maddesi olarak kullanılması

gelir. Silindirle sıkıştırılmış betonlarda, beton blok ve boruların yapımında kullanım bulur. Çimento hammaddesi olarak kullanılabilir. Özel işlemlerle uçucu külden dayanıklı hafif agrega elde edilebilir. Diğer kullanım alanları arasında: beton ve asfalt yollarda, yol temel tabakalarında filler olarak, zemin stabilizasyonunda, kireç-kumtaşı blokları, endüstriyel seramik ve refrakterlerin, boyaların üretiminde, katı atıkların stabilizasyonunda ve bitki yetiştirilmesinde kullanımları sayılabilir.

Uçucu külün özellikleri kömürün özelliklerine ve yakılma yöntemine bağlı olarak farklılıkları gösterir. Genellikle silisi ve aluminli olan bileşimi dolayısıyla puzolanik özellik göstererek çimento ve betonda katkı maddesi olarak yararlı olur. İnce ve küresel taneleri dolayısı ile taze betonda işlenebilmeyi arttırır; ayrıca hidratasyon ısısını azaltır. Çimento hidratasyonu sonucu oluşan kireçle reaksiyona girerek ilave bağlayıcı jel oluşturur, çimento hamurundaki boşlukları doldurur ve betona dayanıklılık kazandırır. Linyit kömürü yakılması ile elde edilen uçucu külde kireç oranı genellikle yüksek olup bu tür küller aynı zamanda hidrolik, yani bağlayıcılık özelliği gösterirler.

Antrasit kömüründen veya iyi yakılmayan diğer kömürlerden elde edilen uçucu küllerde karbon miktarı yüksek olur. Bu da çimento ve betonda su ihtiyacını arttırır; puzolanik özelliği ve kaliteyi olumsuz etkiler. Uçucu kül genellikle çimentodan daha ince taneli olarak elde edilir. Dolayısıyla ilave öğütme gerektirmeden kullanılabilir. Gerektiğinde seperatörden geçirilerek inceliği daha da arttırılır ve olumlu özellikleri daha etkin hale getirilir.

Uçucu külün bilinçli olarak çeşitli alanlarda kullanımı hem kullanıcı, hem de külü üreten için ekonomik avantaj sağlar, atık bir madde ortadan kalktığı için çevre korunmuş olur.

Ayrıca, kullanıcı ürettiği yeni ürünlerde veya uygulamalarında çeşitli teknik avantajlar elde eder. Bütün bu olumlu hususlara rağmen, kullanılarak değerlendirilen uçucu kül miktarları santrallarda elde edilen miktarların küçük bir yüzdesini geçememekte olup, dünya ortalaması olarak %15 civarında rakamlar verilmektedir.

Çeşitli ülkelerde uçucu küllerin önemli miktarlarda kullanılmaya başlaması baraj inşaatları sırasında ve betonda hidratasyon ısısını düşürmek amacı ile olmuştur. Örneğin; A.B.D.'de ilk kullanım 1940'lı yıllarda önce Hoover daha sonra Hungry Horse barajlarındadır. Ülkemizde ise 1960'lı yıllarda Gökçekaya ve Porsuk baraj inşaatlarında uçucu kül kullanılmasına karar verildi ve Türk Standardları Enstitüsü uçucu kül (TS 639) ve uçucu küllü çimento (TS 640) standardlarını hazırlayarak yayınladı. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'nün baraj uygulamaları dışında Karayolları Genel Müdürlüğü bazı köprü ve yol inşaatlarında deneme amacı ile uçucu kül kullandı. Uçucu küllü çimento hemen hiç üretilmedi. Katkılı çimentolarda ise kısıtlı miktarlarda kül kullanıldı. Geçen süre içinde ülkede uçucu kül kullanımı bu tür uygulamalarla sınırlı kaldı. Kullanılan uçucu kül miktarları yılda elde edilenin %1'ine bile ulaşamadı. Ancak son yıllarda, özellikle hazır beton endüstrisinin gelişmesi ve Avrupa'dan uyarlanan yeni çimento ve beton standardları çimento ve beton endüstrilerinde uçucu küle olan ilgiyi arttırmış bulunmaktadır.

Bu kitap 1998 yılında gene Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği tarafından yayınlanmış olan "Türkiye Termik Santrallarından Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu" başlıklı kitabın güncelleştirilmiş hali sayılabilir. Türkiye'deki 11 termik santralda 5 gün süre ile elde edilen günlük uçucu kül numuneleri "Ham" olarak (seperatörden geçmeden) Birlik laboratuvarlarına getirilmiş ve kimyasal, mineralojik, morfolojik, fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir.

Sonuçlar üzerinde gerekli yorumlar yapılmış ve küller sınıflandırılmışlardır. Ayrıca küllerin çimento ve betonda kullanımlarına ilişkin olarak sonuçlar ilgili standardlardaki sınır değerlerle karşılaştırılmıştır.

Uçucu kül numunelerinin temini aşamasında gösterdikleri kolaylık ve kıymetli yardımlarından dolayı EÜAŞ (evvelce TEAŞ) ve termik santral yetkililerine teşekkürlerimizi sunarız.

2. UÇUCU KÜLLERİN SINIFLANDIRILMASI ve ÖZELLİKLERİ

Uçucu kül, termik santrallerde pulverize kömürün yanması sonucu meydana gelen baca gazları ile taşınarak siklon veya elektrofiltrelerde toplanan önemli bir yan üründür. Kömürün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucu meydana gelen ergimiş malzeme soğuyarak, gaz akışı ile kısmen veya tamamen küresel şekilli kül taneciklerine dönüşmektedir. Bu kül tanecikleri çok ince (0.5-150 mikron) olup, baca gazları ile sürüklenmeleri nedeniyle, uçucu kül olarak adlandırılmaktadır.

Uçucu külde bulunan başlıca bileşenler SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 ve CaO olup, bunların miktarları uçucu külün tipine göre değişmektedir. Ayrıca MgO, SO_3, alkali oksitler de minör bileşen olarak bulunmaktadır. Uçucu küldeki temel oksitlerden SiO_2 % 25-60, Al_2O_3 %10-30, Fe_2O_3 %1-15 ve CaO, %1-40 oranlarında bulunmaktadır. Bu farklı aralıklardaki değerler uçucu külün tipini karakterize etmektedir.

2.1. Uçucu Küllerin Sınıflandırılması

Uçucu küllerin sınıflandırılmasında, kimyasal bileşen yüzdesine göre esas olarak ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standardları baz alınmaktadır [1,2,3].

ASTM C 618 standardına göre uçucu küller F ve C sınıflarına ayrılırlar:

a) F sınıfına, bitümlü kömürden üretilen ve toplam SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_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.

b) C sınıfı uçucu küller ise, linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilen ve toplam SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 miktarı %50'den fazla olan küllerdir. Aynı

zamanda, C sınıfı uçucu küllerde CaO > %10 olduğu için bu küller yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğin yanısıra bağlayıcı özelliğe de sahiptirler.

TS EN 197-1'e göre sınıflandırmada uçucu küller silissi (V) ve kalkersi (W) olmak üzere iki gruba ayrılırlar:

a) V sınıfı uçucu küller, çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerden meydana gelen ince bir toz olup ; esas olarak reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksitden (Al_2O_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.

b) W sınıfı küller ise, hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup; esas olarak reaktif kireç (CaO), reaktif SiO_2 ve Al_2O_3'den oluşan; geri kalanı demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan fazla, reaktif silis miktarının da %25'den fazla olması gerekmektedir.

2.2. Uçucu Küllerin Özellikleri

Kimyasal Bileşimleri

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

Uçucu külde bulunan başlıca bileşenler SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 ve CaO olup, diğerleri SO_3, MgO ve alkali oksitlerdir. Ayrıca, yanmamış karbon, titanyum, fosfor, berilyum, mangan ve molibden de eser bileşen olarak bulunabilmektedir.

Temel oksitler olan SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 ,CaO' in miktarları, uçucu külün silissi veya kireçsi yapıda olmasına göre geniş aralıkta değişmektedir. Buna

göre, uçucu külde SiO_2 % 25-60, Al_2O_3 %10-30, Fe_2O_3 %1-15 olarak ve CaO, %1-40 değerleri arasında bulunmaktadır [4,5].

Diğer oksitlerden MgO en fazla % 5.0, alkali oksitler (Na_2O + K_2O) %5.0'in altında bulunmaktadır. SO_3, genellikle % 0.2-2.5 arasında değişmekle birlikte, kömürün yapısı ve proses koşullarına göre % 10 'a kadar yükselmektedir. Ancak, standartlardan özellikle TS EN 450 standardı 6], SO_3 değerini en fazla %3 olarak dar bir aralık ile sınırlamaktadır.

Kızdırma kaybı, esas olarak kömürdeki yanmamış karbona karşılık gelmekle birlikte, kömürdeki hidratlar veya karbonatların bozunması ile ortaya çıkan bağlanmamış su veya CO_2 kaybını da içine almaktadır. Kızdırma kaybı, %1.0-10 arasında değişmektedir.

Uçucu külde reaktif silis ve reaktif kireç, çimentonun hidratasyonu sırasında oluşan ve dayanım gelişiminde önemli rolü olan kalsiyum silikat hidrat jeli oluşturan silisyum ve kalsiyum oksitleri temsil etmektedir. Özellikle reaktif silis, külün aktif bileşeni olup, puzolanik reaksiyonlara girmek üzere, alkali ortamda çözünen silistir. Bu bileşik, amorf veya camsı faz halinde bulunurken; mullit ve kuvars gibi diğer silisli bileşenler inert olup kristalize halde bulunurlar. Reaktif silis miktarının ,uçucu külün tipine bağlı olmaksızın en az % 25 olması gerekmektedir [2, 7]. Reaktif kireç ise, düşük kireçli küllerde % 10 'un altında olmakta ; yüksek kireçli küllerde %10-15 arasında değişmektedir [2, 3].

Mineralojik Bileşim

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

Genellikle, düşük CaO içeren küller başta camsı faz ve minör olarak da kuvars (SiO_2), mullit ($3Al_2O_3.2SiO_2$), manyetit (Fe_3O_4), hematit (Fe_2O_3)

içermekte; yüksek CaO'li uçucu küller kuvars, hematit, anhidrit ($CaSO_4$), serbest kireç, C_3A ($3CaO.Al_2O_3$), CS($CaO.SiO_2$), C_2S ($2CaO.SiO_2$), gehlenit ($Ca_2Al_2Si_2O_7$), mellilit ($Ca_2(Mg,Al)(AlSi)_2O_7$), merwinit ($Ca_3(Mg)(SiO_4)_2$), gibi mineraller ve camsı faz içermektedir. Bu bileşenlerin yanısıra yüksek kireçli küllerde kalsit, portlandit ($Ca(OH)_2$), trisülfoalüminat ($4CaO.3Al_2O_3.32H_2O$) ve mullit' de bulunabilmektedir. Her iki külde de, alkali feldispatlara rastlanmaktadır [8,9].

Düşük ve yüksek kireçli uçucu küllerin camsı fazı karakterize eden X-ışınları difraksiyon piklerinin maksimum durumları da birbirinden farklıdır. Camsı fazın difraksiyon pikinin maksimum olduğu bölge, düşük kireçli uçucu külde 22-27° 2 θ (CuKα) bölgesinde iken, yüksek kireçlide bu bölge 30-34° 2 θ (CuKα) bölgesinde yer almaktadır. Silissi camsı fazın 22-34° 2 θ arasında değişmesi, silisyum dioksit kristal örgü ağının (siliko tetrahedral), Al, Ca, Na gibi çeşitli katyonlar ile modifiye edilmesinden kaynaklanır.

Uçucu külün mineralojik bileşimi (camsı fazın durumu, kristal yapıları), külün puzolanik özelliklerini etkilemektedir. Özellikle camsı fazın durumu uçucu külün reaktivitesinde etkin olmaktadır. Düşük kireçli uçucu küldeki camsı fazın yapısı, SiO_2 açısından zengin, oldukça polimerize silissi veya alüminyum da içeren alüminosilikat bileşimindedir. Silissi veya alümino silikat camsı fazı, düşük kireçli külün reaktif bileşeni olup, su ve kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek, küle puzolanik özellik kazandırmaktadır.

Yüksek kireçli külde ise, aktif bileşen içinde silisyum da içeren kalsiyum alüminat camsı fazının yanısıra aktif kristalize fazlardır(serbest kireç, anhidrit, kalsiyum alüminat gibi). Burada, saf silika camı, Ca ve Al iyonları ile modifiye olmuştur. Bu faz bir bakıma cüruftaki yapıya da benzemektedir. %20 'nin üzerinde CaO içeren küllerde kalsiyum alüminat camsı fazı $12CaO.7Al_2O_3$ bileşimindedir. Yüksek kireçli külün camsı ve kristalize fazları, külün puzolanik özelliğin yanısıra, kısmen kendiliğinden bağlayıcı özelliğe de sahip olmasını sağlamaktadır [5,9].

Düşük kireçli uçucu küldeki yüksek silisli camsı faz genellikle kalsiyum, alkali ve hidroksit ilavesi halinde, yavaş olarak reaksiyona girerken; yüksek kireçli küldeki kalsiyum alüminosilikat camsı fazı su ile reaksiyona girerek bağlayıcı fazları oluşturur. Bu nedenle yüksek kireçli uçucu külün camsı fazının düşük kireçliden daha az, ancak daha reaktif olduğu bilinmektedir[10].

Yüksek kireçli küllerdeki kristalize fazlar (anhidrit,serbest kireç gibi), külün kendiliğinden bağlayıcı olmasına katkıda bulunmakla birlikte, standarttaki sınırlar (SO_3 en fazla %3 ve %5, sırasıyla ASTM C 618, TS 639, ve TS EN 450), serbest kireç TS EN 450'de %1) aşıldığı taktirde SO_3 fazlalığı ileri yaşlarda betonda sülfat genleşmesi (aktif alümina ve SO_3'den etringit oluşumu), serbest kireç ise hidratasyon sırasında kalsiyum hidroksit (portlandit) oluşturarak betonda genleşme ve çatlak oluşumuna sebep olmaktadır. Yine yüksek kireçli uçucu külde bulunan alüminat bileşimindeki gehlenit de, külde yüksek SO_3 olduğunda reaksiyona girmekte, buna karşılık düşük kireçli küldeki kristalize faz olan mullit, alüminat bileşiminde olduğu halde inert bileşen olarak kalmakta; dolayısıyla sülfat genleşmesine yol açmamaktadır [11].

Morfolojik Özellikler

Tanecik morfolojisi (şekli) ve büyüklük dağılımında, kömürün orjini ve uniform olması, kömürün pulverizasyon durumu yanma koşulları (sıcaklık ve oksijen seviyesi), yanmanın uniformluğu ve toz toplama sistemi tipi gibi prosese bağlı faktörler etkili olmaktadır [5].

Uçucu külde büyüklükleri 0.5μm - 150μm arasında değişen hem camsı küresel, hem de düzensiz şekilli tanecikler bulunmaktadır. Bu taneciklerin şekil ve büyüklük açısından farlılıkları, uçucu külün tipinden (düşük veya yüksek kireçli) kaynaklanmaktadır.

Camsı küresel şekilli tanecikler, içi boşluksuz küresel yapılar (solid glassy sphere), boşluklu küreler (cenosphere, hollow spheres) ,büyük bir küre içinde, küçük küreler kümesi içeren yapılar (pleurosphere), yüzeyi düzensiz

dağılmış şekilsiz boşluklar içeren yapılar, yüzeyinde sıvı damlacıkları bulunan yapılar, yüzeyi kristal ile kaplanmış yapılar (dermasphere) deforme yapılar, yüzeyinde şekilsiz birikimler olan yapılar gibi çeşitli şekiller halinde bulunabilir [12] (Şekil.1).

Küresel olmayan tanecikler, kömürden gelen ve yanma reaksiyonlarına katılmamış mineraller (kuvars, feldspatlar gibi), düzensiz şekilli ve gözenekli yapılardan(kil kalıntıları, yanmamış karbon gibi) oluşmaktadır [13].

Düşük kireçli küllerde, çoğunlukla camsı faza karşılık gelen, içi boşluksuz tam küresel tanecikler ve bunun yanısıra senosfer ve plerosferler bulunmakta olup; bu küller şekil dağılımı açısından genellikle homojen olan mikroyapıya sahiptirler.

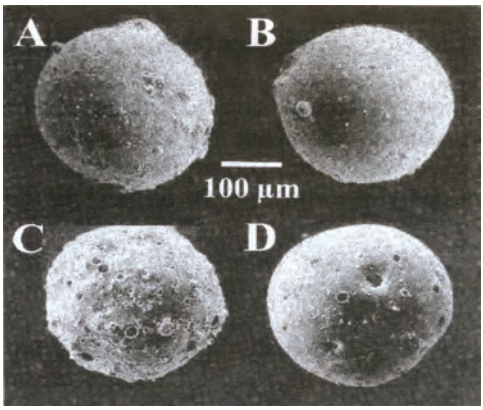
Yüksek kireçli küllerde, mikroyapı içinde hem küresel hem de köşeli, düzensiz şekilli taneciklerin birarada bulunması sonucunda, homojen olmayan şekil dağılımı mevcuttur [14], (Şekil. 2). Ayrıca küresel taneciklerin yüzeyi de, düşük kireçli küller kadar düzgün değildir.

Taneciklerin şekli ve büyüklük dağılımlarının, taze betonun su ihtiyacı ve işlenebilirlik gibi reolojik özelliklerine etki ettiği bilinmektedir [15]. Bu etki özellikle küresel taneciklerin kayganlaştırıcı (lubricant) nitelik taşıması ve dolgu maddesi (microfiller) özelliğine sahip olma; şekilsiz, pürüzlü yüzeye sahip olanların su ihtiyacını arttırma şeklinde olmaktadır. Ayrıca, uçucu külün tane büyüklük dağılımının çok değişken olması halinde de su ihtiyacı artmaktadır [16].

Uçucu külün granülometrik bileşiminin çoğunun 40 μm'nin altında olması (10-20 μm) ve şeklinin de genelde küresel olması puzolanik aktiviteye olumlu etki etmektedir. Özellikle yüzeyi pürüzsüz ince küresel tanecikler, yüzey alanları büyük olduğu için kireç-silikat reaksiyonlarına daha hızlı girmektedirler.

Buna bağlı olarak yüksek kireçli külün aktivitesinde kristalize aktif fazlar (anhidrit, kireç) ve az camsı fazı rol oynamakta, düşük kireçli de ise taneciklerin şekli, büyüklük dağılımı ve camsı fazın fazlalığı önem taşımaktadır.

Şekil 1.Uçucu Kül Taneciklerinin Morfolojik Yapısı.

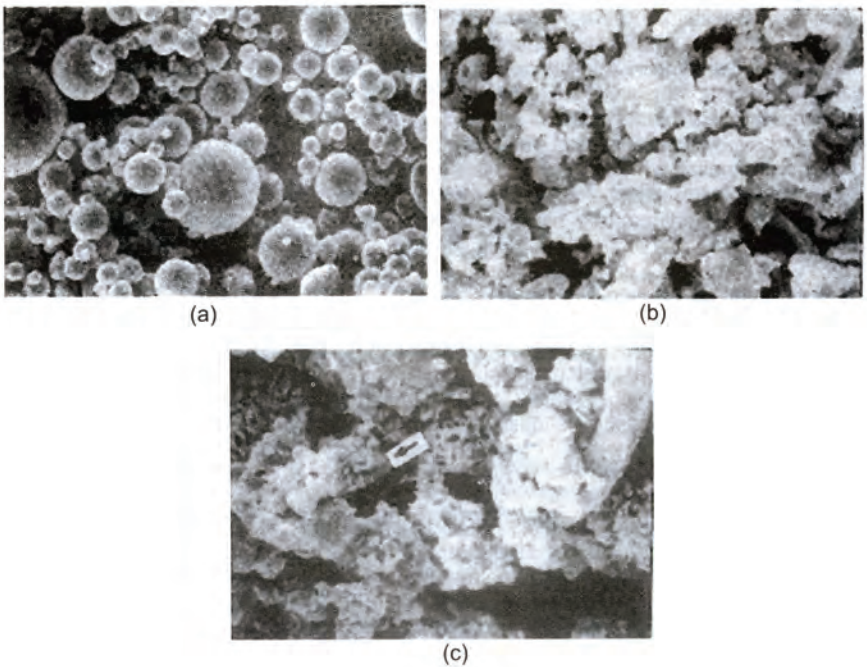


(A) Yüzeyinde birikintiler ve sıvı damlaları olan küresel tanecik

(B) Camsı küresel tanecik

(C) Yüzeyi düzensiz boşluklar içeren tanecik

(D) Boşluklu küresel tanecik



Şekil 2.Uçucu Kül Tipleri

(a) Yüksek silisli uçucu kül (pulverize uçucu kül)
(b) ve (c) Yüksek kireçli uçucu kül

Araştırma Grubu

TÇMB AR-GE Enstitüsünde gerçekleştirilen , "Uçucu Küllerin Karakterizasyonu ve Betonda Kullanımı" konulu araştırma ile ilgili deneysel çalışmalar, Prof. Asım Yeğinobalı'nın koordinasyonu ile Pelin Türker (kimyasal, mineralojik ve mikroskopik analizler), Fehime Katnaş (kimyasal analizler) ve Bahadır Erdoğan (fiziksel ve mekanik testler) tarafından yapılmıştır.

Deneysel Çalışmalar

TÇMB ve EÜAŞ işbirliği ile yürütülen araştırmada, Türkiye'nin çeşitli bölgelerindeki 11 termik santralden (Afşin-Elbistan, Kangal, Seyitömer, Çatalağzı, Yatağan, Orhaneli, Tunçbilek, Çayırhan, Soma, Kemerköy, Yeniköy) orjinal halde (herhangi bir seperasyon işleminden geçmeden) temin edilen uçucu küller kullanılmıştır. Bu küller, bazı santrallerde tek ünite, bazılarında birkaç ünitedeki elektrofiltrelerden 5 gün süreyle toplanan küllerdir.

2.3. Yapılan Analizler

Kimyasal Analiz:

Kimyasal analizler, Atomik Absorbsiyon Spektrometresi (temel oksit analizleri) ve Yaş Analiz Metodları (serbest kireç, reaktif silis, reaktif kireç, SO_3, klorür, kızdırma kaybı) kullanılarak yapılmıştır. Analizlerde TS 687 ve TS EN 451-1 standartlarındaki metodlar kullanılmış olup; sonuçlar TS EN197-1,TS EN 450, TS 639 ve ASTM C-618 standardları baz alınarak değerlendirilmiştir.

Mineralolojik Analiz:

Uçucu küllerin mineralojik bileşimleri, X-Işınları Difraktometresinde toz difraksiyon yöntemiyle (0-65° 2θ aralığında) tespit edilmiştir.

Morfoloji ve Mikroyapı Analizi:

Uçucu kül numunelerinin yüzey yapıları, Tarama Elektron Mikroskobunda, ikincil elektron görüntüsü yöntemiyle incelenmiş; numunelerin mikroanalizleri mikroskoba bağlı Enerji Dağılım Sisteminde yapılmıştır. Camsı fazdaki kristalize yapılar, küllerin %1'lik HF çözeltisinde birkaç saat süreyle tutulması sonrasında tespit edilmiştir.

Fiziksel ve Mekanik Testler:

Uçucu küllerin fiziksel ve mekanik özellikleri (puzolanik aktivite, 90 µm, 45 µm elek bakiyeleri ,özgül ağırlık) TS EN 196-6 ve TS EN 450 standartlarına göre tespit edilmiş yoğunluk değerleri için dijital piknometre kullanımıştır. Sonuçlar TS EN 450 standardına göre değerlendirilmiştir.

3. KİMYASAL, MİNERALOJİK ve MORFOLOJİK ANALİZ SONUÇLARI

3.1. Afşin-Elbistan Termik Santrali Uçucu Külü

Kimyasal Analiz Sonuçları

Afşin-Elbistan Termik Santralinin, 1. üniteden 1. gün, 2. üniteden 4 gün süreyle olmak üzere iki ayrı ünitesinden alınan numunelerin ayrı ayrı kimyasal analizleri yapılmıştır. Kimyasal analiz sonuçları ve bu sonuçların ortalamasının standardlardaki sınırlar ile karşılaştırması, Tablo. 1 ve Tablo. 2a ve 2b' de verilmiştir.

Afşin-Elbistan uçucu külü, reaktif kireç miktarının % 10'un üzerinde olması nedeniyle TS EN 197-1'e göre W sınıfına (kalkersi uçucu kül) girmektedir. ASTM C 618'e göre SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 değerinin % 50'nin altında kalması ve CaO>% 10 olması nedeniyle C sınıfı (yüksek kireçli) uçucu kül sınıfına uymaktadır. Tablo. 1 ve Tablo. 2b'deki standartlara uygunluk değerlendirmesine göre, bu külün TS EN 197-1'deki W sınıfı kül için istenen % 10-15 arası reaktif CaO miktarını içerdiği; ancak, bu değere karşılık reaktif silis için istenen % 25'den az olmama koşulunu sağlayamadığı görülmüştür.

Her iki ünite külü de SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 (S+A+F) için ASTM C 618'de C sınıfında belirtilen S+F+A>% 50 ve TS 639'da S+F+A>%70 şartlarını sağlayamamıştır. TS EN 450 standardına göre en fazla % 3, diğer üç standarda göre en fazla % 5 ile sınırlandırılan SO_3 miktarı da 1. ünitede % 24.24, 2.ünitede % 11.41 olmak üzere sınırın dışındadır. Yine, TS EN 450 standardında serbest kireç için en fazla % 1.0 koşulu, yüksek kireçli uçucu kül olduğu için sağlanamamıştır. Kızdırma kaybı, MgO ve Cl^- içerikleri standardlarda verilen sınır değerler içinde kalmıştır.

Sonuç olarak, Afşin-Elbistan Termik Santrali uçucu külünün ilgili standardların gerektirdiği şartlara tamamiyle uymadığı görülmüştür.

