

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SEYİTÖMER TERMİK SANTRAL UÇUCU
KÜLLERİNİN YAPI SEKTÖRÜNDE
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Elif AĞAR

**Şubat, 2007
İZMİR**

**SEYİTÖMER TERMİK SANTRAL UÇUCU
KÜLLERİNİN YAPI SEKTÖRÜNDE
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Maden Mühendisliği Bölümü, Cevher Hazırlama Anabilim Dalı

Elif AĞAR

**Şubat, 2007
İZMİR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ELİF AĞAR tarafından **YARD. DOÇ. DR. MEHMET TANRIVERDİ** yönetiminde hazırlanan, “**SEYİTÖMER TERMİK SANTRAL UÇUCU KÜLLERİNİN YAPI SEKTÖRÜNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

.....
Yard. Doç. Dr. Mehmet TANRIVERDİ

Yönetici

.....
Doç.Dr. Mümtaz ÇOLAK

Jüri Üyesi

.....
Doç. Dr.Vedat ARSLAN

Jüri Üyesi

.....
Prof.Dr. Cahit HELVACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans Tezimi hazırlarken yaptığım araştırmalar ve deneysel çalışmalar sırasında yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve görüşlerinden yararlandığım danışmanlarım, Sayın Yard. Doç. Dr. Mehmet TANRIVERDİ ve Sayın Uzm. Dr. Tayfun ÇİÇEK'e, laboratuvarlarını kullanmama olanak tanıyan İnşaat Mühendisliği Bölümü yapı malzemeleri laboratuvarı sorumlusu Sayın Araş. Gör. Halit YAZICI'ya teşekkürlerimi borç bilirim.

Bütün eğitim hayatım boyunca gösterdikleri anlayış ve yardımları ile birlikte maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili aileme içtenlikle teşekkür ederim.

Elif AĞAR

SEYİTÖMER TERMİK SANTRAL UÇUCU KÜLLERİNİN YAPI SEKTÖRÜNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZ

Seyitömer Termik Santrali uçucu külleri ile Kütahya Emet Bor İşletmesine ait bor atıklarının fiziksel ve kimyasal özellikleri incelenmiştir. Bu atıklar belirli oranlarda karıştırılarak tuğla yapımında kullanılabilirliği araştırılmıştır. Ancak bor atıklarının direkt kullanımı tuğla dayanımını olumsuz etkilemiştir. Bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak için bor atıkları, öncelikle 700 °C’de kalsine edilmiştir. Kalsine edilen bor atıklarından hazırlanan tuğlalardan olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Uçucu kül, Bor, Tuğla.

UTILISATION OF SEYİTÖMER POWER PLANT FLY ASHES AS CONSTRUCTION MATERIALS

ABSCTRACT

Physical and chemical characteristics of the fly ashes of Seyitömer Thermal Power Plant and boron wastes generated by Emet Boron Operations Kütahya have been examined. The usability of these wastes by mixing at certain rates in brick production has been investigated. But direct using of boron wastes negatively affects brick resistance. To eliminate this negatively, the boron wastes first calcined at 700 °C. positive results are obtained with bricks which are prepared by calcineted boron wastes.

Key Words: Fly Ash, Boron, Brick

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v

BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
-------------------------------	----------

BÖLÜM İKİ - UÇUCU KÜLÜN TANIMI.....	3
--	----------

2.1 Uçucu Küllerin Sınıflandırılması	5
--	---

2.2 Uçucu Küllerin Özellikleri	7
--------------------------------------	---

2.2.1 Uçucu Küllerin Kimyasal, Minerolojik ve Morfolojik özellikleri	7
--	---

2.2.2. Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri.....	13
---	----

2.2.3. Uçucu Küllere Asitlerin Etkisi	18
---	----

2.2.4 Uçucu Külün Puzolanik Özelliği	18
--	----

2.3 Termik Santrallerde Atık Uçucu Küllerin Toplanması	18
--	----

2.4 Termik Santral Uçucu Küllerinin Kullanım Alanları.....	19
--	----

BÖLÜM ÜÇ - TÜRKİYE’DE Kİ TERMİK SANTRALLER VE BU TERMİK SANTRALLEREDEN ÇIKAN UÇUCU KÜLLERİN ÖZELLİKLERİ.....	20
---	-----------

3.1 Seyitömer Termik Santrali	20
-------------------------------------	----

3.2 Türkiye’deki Uçucu Küllerin Özellikleri	21
---	----

3.2.1 Mineroloji	21
------------------------	----

3.2.2 Morfoloji.....	22
----------------------	----

3.2.3 Yoğunluk	24
----------------------	----

3.2.4 Kimyasal Bileşim	24
BÖLÜM DÖRT - BOR MADENİ	28
4.1 Bor Elementi.....	28
4.2 Ticari Öneme sahip Bor Mineralleri	30
4.3 Türkiye Rezervi.....	31
4.4 Üretimler	33
4.5 Kütahya-Emet Bor İşletmesi	34
BÖLÜM BEŞ - DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	37
5.1 Malzeme ve Yöntem	37
5.2 Seyitömer Termik Santrali Uçucu Külü.....	38
5.2.1 Seyitömer Termik Santrali Uçucu Külünün Fiziksel Özellikleri	38
5.2.2 Seyitömer Termik Santrali Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçları	39
5.2.3 Minerolojik Analiz Sonuçları	40
5.3 Kütahya-Emet Bor Atıklarının Fiziksel Özellikleri	41
5.3.1 Kütahya-Emet Bor Atıklarının Fiziksel Özellikleri.....	41
5.3.1.1 Kaba Kil Atık Malzemesinin Elek Analizi.....	41
5.3.1.2 Atık Barajı Malzemesinin Elek Analizi.....	42
5.3.2 Kütahya-Emet Bor Atıklarının Kimyasal Özellikleri.....	44
5.3.2.1 Kaba Kil Atık Malzemesinin Kimyasal Analiz sonuçları	44
5.3.2.2 Atık Barajı Malzemesinin Kimyasal Analiz Sonuçları	44

5.4 Tuğla Test Parametreleri	45
5.4.1 Ön Testler	47
5.4.2 900 °C’de Yapılan Tuğla Test Parametreleri	52
5.4.3 800 °C’de Yapılan Tuğla Test Parametreleri	59
5.4.4 850 °C’de Yapılan Tuğla Test Parametreleri	66
5.5 Optimal şartlarda yapılan diğer testler	68
5.5.1 Isı İletim Katsayısının Tespiti	68
5.5.2 Su Emme	69
BÖLÜM ALTI - SONUÇLAR	70
KAYNAKLAR	72

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Dünya da üretilen kömürün yaklaşık %60'ı elektrik enerjisi üretimin de kullanılmaktadır. Ülkemiz de üretilen linyit kömürünün ise %80'i elektrik enerjisi üretiminde tüketilmekte, kömürün ülkemizdeki elektrik enerjisindeki payının ise %30 olduğu bilinmektedir. Bu tablonun gelecek 20 yıl içinde fazla değişmemesi ve kömürün elektrik enerjisindeki payının bir miktar artması beklenmektedir.

Ülkemiz de son yıllarda ortaya çıkan enerji açığı, hidroelektrik santraller, daha ekonomik üretim yapmalarına rağmen, inşası daha kolay ve çabuk olan termik santrallerin yapımını kaçınılmaz kılmıştır. Genel de düşük kalorili linyit kömürü ile çalışan termik santraller de elektrik enerjisinin yanı sıra, büyük miktarda atık elde edilmektedir. Bu atıklar da önemli ölçüde çevre kirliliğine yol açmaktadır. Çevre kirliliğini önlemek için, planlama ve ek yatırımların yapılmaması halinde, zaman zaman üretimin durdurulması zorunlu hale gelmekte, bu durum büyük teknik ve mali sorunlara yol açmaktadır.

Günümüz de giderek gelişen çevrecilik hareketleri, bilim ve teknoloji alanında yapılan çalışmalar, atık küllerin ve curufların yeniden kullanımını sağlayarak, hem doğaya verdiği zararı önlemeyi, hem de yapı malzemelerinin hammaddesi olarak kullanımını amaçlamaktadır. Kömür yanma ürünlerinin özellikle yapı sektörün de kullanımı, termik santrallerin çevresel etkilerinin azaltılmasını, elektrik üretim maliyetinin azaltılmasını, atmosferdeki katı atıkların depolanma miktarının, atmosferdeki gaz emisyonunun azaltılmasını ve doğal kaynakların korunmasını sağlamaktadır.

Yapılan çalışmalarda curufta bulunan, %10-20 arasındaki yanmamış karbonun (kömürün), tekrar kazanılıp yakılabileceği, ayrıca tuğla yapımında aranılan özellikte olduğu saptanmıştır. Bunun yanı sıra yapılan araştırmalar, uçucu küllerinde çimento, beton, karayolları gibi birçok alanda kullanılabileceğini göstermiştir.

Bugün dünya da ortaya çıkabilecek uçucu kül miktarı, yılda 600 milyon ton civarındadır.

Türkiye’de halen Afşin –Elbistan, Çatalağzı, Çayırhan, Kangal, Kemerköy, Orhaneli, Seyitömer, Soma, Tunçbilek, Yatağan ve Yeniköy santralleri olmak üzere 11 termik santral faaliyet göstermektedir. Bu santrallerden yıllık uçucu kül üretimi, ortalama 13 milyon ton kadar olmakta, ancak doğalgaz santrallerinin devreye girmesi ile yıldan yıla değişmektedir. Ülkenin enerji üretiminde dışa bağımlılığını azaltmanın bir yolu da, endüstrinin diğer kesimlerin de yararlanılamayan düşük kalorili linyit kömürlerini termik santrallerde kullanmaktan geçmektedir.

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

BÖLÜM İKİ

UÇUCU KÜLÜN TANIMI

Termik santrallerin en önemli atık malzemelerinden olan uçucu küller, toz kömürün yanması ile meydana gelen, baca gazlarıyla sürüklenen çok ince kül parçacıklarıdır. Bu küller elektrostatik yöntemlerle elektrofiltrelerde ve siklonlarda yakalanmakta ve baca gazlarıyla atmosfere çıkışları önlenmektedir. Uçucu kül taneleri çoğunlukla küresel yapıda olup, büyüklükleri 1-200 µm arasında değişmektedir. Bir uçucu külün tane boyutları termik santrallerdeki kül toplama yöntemi ve ekipmanına bağlıdır. Uçucu küllerin renkleri açık bejden kahverengiye, griden siyaha kadar değişiklik gösterebilir. İçindeki yanmamış karbon miktarı arttıkça uçucu küllerin renkleri koyulaşır. Uçucu kül çimento inceliğinde, kohezyonlu zemin ya da kil görünümlü ve sıkıştırıldığında düşük geçirimsilikte bir maddedir (Yazıcı, 2004).

Termik santrallerde kömürün yanması, dört farklı atığın ortaya çıkmasına yol açar:

- ❖ Kazandan çıkan ve baca gazları ile taşınan çok ince partiküllere “uçucu kül” denir.
- ❖ Baca gazları ile taşınmayan, yanarak tabana düşen partiküllere “taban külü” denir.
- ❖ Siklon tipi fırınlarda yanan kömür külünün erimesiyle, suda soğutularak uzaklaştırılır. Bu küle “ergimiş kül” veya “ kazanaltı curufu” denir.
- ❖ Desülfürizasyon tesisi bulunan santrallerde sülfür içeren gazların, baca gazlarından ayrılması sırasında oluşan ürüne “baca gazı desülfürizasyon atıkları” denir.

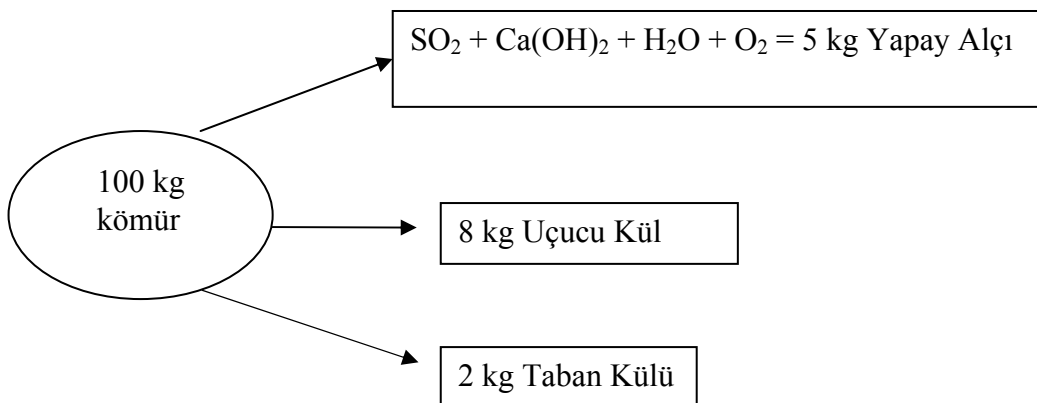
Taban külü ve kazanaltı curufu ise 1-10 mm arasında granüler tanelerden oluşur. Kazanaltı curufu camsı görünüme sahiptir. Kuru birim ağırlıkları 1,5-1,7 gr/cm³ civarındadır. Uçucu külün kesme dayanımı taban külü ve kazanaltı curufuna kıyasla daha büyüktür.

Uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları santralde kullanılan kömürün içerdiği mineral safsızlıklarının tipi ve miktarına bağlıdır. Genellikle uçucu küllerin %85'ini SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO ve MgO oluşturur.

Uçucu kül ve baca gazı desülfürizasyon (FGD- Flue Gas Desulfurisation Wastes) ürünlerinin ikisine birlikte baca gazı temizleme ürünleri (FGC-Flue Gas Cleaning Wastes) adı verilir. Çoğu durumda uçucu kül ve baca gazları farklı sistemlerle kontrol edilir. ve atıkları ayrı ayrı depolama alanına gönderilir. Bazı durumlarda ise baca gazları ve uçucu kül aynı anda tutularak ve karıştırılarak birlikte depolanır.

Termik santralin 1 kw 'lık enerji üretiminde yaklaşık 110 g kül atık madde olarak açığa çıkmaktadır. 1000 MW'lık bir santralden yılda yaklaşık 650.000 ton uçucu kül ve taban külü elde edilmektedir. Dolayısı ile bu küllerin santrallerden uzaklaştırılması ve depolanması çevre kirliliğinin yanı sıra işletme, enerji üretim kaybı vb. konularda parasal ve teknik sorunlar yaratabilmektedir.

Şekil 2.1'de %1 sülfür %10 kül açığa çıkaran kömürün yakılmasıyla oluşan kömürün yakılmasıyla oluşan atıkların miktarları yaklaşık olarak hesaplanmış ve grafik olarak gösterilmiştir. Ancak ülkemiz de kullanılan linyit kömürlerinin %35-40 oranının da kül açığa çıkardıkları bilinmektedir. Bu durumda 100 kg kömür yakılması 35-40 kg kül oluşumuna yol açmaktadır (Yazıcı, 2004).