Tablo1. Afşin-Elbistan(1.Ünite) Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Standartlara Uygunluk Sınırları							
Oksit (%)	Uçucu Kül	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM C 618	
			V	W		F	C
SiO_2	9.37						
Al_2O_3	4.63						
Fe_2O_3	2.58						
S+A+F	16.58				>70.00	>70.00	>50.00
CaO	54.38						
MgO	1.54				<5.00		
SO_3	24.24	<3.00			<5.00	<5.00	<5.00
K_2O	0.43						
Na_2O	0.18						
KK	2.58	<5.00	<5.00	<5.00	<10.00	<6.00	<6.00
Cl^-	0.035	<0.10					
Serb.CaO	12.86	<1.00					
Reak.SiO_2	8.61	>25.00	>25.00	>25.00			
Reak.CaO	36.16		<10.00	>10.00			

Tablo 2a. Afşin-Elbistan(2.Ünite) Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçları

Numune							
Oksit (%)	1	2	3	4	Ortalama	St.sapma	Varyasyon kats.,%
SiO_2	18.26	17.46	16.74	20.62	18.27	1.46	7.99
Al_2O_3	9.05	9.24	8.40	9.96	9.16	0.64	6.99
Fe_2O_3	3.30	3.40	3.04	3.28	3.26	0.15	4.60
S+A+F	30.61	30.10	28.18	33.86	30.69	-	-
CaO	53.88	52.27	53.71	53.88	53.44	0.78	1.45
MgO	1.68	1.78	1.80	1.72	1.75	0.06	3.43
SO_3	11.22	13.16	13.55	7.70	11.41	2.67	23.40
K_2O	0.36	0.34	0.41	0.41	0.38	0.04	10.53
Na_2O	0.18	0.18	0.18	0.21	0.19	0.01	5.26
KK	2.04	2.09	2.14	2.21	2.12	0.07	3.30
Cl^-	0.013	0.013	0.013	0.010	0.012	0.001	8.33

Tablo 2b. Afşin-Elbistan (2.Ünite) Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

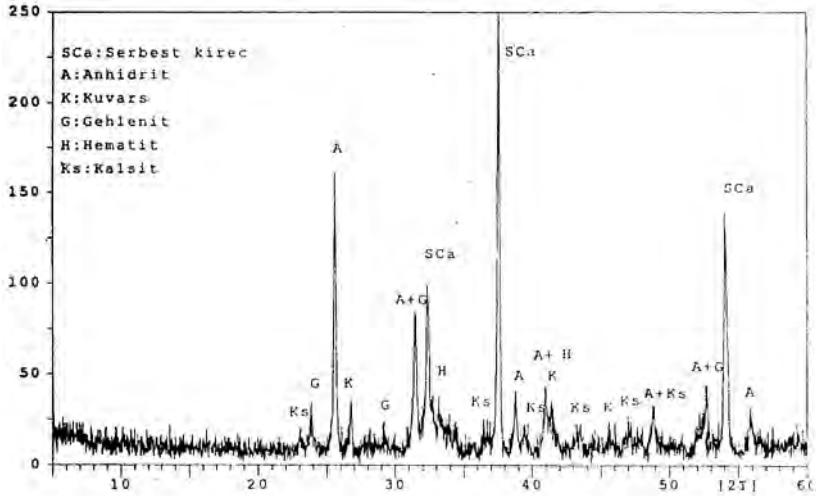
Standartlara Uygunluk Sınırları							
Oksit (%)	Uçucu Kül	TS EN 450	TS ENV 197-1		TS 639	ASTM C 618	
			V	W		F	C
SiO_2	18.27						
Al_2O_3	9.16						
Fe_2O_3	3.26						
S+A+F	30.68				>70.00	>70.00	>50.00
CaO	53.44						
MgO	1.74				<5.00		
SO_3	11.40	<3.00			<5.00	<5.00	<5.00
K_2O	0.38						
Na_2O	0.19						
KK	2.12	<5.00	<5.00	<5.00	<10.00	<6.00	<6.00
Cl^-	0.012	<0.10					
Serb.CaO	11.62	<1.00					
Reak.SiO_2	15.40	>25.00	>25.00	>25.00			
Reak.CaO	37.32		<10.00	>10.00			

Mineralojik Analiz Sonuçları

Afşin-Elbistan uçucu külünün mineralojik bileşimini gösteren X-ışınları difraktogramı Şekil 3'de verilmiştir.

Buna göre, uçucu külün esas itibariyle kristalize fazlar içerdiği, camsı fazın çok az olarak bulunduğu tespit edilmiştir. Kristalize fazlar, başta serbest kireç, anhidrit, kuvarsın yanısıra gehlenit, hematit ve kalsitden oluşmaktadır. Hem kireç hem de kalsitin uçucu külde bulunması, kömürden gelen çok ince kalsit taneciklerinin gaz akışı sırasında tutulmasından ileri gelir.

Şekilde görüldüğü gibi, camsı fazın maksimum durumu 32.5° 2θ'da olup bu durum külün analitik CaO miktarının çok yüksek olmasından (%54.30) ileri gelmektedir. Dolayısıyla, Afşin Elbistan uçucu külü, kalsiyumalüminatlı camsı faz niteliğinde camsı yapıya sahiptir.

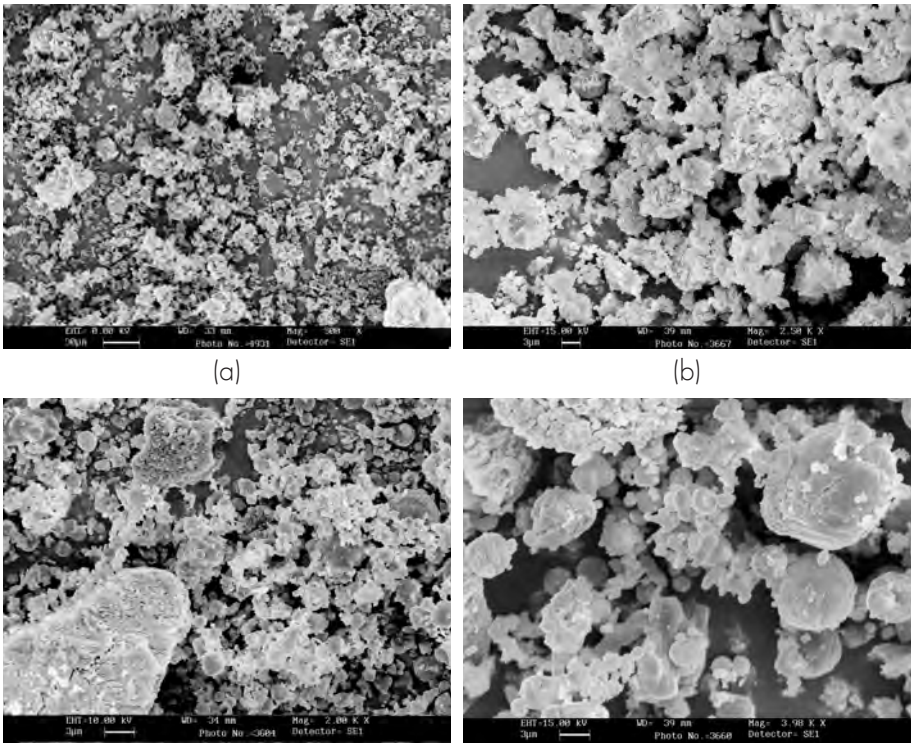


Şekil 3. Afşin Elbistan Uçucu Külünün Mineralojik Bileşimine Ait X-Işınları Difraktogramı

Morfolojik Analiz Sonuçları

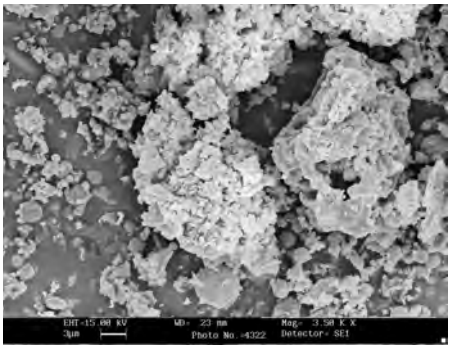
Afşin-Elbistan uçucu külünün mikroyapı incelemesi sonucunda, 3-30 µm arasında değişen büyüklüklerde düzensiz şekilli, ve özellikle 2. ünitede daha fazla olmak üzere köşeli tanecikler içerdiği gözlenmiştir (Şekil. 4).

Köşeli taneciklerin kuvars, serbest kireç, anhidrit bileşiminde olduğu bulunmuştur. Özellikle, 1. ünitede yarı-küresel taneciklere de rastlanmış ; bazılarının yüzeyinin farklı şekillerde (prizmatik, psödokübik , ortorombik gibi)anhidrit kristalleri ile kaplandığı tespit edilmiştir (Şekil. 5). Anhidrit kristalleri, piritin oksidasyonu ile meydana gelen SO_2 gazının, CaO ile külün yüzeyinde heterojen çekirdek oluşturarak yoğuşması ile meydana gelirler. Şekilsiz yapıda görülen poröz kil kalıntıları, kömürün yanması sırasında illitin kısmi ergimesi sonucunda meydana gelmektedir. Kuvars, yanma sırasında ortamdan uzaklaşarak kısmen deforme olmuş şekilde küle karışarak mikroyapı içinde gözlenmiştir. Ayrıca, tanecik yüzeyinde gehlenit oluşumlarına da rastlanmıştır.

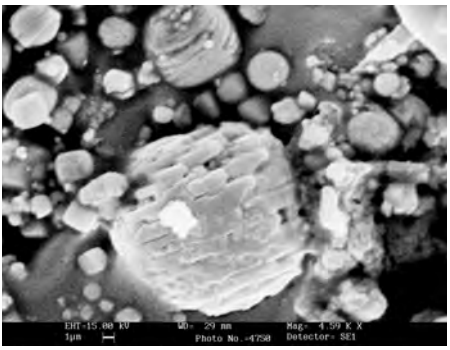


Şekil 4. Afşin-Elbistan Uçucu Külünün Morfolojik Yapısına Ait Mikrofotoğraflar.

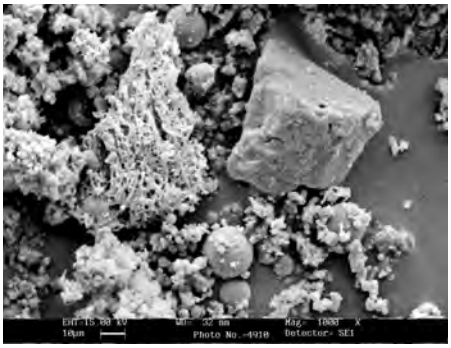
(a) Taneciklerin genel dağılımı (x500),
(b) 1.ünitedeki köşeli,şekilsiz ve kümeler halindeki tanecikler (x 2500)
(c) 2.ünitedeki tanecik dağılımı ve iri anhidrit kristali (x2000)
(d) Yarı-küresel şekilli tanecikler (~x4000)



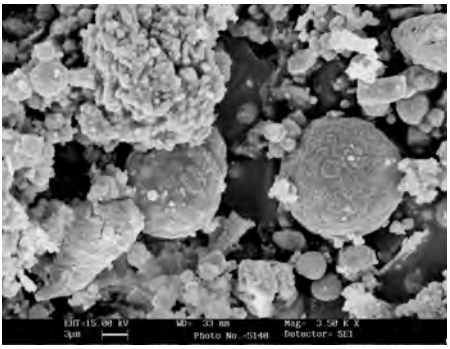
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5. Afşin-Elbistan Uçucu Külünün Kristal Yapısı.

(a) Serbest kireç ve kil kalıntısı (x3500)
(b) Anhidrit kaplı küreler (x5500)
(c) Kuvars ve kil kalıntısı (x1000)
(d) Gehlenit kaplı küreler (x3500)

3.2. Orhaneli Termik Santrali Uçucu Külü

Kimyasal Analiz Sonuçları

Orhaneli Termik Santralinden beş gün boyunca alınan uçucu kül numunelerinin kimyasal analiz sonuçları ve ortalama değerlerin standartlara uygunluğunun değerlendirmesi Tablo. 3a ve 3b 'de verilmiştir.

Tablo. 3a incelendiğinde, Orhaneli uçucu külünün kimyasal bileşenlerin yüzdelerinin birbirine çok yakın olması nedeniyle, bu santralin stabil koşullarda üretim yaptığı sonucuna varılmıştır.

Orhaneli uçucu külü, reaktif kireç miktarının %10'un altında olması nedeniyle TS EN 197-1'e göre V sınıfı (silissi uçucu kül) kapsamına girmektedir. Bu standartta istenilen reaktif silis miktarının da %25'in üzerinde olması (%34.06) nedeniyle TS EN 197-1'V sınıfı kül koşullarına tamamen uyduğu anlaşılmıştır.

SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 yüzdesinin %70'i geçmesi (%80.73) ve CaO miktarının %10'un altında olması nedeniyle ASTM C 618'de belirtilen F sınıfı (düşük kireçli) uçucu kül koşulunu sağlamaktadır.

Orhaneli külünün SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 yüzdesinin %70'i geçmesi aynı zamanda TS 639'daki koşula da uymaktadır.

TS EN 450 standardına göre SO_3 için getirilen %3.0'lük sınırın altında SO_3 içermesi (%2.48) serbest kireç miktarının %1.0'in altında olması nedeniyle bu standarda da uymaktadır.

Sonuç olarak, Orhaneli Termik Santrali uçucu külünün kimyasal bileşim açısından dört standartta da istenilen koşullara tamamiyle uygun bir kül olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 3a. Orhaneli Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçları

	Numune							
Oksit (%)	1	2	3	4	5	Ortalama	St.sapma	Varyasyon kats.,%
SiO_2	47.48	48.66	48.77	48.52	49.23	48.53	0.65	1.34
Al_2O_3	24.17	25.30	25.25	24.29	24.06	24.61	0.61	2.48
Fe_2O_3	8.03	7.18	7.48	7.63	7.62	7.59	0.31	4.08
S+A+F	79.68	81.14	81.50	80.44	80.91	80.73	-	-
CaO	11.38	8.83	9.06	9.06	9.06	9.48	1.07	11.28
MgO	2.27	2.26	2.29	2.31	2.25	2.28	0.02	0.88
SO_3	2.49	2.64	2.10	3.00	2.18	2.48	0.36	14.52
K_2O	2.47	2.56	2.65	2.44	2.44	2.51	0.09	3.58
Na_2O	0.35	0.35	0.37	0.33	0.35	0.35	0.01	2.85
KK	1.11	1.76	1.72	1.93	1.93	1.69	0.34	20.12
Cl^-	0.005	0.006	0.005	0.004	0.005	0.005	0.001	20.00

Tablo 3b. Orhaneli Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

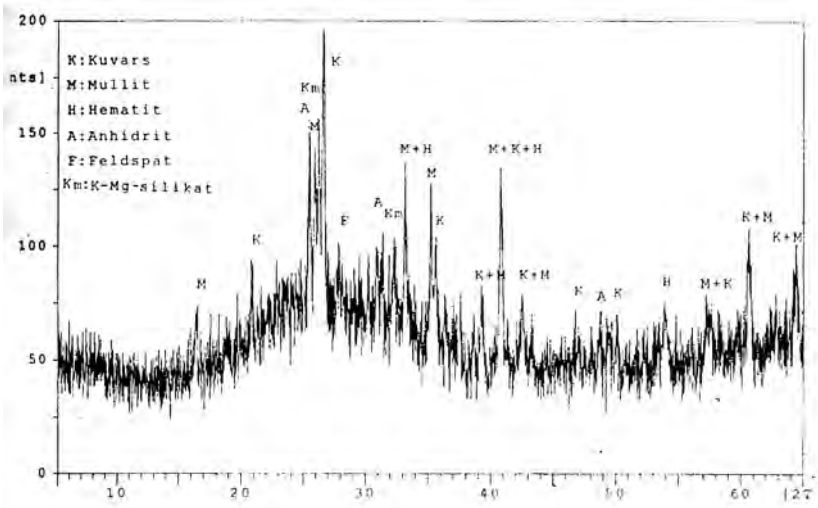
	Standartlara Uygunluk Sınırları						
Oksit (%)	Uçucu Kül	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM C 618	
			V	W		F	C
SiO_2	48.53						
Al_2O_3	24.61						
Fe_2O_3	7.59						
S+A+F	80.73				>70.00	>70.00	>50.00
CaO	9.48						
MgO	2.28				<5.00		
SO_3	2.48	<3.00			<5.00	<5.00	<5.00
K_2O	2.51						
Na_2O	0.35						
KK	1.69	<5.00	<5.00	<5.00	<10.00	<6.00	<6.00
Cl^-	0.005	<0.10					
Serb.CaO	0.11	<1.00					
Reak.SiO_2	34.06	>25.00	>25.00	>25.00			
Reak.CaO	7.58		<10.00	>10.00			

Minerolojik Analiz Sonuçları

Orhaneli Termik Santrali uçucu külünün minerolojik bileşimine ait X-ışınları difraktogramı Şekil 6'da verilmiştir.

Buna göre, Orhaneli uçucu külünün başlıca fazının camsı faz olduğu anlaşılmıştır. Camsı fazın yanısına kuvars, mullit, hematit, anhidrit, sanidin ve K-Mgsilikat gibi kristalize fazlar bulunduğu da tespit edilmiştir.

Orhaneli uçucu külünün X-Işınları difraktogramında ana faz camsı faz olduğunda genel olarak background yüksek konumdadır; ancak, özellikle 23-27° 2θ'da background belirgin bir yükselme (tümsek) göstermiştir. Kimyasal analizde uçucu külde SiO_2 %48.53, Al_2O_3 %24.61 olarak bulunduğu için ve hafifçe 27° 2θ'ye doğru kayması Tunçbilek külüne kıyasla daha fazla Al_2O_3 ve CaO (%9.48) içermesidir.



Şekil 6. Orhaneli Uçucu Külünün Mineralojik Bileşimine Ait X-Işınları Difraktogramı.

Morfolojik Analiz Sonuçları

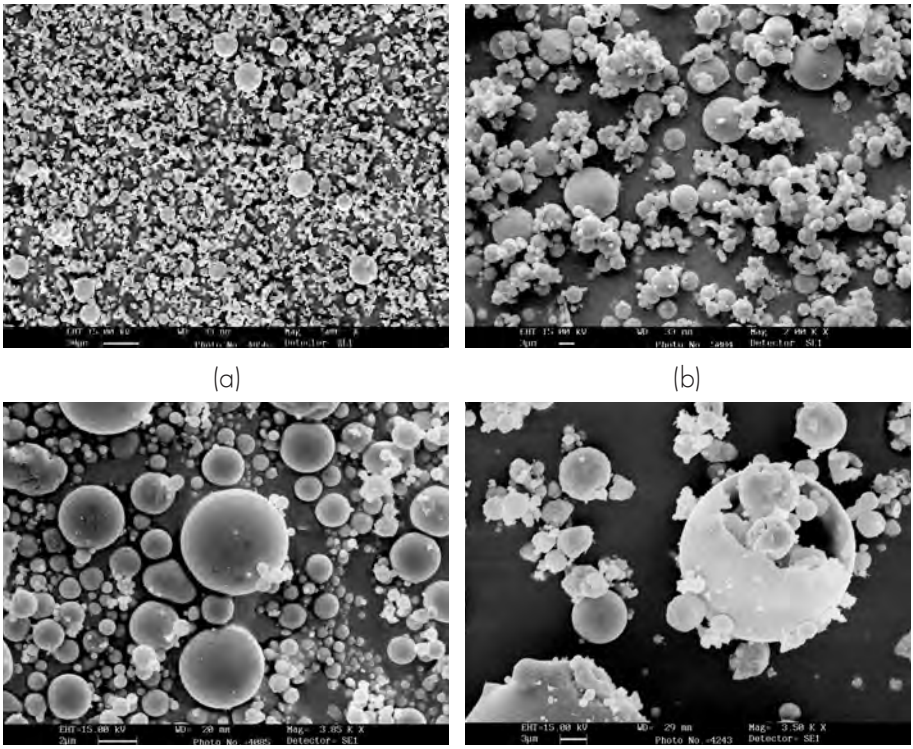
Orhaneli uçucu külünün morfolojik incelemesi sonucunda, büyüklüğü 0.5-15μ arasında değişen çoğunluğu düzenli dağılmış tam küresel taneciklerden (solid spheres) oluştuğu görülmüştür (Şekil. 7, 8, 9)

Tam küresel camsı katı tanecikler, kömürün yanması sırasında ulaşılan yüksek sıcaklık nedeniyle, kömürdeki minerallerin çoğunun (kil) ergimesi sonucunda oluşan damlacıkların hızla soğutulması ile meydana gelirler.

Bunların yanısıra içi boşluklu ve mikro küreler kümesi içeren plerosferlere de rastlanmıştır.

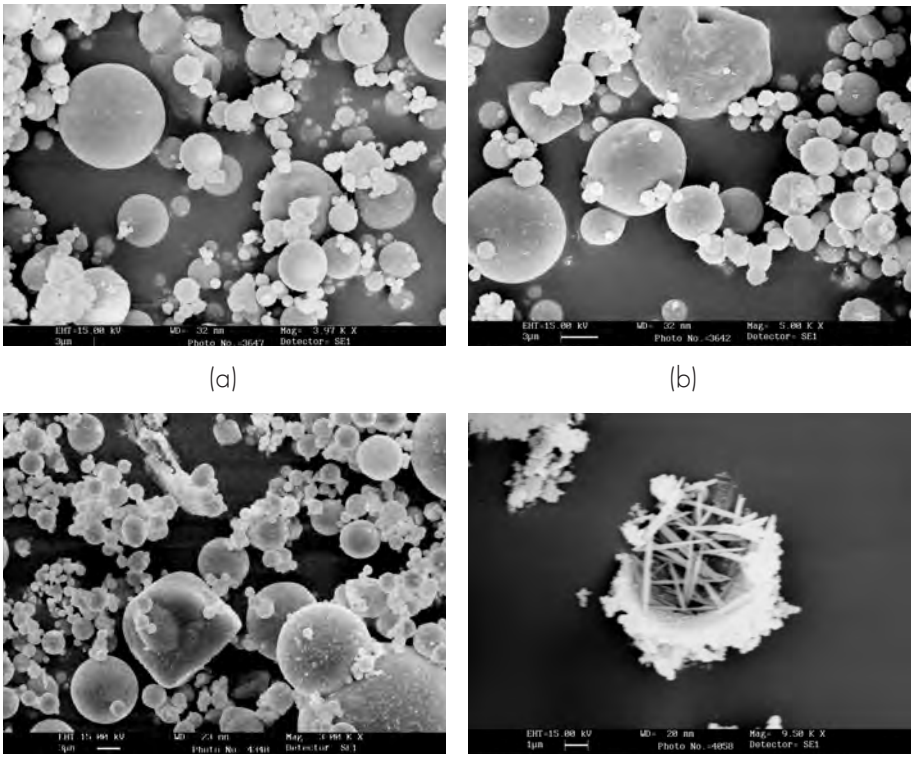
Ayrıca, mikroyapı içinde konkoidal yapılı kuvars, yüzeyi anhidrit kaplı tanecikler ve ince prizmatik mullit kristalleri de tespit edilmiştir. Mullit kristalleri, külün asitde çözme işlemi sonrasında reaktif camsı fazın ayrılması sonucu ortaya çıkmıştır. İnce olarak dağılmış mullit, senosferlerdeki aluminosilikat bileşimli camsı fazın kısmi olarak kristalizasyonundan ileri gelmektedir. Kuvars kristalleri, yüksek termal stabiliteleri nedeniyle, kömürün yanması sırasında ortamdan ayrılarak ve orjinal yapılarını (konkoidal) kısmen koruyarak uçucu küle katılmışlardır.

Bazı kürelerin yüzeyinde anhidrit(kübik) ve hematit(ince kristalize) birikimlerine rastlanmıştır.



Şekil 7. Orhaneli Uçucu Külünün Mikroyapısına Ait Fotoğraflar.

(a) Taneciklerin genel olarak dağılımı (x500),
(b) ve (c) Tam küresel ,yüzeyi pürüzsüz, katı camsı tanecikler (x2000,x3850),
(d) Plerosfer küresi (x3500).

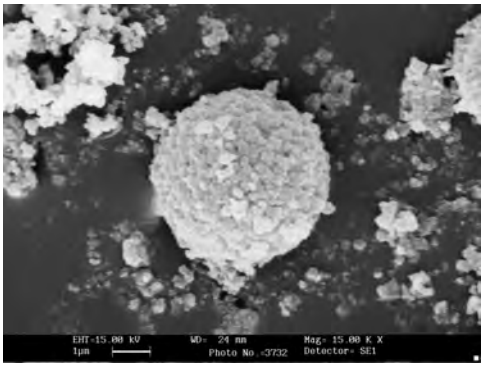


(a) (b)

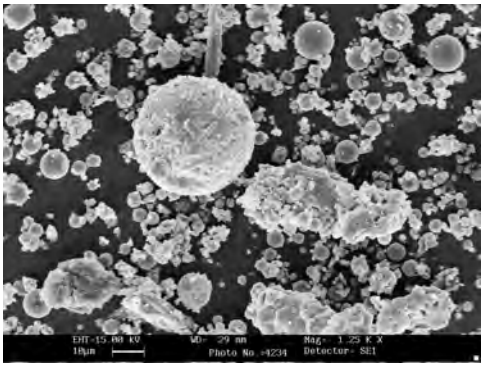
(c) (d)

Şekil 8.Orhaneli Uçucu Külünün Mikroyapısı

(a)ve (b) Farklı boyutlarda dağılmış küresel tanecikler(~x4000,x5000),
(c) Köşeli kuvars kristali,(x3000)
(d) İnce prizmatik mullit kristali.(x9500)



(a)



(b)

Şekil 9. Orhaneli Uçucu Külünün Mikroyapısı.

(a) Kübik anhidrit kristalleri kaplı küresel tanecik (x15000),
(b) Hematit kaplı tanecik (x1250),

3.3. Çatalağzı Termik Santrali Uçucu Külü

Kimyasal Analiz Sonuçları

Çatalağzı Termik Santralinden, beş gün süreyle alınan uçucu kül numunelerinin kimyasal analizleri yapılmış; sonuçlar ve ortalama sonuçların standartlardaki sınır değerlere uygunluğu sırasıyla Tablo. 4a ve 4b' de gösterilmiştir.

Kimyasal bileşim açısından, bileşen yüzdelerinin birbirine çok yakın olması nedeniyle, bu santralden üniform özellikte kül elde edilebileceği anlaşılmıştır.

Çatalağzı uçucu külü, reaktif kireç miktarının % 10'un altında olması nedeniyle TS EN 197-1 standardına göre V sınıfına (silissi uçucu kül) girmektedir. Yine ASTM C618 standardına göre SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 değerinin % 70'in üzerinde olması ve CaO miktarının % 10'dan az olması (%1.46) nedeniyle F sınıfına (düşük kireçli) dahil olmaktadır.

SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3'in % 70'in üzerinde olması nedeniyle TS 639'da istenen şarta uymaktadır.

SO_3 ve serbest kireç yüzdeleri ,sırasıyla % 0.08 ve % 0.13 olup, bu bileşenler için TS EN 450 standardında istenilen en fazla % 3.0 ve % 1.0 koşullarına uymaktadır.

Buna sonuçlara göre, Çatalağzı uçucu külü, dört standartta da kimyasal bileşen bazında istenilen koşullara tamamiyle uygun bir kül olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 4a. Çatalağzı Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçları

	Numune							
Oksit (%)	1	2	3	4	5	Ortalama	St.sapma	Varyasyon kats.,%
SiO_2	58.69	58.48	58.55	58.95	59.07	58.75	0.25	0.43
Al_2O_3	25.10	25.34	25.48	24.94	25.36	25.24	0.22	0.87
Fe_2O_3	5.80	5.77	5.66	5.81	5.74	5.76	0.06	1.05
S+A+F	89.59	89.59	89.69	89.70	90.17	89.75	_	_
CaO	1.49	1.48	1.34	1.55	1.45	1.46	0.08	5.48
MgO	2.22	2.22	2.22	2.22	2.20	2.22	0.01	0.45
SO_3	0.12	0.12	0.10	0.03	0.05	0.08	0.04	50.00
K_2O	4.04	4.09	4.04	4.02	4.05	4.05	0.03	0.74
Na_2O	0.59	0.59	0.59	0.61	0.61	0.60	0.01	1.83
KK	1.28	1.01	1.33	1.02	0.98	1.12	0.17	15.18
Cl^-	0.013	0.027	0.011	0.016	0.010	0.015	0.007	50.00

Tablo 4b. Çatalağzı Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

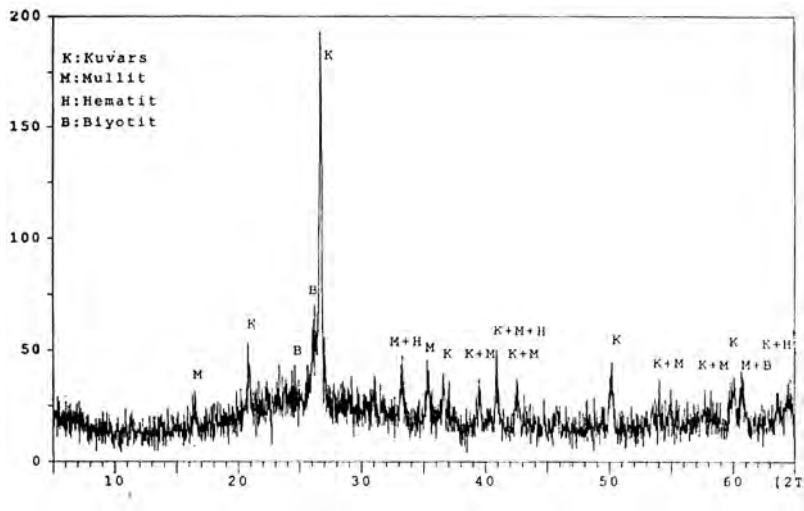
	Standartlara Uygunluk Sınırları						
Oksit (%)	Uçucu Kül	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM C 618	
			V	W		F	C
SiO_2	58.75						
Al_2O_3	25.24						
Fe_2O_3	5.76						
S+A+F	89.75				>70.00	>70.00	>50.00
CaO	1.46						
MgO	2.22				<5.00		
SO_3	0.08	<3.00			<5.00	<5.00	<5.00
K_2O	4.05						
Na_2O	0.60						
KK	1.12	<5.00	<5.00	<5.00	<10.00	<5.00	<6.00
Cl^-	0.015	<0.10					
Serb.CaO	0.13	<1.00					
Reak.SiO_2	34.18	>25.00	>25.00	>25.00			
Reak.CaO	0.65		<10.00	>10.00			

Mineralojik Analiz Sonuçları

Çatalağzı Termik Santrali uçucu külünün mineralojik bileşimine ait x-ışınları difraktogramı Şekil 10' da verilmiştir.

Buna göre camsı ve az oranda kristal fazlardan oluştuğu görülmektedir. Kristalize fazlar kuvars, mullit, biyotit (mika grubu) ve hematit' den meydana gelmektedir.

Çatalağzı uçucu külünün X-ışınları difraktogramında, camsı fazın 23-25° 2θ arasında maksimum duruma geldiği görülmüş, dolayısıyla camsı fazın silisyumca zengin alüminosilikat bileşiminde olduğu anlaşılmıştır.



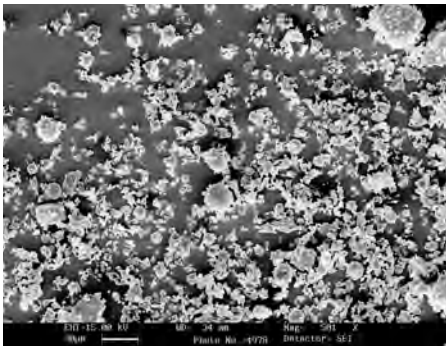
Şekil 10.Çatalağzı Uçucu Külünün Mineralojik Bileşimine Ait X-Işınları Difraktogramı.

Morfolojik Analiz Sonuçları

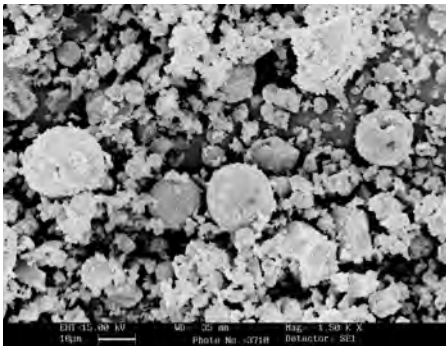
Çatalağzı uçucu külü, çoğunluğu tam küresel tanecikler (1-20 μm)'den olmakla birlikte yarı-köşeli tanecikler de içermektedir (Şekil. 11). Ayrıca ,içi mikroküreler ile dolu iri küresel tanecikler (plerosferler)'de bulunmaktadır. Bunlar belli bir kürenin(senosfer) oluşum sırasında kısmen kırılması bunların daha küçük olanlar ile doldurulması veya ergimiş kildeki gaz çıkışındaki kısmen düzensizlik olması nedeniyle, senosfere ilaveten farklı boyutlarda meydana gelen camsı kabarcıkların oluşumu ile meydana gelirler.

Taneciklere yapılan mikroanaliz sonucunda tam küresel yapıların alüminyum silikat bileşiminde olduğu; köşeli yapıların kuvars, biyotit bileşiminde olduğu tespit edilmiştir (Şekil. 12).

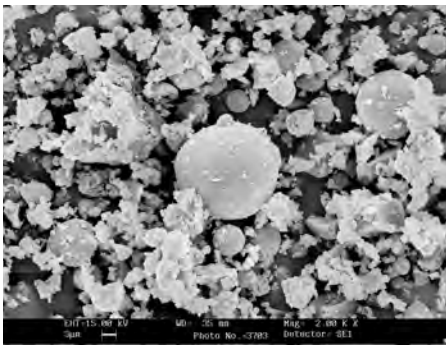
Uçucu küle HF-asit uygulaması sonucunda, bazı küresel taneciklerde camsı fazın çözünmesi sağlanmış ve ince-prizmatik (psödohegzagonal) mullit kristalleri ortaya çıkmıştır (Şekil. 12). Senosferler ve mullit kristalleri, kömürün yüksek sıcaklıklarda yanması sırasında kilin termal bozunmasının ürünleridir. Biyotit minerali, kuvars gibi yüksek termal stabilitesi nedeniyle yanma sırasında reaksiyona girmeyerek, uçucu küle karışmıştır.



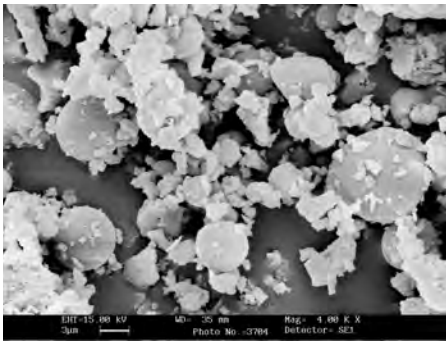
(a)



(b)



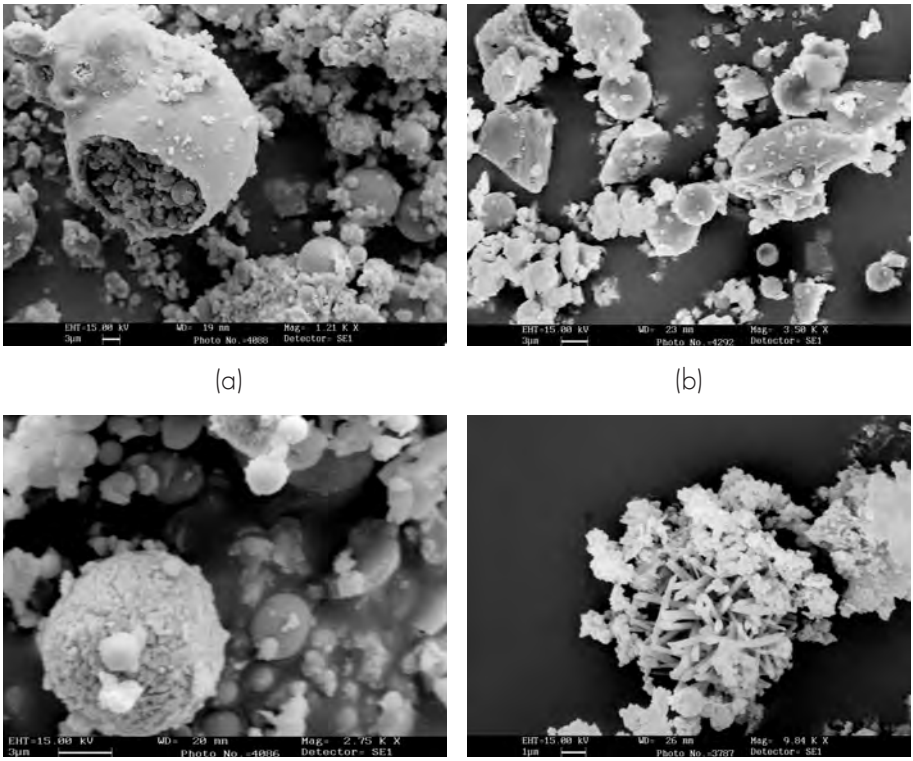
(c)



(d)

Şekil11.Çatalağzı Uçucu Külünün Yüzey Yapısına Ait Fotoğraflar.

(a) Taneciklerin genel olarak dağılımı (x500)
(b) Senosferler ve köşeli yapılar (x1500)
(c) ve (d) Tam küresel ve yüzeyinde kısmen birikintiler olan tanecikler.



Şekil 12. Çatalağzı Uçucu Külünün Mikroyapısı.

(a) Plerosfer küresi (x1200),
(b) Kütle halinde biyotit (x3500)
(c) Ferrosfer küresi(hematit taneciği) (x2750)
(d) Mullit kristalleri içeren tanecik(~x10000)

3.4. Seyitömer Termik Santrali Uçucu Külü

Kimyasal Analiz Sonuçları

Seyitömer Termik Santralinden, beş gün süreyle alınan uçucu kül analiz sonuçları ve ortalama değerlerin standartlara uygunluğunun değerlendirmesi Tablo. 5a ve 5b 'de verilmiştir.

Aynı termik santralin sepere edilmiş haldeki uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları ve ortalama değerlerin standartlardaki sınır değerler karşılaştırılması da Tablo 5c ve 5d'de verilmiştir.

Seyitömer Termik Santralinin, uçucu kül numunelerinin kimyasal bileşen yüzdeleri Tablo. 5a' da görüleceği gibi birbirine çok yakın olduğu için; bu santralden uniform özellikte kül elde edilmesi mümkündür.

Seyitömer uçucu külü, reaktif kireç miktarının % 10'un altında olması (% 2.49) nedeniyle, TS EN 197-1'de verilen V sınıfı (silissi uçucu kül) kapsamına girmektedir. Reaktif silis miktarının % 25'in üzerinde (% 39.01) olması nedeniyle de TS EN 197-1'de V sınıfı uçucu kül için istenilen koşullara tamamen uymaktadır. SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 miktarı ortalama, 88.71 olup ASTM C 618'e göre % 70.00'in üzerinde ve CaO'in % 10'dan az olması nedeniyle F sınıfı (düşük kireçli) uçucu kül sınıfına girmektedir.

SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3'in % 70'in üzerinde olması nedeniyle TS 639'da istenen şarta uymaktadır.

SO_3 değeri EN 450 standardında, SO_3 için istenen en fazla % 3 sınırları içinde (% 0.52) kalmaktadır. Düşük kireçli kül olması nedeniyle serbest kireç yüzdesi de % 0.26 olup, standarttaki % 1.00'lik sınırın altında kalmaktadır.

Sonuç olarak, Seyitömer uçucu külü dört ayrı standartta kimyasal bileşen bazında gereken koşullara tamamen uymaktadır.

Tablo 5a. Seyitömer Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçları

	Numune							
Oksit (%)	1	2	3	4	5	Ortalama	St.sapma	Varyasyon kats. (%)
SiO_2	54.69	54.60	54.37	54.97	53.81	54.49	0.39	0.71
Al_2O_3	21.04	20.92	20.45	19.98	20.50	20.58	0.38	1.85
Fe_2O_3	9.40	9.27	9.24	9.02	9.43	9.27	0.15	1.62
S+A+F	85.13	84.79	84.06	83.97	83.74	84.34	_	_
CaO	3.76	3.29	4.94	4.60	4.70	4.26	0.63	14.78
MgO	4.28	4.63	4.32	4.49	4.70	4.48	0.17	2.54
SO_3	0.53	0.52	0.42	0.50	0.65	0.52	0.07	13.46
K_2O	1.77	2.13	2.19	1.96	1.98	2.01	0.15	7.46
Na_2O	0.63	0.65	0.70	0.63	0.65	0.65	0.03	4.61
KK	3.05	3.08	3.03	3.02	2.88	3.01	0.07	6.47
Cl^-	0.0065	0.0053	0.0056	0.0060	0.0055	0.0058	0.0004	6.89

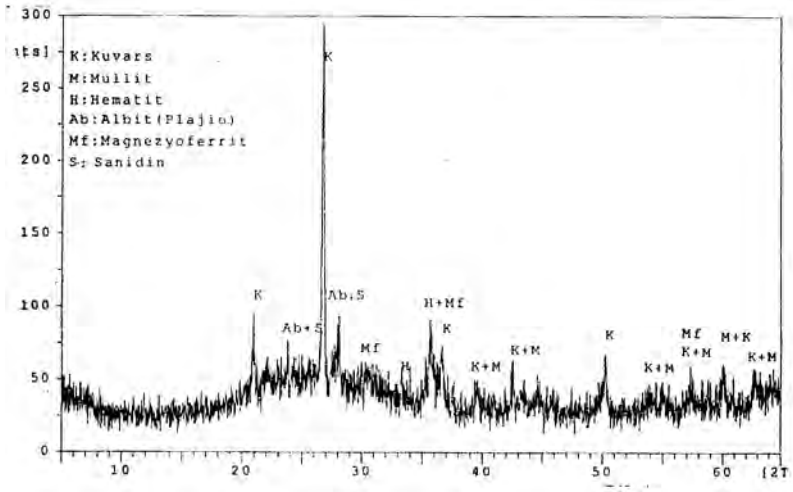
Tablo 5b. Seyitömer Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

	Standartlara Uygunluk Sınırları						
Oksit (%)	Uçucu Kül	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM C 618	
			V	W		F	C
SiO_2	54.49						
Al_2O_3	20.58						
Fe_2O_3	9.27						
S+A+F	84.34				>70.00	>70.00	>50.00
CaO	4.26						
MgO	4.48				<5.00		
SO_3	0.52	<3.00			<5.00	<5.00	<5.00
K_2O	2.01						
Na_2O	0.65						
KK	3.01	<5.00	<5.00	<5.00	<10.00	<6.00	<6.00
Cl^-	0.006	<0.10					
Serb.CaO	0.26	<1.00					
Reak.SiO_2	39.01	>25.00	>25.00	>25.00			
Reak.CaO	2.49		<10.00	>10.00			

Mineralojik Analiz Sonuçları

Seyitömer Termik Santrali uçucu külünün mineralojik bileşimine ait x-ışınları difraktogramı Şekil. 13' de gösterilmiştir.

Şekilde görüleceği gibi, uçucu külde başta camsı faz olmak üzere, kuvars, mullit, magnezyoferrit, hematit kristalleri ve minör olarak alkali feldispatlar bulunmaktadır. Seyitömer uçucu külünün, X-ışınları difraktogramında camsı fazın 22-25° 2θ arasında maksimum verdiği ve background'un camsı fazca zengin olduğu görülmüştür. Bu durumda camsı fazının kuvars kristalinin maksimum pikine yakın olması nedeniyle silissi karakter taşıdığını gösterir.



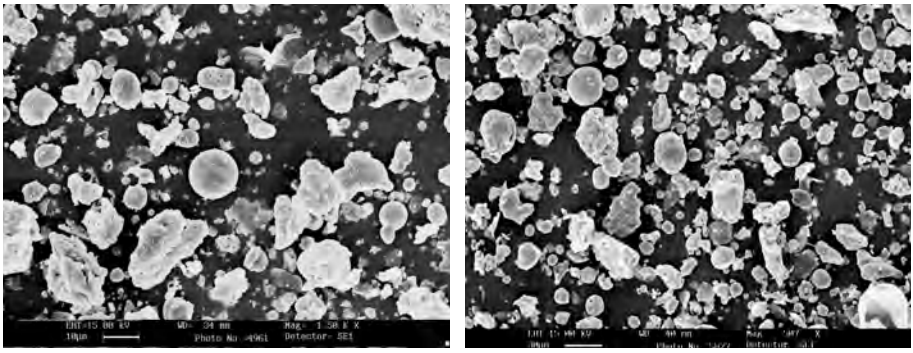
Şekil 13. Seyitömer Uçucu Külünün Mineralojik Bileşimine Ait X-Işınları Difraktogramı.

Morfolojik Analiz Sonuçları

Seyitömer uçucu külü, 1-30 µm arasında değişen büyüklüklerde çoğunluğu küresel bazıları düzensiz şekilli olmak üzere farklı morfolojide tanecikler içermektedir. Özellikle 10 mikron'un altındaki taneciklerin içi dolu camsı küreler(solid spheres) halinde olduğu görülmüştür (Şekil. 14)

Taneciklere uygulanan mikroanalizde, bazılarının yüzeyinde magnezyoferrit, hematit biriktiği, masif kütle halinde nadiren rastlanan yapıların alkali feldispat bileşiminde olduğu saptanmıştır (Şekil 15). Magnezyoferrit ve hematit demiroksit esaslı bileşenler olup, kömürden gelen piritin oksidasyonu ile oluşan demir oksidin spinel grubunu oluşturan oksitlerle birleşmesi sonucu meydana gelirler.

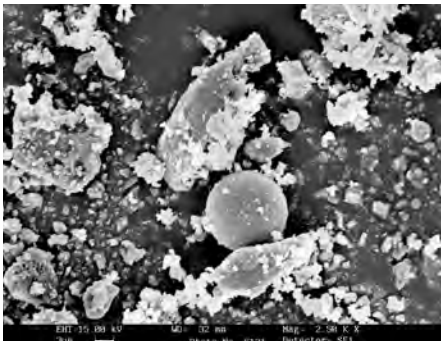
Taneciklerin HF-asitde çözülmesi sonrası incelemede çözünmüş camsı yapı, mullit kristalleri ve değişime uğramamış kuvars kristalleri (Şekil 15) bulunmuştur. Mullit, kaolinit kilinin metamorfizasyonu sonucu oluşmaktadır.



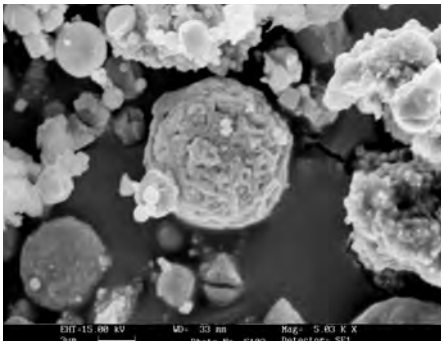
(a) (b)

Şekil 14. Seyitömer Uçucu Külünün Morfolojik Yapısına Ait Fotoğraflar.

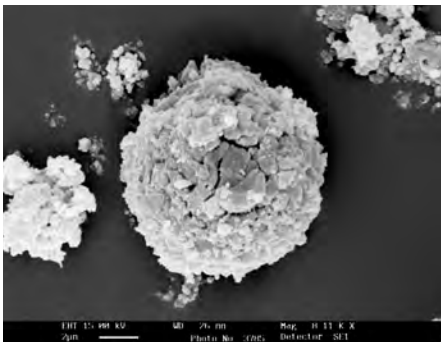
(a)ve (b)Taneciklerin genel dağılımı (x500 ve x1500)



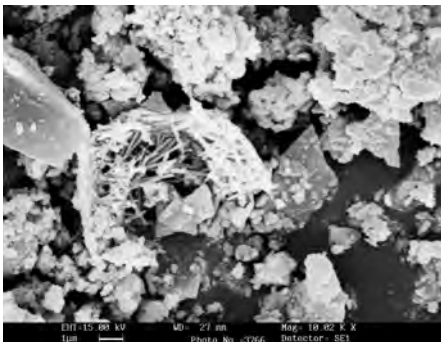
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 15. Seyitömer Uçucu Külünün Mikroyapısı.

(a) Magnezyoferrit küresi (x8100)
(b) Demir oksit kaplı tanecik (x5000)
(c) Alkali feldispatlar (x2500)
(d) Mullit kristalleri (x10000)

3.5. Yatağan Termik Santrali Uçucu Külü

Kimyasal Analiz Sonuçları

Yatağan Termik Santralinden, beş gün süreyle alınan numunelerin kimyasal analizleri yapılmış, sonuçlar ve ortalama değerlerin standartlardaki sınır değerler ile karşılaştırması sırasıyla Tablo. 6a ve 6b' de verilmiştir.

Kimyasal bileşim açısından, bileşen yüzdelerinde belirgin farklar olmadığı için bu santralden üniform özellikte kül elde edilebileceği anlaşılmıştır.

Yatağan uçucu külü, reaktif kireç miktarının % 10'a yakın olması nedeniyle TS EN 197-1'e göre W sınıfına (kalkersi uçucu kül) girmektedir. Ancak, ASTM C 618'e göre SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 değerinin % 70'in üzerinde olması nedeniyle F sınıfı küle (silissi) uygun olmakla birlikte, yine CaO'in % 10 geçmesi sonucunda kireçsi kül sınıfına girmektedir. Buna göre, bu külün her iki uçucu kül sınıfı için de sınırda olduğu düşünülmüştür. Tablo. 6b' de görüleceği gibi, Yatağan külü, ASTM C 618 ve TS 639'daki SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3> 70 koşulunu sağlamaktadır.

TS EN 450 standardına göre SO_3 ve serbest kireç yüzdeleri de sırasıyla en fazla % 3 ve % 1 koşullarına uymaktadır.

Buna göre, Yatağan uçucu külünün dört standartta da istenilen kimyasal bileşen sınırlamalarına uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 6a. Yatağan Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçları

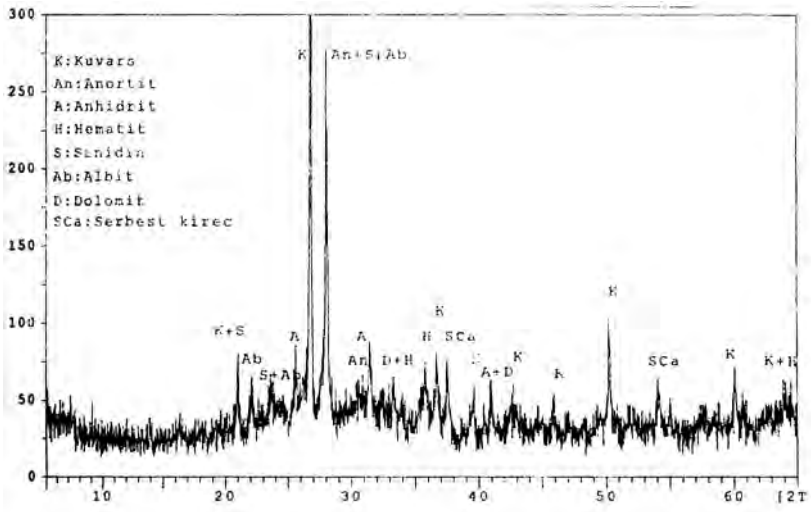
	Numune							
Oksit (%)	1	2	3	4	5	Ortalama	St.sapma	Varyasyon kats. (%)
SiO_2	51.05	50.95	51.95	50.35	53.21	51.50	1.11	2.49
Al_2O_3	22.79	21.82	22.87	23.30	24.64	23.08	1.02	4.42
Fe_2O_3	5.73	5.80	6.64	6.85	5.31	6.07	0.65	10.70
S+A+F	79.57	78.57	81.46	80.50	83.16	80.65	_	_
CaO	11.27	12.00	10.20	11.14	8.05	10.53	1.53	14.53
MgO	2.51	2.50	2.40	2.45	2.23	2.42	0.11	4.54
SO_3	1.71	1.85	1.22	1.00	0.81	1.32	0.45	34.09
K_2O	2.45	2.45	2.47	2.45	2.90	2.54	0.20	7.84
Na_2O	0.78	0.81	0.69	0.69	0.90	0.77	0.09	11.69
KK	1.25	1.15	0.97	0.77	1.18	1.06	0.19	17.92
Cl^-	0.0030	0.0040	0.0020	0.0020	0.0030	0.0028	0.001	33.33

Tablo 6b. Yatağan Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

	Standartlara Uygunluk Sınırları						
Oksit (%)	Uçucu Kül	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM C 618	
			V	W		F	C
SiO_2	51.50						
Al_2O_3	23.08						
Fe_2O_3	6.07						
S+A+F	80.65				>70.00	>70.00	>50.00
CaO	10.53						
MgO	2.42				<5.00		
SO_3	1.32	<3.00			<5.00	<5.00	<5.00
K_2O	2.54						
Na_2O	0.77						
KK	1.06	<5.00	<5.00	<5.00	<10.00	<6.00	<6.00
Cl^-	0.003	<0.10					
Serb.CaO	0.99	<1.00					
Reak.SiO_2	26.69	>25.00	>25.00	>25.00			
Reak.CaO	9.02		<10.00	>10.00			

Mineralojik Analiz Sonuçları

Yatağan Termik Santrali uçucu külünün mineralojik bileşimini gösteren x-ışınları difraktogramı Şekil 16' da verilmiştir. Buna göre, uçucu külün kristalize ve camsı faz karışımından oluştuğu görülmektedir. Başlıca kristal fazlar kuvars, anortit, sanidin, albit olmak üzere, diğer fazlar anhidrit, serbest kireç, dolomit ve hematitdir. Yatağan uçucu külünde camsı fazın, 27° 2θ da maksimum duruma gelmesi ve içine 31-32° 2θ değerini de alacak şekilde yayılması, camsı fazın hem kireçsi hem silissi yapıda olmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla, bu küldeki camsı faz kalsiyum alüminosilikat bileşimli yapıya sahiptir.