Şekil 2.1 %1 sülfür içeren 100 kg kömürün termik santralde yakılması ile oluşan atıklar (Yazıcı,2004)

2.1 Uçucu Küllerin Sınıflandırılması

Uçucu küllerin sınıflandırılmasında, kimyasal bileşen yüzdesine göre esas olarak ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartları baz alınmaktadır (Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği[TÇMB], 2004).

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

- a) F sınıfına, bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %70'den fazla olan uçucu küller girmektedir. Aynı zamanda bu küllerde CaO yüzdesi %10'un altında olduğu için düşük kireçli olarak da adlandırılırlar. F sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğe sahiptirler.
- b) C sınıfı uçucu küller ise, linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı %50'den fazla olan küllerdir. Aynı zamanda, C sınıfı uçucu küllerde $\text{CaO} > \%10$ olduğu için bu küller yüksek kireçli uçucu kül olarak ta adlandırılırlar. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğin yanı sıra bağlayıcı özelliğe de sahiptirler.

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

- c) 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 oksitten (Al_2O_3) oluşan; geri kalanı demiroksit ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan az, reaktif silis miktarının %25'ten fazla olması gerekmektedir.
- d) 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 demiroksit (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.

Ayrıca uçucu külleri sülfat miktarına ve kaynaklarına göre de sınıflandırmak olasıdır:

Sülfat miktarına göre sınıflandırma:

- e) Silikoalüminoz uçucu küller - esas yapısı silikoalüminatlardan meydana gelir. genellikle taş kömüründen elde edilir. Normal sıcaklıkta kireci bağlama özelliğine sahiptir.
- f) Sülfokalsik uçucu küller - yüksek miktarda SO_3 ve CaO içeren ve genellikle linyit kömüründen elde edilen uçucu küllerdir ve ayrıca bunlar bazı durumlarda bağlayıcısız priz alırlar.
- g) Silikokalsik uçucu küller - linyit kömüründen elde edilen, kireç ve silika miktarı yüksek olan uçucu küllerdir. Kömürün veya yanma sisteminin homojen olmadığı durumlarda elde edilen, yapısı ve şekilleri homojen olmayan uçucu küllerdir.

Kaynaklarına göre sınıflandırma:

- a) Linyit uçucu külü: Linyit, turba ile bitümlü kömür arası bir kömürdür. Uçucu maddesi fazladır. Alkali metallerin fazla oluşu bakımından taş kömürü külünden farklıdır.
- b) Taş kömürü uçucu külü: Genel olarak 3-100 μ incelikte 200 μ elek üzerinde %16-20 kalacak şekilde elde edilirler. Tanecikler, büyük oranda camsı minerallerden oluşur. Linyit uçucu külüne göre, daha büyük özel yüzeye sahiptir.

2.2 Uçucu Küllerin Özellikleri

2.2.1 Uçucu Küllerin Kimyasal, Minerolojik ve Morfolojik özellikleri

Kimyasal bileşim

Uçucu külün kimyasal bileşimi, kullanılan kömürün yapısı, jeolojik orjini ve proses koşullarına (kömür hazırlama, yanma, toz toplama, desülfirizasyon gibi) bağlıdır (TÇMB,2004).

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 ve bunun yanı sıra titanyum, fosfor, berilyum, mangan, ve molibden de eser bileşen olarak bulunabilmektedir.

Temel oksitler olan SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO 'ın 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.

Diğer oksitlerden MgO en fazla %5.0, alkali oksitler ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) %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, SO_3 değerini en fazla %3 olarak dar bir aralık ile sınırlamaktadır.

Kızdırma kaybı, esas olarak kömürdeki yanmamış karbona karşılık gelmekle birlikte, kömürdeki hidratlar ve 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. Reaktif kireç ise, düşük kireçli küllerde %10'un altında olmakta; yüksek kireçli küllerde %10-15 arasında değişmektedir.

Uçucu külün karbon içeriği çok değişmektedir. İyi yanma olan termik santrallerde bu oran çok düşük olmaktadır. Eski tip santrallerde karbon oranı %10 dolayındayken yeni tip santrallerde bu oran %3 dolayına inmektedir.

Uçucu küller genellikle %2-5 arasında suda çözünür. Çözelti kalsiyum ve sülfat nedeniyle alkali reaksiyon verir. Magnezyum, sodyum, potasyum ve silikat iyonları suda çok az çözünürler. Kalite bakımından üstün olan uçucu külde suda çözünen madde oranı düşük olmalıdır.

Tablo 2.1 Uçucu küllerin kimyasal bileşimleri ve miktarları (Ağar ve Kara, 2003)

Bileşik	Miktar (%)
SiO ₂	36,43
Al ₂ O ₃	16,13
Fe ₂ O ₃	7,77
CaO	23,51
SO ₃	6,83
MgO	8,80
Na ₂ O	1,05
K ₂ O	0,77

Tablo 2.2 Uçucu küllerin kimyasal analizleri (TEAŞ, 1999)

%	Silikoalüminoz Uçucu kül	Sülfokalsik Uçucu kül	Yüksek fırın curufu
SiO₂	50,0	18,0	29,0
Al₂O₃	30,0	12,0	14,0
Fe₂O₃	7,0	7,0	-
CaO	2,5	45,0	45,0
Serbest CaO	0,1	22,0	-
MgO	1,8	1,8	-
SO₃	0,5	6,0	-
K₂O	5,0	6,0	-
Na₂O	0,8	8,2	-
TiO₂	1,0	-	-
Diğerleri	2,0	1,2	-

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, amorf ve kristal yapıli bileşenlerden oluşmaktadır.

Genellikle, düşük CaO içeren küller başta camısı ve minör olarak da kuvars (SiO₂), mullit (3Al₂O₃.SiO₂), manyetit (Fe₃O₄), hematit (Fe₂O₃) içermekte; yüksek CaO'li uçucu küller kuvars, hematit, anhidrit (CaSO₄), serbest kireç, C₃A (3CaO.Al₂O₃), CS (CaO.SiO₂), C₂S (2CaO.SiO₂), gehlenit (CaAl₂SiO₇), melilit (Ca₂(Mg,Al)(AlSi)₂O₇), mervinit (Ca₃(Mg)(SiO₄)₂), gibi mineraller ve camısı faz içermektedir. Bu bileşenlerin yanısıra yüksek kireçli küllerde kalsit, portlandit Ca(OH)₂, trisülfoalüminat (4CaO.3Al₂O₃.32H₂O) ve mullit'de bulunabilmektedir. Her iki külde de, alkali feldispatlara rastlanmaktadır.

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 $22-27^\circ 2\theta$ (CuK α) bölgesinde iken, yüksek kireçli de bu bölge $30-34^\circ 2\theta$ (CuK α) bölgesinde yer almaktadır. Silissi camsı fazın $22-34^\circ 2\theta$ arasında değişmesi, silisyumdioksit kristal örgü ağının (siliko tetrahedral), Al, Ca, Na gibi çeşitli katyonlar ile modifiye edilmesinden kaynaklanır (TÇMB, 2004).

Uçucu külün minerolojik 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, SiO₂ açısından zengin, oldukça polimerize silissi veya alüminyum da içeren alüminosilikat bileşimindedir. Silissi veya alüminosilikat 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 yanı sıra aktif kristalize fazlardır (serbest kireç, anhidrit, kalsiyum alüminat gibi). Burada saf, silika camı, Ca ve Al iyonları ile modifiye olmuştur. Bu faz bir bakıma curuftaki yapıya da benzemektedir. %20'nin üzerin de CaO içeren küllerde kalsiyum alüminat camsı fazı $12\text{CaO}.7\text{Al}_2\text{O}_3$ bileşimindedir. Yüksek kireçli külün camsı ve kristalize fazları, külün puzolanik özelliğinin yanı sıra, kısmen kendiliğinden bağlayıcı özelliğe de sahip olmasını sağlamaktadır.

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.

Yüksek kireçli küllerdeki kristalize fazlar (anhidrit, serbest fazlar gibi). Külün kendiliğinden bağlayıcı olmasına katkıda bulunmakla birlikte, standarttaki sınırlar

(SO₃ en fazla %3 ve %5, sırasıyla ASTM C 618, TS 639, VE TS EN 450), serbest kireç TS EN 450'de %1 aşıldığı takdirde SO₃ fazlalığı ileri yaşlarda betonda sülfat genişmesi (aktif alümina ve SO₃'etringit oluşumu), serbest kireç ise hidratasyon sırasında kalsiyum hidroksit (portlandit) oluşturarak betonda genişme ve çatlak oluşumuna sebep olmaktadır. Yine yüksek kireçli uçucu külde bulunan alüminat bileşimindeki gehlenit de, külde yüksek SO₃ olduğunda reaksiyona girmekte, buna karşılık düşük kireçli küldeki kristalize faz olan mullit, alüminat bileşiminde olduğu halde inert bileşen olarak kalmakta; dolayısı ile sülfat genişmesine yol açmamaktadır.

Morfolojik özellikler

Tanecik morfolojisi (şekli) ve büyüklük dağılımında, kömürün orijini ve üniform olması, kömürün pulvarizasyon durumu yanma koşulları (sıcaklık ve oksijen seviyesi), yanmanın üniformluğu ve toz toplama sistemi tipi gibi prosese bağlı faktörler etkili olmaktadır.

Uçucu külde, büyüklükleri 0,5µm-150 µm arasında değişen hem camsı küresel, hem de düzensiz şekilli tanecikler bulunmaktadır. Bu taneciklerin şekil ve büyüklük açısından farklılıkları, uçucu külün tipinden (düşük ve yüksek kireçli) kaynaklanmaktadır.

Camsı küresel şekilli tanecikler, içi boşluksuz küresel yapılar (solid glassy sphere), boşluklu küreler (cenosphere, hollow sphere); 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 (şekil 2.2).

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

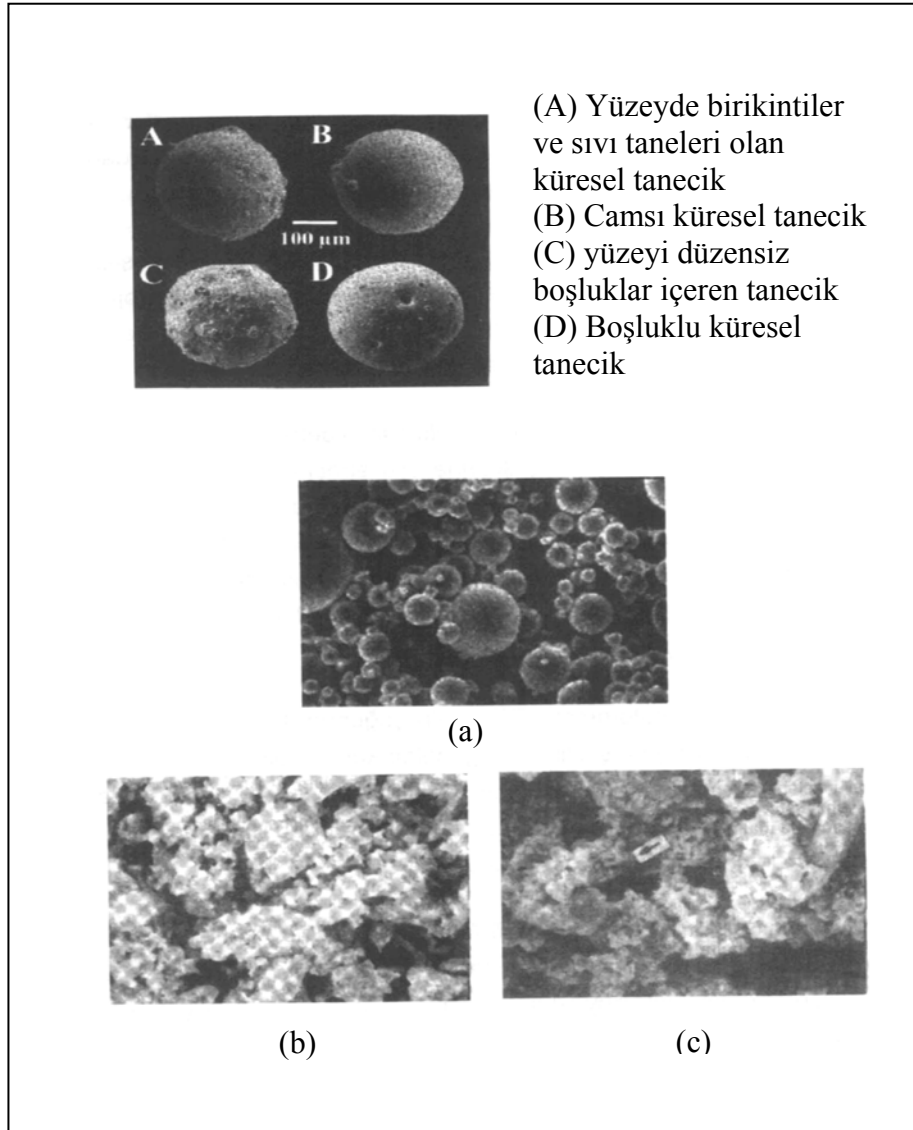
Düşük kireçli küllerde, çoğunlukla camsı faza karşılık gelen, içi boşluksuz tam küresel tanecikler ve bunun yanı sıra senosfer ve plerosferler bulunmakta olup; bu küller şekil dağılımı açısından genellikle homojen olan mikroyapıya sahiptirler.

Yüksek kireçli küllerde mikroyapı içinde hem küresel, hem de köşeli, düzensiz şekilli taneciklerin birarada bulunması sonucunda, homojen olmayan şekil dağılımı mevcuttur (şekil 2.2). Ayrıca küresel taneciklerin yüzeyi de, düşük kireçli küller kadar düzgün değildir (TÇMB, 2004).

Taneciklerin şekil ve büyüklük dağılımları, taze betonun su ihtiyacı ve işlenebilirlik gibi reolojik özelliklerine etki etmektedir. Bu etki özellikle küresel taneciklerin kayganlaştırıcı (lubricant) nitelik taşıması ve dolgu maddesi (microfiller) özelliğine sahip olma; şekilsiz, pürüzlü yüzeye sahip olanların su ihtiyacını artırma şeklinde olmaktadır. Ayrıca uçucu külün tane büyüklük dağılımının çok değişken olması halinde su ihtiyacı artmaktadır.