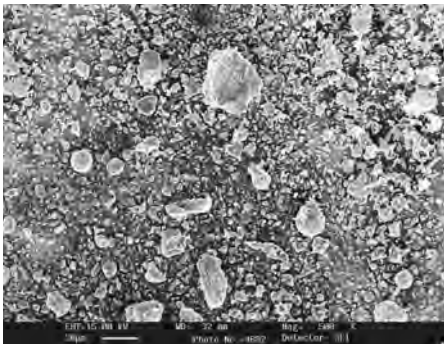


Şekil 16. Yatağan Uçucu Külünün Mineralojik Bileşimine Ait X-Işınları Difraktogramı.

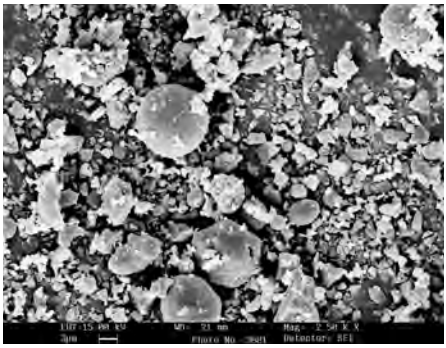
Morfolojik Analiz Sonuçları

Yatağan uçucu külü, homojen olmayan tane büyüklük dağılımına sahiptir. Büyüklükleri 0.5-30μm arasında değişen ve çoğunluğu düzensiz şekilli, köşeli olan taneciklerden oluşmaktadır (Şekil. 17-1, Şekil. 17-2). 3μm ve altındaki büyüklüklerde tam küresel tanecikler de bulunmaktadır.

Yapı içinde masif kütle halinde anortit , sanidin (K-feldspat), albit olduğu mikroanaliz sonucunda tespit edilmiştir (Şekil. 18-1,2). Anortit mineralinin kütle halinde olması, kömürün yanması sırasında bozunmadan uçucu küle katılmasından ileri gelmektedir. Bu mineral, ergimiş camsı fazdan sentezlenmesi halinde, uçucu kül taneciği yüzeyinde kristalize formda olmaktadır; ancak kül yüzeyinde anortit kristallerine rastlanmamıştır. K-feldspat ve albit mineralleri, kömürden gelmekte olup, stabil kristal örgüleri nedeniyle , yanmadan küle katılmışlardır. İri küresel taneciklerin yüzeyinde de mikrokristallere rastlanmıştır (hematit gibi).



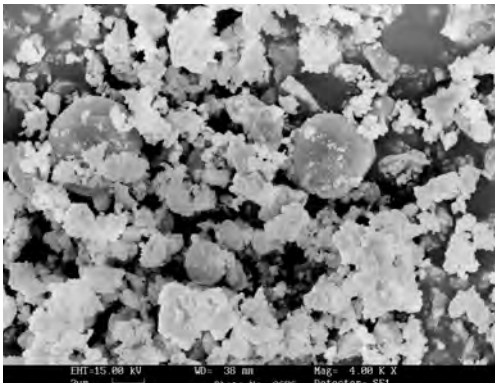
(a)



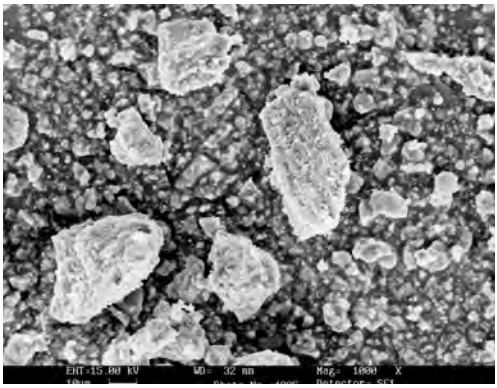
(b)

Şekil 17-1. Yatağan Uçucu Külünün Morfolojisine Ait Fotoğraflar.

(a)Taneciklerin genel dağılımı(x500)
(b)Homojen olmayan tanecik boyut dağılımı(x2500)

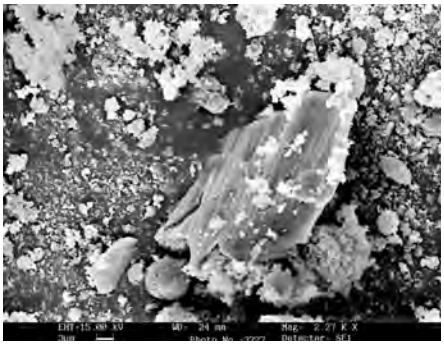


(a)

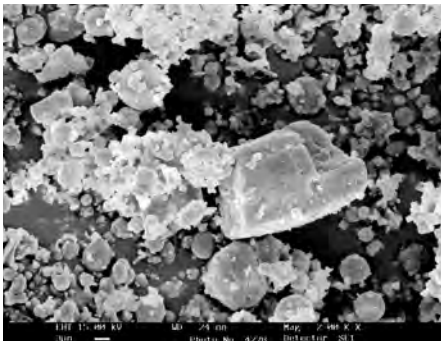


(b)

Şekil 17-2. Yatağan Uçucu Külünün Morfolojisine Ait Fotoğraflar.
(a)Köşeli ve küresel şekilli tanecikler(x4000)
(b)Alkali feldispatlar(x1000)

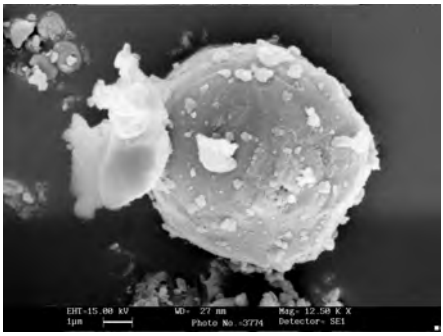


(a)



(b)

Şekil 18-1.Yatağan Uçucu Külünün Mikroyapısı.
(a) Sanidin minerali(x~2300)
(b) Anortit minerali(x2000)



Şekil 18-2.Yatağan Uçucu Külünün Mikroyapısı.
İnce kristalize hematit kaplı tanecik(x12500)

3.6. Tunçbilek Termik Santrali Uçucu Külü

Kimyasal Analiz Sonuçları

Tunçbilek Termik Santralinin, 2 ayrı (3. ve 4-5.) ünitesinden beş gün boyunca toplanan uçucu kül numunelerinin kimyasal analizleri yapılmış; sonuçlar ve ortalama değerlerin standartlardaki sınır değerleri ile karşılaştırılması, Tablo. 7a, 7b , Tablo. 8a, 8b ve Tablo. 9' da verilmiştir.

Tunçbilek Termik Santralinin iki ayrı ünitesinden beş gün boyunca alınan numunelerin kimyasal bileşen yüzdelerinin birbirine yakın olduğu ve yine iki ayrı ünitenin ortalama değerleri karşılaştırıldığında birbirine yakın sonuçlar görülmüştür. Buna göre, bu santralden gerek tek ünite bazında, gerek ayrı ayrı üniteler arasında stabillik olması nedeniyle, uniform özellikte kül elde edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Tunçbilek uçucu külü, reaktif kireç miktarının % 10'un altında olması nedeniyle, TS EN 197-1'de verilen V sınıfı (silissi uçucu kül) kapsamına girmektedir. Reaktif silis miktarının % 25'in üzerinde (% 39.36) olması nedeniyle, TS EN 197-1'de V sınıfı uçucu kül şartlarını tamamiyle sağlamaktadır.

Yine SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 değerinin % 70'in üzerinde ve CaO'in % 10'un altında olması nedeniyle, ASTM C 618 standardına göre F sınıfı (düşük kireçli) uçucu küle uygun olmaktadır.

TS EN 450 standardında özellikle SO_3 için getirilen en fazla % 3.0 sınırına uygun değerde (% 0.76) SO_3 içermektedir. Düşük kireçli uçucu kül olması sebebiyle, serbest kireç miktarıda TS EN 450'deki sınırın (< % 1.0) altında kalmaktadır.

TS 639'da SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 için getirilen % 70 ve üzeri olması koşulunu da sağlamaktadır.

Buna göre Tunçbilek uçucu külü, dört standartta da kimyasal bileşen bazında (sadece TS 639'da MgO için istenilen en fazla % 5.0'lik sınır hariç (4-5. ünite)) gereken koşulları tamamiyle sağlamaktadır.

Tablo 7a. Tunçbilek (3. Ünite) Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçları

	Numune							
Oksit (%)	1	2	3	4	5	Ortalama	St.sapma	Varyasyon kats. (%)
SiO_2	57.62	59.24	59.45	59.80	59.21	59.06	0.84	1.42
Al_2O_3	18.32	16.97	16.55	16.87	17.63	17.27	0.71	4.11
Fe_2O_3	12.14	12.86	12.37	12.38	12.44	12.44	0.26	2.09
S+A+F	88.08	89.07	88.37	89.05	89.28	88.77	_	_
CaO	1.76	1.73	1.51	1.75	1.66	1.68	0.10	5.95
MgO	4.08	4.71	4.80	4.64	4.47	4.54	0.28	6.17
SO_3	0.71	0.62	0.40	0.63	0.63	0.60	0.12	20.00
K_2O	1.14	1.05	1.21	1.14	1.19	1.15	0.06	5.22
Na_2O	0.19	0.23	0.52	0.30	0.26	0.30	0.13	43.33
KK	3.44	1.96	2.35	1.97	1.84	2.31	0.66	28.57
Cl^-	0.001	0.002	0.001	0.002	0.002	0.002	0.001	50.00

Tablo 7b.Tunçbilek (3. Ünite) Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

	Standartlara Uygunluk Sınırları						
Oksit (%)	Uçucu Kül	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM C 618	
			V	W		F	C
SiO_2	59.06						
Al_2O_3	17.27						
Fe_2O_3	12.44						
S+A+F	88.77				>70.00	>70.00	>50.00
CaO	1.68						
MgO	4.54				<5.00		
SO_3	0.60	<3.00			<5.00	<5.00	<5.00
K_2O	1.15						
Na_2O	0.30						
KK	2.31	<5.00	<5.00	<5.00	<10.00	<6.00	<6.00
Cl^-	0.002	<0.10					
Serb.CaO	0.10	<1.00					
Reak.SiO_2	41.10	>25.00	>25.00	>25.00			
Reak.CaO	0.90		<10.00	>10.00			

Tablo 8a. Tunçbilek (4-5. Ünite) Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçları

	Numune							
Oksit (%)	1	2	3	4	5	Ortalama	St.sapma	Varyasyon kats. (%)
SiO_2	56.61	57.49	57.75	57.43	57.89	57.43	0.50	0.87
Al_2O_3	16.82	16.74	15.81	15.31	15.68	16.07	0.67	4.05
Fe_2O_3	13.38	12.90	13.35	14.27	13.17	13.41	0.52	4.26
S+A+F	86.81	87.13	86.91	87.01	86.74	86.92	_	_
CaO	2.39	1.70	2.39	2.25	2.37	2.22	0.30	13.51
MgO	5.53	5.56	5.46	5.78	5.79	5.62	0.15	4.38
SO_3	0.86	1.00	1.03	0.65	1.04	0.92	0.17	18.48
K_2O	1.62	1.75	1.62	1.40	1.52	1.58	0.13	8.23
Na_2O	0.34	0.54	0.36	0.34	0.28	0.37	0.10	27.03
KK	1.84	1.81	1.95	2.15	1.83	1.92	0.14	7.29
Cl^-	0.002	0.003	0.002	0.003	0.002	0.002	0.001	50.00

Tablo 8b. Tunçbilek (4-5. Ünite) Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

	Standartlara Uygunluk Sınırları						
Oksit (%)	Uçucu Kül	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM C 618	
			V	W		F	C
SiO_2	57.43						
Al_2O_3	16.05						
Fe_2O_3	13.37						
S+A+F	86.86				>70.00	>70.00	>50.00
CaO	2.22						
MgO	5.62				<5.00		
SO_3	0.92	<3.00			<5.00	<5.00	<5.00
K_2O	1.58						
Na_2O	0.37						
KK	1.92	<5.00	<5.00	<5.00	<10.00	<6.00	<6.00
Cl^-	0.002	<0.10					
Serb.CaO	0.22	<1.00					
Reak.SiO_2	39.01	>25.00	>25.00	>25.00			
Reak.CaO	1.16		<10.00	>10.00			

Tablo 9. Tunbilek Uçucu Külünün Ortalama Kimyasal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

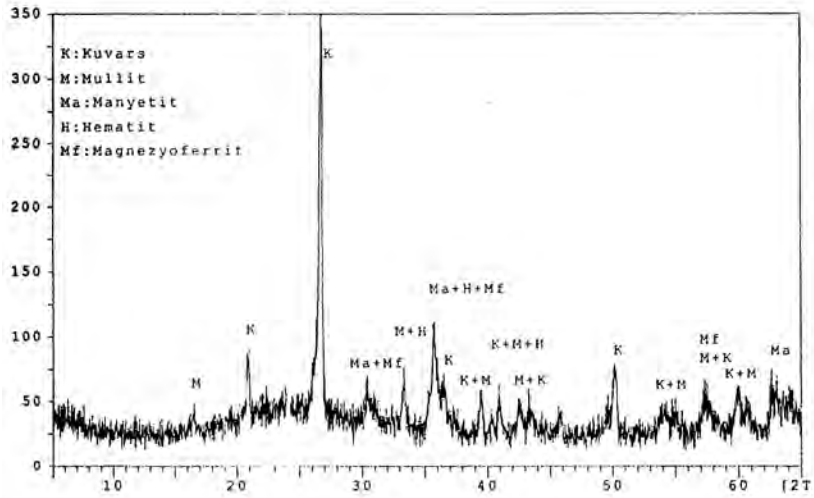
Standartlara Uygunluk Sınırları							
Oksit (%)	Uçucu Kül	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM C 618	
			V	W		F	C
SiO_2	58.25						
Al_2O_3	16.66						
Fe_2O_3	12.91						
S+A+F	87.82				>70.00	>70.00	>50.00
CaO	1.95						
MgO	5.08				<5.00		
SO_3	0.76	<3.00			<5.00	<5.00	<5.00
K_2O	1.37						
Na_2O	0.33						
KK	2.09	<5.00	<5.00	<5.00	<10.00	<6.00	<6.00
Cl^-	0.002	<0.10					
Serb.CaO	0.16	<1.00					
Reak.SiO_2	40.55	>25.00	>25.00	>25.00			
Reak.CaO	1.03		<10.00	>10.00			

Mineralojik Analiz Sonuçları

Tunçbilek Termik Santrali uçucu külünün mineralojik bileşimine ait x-ışınları difraktogramı Şekil. 19 'da verilmiştir.

Buna göre başta camsı faz olmak üzere, kuvars mullit, hematit ve ferrit spinel grubundan manyetit, magnezyoferrit gibi kristalize fazlar içermektedir.

Tunçbilek Uçucu Külünün X-Işınları difraktogramında, camsı fazın durumu 22-24° 2θ'da maksimumu vermektedir. Bu değerlerde difraktogramdaki background belirgin tümsek (hump) oluşturur. Bunun nedeni, bu fazın tipik düşük kireçli (ortalama %1.95) uçucu külde ve dolayısıyla camsı fazın silisyumca zengin alümino silikat bileşiminde olmasıdır. Uçucu külün kimyasal analizinde de SiO_2 %58.25, Al_2O_3 %16.66 bulunmuştur.



Şekil 19.Tunçbilek Uçucu Külünün Mineralojik Bileşimine Ait X-Işınları Difraktogramı.

Morfolojik Analiz Sonuçları

Tunçbilek uçucu külünün morfolojik incelemesinde, 0.5-15 µm arasında değişen büyüklüklerde ve çoğunluğu küresel olan taneciklerden oluştuğu görülmüştür.

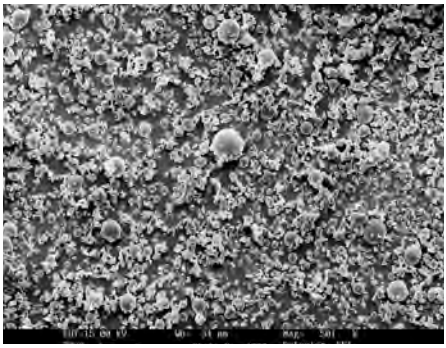
Küresel yapıların çoğu, katı camsı tanecikler olmakla birlikte, içi boşluklu tanecikler (senosfer), aglomere senosferler, içi ince kürelerle dolu senosferler(plerosfer) yüzeyi kristal kaplı tanecikler (dermasfer)'den oluşmaktadır. Bunun yanısıra, özellikle 3. ünitede az oranda köşeli yapılar da bulunmaktadır (Şekil. 20) .

Senosfer (içi boşluklu küreler), kilin yüksek sıcaklarda ergimesi sonucunda ortaya çıkan gaz kabarcıklarının soğumasıyla meydana gelen camsı küreler iken; plerosferler (içi mikroküreli tanecikler) ise, ergimiş kildeki gaz çıkışındaki kısmen düzensizlik olması nedeniyle, senosfere ilaveten farklı boyutlarda meydana gelen camsı kabarcıklardır.

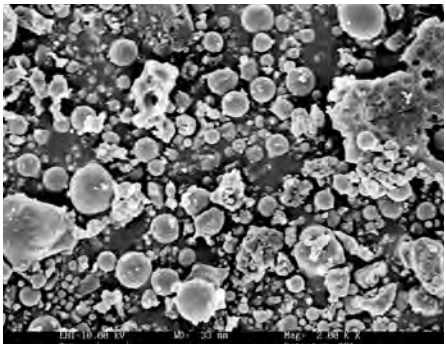
Taneciklere yapılan mikro analiz sonucunda, köşeli yapıların kuvars bileşiminde olduğu saptanmıştır (Şekil. 21). Kürenin yüzeyinde düzgün oktahedral yapıların manyetit bileşiminde olduğu (ferrosfer) bulunmuştur (Şekil. 22). Bazı kürelerde, kürenin yüzeyini örgü gibi saran ince kristalize hematit kristalleri saptanmıştır. Manyetit, magnezyoferrit ve hematit gibi demiroksit bazlı bileşikler piritin oksidasyon ürünleri olup, senosferlerin dışını kaplamaktadırlar.

Tunçbilek termik santralinin her iki ünite külünde mikroyapı açısından benzerlik olmakla ve yapının çoğu düzgün küresel taneciklerden oluşmakla birlikte, özellikle 3. ünitede, nadiren 10-15 mikron boyutlu masif karbon kütlelerine rastlanmıştır. Bu kütlenin içindeki boşluklarda 1-2 mikron çaplı küresel tanecikler bulunmaktadır. Bu şekildeki bir yapı, kömürü yakma sıcaklığı ve süresinin ,kömürün inorganik kısmını oluşturan kil mineralleri (illit)nin ergimesi, dolayısıyla gaz çıkışı ile camsı mikroküreler meydana gelmesi için yeterli olduğunu, ancak organik bileşen olan karbonun tamamen yanması için tam olarak yeterli gelmediğini göstermiştir. Masif kütle yüzeyindeki küresel boşluklar, buradan ayrılan mikrokürelere karşılık gelmektedir.

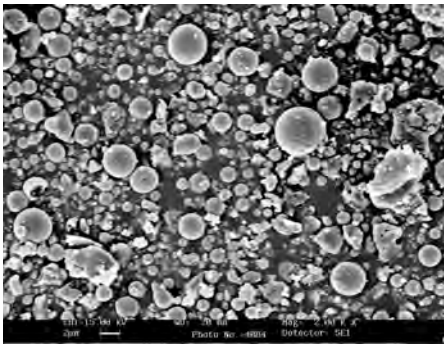
Küle uygulanan HF asitde çözme işlemi sonucunda camsı faz içeren kürelerde camsı fazın çözünmesiyle ince prizmatik mullit kristalleri ortaya çıkmıştır. Ancak bu kristallere 5 μm ve üzerindeki taneciklerde rastlanmıştır.



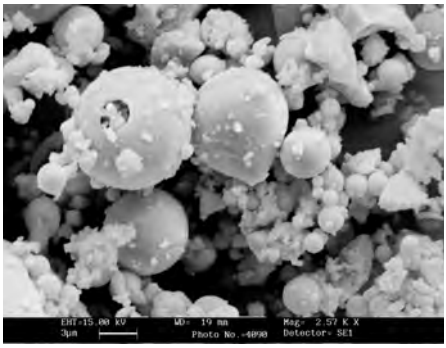
(a)



(b)



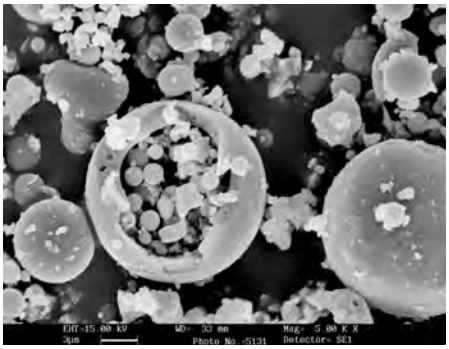
(c)



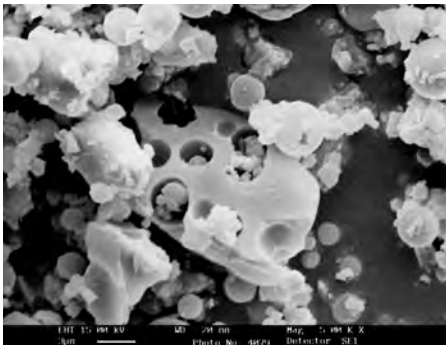
(d)

Şekil 20. Tunçbilek Uçucu Külünün Morfolojik Yapısına Ait Fotoğraflar.

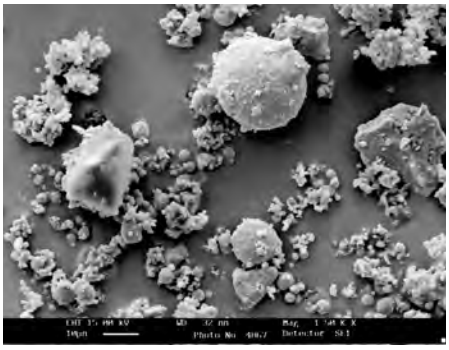
(a) Tanecik dağılımına ait genel görünüm(x500),
(b) 3.Ünitenin tanecikleri (x2000)
(c) 4-5. Ünitenin tanecikleri (x2000),
(d) Senosfer ve katı camsı kürecikler (x2500)



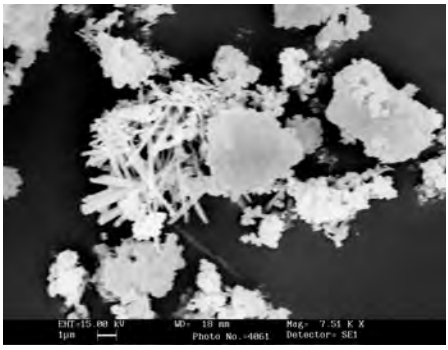
(a)



(b)



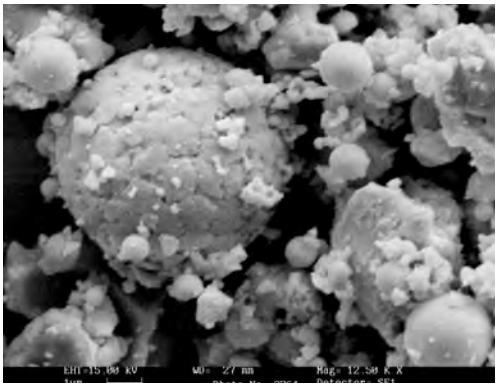
(c)



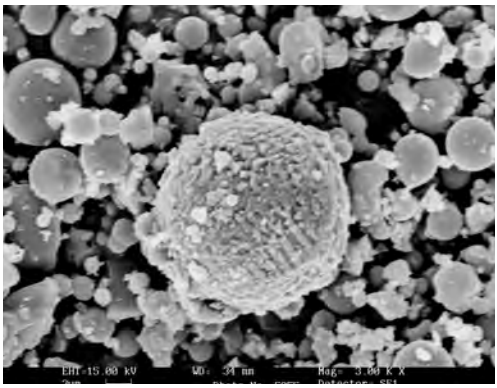
(d)

Şekil 21. Tunçbilek Uçucu Külünün MikroYapısına Ait Fotoğraflar.

(a) İçi mikroküreler ile dolu senosfer (x5000)
(b) İçi mikroküreli yanmamış karbon (x1500)
(c) Kuvars kristali (x1500)
(d) Mullit kristalleri (x7500)



(a)



(b)

Şekil 22.Tunçbilek Uçucu Külündeki Kristaller.

(a) Hematit kaplı tanecik (x3000)
(b) Manyetit kaplı tanecik (x3000)

3.7. Soma Termik Santrali Uçucu Külü

Kimyasal Analiz Sonuçları

Soma Termik Santrali uçucu külünün, üç ayrı ünitesinden (1-2, 3-4, 5-6) beş gün boyunca alınan uçucu kül numunelerinin kimyasal analizleri yapılmış; sonuçlar ve ortalama değerlerin standartlardaki değerler ile karşılaştırması Tablo. 10a, 10b, Tablo. 11a, 11b , Tablo. 12a, 12b ve Tablo 13' de verilmiştir.

Sonuçlardan da görüleceği gibi, Soma uçucu kül numunelerinin kimyasal bileşen yüzdeleri üç ayrı ünitenin kendi içinde birbirine yakın değerlerdir. Ancak, ünitelerin ortalama değerlerinin karşılaştırmasında iki ünitenin (1-2, 3-4) benzer kimyasal bileşimde diğer ünitenin (5-6) daha farklı bileşimde olduğu görülmektedir. Bu nedenle Soma Teknik Santralinden tek ünite bazında uniform özellikte kül elde edilebileceği; ancak üniteler arasında stabillik olmadığı sonucuna varılmıştır.

Soma uçucu külü, reaktif kireç miktarının % 10'un üzerinde olması (% 17.71) nedeniyle TS EN 197-1'de göre W sınıfı (kalkersi uçucu kül) kapsamına girmektedir. Buna karşılık standartta reaktif silis için istenilen > % 25 koşulunu da (% 32.04) sağlamaktadır. Buna göre TS EN 197-1standardına tamamen uymaktadır.

ASTM C-618 standardına göre, SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 miktarının % 50'nin üzerinde (%70.48) olması ve CaO miktarının % 10'u geçmesi (% 20.95) nedeniyle, C sınıfı (yüksek kireçli) uçucu kül şartlarına uygun olmaktadır.

SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 miktarı için TS 639'da istenilen % 70 veya üzerinde olma koşulunu da sağlamaktadır.

TS EN 450'de, SO_3 miktarı için getirilen en fazla % 3.0 'lük sınırı ortalamada geçmemekle (% 2.55) birlikte; 5-6 no'lu ünitelerde bu değer % 4.11 olup, % 3.0'ün üzerindedir. Yüksek kireçli kül olması nedeniyle, serbest kireç miktarı da TS EN 450'deki en fazla % 1.00'lik sınırın üzerindedir (ortalama % 7.22).

Sonuç olarak, Soma uçucu külü üç standartta (TS EN 197-1, TS 639, ASTM C-618) istenilen koşullara tamamen; diğer standartta (TS EN 450) belirtilen koşullara kısmen (SO_3 ve serbest kireç hariç) uygun bir küldür.

Tablo 10a. Soma (1-2. Ünite) Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçları

	Numune							
Oksit (%)	1	2	3	4	5	Ortalama	St.sapma	Varyasyon kats. (%)
SiO_2	44.74	44.71	41.26	45.57	37.81	42.82	3.25	7.59
Al_2O_3	20.59	21.69	19.50	22.10	20.23	20.82	1.07	5.14
Fe_2O_3	4.47	4.24	4.25	4.35	5.53	4.57	0.55	12.03
S+A+F	69.80	70.64	65.01	72.02	63.57	68.21	_	_
CaO	23.44	20.15	26.80	20.50	26.35	23.45	3.13	13.35
MgO	1.72	1.70	1.82	1.70	1.77	1.74	0.05	2.87
SO_3	0.59	2.21	1.10	1.34	2.11	1.47	0.69	46.94
K_2O	1.17	1.45	1.15	1.63	1.15	1.31	0.22	17.74
Na_2O	0.30	0.40	0.32	0.36	0.23	0.32	0.06	18.75
KK	2.13	2.85	3.05	1.60	4.12	2.75	0.96	34.91
Cl^-	0.011	0.010	0.009	0.008	0.012	0.010	0.002	20.00

Tablo 10b. Soma (1-2. Ünite) Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

	Standartlara Uygunluk Sınırları						
Oksit (%)	Uçucu Kül	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM C 618	
			V	W		F	C
SiO_2	42.82						
Al_2O_3	20.82						
Fe_2O_3	4.57						
S+A+F	68.21				>70.00	>70.00	>50.00
CaO	23.45						
MgO	1.74				<5.00		
SO_3	1.47	<3.00			<5.00	<5.00	<5.00
K_2O	1.31						
Na_2O	0.32						
KK	2.75	<5.00	<5.00	<5.00	<10.00	<6.00	<6.00
Cl^-	0.010	<0.10					
Serb.CaO	9.27	<1.00					
Reak.SiO_2	30.04	>25.00	>25.00	>25.00			
Reak.CaO	19,88		<10.00	>10.00			

Tablo 11a. Soma (3-4. Ünite) Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçları

	Numune							
Oksit (%)	1	2	3	4	5	Ortalama	St.sapma	Varyasyon kats. (%)
SiO_2	43.46	39.11	42.13	47.80	45.44	43.59	3.29	7.55
Al_2O_3	20.61	20.04	21.74	24.12	22.02	21.71	1.57	7.23
Fe_2O_3	3.90	4.42	3.96	4.03	4.02	4.07	0.20	4.91
S+A+F	67.97	63.57	70.83	79.95	71.48	70.76	_	_
CaO	21.80	27.69	24.18	16.17	21.32	22.23	4.22	18.98
MgO	1.62	1.65	1.70	1.62	1.67	1.65	0.03	1.82
SO_3	1.20	2.33	3.38	1.83	1.61	2.07	0.84	40.50
K_2O	1.12	1.06	0.36	1.56	1.34	1.09	0.45	41.28
Na_2O	0.25	0.23	0.30	0.40	0.30	0.30	0.07	23.33
KK	5.40	2.86	1.64	1.67	1.63	2.64	1.63	61.74
Cl^-	0.007	0.008	0.009	0.005	0.005	0.007	0.002	28.57

Tablo 11b. Soma (3-4. Ünite) Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

	Standartlara Uygunluk Sınırları						
Oksit (%)	Uçucu Kül	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM C 618	
			V	W		F	C
SiO_2	43.59						
Al_2O_3	21.71						
Fe_2O_3	4.07						
S+A+F	70.76				>70.00	>70.00	>50.00
CaO	22.23						
MgO	1.65				<5.00		
SO_3	2.07	<3.00			<5.00	<5.00	<5.00
K_2O	1.09						
Na_2O	0.30						
KK	2.64	<5.00	<5.00	<5.00	<10.00	<6.00	<6.00
Cl^-	0.007	<0.10					
Serb.CaO	9.62	<1.00					
Reak.SiO_2	29.87	>25.00	>25.00	>25.00			
Reak.CaO	18.86		<10.00	>10.00			

Tablo 12a. Soma (5-6. Ünite) Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçları

	Numune							
Oksit (%)	1	2	3	4	5	Ortalama	St.sapma	Varyasyon kats. (%)
SiO_2	48.74	41.37	42.23	47.66	48.56	45.71	3.61	7.90
Al_2O_3	24.43	21.97	22.13	24.14	25.69	23.67	1.59	6.72
Fe_2O_3	4.70	4.53	4.61	4.19	4.30	4.47	0.21	4.70
S+A+F	77.87	67.87	68.97	75.99	78.55	73.85	_	_
CaO	14.50	21.32	20.40	15.50	14.10	17.16	3.43	19.99
MgO	1.58	1.65	1.53	1.58	1.58	1.58	0.04	2.53
SO_3	2.27	5.60	5.78	3.94	2.96	4.11	1.56	37.96
K_2O	1.45	1.17	1.27	1.22	1.20	1.26	0.11	8.73
Na_2O	0.42	0.45	0.47	0.32	0.32	0.40	0.07	17.50
KK	1.13	1.14	0.85	0.63	0.61	0.87	0.26	29.88
Cl^-	0.010	0.010	0.011	0.009	0.009	0.010	0.001	10.00

Tablo 12b. Soma (5-6. Ünite) Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

	Standartlara Uygunluk Sınırları						
Oksit (%)	Uçucu Kül	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM C 618	
			V	W		F	C
SiO_2	45.71						
Al_2O_3	23.67						
Fe_2O_3	4.47						
S+A+F	73.85				>70.00	>70.00	>50.00
CaO	17.16						
MgO	1.58				<5.00		
SO_3	4.11	<3.00			<5.00	<5.00	<5.00
K_2O	1.26						
Na_2O	0.40						
KK	0.87	<5.00	<5.00	<5.00	<10.00	<6.00	<6.00
Cl^-	0.010	<0.10					
Serb.CaO	4.08	<1.00					
Reak.SiO_2	34.60	>25.00	>25.00	>25.00			
Reak.CaO	14.38		<10.00	>10.00			

Tablo 13. Soma Uçucu Külünün Ortalama Kimyasal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

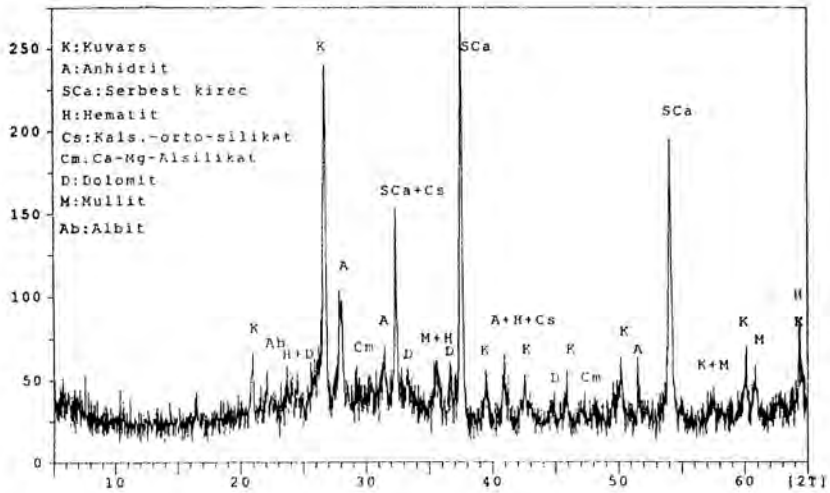
Standartlara Uygunluk Sınırları							
Oksit (%)	Uçucu Kül	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM C 618	
			V	W		F	C
SiO_2	44.04						
Al_2O_3	22.07						
Fe_2O_3	4.37						
S+A+F	70.48				>70.00	>70.00	>50.00
CaO	20.95						
MgO	1.66				<5.00		
SO_3	2.55	<3.00			<5.00	<5.00	<5.00
K_2O	1.22						
Na_2O	0.34						
KK	2.09	<5.00	<5.00	<5.00	<10.00	<6.00	<6.00
Cl^-	0.009	<0.10					
Serb.CaO	7.66	<1.00					
Reak.SiO_2	31.50	>25.00	>25.00	>25.00			
Reak.CaO	17.71		<10.00	>10.00			

Mineralojik Analiz Sonuçları

Soma Termik Santrali uçucu külünün mineralojik bileşimini gösteren x-ışınları difraktogramı Şekil. 23'de verilmiştir.

Soma uçucu külünün, başlıca kuvars, anhidrit, serbest kireç ve bunun yanısıra albit, kalsiyum-orto-silikat, hematit ,dolomit ve mullit içerdiği tespit edilmiştir.

Kristalize fazların yanısıra camsı faz da belirgin olarak mevcut olup, 27-32° 2θ arasında maksimuma yükselmiştir. Bu durum, camsı fazın yapısında silisyum da içeren kalsiyum alüminat fazı, dolayısıyla kalsiyum alüminasilikat fazı bileşiminde olduğunu göstermiştir.

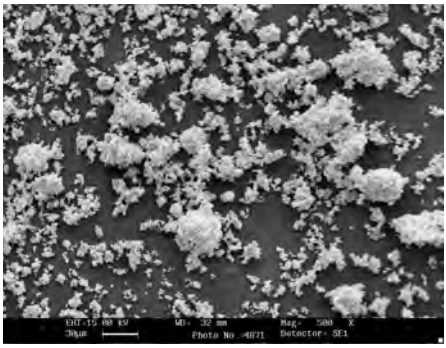


Şekil 23. Soma Uçucu Külünün Mineralojik Bileşimine Ait X-Işınları Difraktogramı.

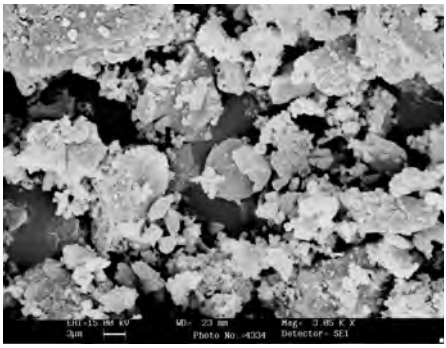
Morfolojik Analiz Sonuçları

Soma uçucu külünün morfolojik analizinde, genellikle büyüklükleri 0.5-20 µm arasında değişen, çoğunluğu düzensiz şekilli olmak üzere yüzeyi pürüzlü küresel ve yarı küresel tanecikler içerdiği gözlenmiştir. Özellikle 2-3 mikronluk taneciklerin tam küresel olduğu tespit edilmiştir (Şekil. 24)

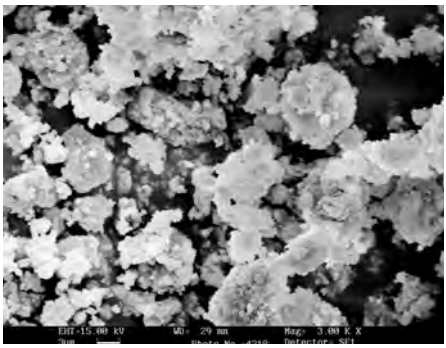
Taneciklere uygulanan mikroanaliz sonucunda, köşeli yapıların anhidrit, kuvars, yanmamış kil kalıntıları, serbest kireç bileşiminde olduğu; poröz yapıların yanmamış karbon (1-2 ve 3-4) bileşiminde olduğu saptanmıştır (Şekil. 25). Deforme olmuş yarı-küresel tanecikler, kömürden gelen kil mineralinin (illit) yanması sonrasında ergime sıcaklığının altında soğutulmasıyla, küresel yapılı ürünün parçalanması sonucunda meydana gelmektedir.



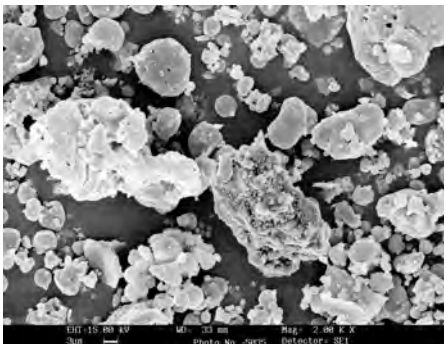
(a)



(b)



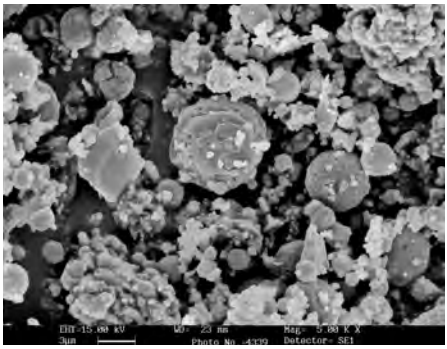
(c)



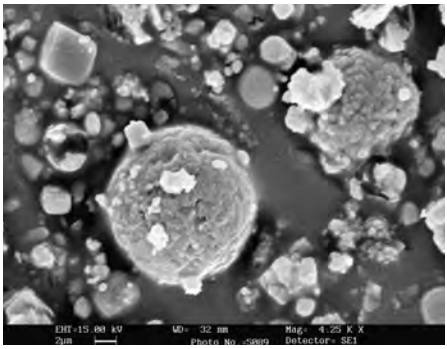
(d)

Şekil 24.Soma Uçucu Külünün Mikroyapısına Ait Fotoğraflar.

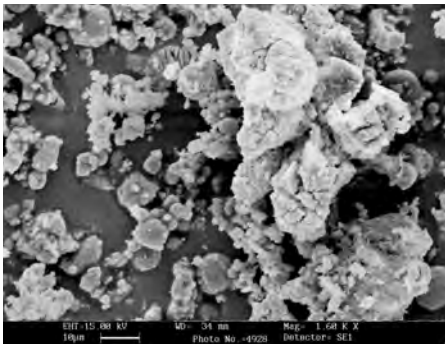
(a) Taneciklerin genel dağılımı (x500)
(b) 1-2.Ünite külünün mikroyapısı (x3000)
(c) 3-4.Ünite külünün mikroyapısı (x3000)
(d) 5-6.Ünite külünün mikroyapısı (x2000)



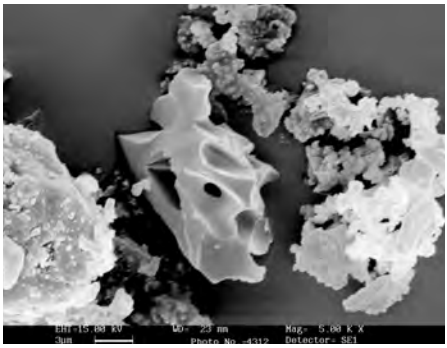
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 25.Soma Uçucu Külündeki Kristaller.

(a) Kuvars kristali,anhidrit kaplı küreler ve yüzeyi pürüzsüz küreler(x5000)
(b) Anhidrit kristali ve anhidrit kaplı tanecikler(x4250)
(c) Serbest kireç kümesi(x1600)
(d) Yanmamış karbon kalıntısı (x5000)

3.8. Kangal Termik Santrali Uçucu Külü

Kimyasal Analiz Sonuçları

Kangal Termik Santralinin üç ayrı ünitesinden numuneler (beş gün boyunca alınan) gelmiş ve her bir ünitenin numunelerinin ayrı ayrı kimyasal analizleri yapılmıştır. Kimyasal analiz sonuçları Tablo. 14a, 14b, Tablo. 15a, 15b, Tablo 16a, 16b ve bu sonuçların ortalamasının standartdaki sınır değerler ile karşılaştırması Tablo. 17'de verilmiştir.

Kimyasal bileşim açısından, ikinci ünite dışında diğer iki üniteden (1 ve 3) beş gün boyunca arda arda alınan numunelerin çok değişken olduğu tespit edilmiştir. Ancak santralin üç ayrı ünitesinden sağlanan küllerin ortalama kimyasal bileşimleri birbirine yakındır. Bu nedenle, bu santralden üniform özellikte kül elde etmenin mümkün olduğu anlaşılmaktadır.

Kangal uçucu külü, TS EN 197-1'e göre, reaktif kireci % 10'un üzerinde olduğu için kalkersi uçucu kül (W) sınıfına girmektedir. SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 miktarı, TS 639'da > % 70 sağlamamakta; ancak ASTM C 618'e göre S+A+F> % 50 olduğu için bu kül C sınıfı (yüksek kireçli) uçucu kül kapsamına girmektedir.

Kangal uçucu külü, yüksek kireçli uçucu kül (CaO>%10) olduğu için serbest kireç miktarı ortalamada % 7.65 olup, TS EN 450' de verilen % 1.0 sınırının üzerindedir. SO_3 miktarı da ortalamada % 6.95 olup, ilgili standard sınırlarının (> %3) dışındadır. Kangal külü, TS EN 197-1'e göre, W sınıfındaki külde % 10'un üzerinde reaktif kirece karşı en az % 25 reaktif silis gerekliliği koşulunda da uymaktadır.

Sonuç olarak, Kangal uçucu külünün kimyasal bileşim açısından TS EN 197-1 ,W sınıfı koşullarını tamamiyle sağladığı ; ASTM C 618 ve TS EN 450'de SO_3 yüzdesi dışında diğer sınırlara uyduğu, TS 639'a göre kısmen (S+A+F ve SO_3 dışında) uygun olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 14a. Kangal (1. Ünite) Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçları

	Numune							
Oksit (%)	1	2	3	4	5	Ortalama	St.sapma	Varyasyon kats. (%)
SiO_2	37.29	33.25	28.97	36.67	35.28	34.29	3.36	9.79
Al_2O_3	14.35	14.51	13.25	18.02	14.59	14.94	1.80	12.38
Fe_2O_3	4.22	4.30	3.91	4.22	4.60	4.25	0.25	5.88
S+A+F	55.86	52.06	46.13	58.91	54.47	53.49	_	_
CaO	29.05	33.37	37.84	26.32	27.50	30.82	4.75	15.41
MgO	2.30	2.36	1.88	1.85	2.01	2.08	0.24	29.41
SO_3	6.88	6.88	8.69	4.86	7.77	7.02	1.42	20.23
K_2O	1.07	0.93	0.68	0.98	1.21	0.97	0.20	20.62
Na_2O	0.61	0.64	0.52	0.71	0.57	0.61	0.07	11.47
KK	3.74	3.43	3.62	5.94	5.73	4.49	1.23	27.39
Cl^-	0.005	0.006	0.007	0.006	0.007	0.006	0.001	16.66

Tablo 14b. Kangal (1. Ünite) Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

	Standartlara Uygunluk Sınırları						
Oksit (%)	Uçucu Kül	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM C 618	
			V	W		F	C
SiO_2	34.29						
Al_2O_3	14.94						
Fe_2O_3	4.25						
S+A+F	53.49				>70.00	>70.00	>50.00
CaO	30.82						
MgO	2.08				<5.00		
SO_3	7.02	<3.00			<5.00	<5.00	<5.00
K_2O	0.97						
Na_2O	0.61						
KK	4.49	<5.00	<5.00	<5.00	<10.00	<6.00	<6.00
Cl^-	0.006	<0.10					
Serb.CaO	7.03	<1.00					
Reak.SiO_2	27.98	>25.00	>25.00	>25.00			
Reak.CaO	20.48		<10.00	>10.00			

Tablo 15a. . Kangal (2. Ünite) Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçları

	Numune							
Oksit (%)	1	2	3	4	5	Ortalama	St.sapma	Varyasyon kats. (%)
SiO_2	36.78	36.20	35.26	35.60	34.40	35.65	0.91	2.55
Al_2O_3	15.06	15.84	15.67	14.51	14.52	15.12	0.62	4.10
Fe_2O_3	4.18	4.45	4.22	4.54	5.34	4.55	0.47	10.33
S+A+F	56.02	56.49	55.15	54.65	54.26	55.31	-	-
CaO	31.50	31.73	30.00	28.11	28.77	30.02	1.61	5.36
MgO	2.12	1.72	1.81	1.85	1.86	1.87	0.15	8.02
SO_3	4.55	4.79	5.75	8.16	7.84	6.22	1.69	27.17
K_2O	1.16	1.12	0.91	1.37	1.40	1.19	0.20	16.81
Na_2O	0.60	0.64	0.67	0.67	0.69	0.65	0.04	6.15
KK	3.70	3.23	5.24	4.81	4.67	4.33	0.83	19.17
Cl^-	0.007	0.012	0.009	0.007	0.008	0.008	0.002	25.00

Tblo 15b. Kangal (2. Ünite) Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

	Standartlara Uygunluk Sınırları						
Oksit (%)	Uçucu Kül	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM C 618	
			V	W		F	C
SiO_2	35.65						
Al_2O_3	15.12						
Fe_2O_3	4.55						
S+A+F	55.31				>70.00	>70.00	>50.00
CaO	30.02						
MgO	1.87				<5.00		
SO_3	6.22	<3.00			<5.00	<5.00	<5.00
K_2O	1.19						
Na_2O	0.65						
KK	4.33	<5.00	<5.00	<5.00	<10.00	<6.00	<6.00
Cl^-	0.008	<0.10					
Serb.CaO	8.94	<1.00					
Reak.SiO_2	27.23	>25.00	>25.00	>25.00			
Reak.CaO	23.76		<10.00	>10.00			

Tablo 16a. . Kangal (3. Ünite) Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçları

	Numune							
Oksit (%)	1	2	3	4	5	Ortalama	St.sapma	Varyasyon kats. (%)
SiO_2	35.55	29.91	28.06	31.88	35.32	32.14	3.29	10.24
Al_2O_3	15.20	14.65	13.44	14.84	15.50	14.73	0.79	5.36
Fe_2O_3	4.46	4.45	4.11	4.32	4.76	4.42	0.24	5.43
S+A+F	55.21	49.01	45.61	51.04	55.58	51.29	-	-
CaO	31.73	34.55	40.19	37.14	30.80	34.88	3.87	11.09
MgO	1.37	1.42	0.97	1.28	1.10	1.23	0.19	15.45
SO_3	5.80	10.11	8.83	6.27	7.07	7.62	1.81	23.75
K_2O	1.02	0.84	0.70	0.84	1.02	0.88	0.14	15.91
Na_2O	0.58	0.74	0.64	0.69	0.76	0.68	0.07	10.29
KK	2.78	1.78	1.67	1.37	2.23	1.97	0.55	27.92
Cl^-	0.005	0.009	0.008	0.008	0.008	0.008	0.001	12.50

Tablo 16b. 3. Ünitenin Kimyasal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

	Standartlara Uygunluk Sınırları						
Oksit (%)	Uçucu Kül	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM C 618	
			V	W		F	C
SiO_2	32.14						
Al_2O_3	14.73						
Fe_2O_3	4.42						
S+A+F	51.29				>70.00	>70.00	>50.00
CaO	34.88						
MgO	1.23				<5.00		
SO_3	7.62	<3.00			<5.00	<5.00	<5.00
K_2O	0.88						
Na_2O	0.68						
KK	1.97	<5.00	<5.00	<5.00	<10.00	<6.00	<6.00
Cl^-	0.008	<0.10					
Serb.CaO	6.97	<1.00					
Reak.SiO_2	28.06	>25.00	>25.00	>25.00			
Reak.CaO	24.80		<10.00	>10.00			

Tablo 17. Kangal Uçucu Külünün Ortalama Kimyasal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

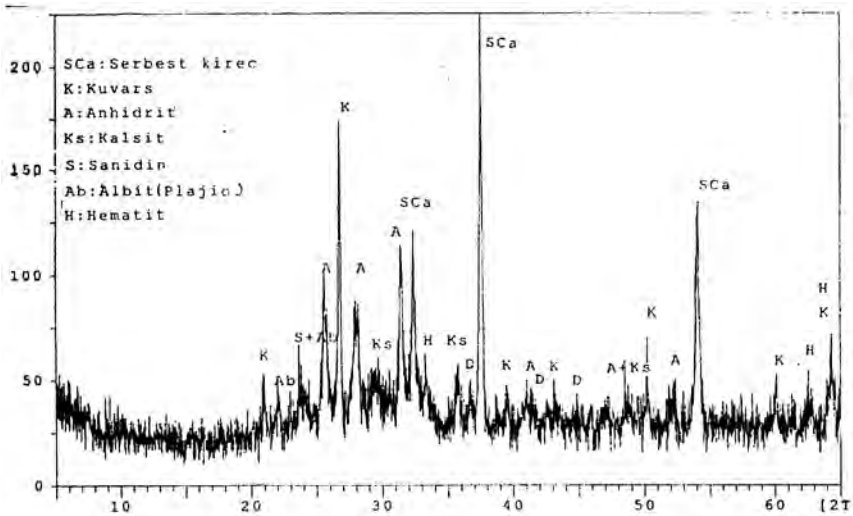
Standartlara Uygunluk Sınırları							
Oksit (%)	Uçucu Kül	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM C 618	
			V	W		F	C
SiO_2	34.03						
Al_2O_3	14.93						
Fe_2O_3	4.41						
S+A+F	53.37				>70.00	>70.00	>50.00
CaO	31.91						
MgO	1.73				<5.00		
SO_3	6.95	<3.00			<5.00	<5.00	<5.00
K_2O	1.01						
Na_2O	0.65						
KK	3.60	<5.00	<5.00	<5.00	<10.00	<6.00	<6.00
Cl^-	0.007	<0.10					
Serb.CaO	7.65	<1.00					
Reak.SiO_2	27.73	>25.00	>25.00	>25.00			
Reak.CaO	23.01		<10.00	>10.00			

Mineralojik Analiz Sonuçları

Kangal Termik Santrali uçucu külünün mineralojik bileşimini gösteren x-ışınları difraktogramı Şekil. 26' da verilmiştir.