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, büyük yüzey alanına sahip olduğu için kireç silikat reaksiyonlarına daha rahat 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 2.2 Uçucu kül tanelerinin morfolojik yapısı (a) yüksek silisli uçucu kül (pulverize uçucu kül), (b) ve (c) yüksek kireçli uçucu kül (TÇMB,2004)

2.2.2. Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri

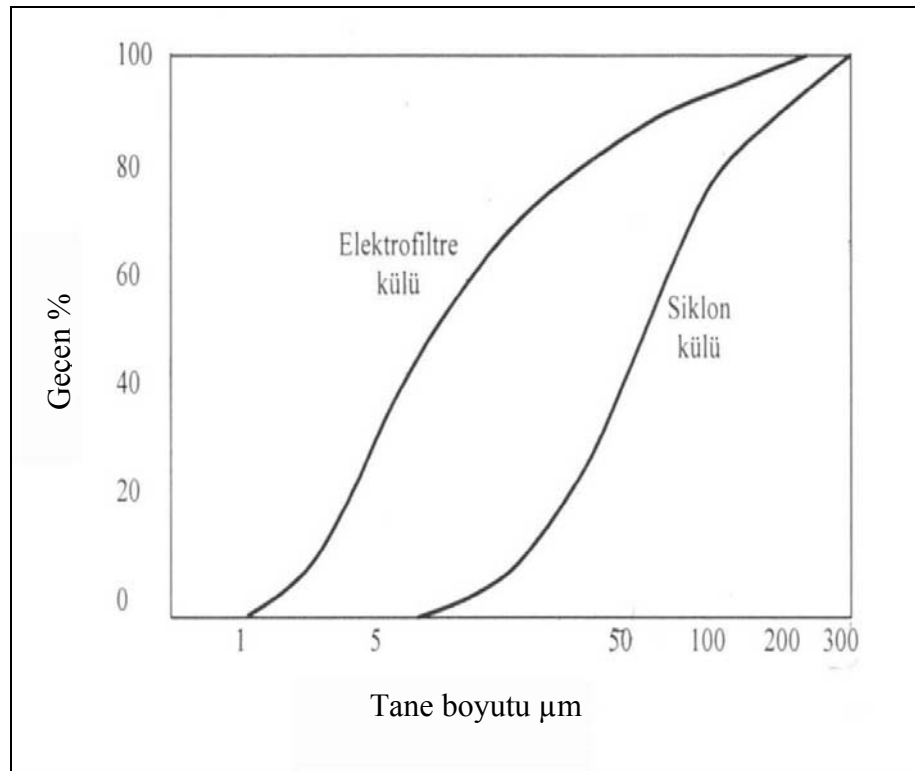
Tane şekli ve boyutu

Uçucu kül partikülleri, camlı küresel şekilli tanecikler, içi boşluksuz veya boşluklu (senosfer), büyük bir küre içinde küçük küreler kümesi içeren yapılar (plerosfer), yüzeyi düzensiz dağılmış şekilsiz boşluklar içeren yapılar, yüzeyinde sıvı

damlacıkları bulunan yapılar, yüzeyi kristal ile kaplamış yapılar, deforme yapılar ve yüzeyin de şekilsiz birikimler olan yapılar gibi değişik şekillerde bulunabilir.

Bazı uçucu kül partikül taneleri içi boş olan küresel tanelerden oluşmuşlardır. İçi boş kül tanelerinin miktarı toplam kül miktarının ağırlıkça yaklaşık %5'i, hacim olarak da yaklaşık %20'si kadardır. Bu boşluklar nitrojen ve karbondioksit ile doludur. Bu parçacıkların yüksek oranda bulunması hafif olmaları nedeni ile beton içerisinde yüzeye çıkmalarına neden olur.

Kül tanelerinin boyutları kül toplama sistemine bağlı olup, boyutları 1-200 μm arasında değişir (Şekil 2.3). Uçucu kül tanelerinin yaklaşık %75'i 45 μm 'lik elekten geçer.



Şekil 2.3 Uçucu küllerin tipik tane boyutu dağılımları (Yazıcı, 2004)

İncelik

Uçucu küllerin inceliği termik santral kazanına verilen kömürün öğütülme derecesi ile yakından ilgilidir. İnceliği sağlayan ikinci etkende, ince partiküllerin baca gazı ile beraber kaçmasının olabildiğince önlenmesidir.

Uçucu külün inceliği kömürün cinsine ve kül tutma mekanizmasına da bağlıdır. Genellikle taş kömürü uçucu külleri, linyit uçucu küllerinden, elektrofilitrelerde tutulan uçucu küller, siklonlarda toplanan uçucu küllerden daha incedir. Böylelikle çimento ve beton endüstrisinde de kullanılmaya daha uygundur.

Yapılan araştırmalar uçucu küllerin özgül yüzeylerinin 1800-5000 cm²/gr arasında değiştiğini göstermekle birlikte, ortalama olarak 2800-3800 cm²/gr dolayındadır. İnceliğin özgül yüzey cinsinden ölçülmesi kimi araştırmacılara göre güvenilir sonuçlar vermemektedir. Diğer incelik ölçme yöntemleri ise lazerli tane dağılım analizi, hidrometre analizi, azot absorpsiyonu, X ışını sedimantasyonu olarak sıralanabilir.

Küllerin inceliği puzolanik aktiviteleri ile doğrudan ilişkilidir. İnceliği fazla olan uçucu küllerin daha fazla puzolanik reaksiyon yaptıkları ve mukavemetlerinin daha fazla olduğu bilinmektedir.

Yoğunluk

Özgül ağırlıkları 1,9-2,4gr/cm³ arasında değişen uçucu küllerin gevşek birim hacim ağırlıkları 800 kg/m³ dolaylarındadır. Uçucu külün yoğunluğu inceliğine ve minerolojik yapısına bağlıdır. İri tanelerin boşluklu yapılarından dolayı, ince tanelerden oluşmuş küllerin yoğunluğu daha fazla olmaktadır. Yoğunluk değerlerinde büyük farklar varsa karışım hesaplarında bu yoğunluk farkının göz önünde bulundurulması gerekir.

Yüksek demir içerikli uçucu küllerin yoğunluğu fazla, yüksek alümin, silika ve karbon içerikli küllerin yoğunluğu ise daha düşüktür.

1 dm³ hacim içerisine vibrasyonla sıkıştırılmış taş kömürü uçucu külünün yoğunluğu 0,54-0,86 gr/cm³ dolayında, görünür yoğunlukları ise 1,90-2,40 gr/cm³ arasındadır. Süngerimsi yapılu uçucu küllerde ise hacimsel yoğunluk 0,25-0,35 gr/cm³ arasında değişirken görünen yoğunlukları ise 0,40-0,60 gr/cm³ dolayındadır.

Renk

Uçucu külün rengindeki ton farklılığı elde ediliş yöntemi ile ilgilidir. Yakılan kömür ve termik santrallere göre farklı renklerde olabilen uçucu küller gri tonlarındadır. Ancak linyit uçucu külleri daha esmer renkli olduğu gibi, iyi yanmamış uçucu küllerden daha açık renktedir. Yanmamış kömür parçalarının fazla olması rengi koyulaştırırken, yüksek demir içerikleri esmer renk sağlarlar.

Ergime

Uçucu külün ergime sıcaklığı, elde edilirken kullanılan işleme ve en yüksek sıcaklığa bağlıdır. Fransa'da yapılan bir deneyde, uçucu külün ergitilmesi sırasında 900-1100°C arasında hafif bir çökme, 1100-1200°C arasında belirgin şişme, 1250-1400°C arasında da tam ergime ve sıvılaşma görülmektedir. İlk görülen çökme kolay ergiyebilen maddelerden dolayıdır. Şişme olayı demir oksit, sülfat ve kalsiyum sülfatın bozulması sırasında gaz çıkışını gösterir.

Uçucu kül ergitildiğinde, 1380°C dolayında tuğla rengine dönüşür. Eğer ısıtma işlemi ergime sıcaklığından önce kesilirse, uçucu kül tanecikleri birbirine yapışır.

Manyetik Özellik

Uçucu külün içine mıknatıs sokulduğunda bir miktar uçucu külün mıknatısa yapıştığı görülür. Manyetik olmadığı halde mıknatısa yapışan uçucu kül

parçacıklarını uzaklaştırmak için mıknatıs bir hava akımına tutulursa mıknatısa yapışan uçucu külün %75'nin uzaklaştığı, %25'nin ise mıknatısta kaldığı izlenir. Yapılan deneylerde %7,7 Fe_2O_3 içeren bir uçucu külde mıknatısa yapışan kısım yaklaşık %6,8 dolayında olmaktadır.

Elektrik İletkenliği

Uçucu kül, farklı potansiyellerde iki metal plaka arasına sıkıştırıldığında (oda sıcaklığında ve kuru olarak) devreden belli bir akım geçtiği görülür. Sıcaklık yükselmesi, uçucu külün elektrik iletkenliğini arttırmaktadır.

Manyetik Dayanım

Uçucu külün manyetik dayanımı içindeki boşluklu malzeme yüzdesine bağlı olarak değişmektedir. Örneğin DSİ araştırma ve geliştirme dairesi laboratuvarların da yapılan deneylerde önce $1,90 \text{ gr/cm}^3$ yoğunluk ve $2400 \text{ cm}^2/\text{gr}$ Blain inceliğine sahip olan, uçucu kül bilyalı değirmende 4 saat ezildikten sonra yoğunluk $2,67 \text{ gr/cm}^3$ dolayına yükselirken incelikte $12000 \text{ cm}^2/\text{gr}$ olmaktadır.

Emme özelliği

Boşluklu taneciklerden meydana gelen uçucu küllerin deterjanla veya endüstri atıkları ile kirlenmiş suları arıtma özelliği vardır.

Suda çözünürlük

Saf suya karıştırılan uçucu kül birkaç saat sonra SO_3 'ün tümü ve toprak alkali metal bileşikleri çözünür. SO_2 , Al_2O_3 , K_2O , Na_2O , ve Fe_2O_3 ise çok az oran da çözünür.

2.2.3 Uçucu Küllere Asitlerin Etkisi

Asitlerin uçucu küle etkileri çok azdır. Seyreltik asidin etkisine bakılan uçucu külün en çok %15 dolayın da çözüldüğü görülür.

2.2.4 Uçucu Külün Puzolanik Özelliği

Silika alüminoz esaslı bir uçucu kül kireç ile sulu ortam da tepkimeye girer. Buna puzolanik özellik denir. Belirli oranlarda birleşen kireç, uçucu kül ve su, zamanla su altında dayanım kazanır. Buna da priz denir. Uçucu kül ve kireç karışımına bağlayıcı adı verilir.

Uçucu külde puzolanik özelliğin çok yavaş ortaya çıktığı unutulmamalıdır. Şöyle bir örnekle bu konu açıklanabilir. Uçucu kül, kireç ve kum karışımına dayanım kazanması için en az 2-3 gün geçmesi gerekir. Oda sıcaklığında iyi bir dayanım elde etmek için ise 2-3 yıl beklemek gerekecektir. Uçucu külsüz kireç ve kum karışımı ise 2-3 günlük bekleme sonucunda sıfır dayanım gösterir. Sıcaklık ve incelik tepkime hızını olumlu yönde etkiler.

2.3 Termik Santrallerde Atık Uçucu Küllerin Toplanması

Uçucu küllerin toplanmasında aşağıdaki yöntemler kullanılabilir:

- ❖ Elektro filtreler
- ❖ Siklonlar
- ❖ Nemlendirme
- ❖ Filtreler
- ❖ Ultrasonik çöktürme
- ❖ Kontrol prosesleri

Termik santrallerde en çok kullanılan kül tutma yöntemleri, elektrofiltre ve siklonlardır. Tane boyutunun büyük olduğu durumlarda siklon gibi mekanik tutucular, küçük olduğu durumlarda ise elektro filtreler kullanılır.

2.4 Termik Santral Uçucu Küllerinin Kullanım Alanları

Termik santraller yoluyla elektrik enerjisi üretiminden vazgeçmek mümkün değildir. Ancak bu proseste ortaya çıkan başta baca külleri ve curuflarında çevreye sorun çıkarmayacak şekilde sürekli bir tüketiminin de düşünülmesi zorunludur.

Çok geniş miktarlarda depolama alanlarında biriken atık malzeme tozlanma, tarım ürünlerine zarar verme, yağmur ve rüzgar erozyonu, toprakta süzülme dolayısı ile toksik madde taşınması ve radyasyon sayılabilir. Bu çevre sorunları nedeniyle tarım ürünleri, su ve havanın kalitesi, doğal hayat, bölgenin ekonomik durumu ve çevre güzelliği açısından istenmeyen sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Rüzgar erozyonu ve tozlanma, uçucu küllerin havuzlarda çökertilmesi ve ıslatılarak taşınması sayesinde önlenebilmektedir. Ancak sorunları tamamıyla ortadan kaldırmamaktadır. Yukarıda sayılan sorunların çözümlenmesi, uçucu küllerin çeşitli kullanım alanlarında değerlendirilerek, ülke ekonomisine kazandırılması ile mümkün görünmektedir. Uçucu küllerin değerlendirildiği sektörlerin başında ağırlıklı olarak inşaat sektörü gelmektedir. Silindirle sıkıştırılmış betonlarda, beton blok ve boruların yapımında kullanım bulur. Çimento hammaddesi olarak kullanılabilir. Uçucu külün çok az miktarı (yaklaşık %3-4) çimento üretiminde ve beton üretiminde agreganın yerine ya da katkı 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 blokların, endüstriyel seramik ve refrakterlerin, boyaların üretiminde, katı atıkların stabilizasyonunda ve bitki yetiştirilmesinde, kimya, cam, metal-döküm sanayii, tarım sektöründe, çevre, sondaj çalışmaları, buzlanmanın önlenmesi çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi [YTED], 2005).

BÖLÜM ÜÇ
TÜRKİYE’DE Kİ TERMİK SANTRALLER VE BU TERMİK
SANTRALLEREDEN ÇIKAN UÇUCU KÜLLERİN ÖZELLİKLERİ

Türkiye’de sadece kömür ile çalışan 11 tane termik santral faaliyet göstermektedir. Elektrik enerjisinin yaklaşık yarısının üretildiği termik santrallerde 55 milyon ton/yıl düşük kalorili linyit kömürü yakılmakta ve bunun sonucunda da bacalardan 16 milyon ton/yıl civarında uçucu kül elde ediliyor.

Tablo 3.1 Türkiye’deki kömürle çalışan termik santraller (Aruntaş,2006)

No	Santral adı	Yakıt cinsi	Kurulu güç (MW)	Bulunduğu il
1	Afşin-Elbistan A	Linyit	1355	Kahramanmaraş
2	Afşin-Elbistan B	Linyit	1440	Kahramanmaraş
3	Çatalağzı	Taşkömürü	300	Zonguldak
4	Çayırhan park	Linyit	620	Ankara
5	Kangal	Linyit	457	Sivas
6	Kemerköy	Linyit	630	Muğla
7	Orhaneli	Linyit	210	Bursa
8	Seyitömer	Linyit	600	Kütahya
9	Soma A-B	Linyit	1034	Manisa
10	Tunçbilek A-B	Linyit	429	Kütahya
11	Yatağan	Linyit	630	Muğla
12	Yeniköy	Linyit	420	Muğla

3.1 Seyitömer Termik Santrali

Seyitömer kömür kaynaklı elektrik santrali (STS) Kütahya’nın 28 km kuzeybatısında Seyitömer bölgesinde T.K.İ. tesisleri ile entegre olarak çalışan, her biri 150 MW gücünde 4 üniteden oluşmaktadır. Toplam 600 MW enerji üretim kapasitesine sahiptir. Santral ünitelerinin her biri, yıllık 900 milyon kwh üretim kapasitesine sahip olup, toplam yıllık üretim kapasitesi 3,6 milyar kwh’dır. Üretilen

bu enerji Türkiye elektrik üretiminin % 4,6'sını karşılamaktadır. Santralde nominal elektrik üretiminin sağlanması için yılda 5,5 milyon ton tüvenan kömür ve Enne barajından isale hattı ile temin edilen 8,4 milyon m³ su kullanılmaktadır.