Buna göre, uçucu külün camsı ve kristalize fazların karışımından oluştuğu görülmektedir. Kristalize fazların başta kireç, kuvars, anhidrit olmak üzere, kalsit, alkali feldispatlar (sanidin, albit) ve hematit'den meydana geldiği tespit edilmiştir.

Şekilde görüldüğü gibi, camsı fazın maksimum durumu, 2θ açısının 32-33° değerlerinde meydana gelmiştir. Bu durum, esas olarak camsı fazın kalsiyumca zengin kalsiyum alüminat camsı fazı bileşiminde olduğu; ancak camsı fazı karakterize eden alanın geniş ve kuvars pikini de içine alması nedeniyle kalsiyum alüminat camsı fazına silisyumun'da katıldığını göstermiştir.



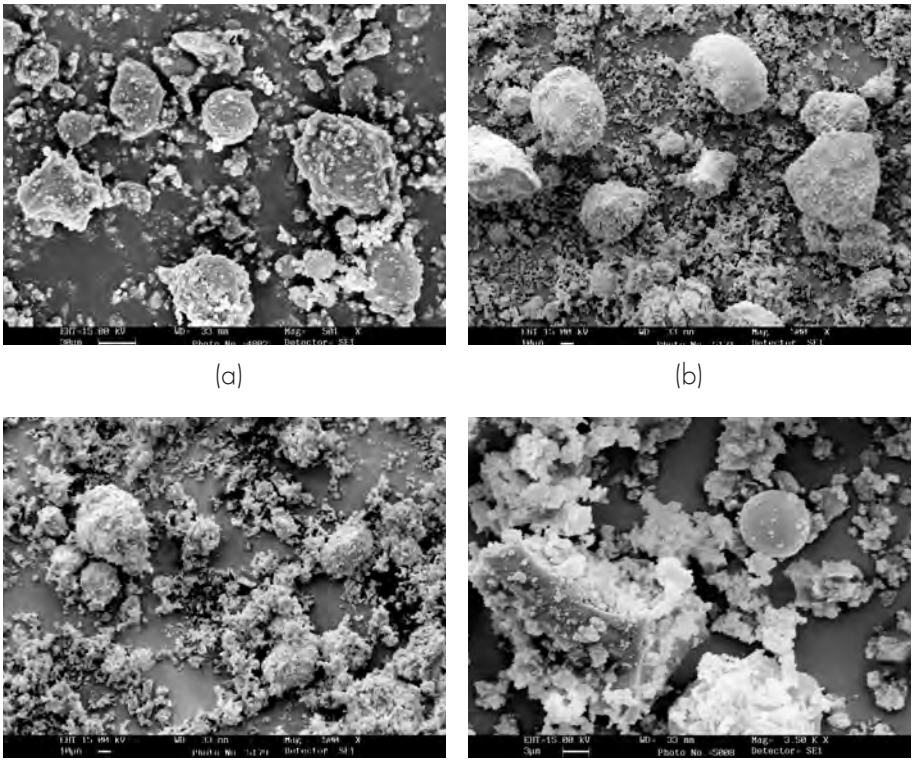
Şekil 26. Kangal Uçucu Külünün Mineralojik Bileşimine Ait X-Işınları Difraktogramı.

Morfolojik Analiz Sonuçları

Kangal uçucu külünün morfolojik incelemesinde, 1-100 µm arasında değişen büyüklüklerde aglomere olmuş tanecikler içerdiği gözlenmiştir (Şekil. 27). 1 ve 3. ünitelere ait küllerin, 2. üniteye kıyasla daha ince oldukları görülmüştür. Bu külde, genellikle köşeli yapıda olmakla birlikte, bir kısmının yüzeyi kristal kaplı, diğer kısmının ise yüzeyi pürüzsüz küresel yapıda olmak üzere, farklı şekilli tanecikler bulunmaktadır. Özellikle 3. Ünitede yüzeyi pürüzsüz katı-küresel taneciklere ,diğer ünitelere kıyasla daha fazla rastlanmıştır.

Küle uygulanan mikroanaliz sonucunda, yapı içinde alkali feldispatlar,kalsit, serbest kireç, kuvars, yanmamış karbon tanecikleri tespit edilmiştir (Şekil 28, 29). Alkali feldispatlar, kömürün yanması sırasında reaksiyona katılmadan doğrudan uçucu küle taşınmaları sebebiyle, külün içinde görülmüşlerdir. Serbest kireç, özellikle 2. Ünitede daha belirgin olarak kümeler halinde bulunmaktadır. Kalsit minerali , kömürdeki ince taneli kısımların doğrudan baca gazına karışmaları veya serbest kirecin yanma sırasında açığa çıkan

CO_2 ile birleşmesinden dolayı meydana gelebilir. Özellikle iri boyutlu(~100 µm) ve gözenekli yapılar, yanmamış karbona (kömür) karşılık gelmektedir. Yanmamış karbon kalıntıları da, kömürün düşük sıcaklıklarda yanması sırasında iri taneciklerin tamamen reaksiyona katılmamalarından ileri gelmektedir.

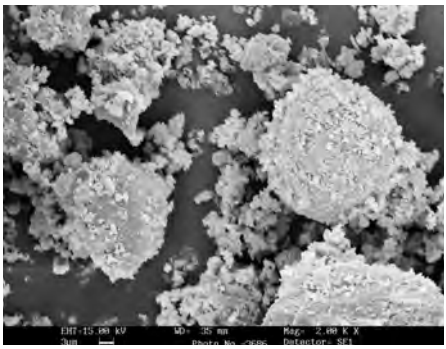


(a) (b)

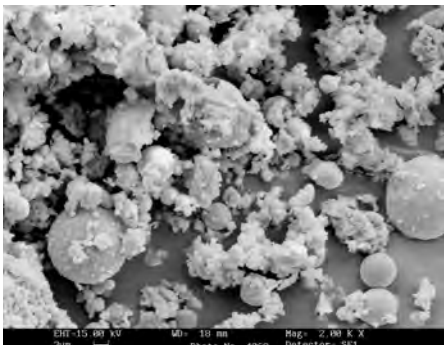
(c) (d)

Şekil 27. Kangal Uçucu Külünün Morfolojisine Ait Fotoğraflar.

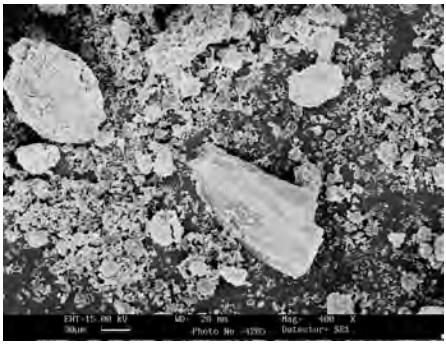
(a) 1.Ünite uçucu külü (x500)
(b) 2. Ünite uçucu külü (x500)
(c) 3.Ünite uçucu külü (x500)
(d) 1.ünitedeki küresel ve köşeli yapılar (x3500)



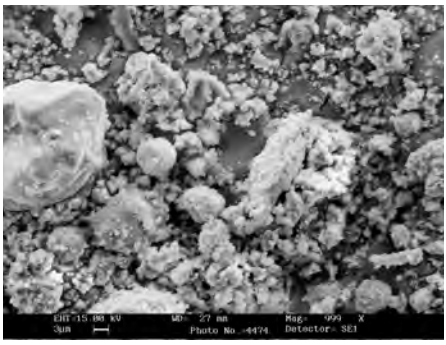
(a)



(b)



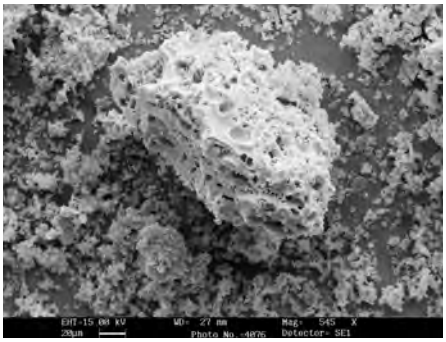
(c)



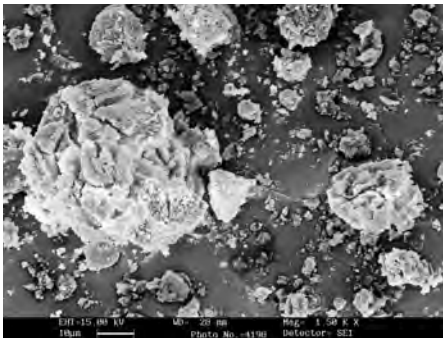
(d)

Şekil 28. Kangal Uçucu Külünün Mikroyapısı.

(a) 2.ünitedeki yüzeyi pürüzlü tanecikler(x2000)
(b) 3.Ünitedeki tam küresel yapılar (x2000)
(c) Sanidin kristali(x400)
(d) Kuvars ve kalsit tanecikleri(x~1000)



(a)



(b)

Şekil 29. Kangal Uçucu Külündeki Kristaller.

(a) Yanmamış karbon taneciği (x545)
(b) Serbest kireç kümeleri(x1500)

3.9. Yeniköy Termik Santrali Uçucu Külü

Kimyasal Analiz Sonuçları

Yeniköy Termik Santralinin iki ayrı ünitesinden beş gün boyunca alınan uçucu kül numunelerinin kimyasal analizleri yapılmış; sonuçlar ve ortalama değerlerin standartlardaki sınır değerler ile karşılaştırılması Tablo. 18a, 18b, Tablo . 19a, 19b ve Tablo. 20' de verilmiştir.

Yeniköy Termik Santrali uçucu kül numunelerinin kimyasal bileşen yüzdelerini her iki ünitede (özellikle 2.ünite) birbirinden farklı değerler olması nedeniyle, bu santralden üniform kül elde etmek mümkün değildir.

Yeniköy uçucu külü, reaktif kireç miktarının % 10'un üzerinde olması (ortalama, % 24.96) nedeniyle TS EN 197-1de verilen W sınıfı (kalkersi uçucu kül) kapsamına girmektedir. Buna karşılık reaktif silis için standardda istenilen >% 25 koşuluna uymamaktadır.

ASTM C 618'e göre SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 miktarı, ortalama % 32.5 olup % 50'den az ve CaO miktarınında % 10'dan fazla (% 39.40) olması nedeniyle, C sınıfı (yüksek kireçli) uçucu kül koşullarını sağlamaktadır.

Yeniköy uçucu külü, SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 miktarının % 70'in epeyce altında olması nedeniyle TS 639'da istenen şarta uymamaktadır.

TS EN 450 standardında, SO_3 için belirtilen sınır değer % 3 olup, bu küldeki SO_3 miktarı sınırın üzerindedir (% 23.94). Yüksek kireçli kül olduğu için serbest kireç yüzdesi de % 11.81 olup, standarttaki % 1.00 sınırını geçmiştir.

Buna göre, Yeniköy uçucu külünün ilgili dört standartta da istenilen koşullara tamamiyle uymadığı sonucuna varılmıştır.

Tablo 18a. Yeniköy (1. Ünite) Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçları

	Numune							
Oksit (%)	1	2	3	4	5	Ortalama	St.sapma	Varyasyon kats. (%)
SiO_2	12.56	14.36	16.50	16.94	14.35	14.94	1.79	11.98
Al_2O_3	9.14	10.58	10.87	11.36	9.22	10.23	1.00	9.77
Fe_2O_3	4.29	5.52	5.87	5.74	4.60	5.20	0.71	13.65
S+A+F	25.99	30.46	33.24	34.04	28.17	30.38	_	_
CaO	41.73	38.81	38.10	37.51	40.43	39.32	1.74	4.36
MgO	1.63	1.47	1.67	1.28	1.31	1.47	0.18	12.24
SO_3	27.78	25.60	23.45	24.04	27.51	25.68	1.96	7.63
K_2O	1.26	1.42	1.54	1.42	1.33	1.39	0.11	7.91
Na_2O	0.41	0.43	0.50	0.52	0.50	0.47	0.05	10.64
KK	0.73	1.26	1.24	0.69	0.56	0.90	0.33	36.66
Cl^-	0.009	0.009	0.019	0.010	0.017	0.013	0.005	38.46

Tablo 18b. Yeniköy (1. Ünite) Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

	Standartlara Uygunluk Sınırları						
Oksit (%)	Uçucu Kül	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM C 618	
			V	W		F	C
SiO_2	14.94						
Al_2O_3	10.23						
Fe_2O_3	5.20						
S+A+F	30.38				>70.00	>70.00	>50.00
CaO	39.32						
MgO	1.47				<5.00		
SO_3	25.68	<3.00			<5.00	<5.00	<5.00
K_2O	1.39						
Na_2O	0.47						
KK	0.90	<5.00	<5.00	<5.00	<10.00	<6.00	<6.00
Cl^-	0.013	<0.10					
Serb.CaO	1.48	<1.00					
Reak.SiO_2	9.57	>25.00	>25.00	>25.00			
Reak.CaO	21.80		<10.00	>10.00			

Tablo 19a. Yeniköy (2. Ünite) Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçları

	Numune							
Oksit (%)	1	2	3	4	5	Ortalama	St.sapma	Varyasyon kats. (%)
SiO_2	14.92	20.70	17.81	20.84	14.45	17.74	3.05	17.19
Al_2O_3	10.15	12.52	10.83	12.43	9.35	11.06	1.40	12.66
Fe_2O_3	4.29	4.74	5.23	5.72	4.62	4.92	0.56	11.38
S+A+F	29.36	37.96	33.87	38.99	28.42	33.72	_	_
CaO	44.15	37.64	37.70	36.67	41.27	39.49	3.14	7.95
MgO	1.85	1.59	1.27	1.41	1.41	1.51	0.22	14.57
SO_3	22.35	18.81	24.21	19.64	26.04	22.21	3.04	13.69
K_2O	1.14	1.62	1.67	1.57	1.52	1.50	0.21	14.00
Na_2O	0.37	0.50	0.57	0.57	0.55	0.51	0.08	15.69
KK	0.37	0.43	0.49	0.52	0.45	0.45	0.06	13.33
Cl^-	0.008	0.010	0.008	0.008	0.009	0.009	0.001	11.11

Tablo 19b. Yeniköy (2. Ünite) Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

	Standartlara Uygunluk Sınırları						
Oksit (%)	Uçucu Kül	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM C 618	
			V	W		F	C
SiO_2	17.74						
Al_2O_3	11.06						
Fe_2O_3	4.92						
S+A+F	33.72				>70.00	>70.00	>50.00
CaO	39.49						
MgO	1.51				<5.00		
SO_3	22.21	<3.00			<5.00	<5.00	<5.00
K_2O	1.50						
Na_2O	0.51						
KK	0.45	<5.00	<5.00	<5.00	<10.00	<6.00	<6.00
Cl^-	0.009	<0.10					
Serb.CaO	2.35	<1.00					
Reak.SiO_2	14.06	>25.00	>25.00	>25.00			
Reak.CaO	28.13		<10.00	>10.00			

Tablo 20. Yeniköy Uçucu Külünün Ortalama Kimyasal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

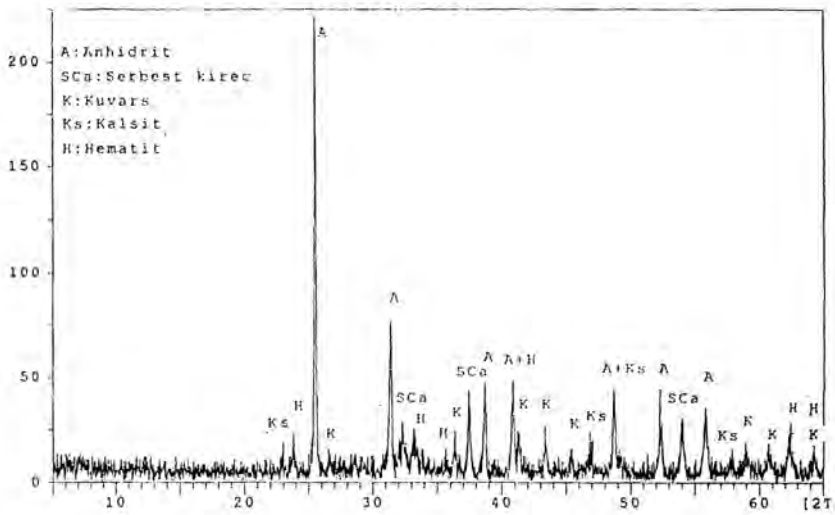
Standartlara Uygunluk Sınırları							
Oksit (%)	Uçucu Kül	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM C 618	
			V	W		F	C
SiO_2	16.34						
Al_2O_3	10.65						
Fe_2O_3	5.06						
S+A+F	32.05				>70.00	>70.00	>50.00
CaO	39.40						
MgO	1.49				<5.00		
SO_3	23.94	<3.00			<5.00	<5.00	<5.00
K_2O	1.44						
Na_2O	0.49						
KK	0.67	<5.00	<5.00	<5.00	<10.00	<6.00	<6.00
Cl^-	0.011	<0.10					
Serb.CaO	1.91	<1.00					
Reak.SiO_2	11.81	>25.00	>25.00	>25.00			
Reak.CaO	24.96		<10.00	>10.00			

Mineralojik Analiz Sonuçları

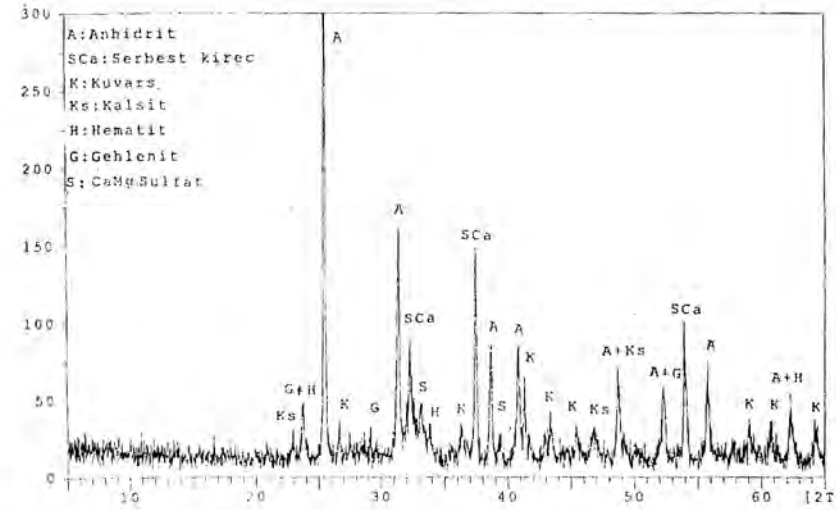
Yeniköy uçucu külünün iki aynı ünitesinin mineralojik bileşimine ait x-ışınları difraktogramı Şekil. 30 ve 31'de verilmiştir.

Şekil. 30'da görüleceği gibi 2.ünite külünde başlıca kristalize fazlar, anhidrit ve serbest kireç olup; bunun yanısıra kuvars, kalsit ve hematit'de bulunmaktadır. Camsı faz çok az miktarda görülmüştür. Şekil. 31'deki difraktogram 2. üniteye ait olup çoğunlukla kristalize fazlardan oluşmaktadır. Bu fazlar, başta anhidrit ve serbest kireç olup; diğerleri gehlenit, CaMgsülfat, kuvars, kalsit ve hematit ve camsı fazdır.

Yeniköy uçucu külünün her iki ünitesinde benzer olmakla birlikte 1. ünitede camsı fazın çok az olduğu ve 32.5° 2θ açısında maksimum verdiği, 2. ünitedeki camsı fazında, yine 32.5° 2θ'da maksimum duruma gelmekle birlikte, diğerine göre daha belirgin alana sahip olduğu görülmüştür. Bu maksimum değerler, uçucu külde analitik olarak çok yüksek CaO (Ortalamada %39.40) olmasıdır.



Şekil 30. Yeniköy Uçucu Külünün(1.ünite) Mineralojik Bileşimine Ait X-Işınları Difraktogramı.



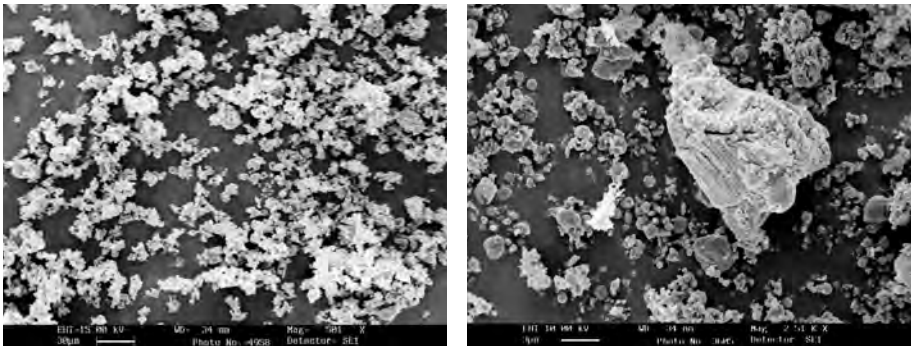
Şekil 31. Yeniköy Uçucu Külünün(2.ünite) Mineralojik Bileşimine Ait X-Işınları Difraktogramı.

Morfolojik Analiz Sonuçları

Yeniköy uçucu külünün morfolojik analizi sonucunda, genellikle 0.5-3μm arasında değişen büyüklüklerde yarı küresel, yüzeyi pürüzlü, tam küresel ve bunun yanısıra düzensiz şekilli taneciklerden oluştuğu görülmüştür (Şekil. 32-33) .Düzensiz şekilli taneciklerin boyutlarının 10-15 mikrona vardığı saptanmıştır .

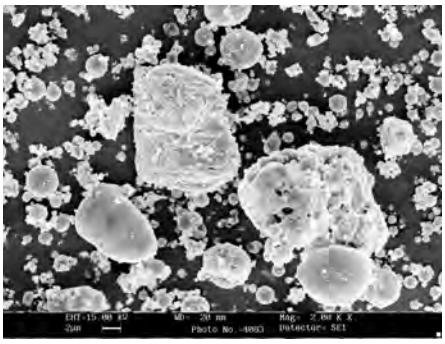
Mikroanaliz sonucunda yüzeyi anhidrit kaplı küreler, masif anhidrit kütlesi, yanmamış kil kalıntıları, serbest kireç, kalsit ve CaMgsülfat kristalleri tespit edilmiştir. Ayrıca 3 mikron ve altındaki tam küresel taneciklerin, alüminyum silikat bileşimi olduğu bulunmuştur (Şekil. 33)

Anhidrit, kömürdeki kükürtlü mineralin (FeS_2) yanması sonucu ortaya çıkan SO_2'nin soğutma sırasında uçucu kül yüzeyinde yoğuşması ve CaO tarafından tutulması (self-scrubbing) veya kömürden gelen jipsin parçalanması sonucu ortaya çıkan kireç ve oksijenin baca gazlarındaki SO_2 ile birleşmesi sonucunda meydana gelir. $CaMgSO_4$'a da rastlanması, SO_2'nin alkali ile bağlanmasından dolayıdır. Kalsit ,ince kristalize formda olup, serbest kirecin baca gazlarındaki veya elektrostatik filtre çıkışıda CO_2 ile birleşmesinden meydana gelmiştir (Şekil 34).

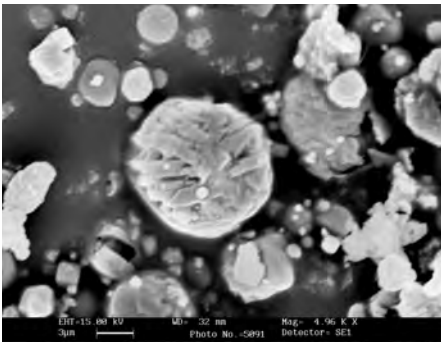


(a) (b)

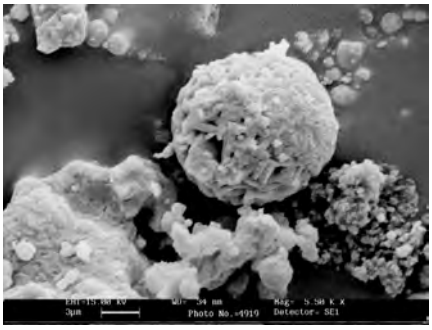
Şekil 32.Yeniköy Uçucu Külünün Mikroyapısına Ait Fotoğraflar
(a) Genel tanecik dağılımı(x500)
(b) 1.Ünite külünün mikroyapısı ve iri anhidrit kristali(x2500)



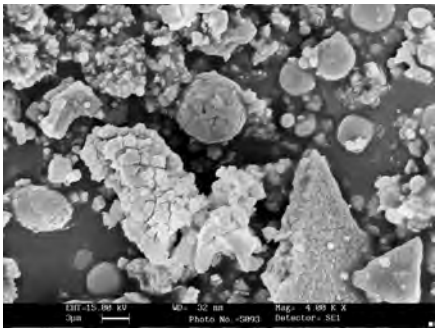
(a)



(b)



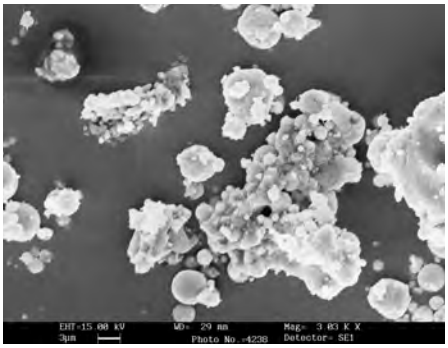
(c)



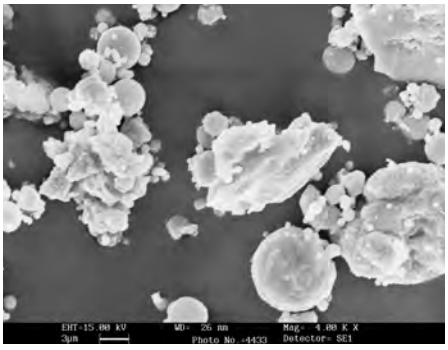
(d)

Şekil 33. Yeniköy Uçucu Külünün Mikroyapısına Ait Fotoğraflar

(a) 2.Ünite külünün mikroyapısı, iri anhidrit kristali ve yanmamış kil kalıntısı(x2000)
(b) Prizmatik anhidrit kristalleri ile kaplı tanecik(~x5000)
(c) Yüzeyi anhidrit kaplı senosfer (x5500)
(d) Küçük bir serbest kireç kümesi(x4000)



(a)



(b)

Şekil 34.