Üniteden çıkan uçucu kül santrale 2,5 km uzaklıktaki depolama alanına taşınmaktadır (YTED, 2005).

3.2 Türkiye'deki Uçucu Küllerin Özellikleri

Türkiye'deki orta, doğu ve batı linyit, ziftli kömür alanlarından alınan yedi farklı uçucu külün, minerolojik, morfolojik, fiziksel ve kimyasal özelliklerini tespit etmek amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar neticesinde birtakım sonuçlar elde edilmiştir.

3.2.1 Mineraloji

Minerolojik 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.

Uçucu küllerdeki, X ışını kırınımı ile saptanan mineral maddeler, anhidrit, kireç, kuvars ve hematit–ferrit ve spineldir. Camsı ve amorf faz özellikle yüksek silisli küllerde (Tunçbilek, Orhaneli, Çatalağzı, Seyitömer, Çayırhan) belirgindir. Ancak bu küllerde kristalize fazlar (başlıca, kuvars ve mullit) mevcuttur (TÇMB,2004).

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

En yüksek kalsiyum toplanmaları kireç (CaO), melilite [(Ca,Na)₂ (Mg, Al, Fe) (Si, Al)₂ O₇] ve mervinite [Ca₃Mg(SiO₄)₂] oluşumuyla sonuçlanıyor. Bütün örneklerdeki

anhidrit yüksek kalsiyum aktivitesi sadece kalsitten oksijen ve sülfür varlığındaki sülfat oluşumunu ilerletmez, aynı zamanda 400-500 °C’de gerçekleşen yanma sırasında ve sonrasında alçı taşının kurumasını ilerletir (Ağar ve Kara,2003).

Natusch ve diğer insanlar Amerika’da çok az uçucu külde kuvars, mullilite, hematit, mağnetit ve az miktarda alçı taşı varlığını saptamıştır. Aynı zamanda bu uçucu küllerin, Türkiye’deki uçucu küllerde de görülen oldukça çok amorf, yapılara sahip olduklarını belirtmişlerdir. Yüksek miktardaki amorf yapılı maddeler bu uçucu küllerin matrisinin çoğunlukla saydam madde olduğunu göstermiştir (Bayat ve Toraman,1996).

3.2.2 Morfoloji

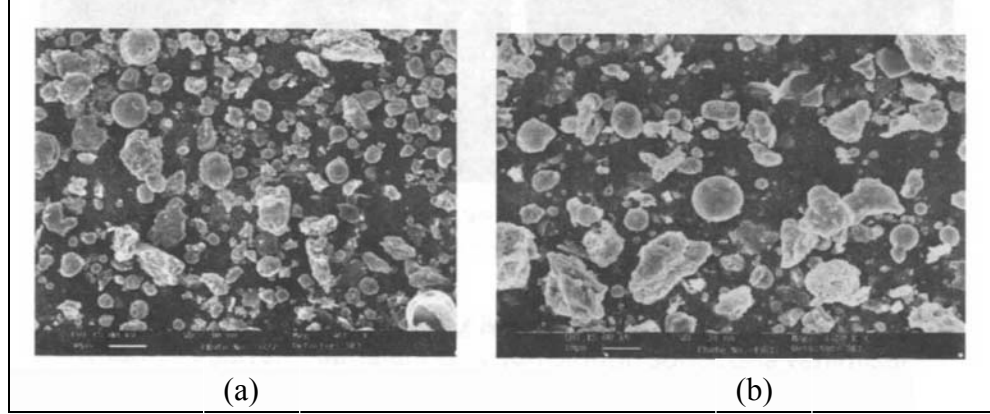
Çatalağzı ve Tunçbilek’teki uçucu küllerde boşluklu küreler (cenosphere) şeklindeki oluşumlara rastlanmıştır. Boşluklu küreler şeklindeki oluşumun optimal ısısının esas kül yoğunluğun da 1230°C olduğu saptanmıştır. Ayrıca, Tunçbilek uçucu küllerinin tane yüzeylerinde mullit oluşumu gözlenmiştir.

Soma, Yeniköy uçucu küllerinin tanecikleri ya büyük düzgün ya da eğri büğrü şekildedir. Ayrıca Yatağan, Seyitömer ve Afşin-Elbistan uçucu küllerinde kristal fazı gözlenmiştir.

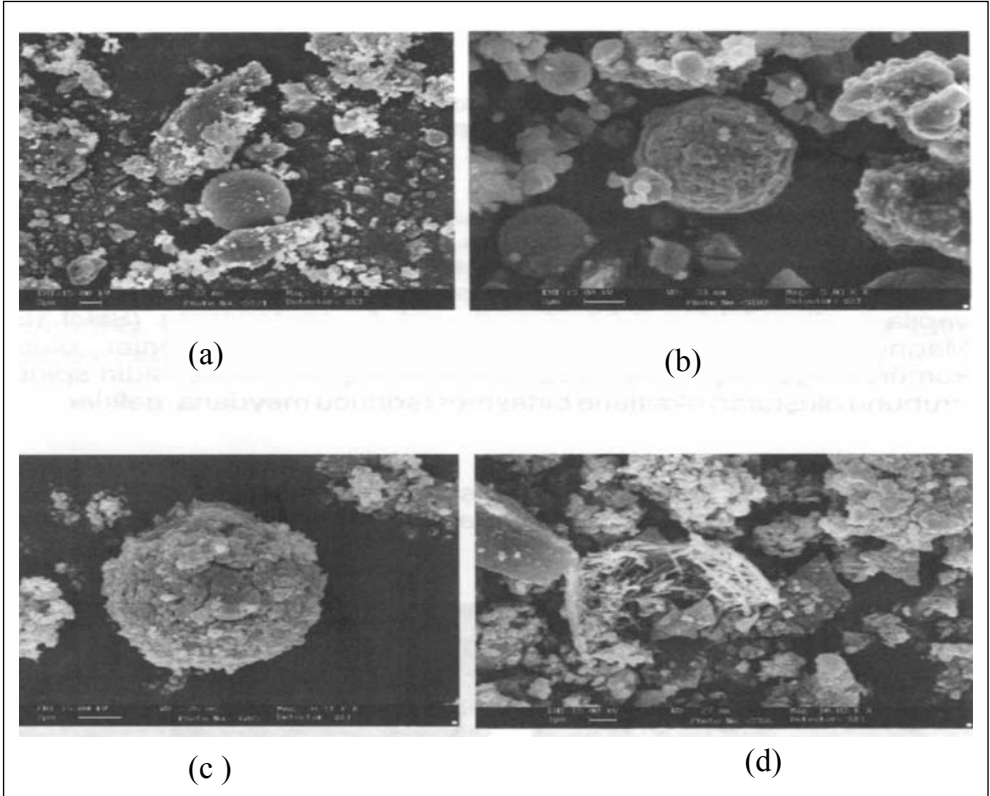
Seyitömer uçucu külü, 1-30µm arasında değişen büyüklüklerde çoğunluğu küresel bazıları düzensiz şekilli olmak üzere farklı morfoloji de tanecikler içermektedir. Özellikle 10 mikron’un altındaki taneciklerin içi dolu camsı küreler (solid spheres) halinde olduğu görülmüştür (Şekil 3.1) (TÇMB,2004).

Taneciklere uygulanan mikroanalizde, bazılarının yüzeyinde mağnezyoferrit, hematit biriktiği, masif kütle halinde nadiren rastlanan yapıların alkali feldispat bileşiminde olduğu saptanmıştır (Şekil 3.2). Mağnezyoferrit 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 bulunmuştur (Şekil 3.2). Mullit, kaolinit kilinin metamorfizasyonu sonucu oluşmaktadır.



Şekil 3.1 Seyitömer uçucu külünün morfolojik yapısına ait fotoğraflar (a) ve (b) Taneciklerin genel dağılımı (x500 ve x1500) (TÇMB,2004)



Şekil 3.2 Seyitömer uçucu külünün mikroyapısı (a) Mağnezyoferrit küresi(x8100), (b) Mullit kristalleri (x10000), (c) Alkali feldispatlar (x2500), (d) Demiroksit kaplı tanecik (x5000) (TÇBM,2004)

3.2.3 Yoğunluk

Minimum uçucu kül miktarı düştükçe, hacimsel ve net ağırlık değerleri artmaktadır. Ana yoğunluk farkları büyük olasılıkla duvar kalınlığı, boş ses veya minimum çap gibi özelliklerin etkilerine bağlıdır. Uçucu küllerin hacim yoğunluğunun düşük olması, hafif bina blokları yapımında kullanılmasını sağlar.

Townsed ve Hodgson'ın raporlarına göre, İngiliz kömür külü hacimsel yoğunluk değerleri 0,99'dan 1,73 gr/cm³ 'e kadar uzanır. Ayrıca Cope hacimsel yoğunluğun 0,56'dan 1,13 gr/cm³'e kadar uzandığını belirtmiştir (Bayat ve Toraman,1996).

Tablo 3.2 Türkiye uçucu küllerinin fiziksel özellikleri (Bayat veToraman ,1996)

Uçucu Kül	Özgül yüzey alanı (m ² /g)	Hacimsel Yoğunluk (g/cm ³)	Özgül Ağırlık (g/cm ³)
Yatağan	0,334	1,07	1,99
Soma	0,207	0,95	2,12
Seyitömer	0,115	0,88	1,58
Yeniköy	0,168	1,44	2,99
Çatalağzı	0,139	1,07	1,95
Afşin-Elbistan	0,342	1,05	2,70
Tunçbilek	0,094	1,11	1,83

3.2.4 Kimyasal Bileşim

Uçucu küllerdeki kimyasal elementlerin temel kaynağı şüphesiz kömür madenidir. Uçucu külde bulunan başlıca bileşenler SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, ve CaO olup, diğerleri SO₃, MgO ve alkali oksitlerdir. Ayrıca yanmamış karbon ve bunun yanı sıra titanyum, fosfor, berilyum, mangan ve molibden de bileşen olarak bulunabilmektedir.

Türkiye haricinde, doğu Karadeniz kıyıları toprakları çoğunlukla kalkerli ve alkanidir. Ayrıca demir de sıkça rastlanan önemli bir problemdir.

Yapılan alışmalar neticesinde uçucu küllerin başlıca elementleri Al_2O_3 , Si_2O ve CaO 'dir. Bu oksit içeren elementlerin her biri metal emici kadar kullanıma uygundurlar. Bu uçucu küllerin alkalın özelliği onları iyi bir ntrleştirici kaynak haline getirir. Bu mineralleri yeniden meydana getirmek veya yararlı diğer mineraller üretmek için uçucu külün bazı bileşenlerinin kaybolması literatür araştırmalarında yeterince araştırılmış ve belirtilmiştir. Ayrıca fiziksel ve kimyasal özellikleri incelenen Yatağan, Soma ve Çatalağzı uçucu küllerinin mineral üretmede yüksek potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Tablo 3.3 Türkiye uçucu küllerinin kimyasal bileşimleri (Bayat ve Toraman,1996)

Elementler	Yatağan	Soma	Seyitömer	Yeniköy	Çatalağzı	Afşin	Tunçbilek	Çayırhan	Orhaneli	Kangal	Kemerköy
SiO₂	45,18	49,50	53,50	15,35	47,60	15,14	52,10	47,50	52,00	23-30	13-25
Al₂O₃	20,94	26,70	15,71	5,54	24,31	7,54	19,06	15,95	26,00	12,00	3-22
Fe₂O₃	7,99	5,42	8,81	3,52	4,48	3,30	10,10	16,30	12,00	4,7-7	3-13
CaO	1,22	0,84	0,29	25,62	0,20	23,66	0,10	6,60	6,00	35,00	21-60
MgO	2,79	2,92	2,94	2,61	1,00	4,50	6,11	4,65	1,60	6,00	2,00
K₂O	2,24	2,42	1,19	0,41	3,50	0,28	1,32	3,70	1,50	0,80	1,00
Na₂O	0,57	0,81	0,77	0,27	0,58	0,57	0,49		3,00		1,00
TiO₂	1,04	0,99	0,12	0,63	1,50	1,03	1,07	NA	0,60	NA	NA
SO₃	5,63	1,59	1,11	20,86	0,57	13,22	0,83	NA	NA	18,50	13-31
Cd^b	9,6	8,0	-	8,0	4,0	8,0	-	NA	NA	NA	NA
Pb^b	57,7	79,7	79,0	39,8	118,5	79,6	99,3	NA	NA	NA	NA
Zn^b	404,1	195,2	112,6	71,6	138,3	79,6	99,3	NA	NA	NA	NA
Cu^b	136,7	59,8	98,8	39,8	98,8	39,8	99,3	NA	NA	NA	NA
Cr^b	134,7	119,5	454,5	79,6	138,3	298,4	695,1	NA	NA	NA	NA
Ni^b	134,7	79,7	1975,9		118,5	119,4	1986,1	NA	NA	NA	NA
Mn^b	384,8	358,6	790,4	457,4	790,0	218,8	1589,0	NA	NA	NA	NA
K.K	1,87	6,47	3,78	1,33	1,87	2,31	4,62	NA	NA	NA	NA

Tablo 3.3’ de görüldüğü gibi demir (Fe_2O_3) değerinin Yatağan, Seyitömer, Tunçbilek, Çayırhan, Orhaneli, uçucu küllerinde daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca bu küllerde $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Si}_2\text{O}$ değeri, diğer tüm örneklerden fazladır. Sülfür değerinin Yeniköy, Afşin-Elbistan, Kangal uçucu küllerinde daha yüksek olduğu görülmektedir.

BÖLÜM DÖRT

BOR

4.1 Bor Elementi

Periyodik sistemin üçüncü grubun başında bulunan ve atom numarası 5 olan bor elementi, kütle numaraları 10 ve 11 olan iki kararlı izotopundan oluşur. Kimyasal sembolü (B) olup, periyodik cetvelin III A grubunun metal olmayan tek elementidir. Bor madeni ilk bakışta beyaz bir kaya şeklinde olup, çok sert ve ısıya dayanıklı, doğada serbest bir element olarak değil, tuz bileşikleri şeklinde bulunmaktadır. Bor elementinin amorf bir toz halindeki rengi koyu kahverengidir. Ancak çok gevrek ve sert yapılı monoklinik kristal halinin rengi ise sarımsı kahverengidir. Bazı bor bileşikleri yüksek sertlik derecesine sahiptir.

Yeryüzünün 51. yaygın elementi olan bor, yeryüzünde toprak kayalar ve suda yaygın olarak bulunan bir elementtir. Toprağın bor içeriği genellikle ortalama 10-20 ppm, deniz suyunda 0,5-9,6 ppm, tatlı sularda ise 0,001-1,5 ppm aralığındadır. Yüksek konsantrasyonda ve ekonomik boyutlarda ki bor yatakları, borun oksijenle bağlanmış bileşikleri olarak daha çok Türkiye ve Amerika'nın kurak volkanik ve hidrotermal aktivitesinin yüksek olduğu bölgelerde bulunmaktadır. Tablo 5'de bor elementini fiziksel özellikleri verilmiştir. Borun karbon ve silisyum elementlerine benzerliği en fazla olan ve oksijene karşı afinitesi (bağ yapma özelliği) çok yüksek olan bir elementtir. Bu yüzden pek çok değişik bor-oksijen bileşimi bulunmaktadır. Bor oksijen bileşimlerini genel adı borattır. Bor suda çözülebilen, renksiz ve billursuz bir maden olan boraks, ısı etkisiyle önce ısı kaybetmekte, sonra erime özelliğine sahip bir elementtir (DPT, 2001).

Bor elmaştan sonra ametaller arasında elektropozitifliği en yüksek olan elementtir. Oda sıcaklığında elektrik iletkenliği zayıftır. Fakat yüksek sıcaklıklarda çok yüksektir. Proton ve elektron sayısı 5, nötron sayısı 6, atom çapı 1,78 Å'dur. Bor atomlarının yer kabuğunda çok fazla bulunmamasının yararı özellikle canlı hayat için çok önemli elementler olan karbon, azot ve oksijenin bolluk oranlarından daha az

olması çok faydalı olmaktadır. Şöyle ki nükleon başına bağlama enerjisi düşük olan atomlar hidrojen ve helyumla daha kolay birleşme reaksiyonlarına girerler. Bor atom çekirdekleri yıldız kütlesi içinde bu tür reaksiyonlarla C,N ve oksijen sentezlerine yol açarlar. Bor $2,33 \text{ gr/cm}^3$ yoğunluklu kristal ve $2,3 \text{ gr/cm}^3$ yoğunluklu amorf olmak üzere iki şekilde bulunur. Kristal borun yapısı ve kafes parametreleri tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1 Bor elementinin fiziksel özellikleri (DPT,2001)

Özellik	Değeri
Atom Ağırlığı	$10,811 \pm 0,003$
Ergime Noktası	$2190 \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$
Kaynama Noktası	3660
Isıl Genleşme Katsayısı (25-1050 $^\circ\text{C}$ arası 1°C için)	$5*10^6$ - $7*10^6$
Knoop Sertliği	2100-2560 HK
Mohr Sertliği	11
	5000 HV

Toblo 4.2 Kristalin Borun Yapısı ve Kafes Parametreleri (Çalık,2002)

Kristal şekli	Kafes parametreleri	
	B	C
Tetragonal	8,13	8,57
Heğzegonal	9,54	11,98

Bor, yanıcı fakat tutuşma sıcaklığının yüksek olmasından dolayı, yanma sonucunda kolaylıkla aktarılabilecek katı ürün vermesi ve çevreyi kirletecek emisyon açığa çıkarmaması gibi bir özelliğe sahip olduğundan katı yakıt hücresi olarak ta kullanılmaktadır. Bor mineralleri yapılarında bulunan Ca, Na ve Mg elementlerine göre sınıflandırılırlar. Na kökenli olanlara tinkal (boraks), Ca kökenli olanlara kolemonit ve Na-Ca kökenli olanlara üleksit denir.

Kimyasal olarak ametal olan kristal bor, normal sıcaklıklarda su, hava ve hidroklorik/hidroflorik asitler ile soy davranışlar göstermekte, sadece yüksek konsantrasyonlu nitrik asit ile sıcak ortamda borik asite dönüşebilmektedir. Öte yandan yüksek sıcaklıklarda saf oksijen ile reaksiyona girerek bor oksit (B_2O_3), aynı koşullarda nitrojen ile bor nitrat (BN) ve titanyum diborat (TiB_2) gibi endüstride kullanılan bileşikler oluşabilmektedir.

Bor elementinin kimyasal özellikleri morfolojisine ve tane büyüklüğüne bağlıdır. Mikron ebadındaki amorf bor kolaylıkla ve bazen şiddetli olarak reaksiyona girerken kristalin bor kolay reaksiyona girmez. Bor yüksek sıcaklıkta su ile reaksiyona girerek borik asit ve diğer ürünleri oluşturur. Mineral asitleri ile reaksiyonu, konsantrasyona ve sıcaklığa bağlı olarak yavaş veya patlama şeklinde olabilir ve ana ürün olarak borik asit oluşur. Bor doğada serbest olarak bulunmamaktadır. Doğada 250'den fazla minerale bileşik olarak bulunmaktadır. Bu oluşan bor minerallerinden en önemlileri yapılarında (bünyelerinde) değişik oranlarda bor oksit (B_2O_3) içeren bor minerallerinin en önemlileri tinkal, kolemonit ve üleksittir. Bor cevherlerinin yapısındaki kil bileşiklerinden arındırılması için uygulanan zenginleştirme işlemi ile elde edilen ürün, hamlar olarak tanımlanmaktadır. Bor mineralleri piyasaya ham bor ve /veya öğütülmüş ham bor olarak da sunulmakta, fakat genel olarak rafine bor bileşiklerine dönüştürülerek kullanılabilmektedir.

4.2 Ticari öneme sahip Bor Mineralleri

Bor madenlerinin değeri genellikle içindeki B_2O_3 (bor oksit) ile ölçülmekte, yüksek oranda B_2O_3 bileşiğine sahip olanlar daha değerli kabul edilmektedir. Ticari önemi olan ve kristal suyu içeren boratlardan en önemlileri, kimyasal kompozisyonları ile bulunduğu yerler Tablo 4.3'de verilmiştir.

Tablo 4.3 Ticari önemi olan bor mineralleri (EGİAD,2004)

Mineral	Formülü	%B ₂ O ₃	Bulunduğu Yer
Boraks (Tinkal)	Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O	36,6	Kırka, Emet, Bigadiç, ABD
Kernit (Razorit)	Na ₂ B ₄ O ₇ +H ₂ O	51,0	Kırka, ABD, Arjantin
Üleksit	NaCaB ₅ O ₉ .8H ₂ O	43,0	Bigadiç, Kırka, Emet, Arjantin
Propertit	NaCaB ₅ O ₉ .5H ₂ O	49,6	Kestelek, Emet, ABD
Kolemonit	CaB ₆ O ₁₁ .5H ₂ O	50,8	Emet, Bigadiç, ABD
Pandermit (priseit)	Ca ₄ B ₁₀ O ₁₉ .7H ₂ O	49,8	Sultançayır, Bigadiç
Borasit	Mg ₃ B ₇ O ₁₃ Cl	62,2	Almanya
Szaybelit	MgBO ₂ (OH)	41,4	Rusya
Hidroborasit	CaMgBO ₁₁ .6H ₂ O	50,5	Emet

4.3 Türkiye Rezervi

Türkiye’de bilinen bor yatakları özellikle Eskişehir-Kırka, Balıkesir-Bigadiç, Bursa-Kestelek ve Kütahya-Emet’te bulunmaktadır. Ülkemizde işletilmekte olan başlıca bor minerallerinden Tinkal Kırka (Eskişehir), Kolemanit Emet (Kütahya), Bigadiç (Balıkesir) ve Kestelek (Bursa), Üleksit ise Bigadiç’te bulunmaktadır. Ülkemizde görünür bor rezerv miktarı Tablo 4.4’de verilmiştir. Ancak yapılacak yeni çalışmalarla bu verilerin artabileceği belirtilmektedir. Türkiye’de bulunan bor rezervlerinin % 64’nü Kolemanit, %32’sini Boraks kalan %4’lük kısmını da Üleksit oluşturmaktadır.

Tablo 4.4 Bölge ve çeşit açısından bor rezervleri (<http://www.etimaden.gov.tr>)

İl/İlçe	Bulunan Bor Mineralleri	Cevher Rezervi (1.000 ton)	B₂O₃ Tenörü %	B₂O₃ itibariyle Rezerv (1.000 ton)
Balıkesir Bigadiç	Kolemanit (en çok) Üleksit (yan ürün)	1.029.722	35	360.403
Kütahya Emet	Kolemanit (en çok) Üleksit (yan ürün) Meyerhofferit (yan ürün) Propertit (yan ürün) Tünelit (yan ürün) Hidroborasit (yan ürün)	886.743	35	310.360
Eskişehir Kırka	Tinkal (en çok) Üleksit (2. derece) Kolemanit (3. derece) Kernit (yan ürün)	518.535	25	129.634
Bursa Kestelek	Kolemanit (en çok) Propertit (yan ürün) Hidroborasit (yan ürün) Meyerhofferit (yan ürün) Üleksit (yan ürün)	8.142	35	2.850

4.4 Üretimler

Türkiye’de büyük rezervlere sahip olan iki ana cevherden, tinkal ($\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) ile kolemanitten ($2 \text{ CaO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) bor ve bor bileşikleri elde edilmektedir. Türkiye ‘de önemli tinkal yatakları Kırka’da, önemli kolemanit yatakları ise Emet ve Bigadiç civarında bulunmaktadır. Bor mineralleri, bileşikleri ve

türevleri üretimi Eti Bor A.Ş.'ye bağlı 5 müessese tarafından yapılmaktadır. Diğer önemli bor minerali olan üleksit ($\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ise Bigadiç'te açık ocak yöntemi ile üretilmektedir.

Tablo 4.5 Eti Holding A.Ş.'ye bağlı işletmeler ve kapasiteleri (EGİAD, 2004)

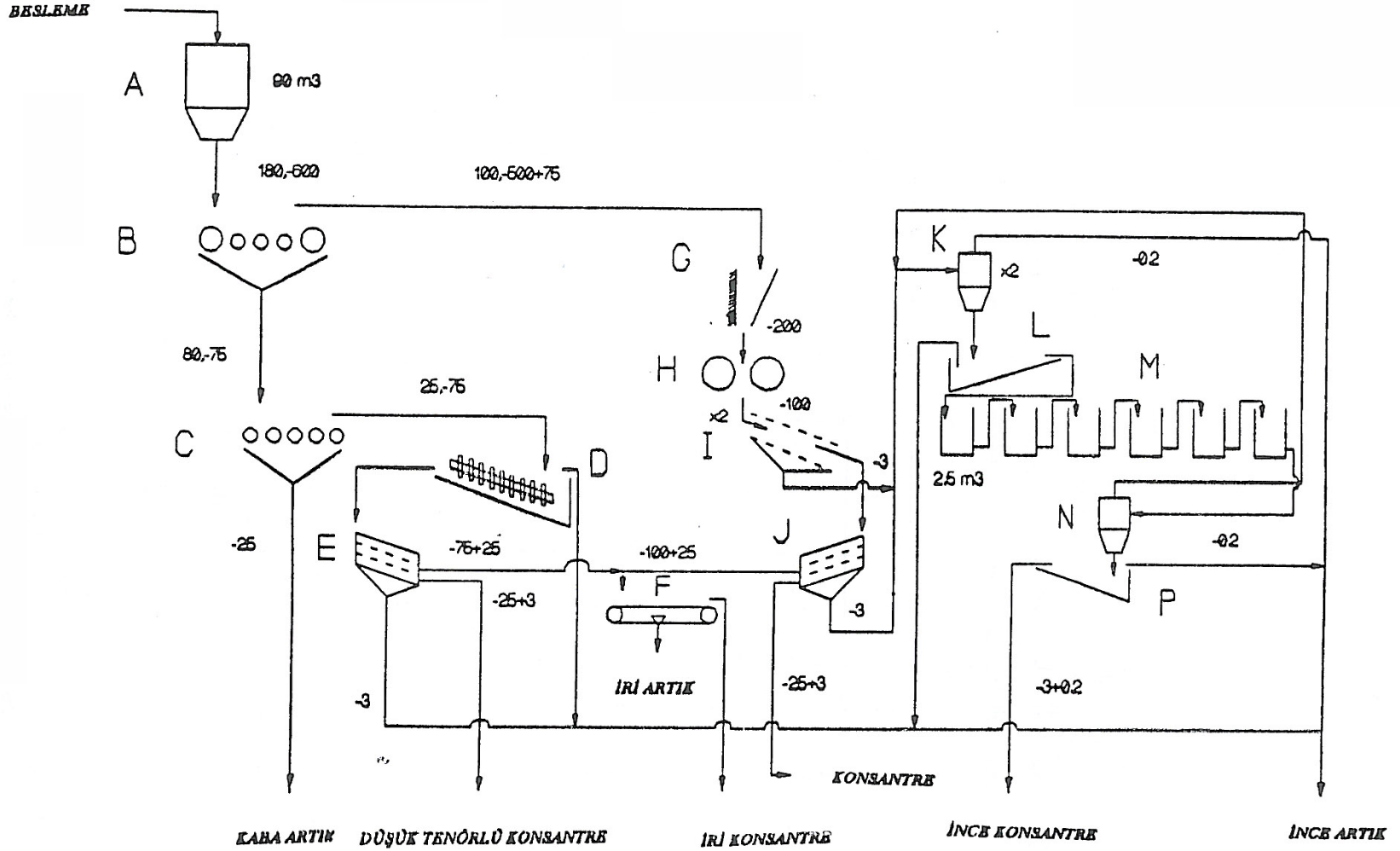
İŞLETME	ÜRÜN	KURULU KAPASİTE	
		HAM BOR	RAFİNE BOR
		Bin ton /yıl	Bin ton/ yıl
Kırka Bor İşl. Md.	Tinkal Konsantre	800	
	Boraks Pentahidrat		320
	Boraks Dekahidrat		17
	Susuz Boraks		60
Bandırma Bor ve Asit Fab. İşl. Md.	Boraks Hidrat (Deka+penta)		
	Borik Asit		
	Sodyum Perborat		
Bigadiç Bor İşl. Md.	Konsatre kolemanit	200	
	Konsantre üleksit	200	
Emet Bor İşl. Md.	Konsantre kolemanit	500	
Kestelek Bor İşl. Md.	Konsantre kolemanit	100	
	TOPLAM	1800	557

4.5 Kütahya-Emet Bor İşletmesi

Kütahya ilinin güneybatısındaki Emet ilçesinde kurulmuş ve Kütahya'ya 100 km uzaklıktadır. Türkiye'nin bor mineralleri rezervinin önemli bir bölümünü oluşturan Kütahya – Emet yatağı 1956 yılında M.T.A. jeologu Dr. Gawlik tarafından kurulmuştur. 12.08.1958 tarihinde bölgedeki bor sahaları M.T.A. tarafından Etibank'a devredilmiştir. M.T.A tarafından Etibank'a devredilen sahalar; güneyde

Hisarcık'a 4 km. mesafedeki hamamköy ile kuzey'de Emet'e 3,5 km. mesafedeki Espey bölgesini içine almaktadır (www.etimaden.gov.tr).