(a) İnce kristalize kalsit(x3000)
(b) CaMgsülfat kristali(köşeli yapı) (x4000)

3.10. Kemerköy Termik Santrali Uçucu Külü

Kimyasal Analiz Sonuçları

Kemerköy Termik Santralinden beş gün boyunca alınan numunelerin kimyasal analizleri yapılmış; sonuçlar ve ortalama değerlerin standartlara uygunluğunun karşılaştırması Tablo. 21a ve 21b' de verilmiştir.

Kimyasal bileşim açısından değerlendirildiğinde beş gün boyunca alınan numunelerin bileşen yüzdeleri arasında belirgin farklar bulunduğu görülmüştür. Buna göre, santralde stabil koşullarda üretim yapılmadığı sonucuna varılmıştır.

Kemerköy uçucu külü, reaktif kireç miktarının %10'un üzerinde olması (%28.32) nedeniyle, nedeniyle TS EN 197-1''e göre W sınıfı (kalkersi uçucu kül) kapsamına girmektedir. Ancak, bu sınıfı için standartta istenilen reaktif silis en az %25 olması gerekliliğine uymamaktadır. %17.61 reaktif silis). ASTM C 618'e göre SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 değerinin %50'nin altında olması ve CaO'in %10'dan fazla olması nedeniyle C sınıfı (yüksek kireçli) uçucu kül sınıfına girmektedir.

Tablodan görüleceği gibi Kemerköy uçucu külü gerek TS 639, gerekse ASTMC 618'de SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 için istenilen, sırasıyla >%70 ve >%50 koşulunu sağlayamamıştır. En 450 standardında SO_3 için getirilen en fazla %3 koşuluna da, SO_3 yüzdesinin 13.88 olması nedeniyle uymamaktadır. Yine, yüksek kireçli kül olması nedeniyle serbest kireç miktarı da %7.15 olup standarttaki sınırın değerin oldukça üzerindedir.

Buna göre, Kemerköy uçucu külü kimyasal bileşim açısından dört standartta da istenilen koşulları tamamen sağlayamayan bir küldür.

Tablo 21a. Kemerköy Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçları

	Numune							
Oksit (%)	1	2	3	4	5	Ortalama	St.sapma	Varyasyon kats. (%)
SiO_2	22.90	29.57	25.87	27.54	20.11	25.20	3.75	14.88
Al_2O_3	13.10	14.10	12.98	13.17	9.55	12.58	1.75	13.91
Fe_2O_3	5.83	6.00	6.45	6.28	5.34	5.98	0.43	7.19
S+A+F	41.83	49.67	45.30	46.99	35.00	43.76	_	_
CaO	39.39	35.35	37.81	35.82	44.10	38.49	3.53	9.17
MgO	1.30	1.22	1.35	1.29	1.18	1.27	0.07	5.51
SO_3	14.88	11.42	12.75	12.67	17.67	13.88	2.46	17.72
K_2O	1.16	1.35	1.21	1.28	0.91	1.18	0.17	14.41
Na_2O	0.38	0.43	0.37	0.52	0.33	0.41	0.07	17.07
KK	0.61	0.19	0.53	0.77	0.38	0.50	0.22	44.00
Cl^-	0.011	0.012	0.018	0.018	0.011	0.014	0.004	28.57

Tablo 21b. Kemerköy Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

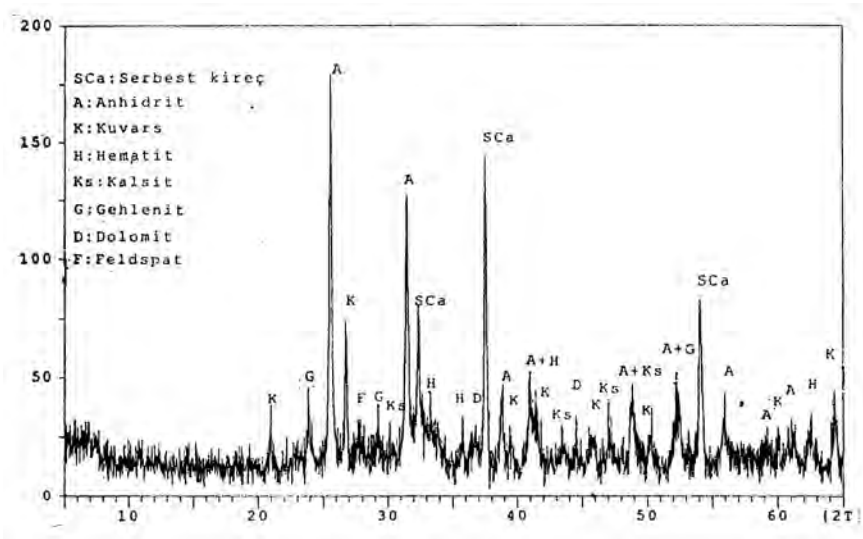
	Standartlara Uygunluk Sınırları						
Oksit (%)	Uçucu Kül	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM C 618	
			V	W		F	C
SiO_2	25.20						
Al_2O_3	12.58						
Fe_2O_3	5.98						
S+A+F	43.76				>70.00	>70.00	>50.00
CaO	38.49						
MgO	1.27				<5.00		
SO_3	13.88	<3.00			<5.00	<5.00	<5.00
K_2O	1.18						
Na_2O	0.41						
KK	0.50	<5.00	<5.00	<5.00	<10.00	<6.00	<6.00
Cl^-	0.014	<0.10					
Serb.CaO	7.15	<1.00					
Reak.SiO_2	17.61	>25.00	>25.00	>25.00			
Reak.CaO	28.32		<10.00	>10.00			

Minerolojik Analiz Sonuçları

Kemerköy uçucu külünün minerolojik analizi yapılmış ve sonuçlar Şekil. 35'deki X-ışınları difraktogramında gösterilmiştir.

Buna göre, Kemerköy uçucu külünün esas olarak kristalize fazdan oluştuğu, başlıca fazların serbest kireç, anhidrit, kuvars olduğu, ayrıca gehlenit, dolomit, kalsit ve feldispat'da bulunduğu tespit edilmiştir. Bu kristalize fazların yanısıra difraktagramda görüleceği gibi uçucu külde camsı fazı da bulunmaktadır.

Kemerköy uçucu külünde camsı fazın maksimum yükselmesi 32° 2θ olup, camsı fazın bu görünümü uçucu külün yüksek kireçli (%38.49) olmasından kaynaklanmaktadır.

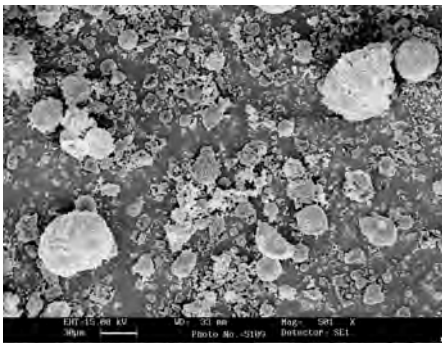


Şekil 35.Kemerköy Uçucu Külünün Mineralojik Bileşimine Ait X-Işınları Difraktogramı.

Morfolojik Analiz Sonuçları

Kemerköy uçucu külünün, büyüklüğü 1-40 µm arasında çoğunluğu düzensiz şekilli ve aglomere olmuş taneciklerden oluştuğu görülmüştür. Tanecikler genellikle köşeli, şekilsiz yapıda olmakla birlikte yarı küresel (semispherical) ve yüzeyi pürüzlü küresel (dermasfer) yapılar da mevcuttur. Tam küresel tanecikler az miktarda olup, bunlar 3µm'nin altındadır. (Şekil. 36).

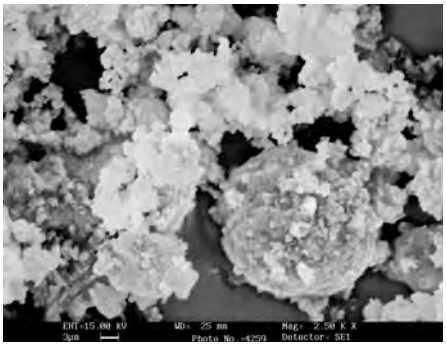
Mikroanaliz uygulaması sonucunda, yüzeyi anhidrit kaplı tanecikler, katmansı-köşeli dolomit, kalsit ve şekilsiz kil kalıntıları tespit edilmiştir (Şekil. 37). Kalsit ve dolomit tanecikleri, yüksek karbonatlı kömür kullanılmasının bir sonucu olup, bu taneciklerin ince olanları gaz akışı ile uçucu küle geçerler. İri kristalin yapılı sinterlenmiş (dead-burned) serbest kireç kümeleri görülmüştür.



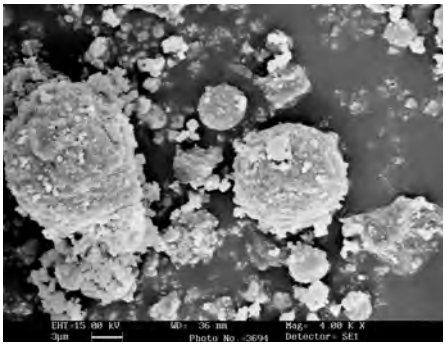
(a)

Şekil 36. Kemerköy Uçucu Külünün Morfolojik Yapısına Ait Fotoğraflar.

(a)Taneciklerin genel dağılımı(x500)



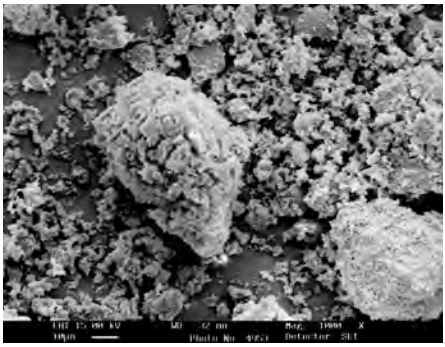
(b)



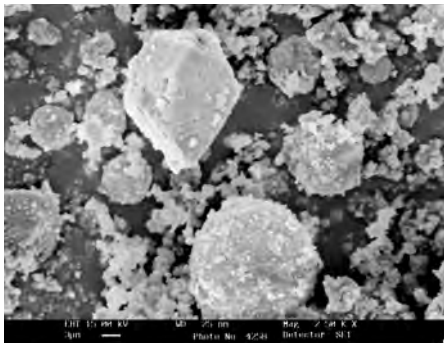
(c)

Şekil 36. Kemerköy Uçucu Külünün Morfolojik Yapısına Ait Fotoğraflar.

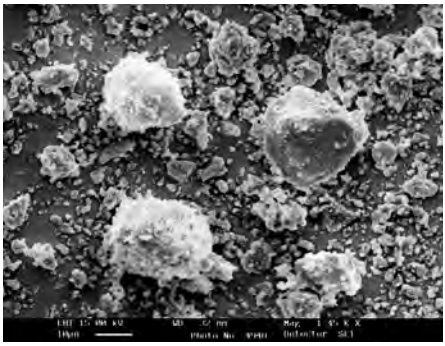
(b) Köşeli yapılar ve kürenin yüzeyindeki pürüzlü birikintiler (x2500)
(c) Yaklaşık 3 mikron boyutlarında tam küresel ve yüzeyi pürüzlü tanecikler (x4000)



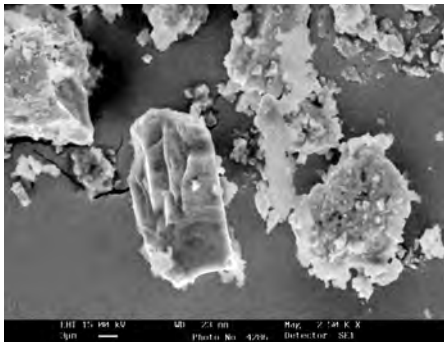
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 37. Kemerköy Uçucu Külünün Kristal yapısı.

(a) Büyük bir serbest kireç kümesi(x1000)
(b) Dolomit taneciği(x2500)
(c) Kaba şekilli kuvars(x1450)
(d) Kalsit kristali(x2500)

3.11. Çayırhan Termik Santrali Uçucu Külü

Kimyasal Analiz Sonuçları

Çayırhan Termik Santraline ait uçucu kül numunesinin kimyasal analizleri yapılmış ; sonuçların standartlara uygunluğunun karşılaştırılması Tablo.22'de gösterilmiştir.

Çayırhan uçucu külü, reaktif kireç miktarının % 10'un altında olması nedeniyle TS EN 197-1 standardına göre V sınıfına (silissi uçucu kül) girmektedir. Yine ASTM C618 standardına göre SiO_2+Al_0O_3+Fe_2O_3 değerinin % 70'in üzerinde olması nedeniyle F sınıfına (düşük kireçli) dahil olmakla birlikte ,analitik CaO miktarının % 10'un üzerinde olması nedeniyle kireçsi kül sınıfına da girmektedir. Buna göre, bu külün her iki uçucu kül sınıfı için de sınırda olduğu düşünülmüştür. Tablo 22'de görüldüğü gibi, Çayırhan külü, ASTM C618 ve TS 639'daki S+A+F>70 koşulunu sağlamaktadır.

TS EN 450 standardına göre serbest kireç yüzdesi için kabul edilen en fazla % 1.0 koşullarına uymaktadır. Yine bu standart için ,reaktif silis, kızdırma kaybı ve Cl 'de sınırlar içindedir. Ancak, SO_3 miktarı %3.94 olup, bu standarddaki sınırın (%3) dışındadır.

Buna göre, Çayırhan uçucu külünün, üç standartta da kimyasal bileşen bazında istenilen koşullara tamamiyle uygun ,TS EN 450'ye de SO_3 hariç uygun bir kül olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 22. Çayırhan Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçları ve Değerlendirilmesi

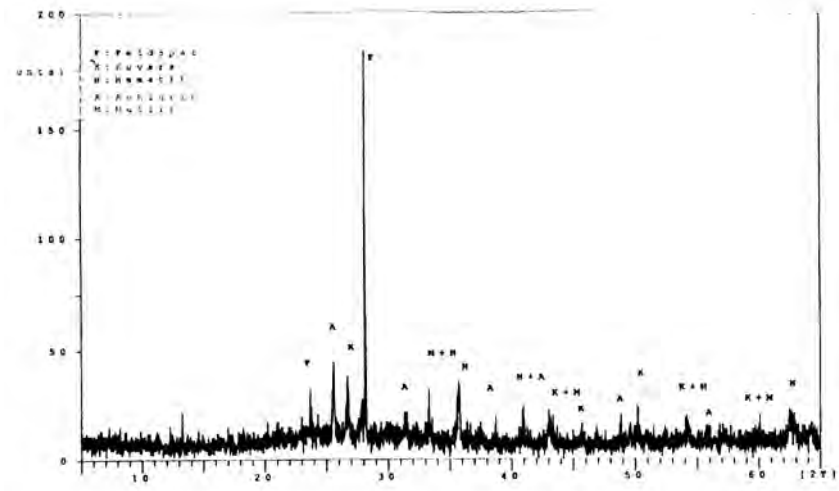
Standartlara Uygunluk Sınırları							
Oksit (%)	Uçucu Kül	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM C 618	
			V	W		F	C
SiO_2	50.98						
Al_2O_3	13.11						
Fe_2O_3	9.74						
S+A+F	73.83				>70.00	>70.00	>50.00
CaO	11.82						
MgO	3.91				<5.00		
SO_3	3.94	<3.00			<5.00	<5.00	<5.00
K_2O	1.91						
Na_2O	2.71						
KK	0.86	<5.00	<5.00	<5.00	<10.00	<5.00	<6.00
Cl^-	0.014	<0.10					
Serb.CaO	0.56	<1.00					
Reak.SiO_2	40.89	>25.00	>25.00	>25.00			
Reak.CaO	8.78		<10.00	>10.00			

Mineralojik Analiz Sonuçları

Çayırhan Termik Santrali uçucu külünün mineralojik bileşimine ait x-ışınları difraktogramı Şekil. 38'de verilmiştir.

Buna göre ,bu külün camsı ve kristalize fazlardan oluştuğu görülmektedir. Kristalize fazlar alkali feldspatlar,kuvars, hematit, anhidrit ve mullit'den meydana gelmektedir.

Çayırhan uçucu külünün X-ışınları difraktogramında, camsı fazın 23-28° 2θ arasında maksimum duruma geldiği görülmüş; dolayısıyla camsı fazın silissi karakter taşıdığı anlaşılmıştır.

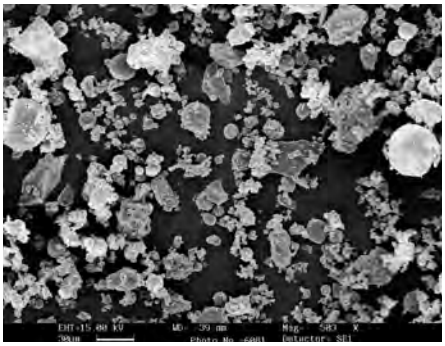


Şekil 38. Çayırhan Uçucu Külünün Mineralojik Bileşimine Ait X-Işınları Difraktogramı.

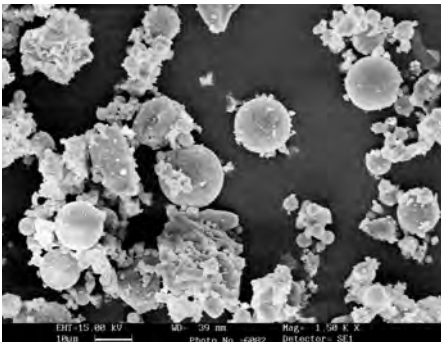
Morfolojik Analiz Sonuçları

Çayırhan uçucu külü, büyüklüğü 1-20 µm arasında değişen küresel , yarı-köşeli ve köşeli tanecikler de içermektedir (Şekil. 39). Özellikle,büyüklüğü 3-6 µm arasında değişen tanecikler tam küresel yapıya sahiptirler.

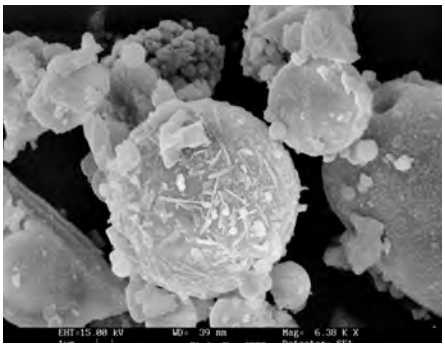
Uçucu kül numunesine uygulanan mikroanaliz sonucunda, yüzeyi feldspat ve hematit kaplı tanecikler ve anhidrit kümeleri tespit edilmiştir (Şekil. 40). Tane yüzeyinde gözlenen feldspatlar,camsı fazdan sentezlenme sonucunda oluşmuştur. Bunun yanısıra,camsı faza uygulanan asitte çözme (HF) işlemi sonucunda mullit kristallerine rastlanmıştır.



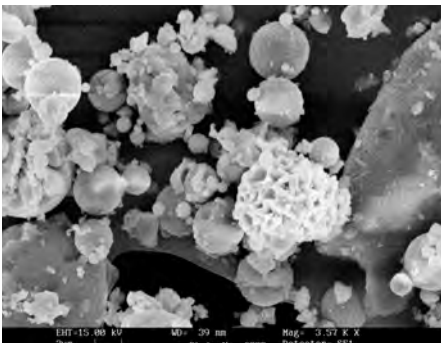
(a)



(b)



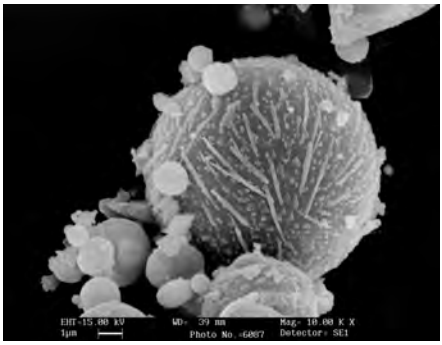
(c)



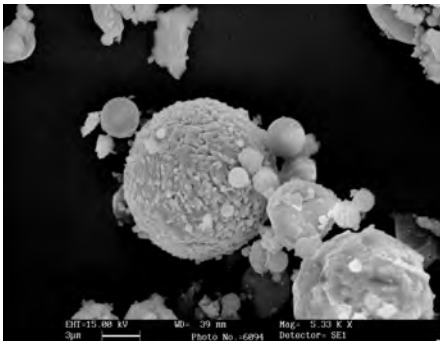
(d)

Şekil 39. Çayırhan Uçucu Külünün Mikroyapısı

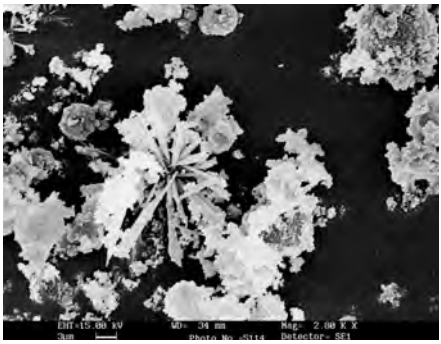
(a) Taneciklerin genel dağılımı (x500)
(b) Küresel,yarı-köşeli ve köşeli tanecikler (x1500)
(c) Alkali felspat kaplı küreler (x6300)
(d) Anhidrit taneciği (x4100)



(a)



(b)



(c)

Şekil 40. Çayırhan Uçucu Külünün Kristal Yapısı.

(a) Feldispat kaplı küresel tanecik (x10000)
(b) Hematit kaplı küreler (x5300)
(c) Mullit kristalleri (x2800)

4. GENEL DEĞERLENDİRME

1) TS EN 197-1 standardına göre, reaktif kireç miktarının %10'un üzerinde olması nedeniyle, Afşin Elbistan, Kangal, Yeniköy, Soma, Kemerköy uçucu külleri W sınıfına (kalkersi uçucu kül); reaktif kireç miktarının %10'un altında olması nedeniyle Tunçbilek, Çatalağzı, Orhaneli, Seyitömer,Çayırhan uçucu külleri V sınıfına (silissi uçucu kül) girmektedir. Yatağan uçucu külü, kalkersi-silissi kül sınıflandırması için arada kalan kül olmakla birlikte W sınıfı (kalkersi uçucu kül) bileşimine daha yakındır.

2) TS EN 197-1 standardında istenilen koşullar (reaktif silis, reaktif kireç ve kızdırma kaybı) dikkate alındığında, Afşin-Elbistan, Kemerköy ve Yeniköy özellikle reaktif silis için istenilen en az %25 olma gerekliliğini sağlayamamıştır. Bu üç külün dışındaki uçucu küller, sınıfları ile ilgili olarak TS EN 197-1'de istenilen koşullara uygundur.

3) TS 639 standardına göre, SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 (S+A+F) >% 70 koşulunu, Tunçbilek, Orhaneli, Çatalağzı, Yatağan, Soma, Seyitömer,Çayırhan uçucu külleri sağlamış; diğer küllerde S + A + F %70'in altında kalmıştır.

   SO_3 miktarı için <%5 koşulunu, Tunçbilek, Orhaneli, Çatalağzı, Yatağan, Soma, Seyitömer sağlamakta; Yeniköy, Kemerköy, Afşin-Elbistan, Çayırhan ve Kangal uçucu külleri sınırın dışında kalmaktadır. Yine bu standartta getirilen MgO<%5 ve kızdırma kaybı <%10 koşuluna tüm küller uymaktadır.

4) ASTM C 618'e standardına göre, SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3>%70 koşulu ve analitik CaO <%10 koşulunu gerçekleştiren Tunçbilek, Orhaneli, Çatalağzı, Seyitömer uçucu külleri F sınıfına (düşük kireçli kül); S+A+F>%50 ve analitik CaO >%10 koşulunu sağlayan Kangal, Soma, Çayırhan,Yatağan C sınıfına (yüksek kireçli uçucu kül) girmektedir. Afşin-Elbistan, Kemerköy, Yeniköy analitik CaO>%10 olması nedeniyle C sınıfına girmekle birlikte, standartta istenilen S+A+F>%50 koşulunu sağlayamamaktadır.

ASTM C 618 standardında, uçucu küller elde edildikleri kömürün niteliğine göre de sınıflandırıldığı için Türkiye'de taşkömürünün yakılması ile üretilen tek kömür Çatalağzı olup; bu kül F sınıfına girmektedir. Diğer santrallerde linyit ve benzeri kömür kullanıldığı için, diğer küller C sınıfına girmektedirler.

Bu standartta SO_3 için getirilen sınırlama (<%5), TS 639 ile aynıdır. Yeniköy, Kemerköy ,Afşin Elbistan ve Kangal külü dışındakiler bu sınıra uymaktadır.

Yine bu standartta verilen kızdırma kaybı <%6 olmalı koşuluna tüm küller uymaktadır.

5) TS EN 450 standardı, diğer standartlardan farklı olarak, özellikle SO_3 miktarı sınırını düşürdüğü (en fazla %3) ve serbest kireç miktarına da sınırlama (serb. CaO<1.00) getirdiği için, bu standarda tamamiyle uygun kül tipi de daha az olmuştur. Bu anlamda sülfokalsik uçucu küllerin doğal olarak TS EN 450 standardına tam olarak uygun olmadığı düşünülmektedir. Kimyasal analiz sonuçlarına göre Tunçbilek, Seyitömer, Orhaneli, Çatalağzı, Yatağan külleri hem SO_3 hem de serbest kireç sınırlamalarına uygundur. Diğer küller, yüksek kireçli olduğundan serbest kireç yüzdeleri %1.00'in üzerindedir.

   SO_3 sınırlamasına gelince, yüksek kireçli küllerden, sadece Soma 1-2 ve 3-4 ünitelerine ait küller SO_3< %3.00 koşuluna uymaktadır. Soma 5-6. Ünite (% 4.11) ve Çayırhan SO_3 açısından standart dışında (% 3.94) kalmaktadır.