Hisarcık ve Espey açık işletmelerinde üretilen cevher yine buralardaki konsantratörlerde zenginleştirilerek satışa hazır hale getirilmektedir. Hisarcık konsantratörü tüvenan cevher işleme kapasitesi 9000.000 ton/yıl ve konsantre cevher üretim kapasitesi 450.000 ton/yıl'dır. Espey konsantratörü cevher işleme kapasitesi 300.000 ton /yıl ve konsantre kolemanit elde etme kapasitesi ise 120.000 ton/yıl'dır. Üretilen tüvenan cevheri zenginleştirmek amacı ile açık işletmenin bulunduğu Hisarcık bölgesine kurulan konsantratörde yapılan başlıca işlemler, kırma, klasifikasyon ve yıkamadan oluşmaktadır. Hisarcık'taki açık işletmeden elde edilen tüvenan tenörü yaklaşık %29 B_2O_3 olup, konsantratör tesisi çıkış tenörü %41 dolayında gerçekleşmektedir (DPT, 2001).



(A: SİLO, B: IZGARALI ELEK, C: DÖNER MİLLİ ELEK, D: KÜTÜKLÜ YIKAYICI, E: TİTREŞİMLİ ELEK, F: TRİYAJ BANDI, G: ÇENELİ KIRICI, H: MERDANELİ KIRICI, I: TİTREŞİMLİ YIKAYICI, J: TİTREŞİMLİ ELEK, K: SİKLON, L: SİRAL KLASİFİKATÖR, M: AŞINDIRARAK YIKAMA ÜNİTESİ, N: SİKLON, P: SİRAL KLASİFİKATÖR)

Şekil 4.2 Hisarcık konsantratör tesisi akım şeması

Elde edilen konsantreler 0,2-3 mm, 3-25 mm ve 25-100 mm tane boyutlarındadır. Ancak 3-25 mm tane boyutunda düşük ve yüksek tenörlü olmak üzere iki çeşit konsantre alınmaktadır. Tesise ait genel akım şeması ile tüvenan cevher ve konsantrelerin tenörleri şekil 4.2’de gösterilmektedir. Bu akım şemasına göre kolemanit cevheri önce 75 mm’lik bir kalibreli eleğe verilmekte ve iki kısma ayrılmaktadır. Elek altı 25 mm’lik bir diğer kalibreli eleğe gönderilmekte ve bu eleğin altı artık olarak atılırken üstü bir kütüklü yıkayıcıda yıkanan malzeme 3-25 mm’lik çift katlı bir eleğe gelmekte. Bu eleğin altına geçen -3 mm’lik malzeme atılırken 25-75 mm’lik ara ürün düşük tenörlü konsantre olarak alınmaktadır. Elek üstünden alınan 25-75 mm’lik cevher triyaja giderek parça konsantre olarak alınmaktadır.

75 mm’lik kalibreli eleğin üzerinden alınan +75 mm’lik malzeme bir çeneli kırıcı ve merdaneli kırıcıdan geçerek -100 mm’lik tane iriliğine inmekte ve daha sonra tüplü yıkayıcıya verilmektedir. Burada kilinden yıkanan cevher 3 ve 25 mm’lik bir çift katlı eleğe gelmekte, 3-25 mm’lik ara ürün konsantre olarak alınırken, 25-100 mm’lik kısım triyaja giderek 25-100 mm’lik konsantre elde edilmektedir. Elek altına geçen -3 mm’lik kısım ise bir hidrosiklona verilmektedir. Siklon üstü artık göletine gönderilirken, siklon altı klasifikatöre verilmektedir. Klasifikatör taşanı atılırken, iri cevher 0,2-3 mm konsantre olarak alınmaktadır.

BÖLÜM BEŞ

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 Malzeme ve Yöntem

Bu araştırmanın amacı, Seyitömer Termik Santrali Uçucu Külleri ve Kütahya – Emet Bor İşletmesinin atıklarının özelliklerini incelenmek ve bu atıkların tuğla yapımında kullanılabilirliğini saptamaktır.

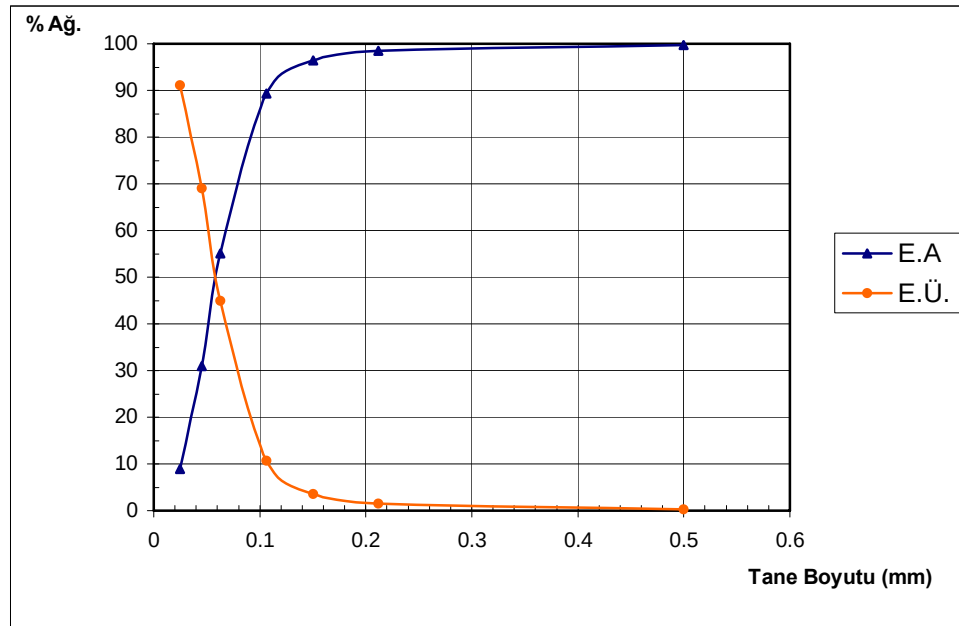
Bu çalışmada Seyitömer Termik Santrali Uçucu Külleri ve Kütahya- Emet Bor işletmesinin, kaba kil atık (-25 mm) (Şekil 4.2) ve atık barajı (-3 mm) (Şekil 4.2) diye adlandırılan 2 çeşit bor atıklarının tane boyut dağılımları tespit edilmiştir. Ayrıca bu atıkların kimyasal bileşimlerinin incelenmesi amacıyla kimyasal analizi de yapılmıştır. Bu analizlerin sonuçları bölüm 5.2’de verilmiştir. Bu işlemlerden sonra bu atıklar değişik oranlarda karıştırılarak tuğla yapımında kullanılabilirliği incelenmiştir. Uçucu kül içerisine belirli oranlarda katılan bor atıklarından kaba kil atık kırma, öğütme ve eleme işlemlerinden geçirilmiştir. Çünkü bu malzeme tesisten granüller halinde ve oldukça iri boyutta gelmiştir. Deneylerde kullandığımız atık barajı numunesi ise -0,3 mm tane iriliğindedir. Bundan dolayı herhangi bir ufalama işlemine tabi tutulmamıştır.

5.2 Seyitömer Termik Santrali Uçucu Külü

5.2.1 Seyitömer Termik Santrali Uçucu Külünün Fiziksel Özellikleri

Tablo 5.1 Seyitömer termik santrali baca külünün elek analizi sonuçları

Tane İriliği (mm)	Ağırlık (%)	Elek altı (E.A) (%)	Elek üstü (E.Ü) (%)
+0,500	0,32	100,00	0,32
0,500-0,212	1,23	99,68	1,54
0,212-0,150	2,02	98,46	3,57
0,150-0,106	7,07	96,43	10,64
0,106-0,063	34,28	89,36	44,92
0,063-0,045	24,09	55,08	69,00
0,045-0,025	22,06	31,00	91,06
-0,025	8,94	8,94	100,00
Toplam	100		



Şekil 5.1 Seyitömer termik santrali uçucu külünün elekaltı-eleküstü eğrileri

Tablo 5.1 ve Şekil 5.1’de Seyitömer Termik Santrali uçucu külünün elek analizi sonuçları verilmektedir. Şekil 5.1’den görüleceği üzere incelendiği zaman, malzemenin % 90’ı 100 μ tane boyutunun altındadır.

5.2.2 Seyitömer Termik Santrali Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçları

Seyitömer uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları, Tablo 5.2’de verildiği gibidir. Analiz sonuçlarından da görüleceği üzere, reaktif kireç miktarının %10’un altında olması (%6,03) nedeniyle (Tablo 5.2), TS EN 197-1’de verilen V sınıfı (silis ağırlıklı uçucu kül) kapsamına girmektedir. $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı ortalama, %83,03 olup ASTM C 618’e göre %70’in üzerinde ve CaO’in %10’dan az olması nedeniyle F sınıfı (düşük kireçli) uçucu kül sınıfına girmektedir.

$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ’in %70’in üzerinde olması nedeniyle TS 639’da istenen şarta uymaktadır.

SO_3 değeri EN 450 standardın da, SO_3 için istenen en fazla %3 sınırları için de (%1,14) kalmaktadır.

Tablo 5.2 Seyitömer uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları

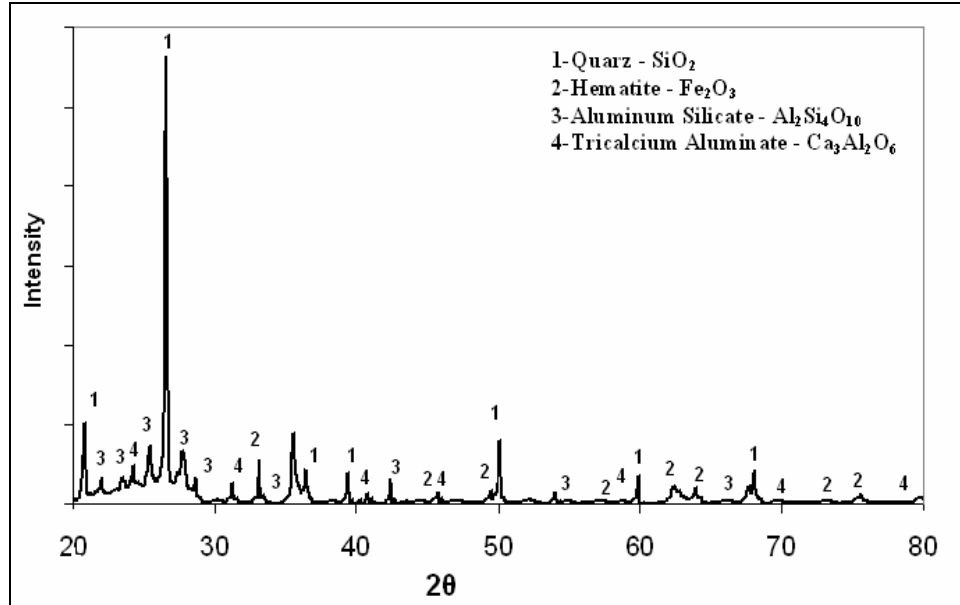
Bileşik	Miktar (%)
SiO_2	56,23
Al_2O_3	14,72
Fe_2O_3	12,08
CaO	6,03
SO_3	1,14
MgO	4,66
Na_2O	0,60
K_2O	1,45
KK	3,09

Tablo 5.3 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	56,23						
Al ₂ O ₃	14,72						
Fe ₂ O ₃	12,08						
Si+Al+Fe	84,04				>70,00	>70,00	>50,00
CaO	6,06						
MgO	4,66				<5,00		
SO ₃	1,14	<3,00			<5,00	<5,00	<5,00
K ₂ O	1,45						
Na ₂ O	0,60						
KK	3,09	<5,00	<5,00	<5,00	<10,00	<6,00	<6,00

5.2.3 Mineralojik Analiz Sonuçları

Seyitömer termik santrali uçucu külünün mineralojik bileşimine ait X-ışınları difraktogramı Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Şekilde görüleceği gibi, uçucu külde başta camsı faz olmak üzere, kuvars, hematit, alüminyum silikat kristalleri ve minör olarak trikalsiyum alüminatlar bulunmaktadır. Seyitömer uçucu külünün, X-ışınları difraktoğramında camsı fazın 26,66° 2θ arasında maksimum verdiği görülmektedir.



Şekil 5.2 Seyitömer uçucu külünün mineralojik bileşimine ait X-ışınları difraktogramı

5.3 Kütahya-Emet Bor Atıklarının Fiziksel Özellikleri

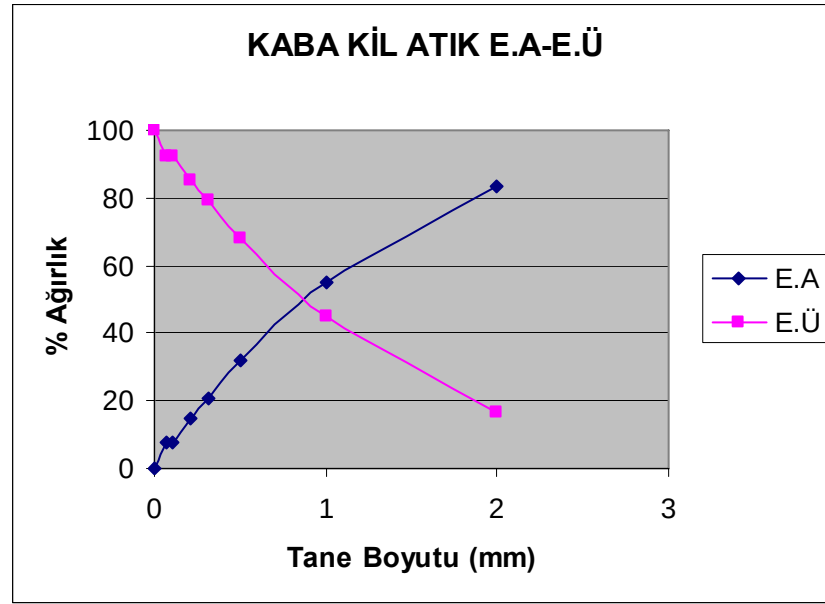
5.3.1 Kütahya-Emet Bor Atıklarının Fiziksel Özellikleri

Kütahya-Emet bor işletmesinin bor atıklarının tane boyut dağılımına bakmak amacıyla, bu atıkların elek analizi yapılmıştır. Elek analizi sonuçları da Tablo 5.4 ve Tablo 5.5’de görüldüğü gibidir.

5.3.1.1 Kaba Kil Atık Malzemesinin Elek Analizi

Tablo 5.4 Kaba kil atık malzemesinin elek analizi

Tane iriliği (mm)	Ağırlık (%)	E.A (%)	E.Ü (%)
+2,000	16.36	100	16.36
2,000-1,000	28.79	83.67	45.15
1,000-0,500	22.83	54.88	67.98
0,500-0,315	11.44	32.05	79.42
0,315-0,212	5.55	20.61	84.97
0,212-0,106	7.13	15.06	92.1
0,106-0,075	0.14	7.93	92.24
-0,075	7.79	7.79	100
Toplam			



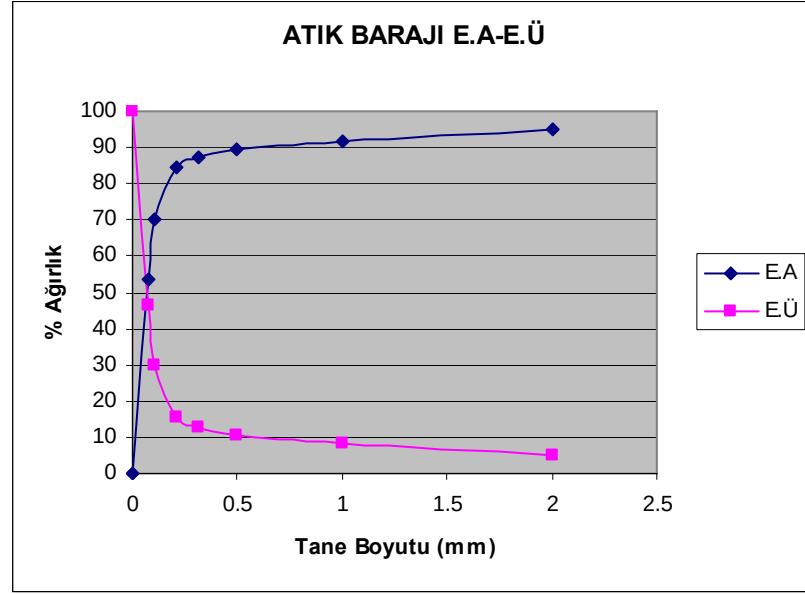
Şekil 5.3 Kaba kil atık malzemesinin elekaltı-eleküstü eğrileri

Tablo 5.4 ve Şekil 5.3’de görüldüğü gibi kaba kil atık malzemesinin elek analizi sonuçları verilmektedir. Şekil 5.3’den kaba kil atık malzemesinin elek altı grafiği incelendiği zaman malzemenin %80’nin 2 mm’nin altında kaldığı gözlenmiştir. Kaba kil atık malzemesinin tane boyut dağılımının iri olması nedeniyle -200 mikron tane boyutuna getirildikten sonra deneylerde kullanılmıştır.

5.3.1.2 Atık Barajı Malzemesinin Elek Analizi

Tablo 5.5 Atık barajı malzemesinin elek analizi sonuçları

Tane iriliği (mmm)	Ağırlık (%)	Elek altı (%)	Elek üstü (%)
+2,000	4,89	100	4,89
2,000-1,000	3,19	95,11	8,08
1,000-0,500	2,50	91,92	10,58
0,500-0,315	2,19	89,42	12,77
0,315-0,212	2,50	87,23	15,27
0,212-0,106	14,37	84,73	29,64
0,106-0,075	16,86	70,36	46,5
-0,075	53,50	53,50	100
Toplam	100		



Şekil 5.4 Atık baraj malzemesinin elekaltı-eleküstü eğrileri

Tablo 5.5 ve şekil 5.4’de görüldüğü gibi, atık barajı malzemesinin elek analizi sonuçları verilmektedir. Şekil 5.4’deki atık barajı malzemesinin E.A grafiğinden görüleceği üzere atık barajı malzemesinin % 80’ninin -0,2 mm’nin altında olduğu görülmektedir. Atık barajı malzemesi ince tane boyut dağılımında olduğundan dolayı, hiç bir işleme tabi tutulmadan deneysel çalışmalarda kullanılmıştır.

5.3.2 Kütahya-Emet Bor Atıklarının Kimyasal Özellikleri

Kütahya-Emet bor işletmesinin atıklarının içerisindeki element ve bileşiklerin oranlarını tespit etmek amacıyla, bu atıkların kimyasal analizi yapılmıştır. Kimyasal analiz sonuçları Tablo 5.6 ve Tablo 5.7’de görüldüğü gibidir.

5.3.2.1 Kaba Kil Atık Malzemesinin Kimyasal analiz sonuçları

Tablo 5.6 Kaba kil atık malzemesinin kimyasal analiz sonuçları

Bileşik	Miktar (%)	Bileşik	Miktar (ppm)
SiO ₂	37,37	Pb	0,33
Al ₂ O ₃	4,77	Zn	0,11
Fe ₂ O ₃	1,75	Cu	0,01
CaO	10,20	Cr	0,10
MgO	11,50	Ni	0,63
K ₂ O	2,27	Co	0,11
Na ₂ O	0,1	Sb	1,03
TiO ₂	0,03	Mn	0,04
SO ₃	0,24		
B ₂ O ₃	13,65		
Kızdırma Kaybı	17,88		

5.3.2.2 Atık Barajı Malzemesinin Kimyasal Analiz Sonuçları

Tablo 5.7 Atık barajı malzemesinin kimyasal analiz sonuçları

Bileşik	Miktar (%)	Bileşik	Miktar (ppm)
SiO ₂	36,55	Pb	0,29
Al ₂ O ₃	6,87	Zn	0,13
Fe ₂ O ₃	2,35	Cu	0,02
CaO	11,08	Cr	0,12
MgO	6,20	Ni	0,84
K ₂ O	2,07	Co	0,12
Na ₂ O	0,2	Sb	1,07
SO ₃	0,3	Mn	0,08
B ₂ O ₃	17,13		
Kızdırma Kaybı	16,98		

5.4 Tuğla Test Parametreleri

Deneysel çalışmada uçucu kül ve bor atıkları (kaba kil atık ve atık barajı) ayrı ayrı karıştırılarak, 10 MPa pres basıncı altında tuğlalar elde edilmiştir. Elde edilen tuğlalar etüvde 105 °C de 3 saat bekletildikten sonra, fırında 800, 850 °C ve 900°C’de pişirildikten sonra öncelikli olarak mekanik dayanım açısından optimal tuğla parametresinin tespiti planlanmıştır. Bu test planlamaları Tablo 5.8 ve 5.9 da verildiği gibidir.

Tablo 5.8 Kaba kil atık malzemesi ile yapılan tuğlaların içindeki karışım oranları

Tuğla adedi	% Kaba kil atık	% Uçucu kül	%Nem	Pres basıncı (MPa)	Sıcaklık (°C)
5	%2	%98	20	10	800
5	%4	%96	20	10	
5	%6	%94	20	10	
5	%8	%92	20	10	
5	%2	%98	20	10	900
5	%4	%96	20	10	
5	%6	%94	20	10	
5	%8	%92	20	10	

Tablo 5.9 Atık barajı malzemesi ile yapılan tuğların içerisindeki karışım oranları

Tuğla adedi	% Atık barajı	% Uçucu kül	%Nem	Pres basıncı (MPa)	Sıcaklık (°C)
5	%2	%98	20	10	800
5	%4	%96	20	10	
5	%6	%94	20	10	
5	%8	%92	20	10	
5	%2	%98	20	10	900
5	%4	%96	20	10	
5	%6	%94	20	10	
5	%8	%92	20	10	

Tablo 5.10 %100 uçucu kül ile yapılan tuğlaların pişirilme sıcaklıkları

Tuğla adedi	% uçucu kül	% Nem	Pres basıncı (MPa)	Sıcaklık (°C)
5	%100	20	10	800
5	%100	20	10	900

5.4.1 Ön Testler

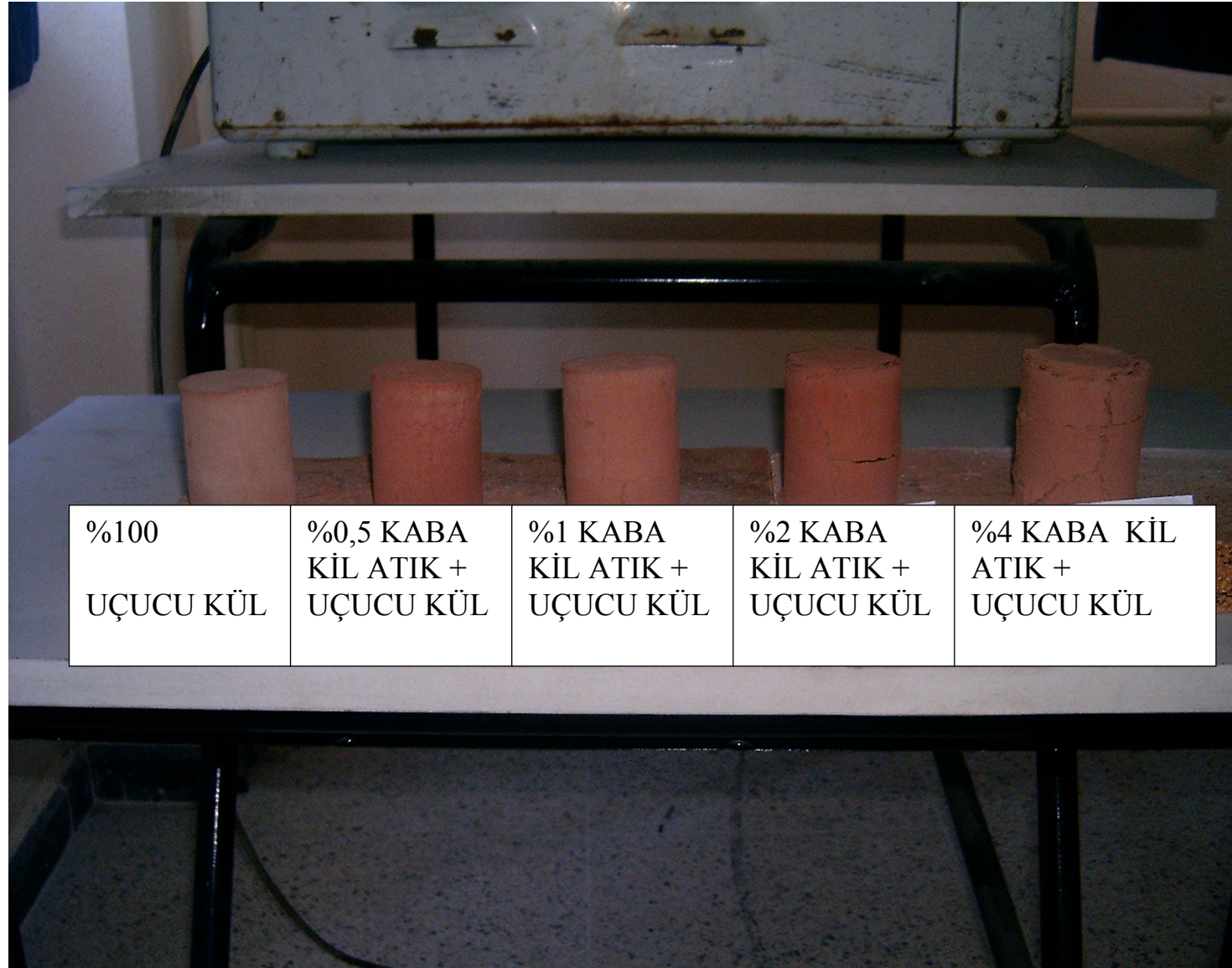
Çalışmalara yön vermesi açısından öncelikle %4 kaba kil atık ve %4 atık barajı bor atıkları oranı ile olmak üzere ayrı ayrı 10'ar adet tuğla yapılarak fırında 900 °C'de 1 saat süreyle tutulmuştur.



Şekil 5.5 %4 Kaba kil atık ve %4 atık barajı malzemesi ile yapılan tuğlaların fırında 1 saat boyunca 900 °C'de pişirildikten sonraki durumları

Şekil 5.5'den görüldüğü gibi tuğlaların pişirme işleminden sonra çatladığı ve bazılarında dağıldığı görülmüştür. Yapılan bu kör deney neticesinde, bu çatlamların ve dağılmaların nereden kaynaklandığını tespit etmek amacıyla bir deney daha yapılmıştır. Bu defa %100 uçucu kül, %0,5, %1, %2 kaba kil atık bor oranıyla 4 tip tuğla yapılmıştır. Burada amaç tuğlaların bozulmalarında borun

etkisinin olup olmadığını tespit etmektir. Bu tuğlalar fırında 900 °C’de 1 boyunca pişirilmiştir.



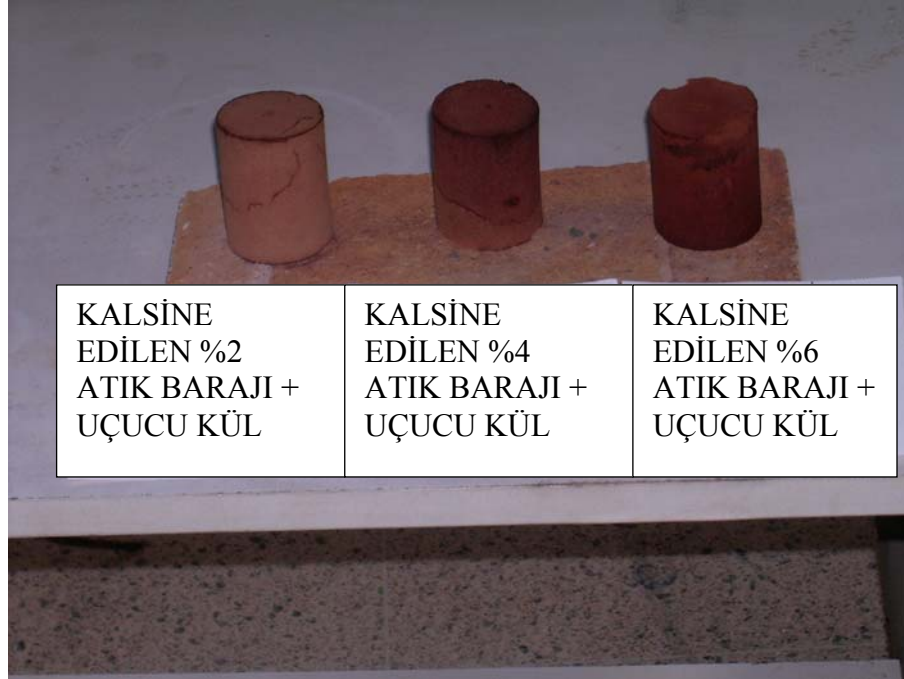
Şekil 5.6 Değişik bor oranlarında yapılan tuğlaların 900 °C’de pişirildikten sonraki durumları

Şekil 5.6'dan da görüldüğü gibi yalnız %100 uçucu kül ile yapılan tuğla da çatlama olmadığı görülmüştür. Fakat %0,5, %1, %2 oranında kaba kil atık içeren tuğlaların hepsinde, bor oranının artışına paralel olarak çatlamlar oluşmuştur. Böylece bor oranının artması ile tuğla içerisinde ki çatlakların doğru orantılı olarak arttığı ortaya çıkmıştır. Tuğlalarda meydana gelen bu çatlamlar, bor'un 600-700 °C sıcaklığın da genişip, bünyesindeki kristal suyunu dışarı vermesinden (dekrapitasyon özelliği) kaynaklanmaktadır. Bu da tuğla içerisinde çatlamlara ve bor oranının artmasıyla da patlamalara sebep olmaktadır.