   Kızdırma kaybı ve klorür koşuluna tüm küller uymaktadır.

   Sonuç olarak, TS EN 450 standardında yüksek silisli uçucu küllerin tamamiyle, yüksek kireçli küllerin ise kısmen uygun olduğu anlaşılmıştır.

6) Kimyasal bileşim açısından küller genel olarak karşılaştırılırsa standartlarda SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 miktarı, reaktif silis, reaktif kireç SO_3, MgO, serbest

kireç, kızdırma kaybı ve Cl^- için istenilen sınırlamalara, Orhaneli, Çayırhan,Tunçbilek, Seyitömer, Yatağan, Çatalağzı, Soma (1-4. Ünite hariç) uçucu külleri tamamen uymaktadır.

7) Mineralojik bileşim açısından uçucu küller karşılaştırıldığında genelde camsı ve kristalize olmak üzere iki ayrı yapıda fazlar içerdikleri saptanmıştır. Ancak, yüksek silisli küllerde, daha homojen faz dağılımı bulunduğu görülmüştür.

X-ışınları difraktogramlarında görüldüğü gibi camsı veya amorf faz, özellikle yüksek silisli küllerde (Tunçbilek, Orhaneli, Çatalağzı, Seyitömer, Çayırhan) daha belirgindir. Ancak bu küllerde kristalize fazlar (başlıca kuvars ve mullit olmak üzere) da mevcuttur. Difraktogramlarda, camsı kürelerin kristalize bileşenini oluşturan mullit piki-yüksekliğinin, Çatalağzı ve Orhaneli küllerine kıyasla daha az olduğu görülmüştür. Dolayısıyla, Seyitömer, Tunçbilek ve Çayırhan küllerindeki reaktif silis (kimyasal analiz sonucunda), sırasıyla 39.01, 40.55 ve 40.89 olup diğer küllere kıyasla en yüksek değerlere sahiptir.

Kristalize fazlar (başta kuvars, serbest kireç, anhidrit olmak üzere) yüksek kireçli küllerde (Afşin-Elbistan, Yeniköy, Kemerköy) daha belirgin olup; bu küllerde camsı faz alanı oldukça azdır. Yatağan, Soma ve Kangal uçucu küllerinde hem camsı hem de kristalize fazlar belirgin durumdadır.

Uçucu küller, camsı fazın durumuna (alümino silikat veya kalsiyum alümina silikat) göre değerlendirildiğinde, küldeki CaO yüzdesine bağlı olarak camsı fazın X-ışını difraktogramındaki maksimum değeri 2θ açısında 22-34° arasında değişmekte olup; CaO arttıkça maksimum nokta yüksek dereceye (34°) doğru tespit edilmiştir. Buna göre, maksimum nokta düşük kireçli küllerde (Tunçbilek, Orhaneli, Seyitömer, Çayırhan ve Çatalağzı) 22-27° 2θ arasında-yüksek kireçli (Kangal, Yatağan, Soma, Yeniköy, Kemerköy) küllerde 27° 2θ üzerindedir. Dolayısıyla, camsı faz düşük kireçli küllerdeki alüminosilikat yüksek kireçli küllerde kalsiyumalüminosilikat bileşimindedir.

8) Uçucu küller morfolojik açıdan değerlendirildiğinde, genelde küresel, köşeli ve şekilsiz olmak üzere farklı yapılar bulunduğu tespit edilmiştir. Tanecik büyüklük dağılımı 0.5-80 mikron arasında değişmektedir. Tanecik büyüklük ve şekil dağılımı açısından, yüksek silisli küllerin, kireçli küllere kıyasla daha homojen olduğu görülmüştür.

Yüksek silisli küllerde, genellikle küresel (tam şekilli küreler, senosferler, plerosfer, dermasfer gibi) yapılar ve bunların yanısıra köşeli tanecikler görülmüştür. Orhaneli ve Tunçbilek uçucu küllerinde diğer küllere kıyasla küresel tanecikler esas yapıyı oluşturmakta ve bu küller tanecik şekil dağılımı açısından homojenlik göstermektedirler. Ancak, Çatalağzı, Çayırhan ve Seyitömer uçucu küllerinde köşeli yapılar bulunduğu da tespit edilmiştir.

Yüksek kireçli küllerde genellikle köşeli tanecikler ve bunların yanısıra küresel yapılar görülmüş olup ancak köşeli tanecikler daha belirgin durumdadır. Küresel tanecikler de düşük kireçli küller kadar pürüzsüz değildir.

Afşin-Elbistan (özellikle 1. Ünite), Yeniköy (1. ünite), Soma (1-2 ve 3-4 ünite), Kangal (1.ünite), Kemerköy küllerinde düzensiz şekilli yapılar fazla olduğu görülmüştür. Yatağan, Soma (5-6 ünite), Afşin Elbistan (2. Ünite), Yeniköy (2. Ünite), Kangal (2 ve 3. ünite) küllerinde karma şekilli tanecik yapısı (hem köşeli hem küresel) gözlenmiştir.

5. FİZİKSEL ve MEKANİK ANALİZ SONUÇLARI

Bu araştırmada kullanılan uçucu külllerin fiziksel ve mekanik testleri her termik santralden gelen 5 numunenin karışımı üzerinden tespit edilmiştir. Numunelerin özgül ağırlıkları için Dijital Piknometre kullanılmış, incelikler ise 90 µm ve 45 µm elek bakiyeleri cinsinden analiz edilmiştir. Numunelerin mekanik testleri puzolanik aktivite olarak TS EN 450 standardında belirtilen yöntem ile yapılmıştır.

5.1.Özgül Ağırlık ve İncelik Test Sonuçları

Tablo.23 Uçucu Kül Numunelerinin Özgül Ağırlık ve İncelik Sonuçları

Numune	Özgül Ağırlık (g/cm^3)	90 µm Elek Bakiyesi(%)	45 µm Elek Bakiyesi(%)
Afşin Elbistan-1	2.93	12.3	32.0
Afşin Elbistan-2	2.78	10.4	27.5
Tunçbilek -3	2.34	6.7	26.0
Tunçbilek 4-5	2.18	3.6	22.4
Çatalağzı	2.00	21.4	38.7
Yeniköy-1	2.86	1.1	0.8
Yeniköy-2	2.81	0.7	0.8
Orhaneli	2.18	2.6	7.0
Yatağan	2.12	24.7	50.1
Kemerköy	2.83	26.4	47.8
Soma 1-2	2.41	33.7	52.6
Soma 3-4	2.28	4.0	12.4
Soma 5-6	2.20	3.0	11.5
Kangal-1	2.50	46.4	74.4
Kangal-2	2.47	54.0	78.6
Kangal-3	2.10	5.7	48.9
Seyitömer	2.13	3.2	47.0
Çayırhan	2.36	6.7	24.5

TS EN 450 standardında uçucu küllerin özgül ağırlıkları için herhangi bir sınır değer bulunmazken incelikler için 45 µm' luk eleğin üstünde kalan miktarın en çok % 40 olması koşulu bulunmaktadır. Bu durumda yapılan analizlerden elde edilen sonuçların gösterildiği Tablo 23' de Çatalağzı, Yatağan, Soma-1-2, Kangal-1, Kangal-2, Kangal-3, Seyitömer ve Kemerköy Termik Santrallerinin uçucu küllerinin bu sınırlamaya uymadığı görülmektedir.

5.2. Puzolanik Aktivite Deney Sonuçları

Puzolanik aktivite deneyleri TS EN 450 standardına uygun olarak üç sınıf incelik değeri için yapılmıştır. Küller önce santralden alındıkları gibi akitivite deneyine tabi tutulmuş, daha sonra sırasıyla 200 µm ve 90 µm' luk eleklerden elenerek puzolanik aktivite deneyleri tekrar edilmştir. Numunelerin standardta istenen 28 ve 90 günlük aktvitelerine ilave olarak 7 günlük aktivite testleri de yapılmıştır.

Tablo 24. Uçucu Kül Numunelerinin Puzolanik Aktivite Sonuçları

Numune	7 Günlük Aktivite (%)			28 Günlük Aktivite (%)			90 Günlük Aktivite (%)		
	Orj.	200 µm Altı	90 µm Altı	Orj.	200 µm Altı	90 µm Altı	Orj.	200 µm Altı	90 µm Altı
Afşin Elbistan –1	63	68	68	67	70	69	70	73	76
Afşin Elbistan-2	47	48	50	62	67	70	79	86	88
Tunçbilek-3	66	82	84	72	86	89	80	100	105
Tunçbilek 4-5	82	89	90	87	99	102	103	114	117
Çatalağzı	70	70	75	73	75	80	81	86	93
Yeniköy-1	63	72	72	65	73	77	74	79	85
Yeniköy-2	58	62	65	62	67	67	68	69	72
Orhaneli	96	95	98	108	110	110	126	126	127
Yatağan	66	71	74	69	77	80	77	87	86
Kemerköy	46	50	53	52	64	67	72	80	82
Soma 1-2	52	75	79	54	78	81	59	86	90
Soma 3-4	58	69	71	60	74	74	69	79	77
Soma 5-6	87	88	88	100	105	110	108	114	113
Kangal-1	68	75	76	77	86	90	89	92	97
Kangal-2	60	72	75	64	74	80	68	84	88
Kangal-3	73	70	72	77	77	78	82	85	86
Seyitömer	83	87	98	91	98	108	100	103	116
Çayırhan	61	75	83	72	86	91	-	-	-
Referans PÇ 42.5	7 Günlük Basınç Dayanımı (N/mm2)			28 Günlük Basınç Dayanımı (N/mm2)			90 Günlük Basınç Dayanımı (N/mm2)		
	35.0			46.4			54.4		

TS EN 450 standardına göre orjinal numunelerin puzolanik aktivite sonuçları değerlendirildiğinde (Tablo.24), 28 günlük aktivite sınırı olan en az % 75 değerini Tunçbilek 4-5 , Orhaneli, Soma 5-6, Kangal-2, Kangal-3 ve

Seyitömer küllerinin sağladığı görülmektedir. 90 günlük aktivite sınırı olan en az % 85' i ise Kangal-3 hariç yine adı geçen bu santraller sağlayabilmiştir. 200 µm' dan elenmiş numunelerde 28 günlük aktivite sınırını geçen küller sırasıyla Tunçbilek –3, Tunçbilek 4-5, Çatalağzı, Orhaneli, Yatağan, Soma 1-2 , Soma 3-4, Kangal –1, Kangal- 3, Seyitömer ve Çayırhan olurken, 90 günlük aktivite sınırını geçen küller, bu küllere ilave olarak Afşin Elbistan –2 olmuştur. Son olarak 90 µm' dan elenmiş numunelerin sonuçları incelendiğinde , Afşin Elbistan -1, Afşin Elbistan -2, Yeniköy-2, Kemerköy ve Soma 3-4 haricindeki diğer tüm küller hem 28 günlük hem de 90 günlük aktivite sınırlarını geçmiştir.

Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere genel olarak küllerin incelikleri arttığında puzolanik aktivite değerleri de artma eğilimi göstermektedir. Artış genel olarak orjinal numuneler ile 200 µm'dan elenmiş numuneler arasında daha belirgin görünmekte, 90 µm'dan elenmiş numunelerin 200 µm'dan elenmiş numunelere göre artışları daha az olmaktadır.

6. ÇİMENTO ve BETONDA KATKI MADDESİ OLARAK UÇUCU KÜL

Uçucu külün katkı maddesi olarak çimento ve beton özelliklerine etkileri katılan kül miktarı, külün ve çimentonun özellikleri, külün çimento yerine veya çimentoya ilaveten katılması gibi faktörlere bağlıdır. İlaveten , kül katkısının katkısız karışıomdaki kıvamı veya su ihtiyacını etkileyişi de dikkate alınmalıdır. Beton karışımının, agrega granülometrisinin yeniden düzenlenmesi ve kimyasal katkı kullanılması söz konusu olabilecektir. Aşağıda sabit su/bağlayıcı oranında ve sabit kıvamda olmak üzere iki harç karışım serisi üzerinde yapılan bazı deneylerden örnekler sunulmuştur. Ayrıca küllerin çimento eşdeğerliliği konusunda kullanılan "k" faktörü tanımlanmaktadır.

Sabit Su/Bağlayıcı Oranında Değişik Katkı Miktarlarında Uçucu Kül Katılan Harçların Dayanımları

Bu çalışmada yüksek, orta ve düşük düzeyde aktivite veren küllerden gelişi güzel seçilen 3 termik santrale ait küller üzerinde su/bağlayıcı oranı 0,5 olarak sabit tutularak ve portland çimentosuna ağırlıkça % 10, % 20 % 30, ve % 40 oranlarında uçucu kül ikame edilerek numunlerin basınç dayanımları tespit edilmiştir.

Yapılan deney sonuçlarına göre Soma 3-4. Ünite külü ve Afşin Elbistan 1. Ünite külü tüm yüzde ikame değerleri için referans PÇ' ye göre daha az basınç dayanımı değerleri vermekte ve ikame kül miktarı arttıkça harçların işlenebilirlik değerleri düşmektedir. Buna karşın Orhaneli uçucu külünün % 30 ikame oranına kadar referans PÇ' den daha yüksek basınç dayanımına ve referans PÇ' den daha iyi işlenebilirliğe sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 25. Soma 3-4. Ünite Uçucu Külünün Dayanım Sonuçları

	% 100 PÇ	%10 UÇK % 90 PÇ	%20 UÇK % 80 PÇ	%30 UÇK % 70 PÇ	%40 UÇK % 60 PÇ
Yayılma (cm)	17.2	14.2	13.7	12.3	11.7
7 Günlük Dayanım	35.7/1	31.6/0.88	26.9/0.75	20.9/0.58	17.5/0.49
28 Günlük Dayanım	45.1/1	39.8/0.88	33.5/0.74	29.1/0.64	24.4/0.54
90 Günlük Dayanım	55.8/1	50.2/0.90	42.5/0.76	36.5/0.69	31.4/0.56

Tablo 26. Afşin Elbistan –1. Ünite Uçucu Külünün Dayanım Sonuçları

	% 100 PÇ	%10 UÇK % 90 PÇ	%20 UÇK % 80 PÇ	%30 UÇK % 70 PÇ	%40 UÇK % 60 PÇ
Yayılma (cm)	17.2	15.6	15.4	15.2	14.3
7 Günlük Dayanım	35.7/1.00	31.3/0.88	20.0/0.56	16.2/0.45	11.2/0.31
28 Günlük Dayanım	45.1/1.00	43.9/0.97	35.7/.79	20.9/0.46	13.4/0.30
90 Günlük Dayanım	55.8/1.00	55.7/1.00	45.9.0.82	26.1/0.47	16.3/0.29

Tablo 27. Orhaneli Uçucu Külünün Dayanım Sonuçları

	% 100 PÇ	%10 UÇK % 90 PÇ	%20 UÇK % 80 PÇ	%30 UÇK % 70 PÇ	%40 UÇK % 60 PÇ
Yayılma (cm)	17.2	17.8	19.6	21.2	22.4
7 Günlük Dayanım	35.7/1	36.3/1.02	33.5/0.94	29.4/0.82	25.7/0.72
28 Günlük Dayanım	45.1/1	47.4/1.05	48.0/1.06	46.1/1.02	43.3/0.96
90 Günlük Dayanım	55.8/1	59.0/1.06	59.9/1.07	57.4/1.04	54.0/0.97

Sabit Kıvamda Değişik Miktarlarda Uçucu Kül Katılan Harçların Dayanımları

Bu çalışmada ise yine aynı termik santralllere ait uçucu küllerde yayılma tablası deneyi ile referans PÇ 42.5 çimentosun yayılma değeri baz alınarak %10, % 20, % 30 ve % 40 uçucu kül katkılı bağlayıcılarla hazırlanan harçların (PÇ + Uçucu kül) su/bağlayıcı oranları, basınç dayanımları ve numunelerin basınç dayanımlarının referans PÇ' nin basınç dayanımına oranları tespit edilmiştir.

Tablo 28. Soma 3-4. Ünite Uçucu Külünün Dayanım Sonuçları

	% 100 PÇ	%10 UÇK % 90 PÇ	%20 UÇK % 80 PÇ	%30 UÇK % 70 PÇ	%40 UÇK % 60 PÇ
Yayılma (cm)	17.2	17.1	17.1	17.2	17.3
S/b	0.50	0.53	0.54	0.56	0.58
7 Günlük Dayanım	35.7 /1.0	30.5 / 0.85	26.7/0.75	21.5/0,60	19.8/0.55
28 Günlük Dayanım	45.1/1.0	36.9/0.82	33.0/0.73	30.2/0.67	28.3/0.63
90 Günlük Dayanım	55.8/1.0	47.5/0.85	41.4/0.74	39.7/0.71	35.6/0.64

Tablo 29. Afşin Elbistan 1. Ünite Uçucu Külünün Dayanım Sonuçları

	% 100 PÇ	%10 UÇK % 90 PÇ	%20 UÇK % 80 PÇ	%30 UÇK % 70 PÇ	%40 UÇK % 60 PÇ
Yayılma (cm)	17.2	17.0	17.0	17.1	17.3
S/b	0.50	0.51	0.52	0.54	0.57
7 Günlük Dayanım	35.7/1	33.1/0.93	20.0/0.56	16.6/0.46	12.2/0.34
28 Günlük Dayanım	45.1/1	46.1/1.02	36.6/0.81	21.9/0.49	15.6/0.35
90 Günlük Dayanım	55.8/1	57.9/ 1.04	45.9/0.82	26.5/0.47	20.7/0.37

Tablo 30. Orhaneli Uçucu Külünün Dayanım Sonuçları

	% 100 PÇ	%10 UÇK % 90 PÇ	%20 UÇK % 80 PÇ	%30 UÇK % 70 PÇ	%40 UÇK % 60 PÇ
Yayılma (cm)	17.2	17.3	17.2	17.0	17.0
S/b	0.50	0.49	0.48	0.46	0.45
7 Günlük Dayanım	35.7/1	37.3/1.04	36.9/1.03	36.0/1.01	31.9/0.89
28 Günlük Dayanım	45.1/1	48.3/1.07	50.5/1.12	53.5/1.19	51.1/1.13
90 Günlük Dayanım	55.8/1	60.5/1.08	63.3/1.13	68.4/1.23	64.5/1.16

Deney sonuçlarının sunulduğu Tablo 28, 29 ve 30'da görüldüğü gibi Soma 3-4 ve Afşin Elbistan-1 uçucu külleriyle hazırlanan harçlarda yüzde ikame değeri arttıkça dayanımlar düşmekte, su ihtiyaçları artmaktadır. Orhaneli uçucu külünde ise hem su ihitiyacı hem de dayanım yüzde ikame oranı arttıkça arttarak % 30 oranı için en yüksek dayanım değerini vermektedr.

Uçucu Kül Katılan Betonlar için k - Faktörü Kavramı

k - faktörü, aynı dayanımı sağlaması ve aynı su/bağlayıcı oranına sadık kalmak koşuluyla elde edilen mineral katkılı (uçucukül veya silis dumanı) ve normal (mineral katkısız) betonların karşılaştırılması sonucunda kullanılan mineral katkının bağlayıcı performansının ifade edilmesi için geliştirilen bir kavramdır.

Belli bir miktar çimentonun azatılıp yerine aynı dayanımı sağlayacak kadar uçucu kül (ağırlıkça eksiltilen çimentodan az , eşit veya fazla olabilir) katılmasıyla elde edilen uçucu kül miktarının, eksiltilen çimentoya oranının tersi k - faktörü olarak adlandırılır. k - faktörü normal betonda kullanılan

çimentonun dozajına, tespit edilen su/bağlayıcı oranına, kulanılacak mineral katkının miktarına ve mineral katkının fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre değişkenlik gösterir.

k - faktörü = 1	⇒	Uçucu kül çimentoyla aynı bağlayıcılığa sahiptir.
k - faktörü > 1	⇒	Uçucu kül çimentodan daha iyi bağlayıcılığa sahiptir.
k - faktörü < 1	⇒	Uçucu kül çimentodan daha az bağlayıcılığa sahiptir.
k - faktörü = 0	⇒	Uçucu kül bağlayıcı özelliğe sahip değildir.
k - faktörü < 0	⇒	Uçucu kül bağlayıcı özelliğe sahip olmadığı gibi çimentoyla beraber kullanıldığında çimentonun bağlayıcılığını da olumsuz yönde etkilemektedir.

7. KAYNAKLAR

1. ASTM C618 : Standart Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete,Annual Book of ASTM Standarts, No.4, 1998.
2. TS EN 197-1 : Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim,Özellikler ve Uygunluk Kriterleri,Türk Standartları Enstitüsü, Mart 2002.
3. RILEM Committee 73-SCB : Final Report on Siliceous by-products for Use in Concrete, Materials and Structures, C.21, No.121, s.69-80, 1988
4. HEWLETT, P.C: Lea's Chemistry of Cement and Concrete, Fourth Edition, Arnold,1998.
5. ACI Committee 226 : Use of Fly Ash in Concrete, ACI Materials Journal, C.84,No.5, s.381-409, 1987.
6. TS EN 450 :Uçucu Kül-Betonda Kullanılan -Tarifler, Özellikler ve Kalite Kontrolü, Türk Standartları Enstitüsü, Nisan 1998.
7. TS 639: Uçucu Küller, Türk Standartları Enstitüsü, Nisan 1998.
8. HUBBARD,F.H. ve ark. :Pulverized Fly Ash for Concrete: Compositional Characterization of UK PFA, Cement and Concrete Research, C.15, s.185-198 No.1, 1985
9. ENDERS,M.: The CaO Distribution to Mineral Phases in a High Calcium Fly Ash from Eastern Germany, Cement and Concrete Research, C.26, No.2, s.243-250, 1996.
10. MEHTA, K.: Influence of Fly Ash Characteristics on the Strength of Portland-Fly Ash Mixtures, Cement and Concrete Research C.15, No.1, s.669-674, 1985.
11. TIKALSKY, P.J.,ve CARRAQULLO,R.L.: Influence of Fly Ash on Sulfate Resistance of Concrete, ACI Materials Journal, C.89, No.1, s.69-75, 1992.
12. BOSBACH, D. ve ENDERS ,M.: Microphotography of High Calcium Fly Ash Particle Surfaces, Advances in Cement Research, C.10, No.1, s.17-24,1998.
13. DIAMOND ,S.:Particle Morphologies in Fly Ash,Cement and Concrete Research,C.16, No.4, s.569-579, 1986.
14. TANOSAKI, T. ve ark.: Characterization of Incineration Ashes in Japan, Journal of Research of the Chichibu Onoda Cement Corp., C.49, No.135, s.145-154, 1998
15. CABRERA, J.G. ve HASSAN, K.E.: The Use of Classified Fly Ash to Produce High Performance Concrete, Sixth Canmet/ACI İnt. Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Pozzolans in Concrete, Bangkok, , C.1,s.21-26, 1998.
16. MORA, E.P. ve ark. : Influence of Different Sized Fractions of a Fly Ash on Workability of Mortars, Cement and Concrete Research, C.23, No.4, s.917-924, 1993.

TÜRKİYE ÇİMENTO MÜSTAHSİLLERİ BİRLİĞİ AR-GE ENSTİTÜSÜ'NÜN YAYINLARI

1. TÇMB/AR-GE/Y96.1 Türkiye Çimento-Beton Araştırmacı Envanteri (1996)
2. TÇMB/AR-GE/Y96.2 Türkiye Çimento-Beton Ekipman Envanteri (1996)
3. TÇMB/AR-GE/Y97.1 Türkiye Çimentoları, prEN 197 Çimentoları ve Avrupa Ülkelerinde İç Satış İstatistikleri
4. TÇMB/AR-GE/Y97.2 Cüruflar ve Cüruflu Çimentolar Araştırmaların Gözden Geçirilmesi ve Durum Raporru
5. TÇMB/AR-GE/Y97.3 Çimento ve Beton Tez Özetleri (1995, 1996)
6. TÇMB/AR-GE/Y98.1 Avrupa Çimento Standartları ve Testleri
7. TÇMB/AR-GE/Y98.2 Türkiye Çimento Endüstri Enerji ve Emisyon Düşünceleri
8. TÇMB/AR-GE/Y98.3 Türkiye Termik Santrallarından Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu
9. TÇMB/AR-GE/Y98.4 Cumhuriyetimizin 75. Yılında Türk Çimento Sektörü
10. Proceedings of 1st International Symposium on Admixtures in Cement (1. Uluslararası Çimentoda Mineral Katkılar Sempozyumu Bildiriler Kitabı)
11. TÇMB/AR-GE/Y99.1 TÇMB Çimento ve Beton Araştırma Geliştirme Enstitüsü
12. TÇMB/AR-GE/Y99.2 Traslar ve Traslı Çimentolar
13. Proceedings of 2nd International Symposium on "Cement and Concrete Technology in the 2000's" (2. Uluslararası Sempozyum "2000'lerde Çimento ve Beton Teknolojisi" Bildiriler Kitabı)
14. TÇMB/AR-GE/Y01.01 Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı
15. TÇMB/AR-GE/Y02.01 Beton Yollar
16. TÇMB/AR-GE/Y03.01 Uluslararası Beton Yollar Kongresi-Konuşma Metinleri
17. TÇMB/AR-GE/Y03.02 Çimento/Yeni Bir Çağın Malzemesi
18. TÇMB/AR-GE/Y03.03 Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri
19. TÇMB/AR-GE/Y04.01 Çimentoda Yeni Standartlar ve Mineral Katkılar
20. TÇMB/AR-GE/Y04.02 Türkiye'de Çimento ve Beton Konularında Araştırmacılar ve Laboratuvarlar

YAYIN TALEP FORMU

Aşağıda yayın numarası sunulmuş olan yayınlarınızın adresime gönderilmesini arz ederim.

Adı :

Soyadı :

Mesleği :

Çalıştığı Kurum :

Adres :

İstenen Yayınlar

Yayın talepleriniz için bu formu 0.312.265 09 06 numaralı faksa gönderebilir veya info@tcma.org.tr adresine mail atabilirsiniz.

TÇMB
TÜRKİYE ÇİMENTO MÜSTAHSİLLERİ BİRLİĞİ

TÇMB / AR-GE ENSTİTÜSÜ
Ankara Cyberpark, Cyber Plaza C Blok Bilkent 06800 Ankara
Tel: (0312) 444 50 57 Faks: (0312) 265 09 06
www.tcma.org.tr • info@tcma.org.tr