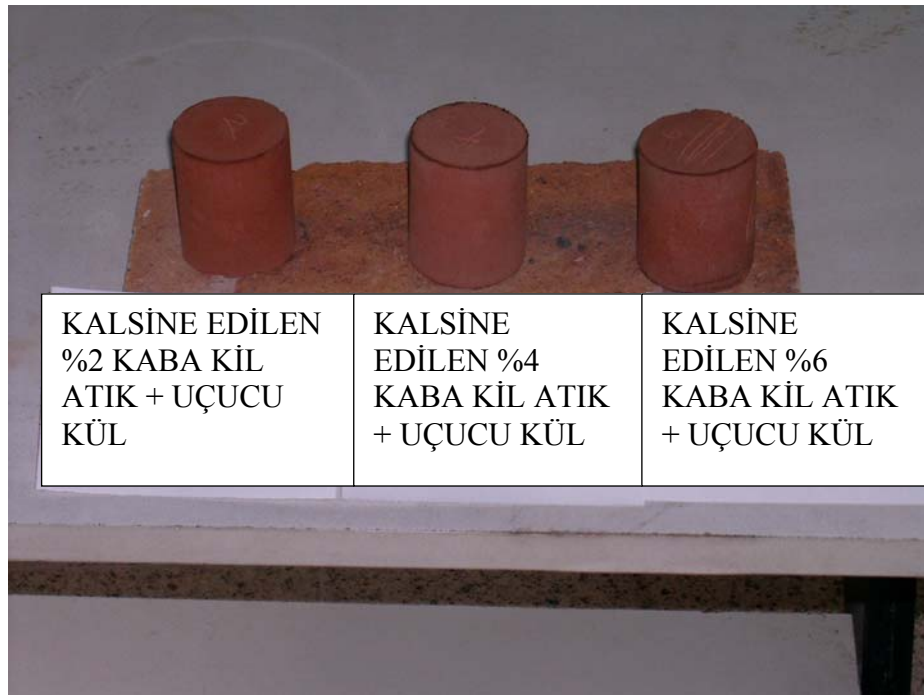
Yapılan bu deneysel çalışmalar neticesinde, tuğlalarda meydana gelen bu çatlamları ve patlamaları önlemek amacıyla tuğla içerisine katılan kaba kil atık ve atık barajı malzemeleri 700 °C'de 1,5 saat kalsine edilmiştir (Şekil 5.7). Bor atıklarının kalsinasyonu ile bünyelerindeki kristal suyu uzaklaştırılmış olur. Böylelikle de tuğla içerisine katılan bor'un genişerek, tuğlaları çatlatması önlenmiş olur. Daha sonra %2, %4, %6 atık barajı malzemesi oranıyla 3 adet ve aynı oranlarda kaba kil atık malzemesi ile 3 adet olmak üzere 6 adet deneme amaçlı tuğlalar yapılarak, 900 °C'de 1 saat boyunca fırınlanmıştır. Fırından çıkan tuğlalarda herhangi bir dağılmanın olmadığı gözlenmiştir (Şekil 5.8 -9).



Şekil 5.7 Atık barajı malzemesinin fırında 700 °C'de 1,5 saat boyunca kalsine edildikten sonraki durumu



Şekil 5.8 700 °C’de kalsine edilen atık barajı malzemesinden 900 °C’de deneme amaçlı yapılan tuğlalar



Şekil 5.9 700 °C’de kalsine edilen kaba kil atık malzemesinden 900 °C’de deneme amaçlı yapılan tuğlalar

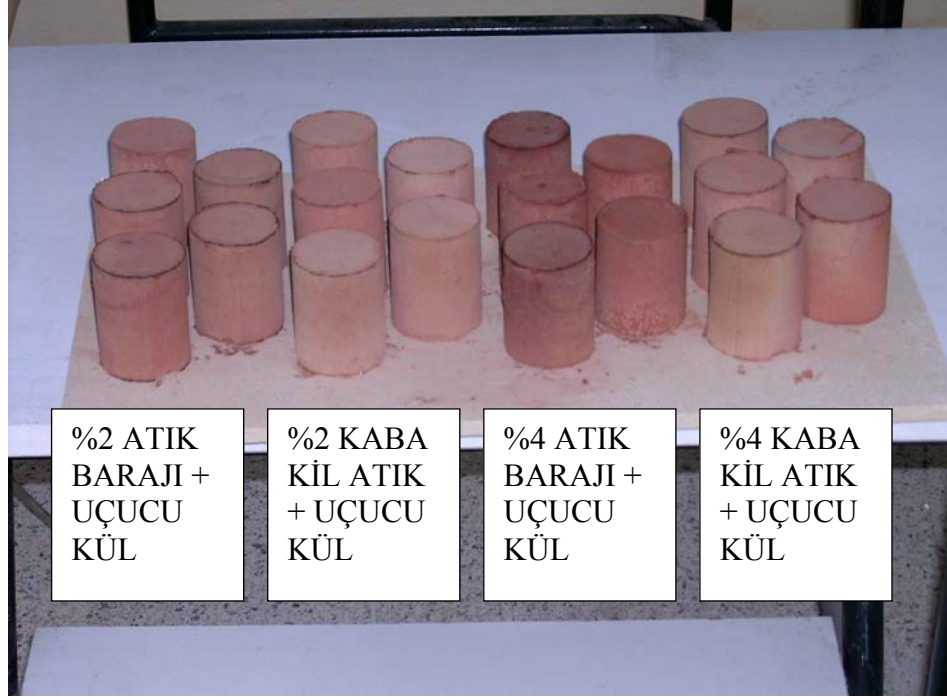
Böylelikle deneylere Tablo 5.8-9’ da belirtilen tuğla karışım oranlarında, kalsine edilen atık barajı ve kaba kil atık malzemesi ile devam edilmiştir.

5.4.2 900 °C’de Yapılan Tuğla Test Parametreleri

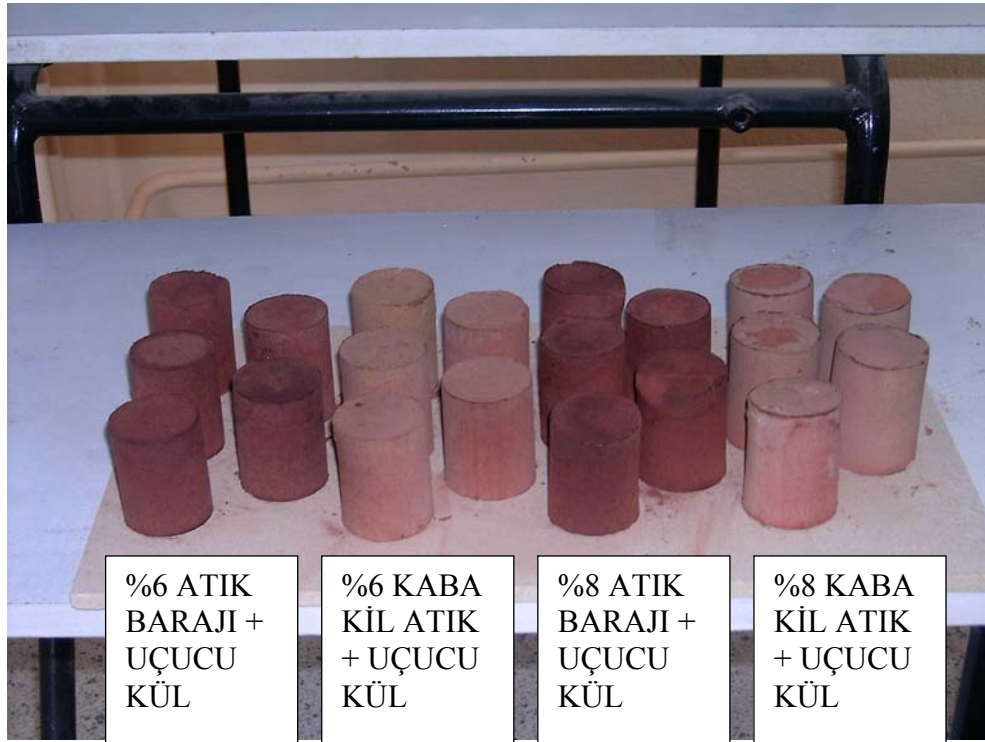
Öncelikle Tablo 5.8-9’ da verilen karışım oranları kullanılarak, % 2, %4, %6 ve %8 oranlarında kaba kil atık malzemesi ve gene aynı oranlarda kalsine edilmiş atık barajı malzemesi kullanılarak 40 adet tuğla yapılmıştır (şekil 5.10). Bunun yanında %100 uçucu kül kullanılarakta 5 adet tuğla yapılmıştır. Bu tuğlalar, 900°C’de 1 saat boyunca pişirilmiştir (Şekil 5.11-12).



Şekil 5.10 %2 ve %4 oranlarında kaba kil atık malzemesi ile yapılan tuğlaları Fırına konmadan önceki durumları



Şekil 5.11 %2, %4, oranlarında atık barajı ve kaba kıl atık malzemesi ile yapılan tuğlaların fırında 900 °C’de 1 saat boyunca pişirildikten sonra ki durumları



Şekil 5.12 %6, %8 atık barajı ve kaba kıl atık malzemesi ile yapılan tuğlaların 900 °C’de 1 saat boyunca pişirildikten sonraki durumları

Şekil 5.12' den görüleceği üzere atık barajı malzemesi ile yapılan tuğlaların pişirilme işleminden sonra daha koyu bir renk aldığı gözlenmektedir. %8 oranında kaba kil atık ve atık barajı malzemesi ile yapılan tuğlaların dış yüzeylerinin kabuk tutup soyulduğu dikkati çekmektedir.

Piştirme işleminden sonra, tuğlaların basınç dayanımlarını tespit etmek amacıyla, her bir seride ki 5 tuğladan 4 tanesi tek eksenli basınç cihazında kırma testine tabi tutulmuştur. Böylelikle tuğlaların kırılma yükleri tespit edilmiştir. Tuğlaların fırında 900 °C'de pişirildikten sonraki, boyutları, kırılma yükleri, yoğunlukları, ağırlıkları ve basınç dayanımları Tablo 5.11-14 verildiği gibidir.

Tablo 5.11 %100 uçucu kül ,%2 ve %4 oranlarında kaba kil atık malzemesi kullanılarak 900 °C pişirilen tuğlaların basınç dayanım test veri ve sonuçları

	%0				%2				%4			
Tuğla kodu	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Uçucu kül (%)	100	100	100	100	98	98	98	98	96	96	96	96
Bor (%)	0	0	0	0	2	2	2	2	4	4	4	4
Nem (%)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Pres basıncı (MPa)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Tuğla çapı (cm)	4,30	4,38	4,35	4,39	4,21	4,23	4,24	4,16	4,18	4,21	4,22	4,18
Alan (cm ²)	14,51	15,06	14,92	15,20	13,98	14,11	14,11	13,58	13,72	13,98	13,98	13,72
Tuğla yüksekliği (cm)	6	5,94	6,01	5,98	5,09	5,15	5,09	5,65	5,68	5,60	5,44	5,70
Hacim (cm ³)	87,06	89,46	89,67	90,90	71,16	72,66	71,49	76,73	77,93	78,29	76,05	78,20
Ağırlık (g)	92,34	91,13	95,30	94,45	83,12	85,28	88,19	93,44	94,10	90,73	86,98	93,11
Yoğunluk (g/cm ³)	1,06	1,02	1,06	1,04	1,168	1,173	1,23	1,22	1,21	1,16	1,14	1,19
Pişme büzülmesi (%)	5,49	3,74	4,40	3,52	7,47	7,03	6,81	8,57	8,13	7,47	7,25	8,13
Kırılma yükü (kg)	160	50	60	150	1070	1670	1560	1240	1590	1210	1120	1350
Basınç dayanımı (MPa)	1,10	0,33	0,40	0,99	7,65	11,8	11	9,13	11,59	8,66	8,01	9,84

Tablo 5.12 %6 ve %8 oranlarında kaba kil atık malzemesi kullanılarak 900 °C pişirilen tuğlaların basınç dayanım test veri ve sonuçları

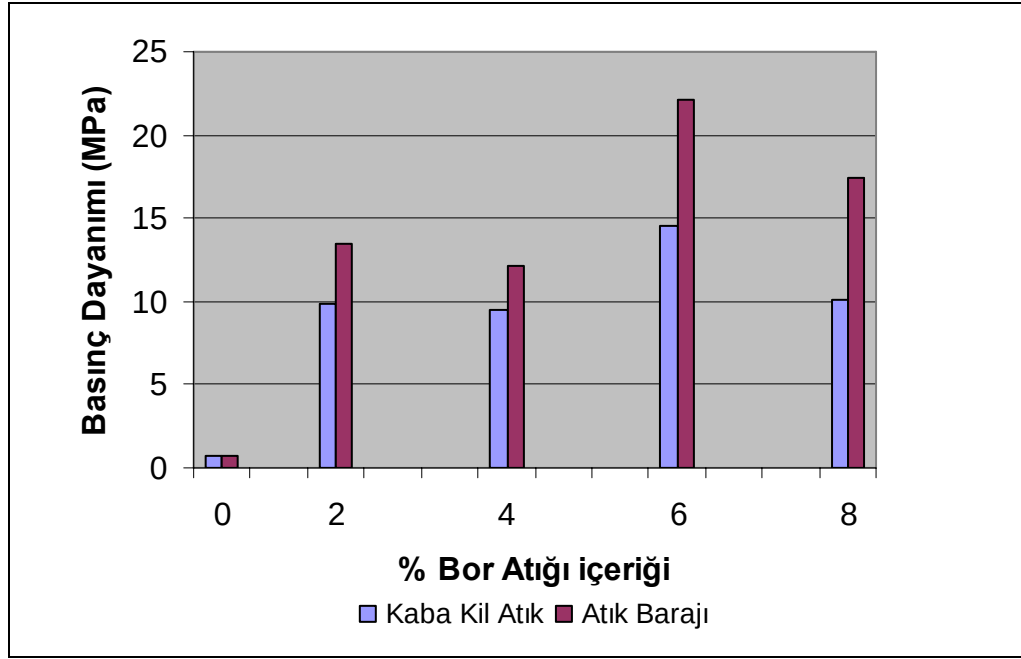
	% 6				%8			
Tuğla kodu	1	2	3	4	1	2	3	4
Uçucu kül (%)	94	94	94	94	92	92	92	92
Bor (%)	6	6	6	6	8	8	8	8
Nem (%)	20	20	20	20	20	20	20	20
Pres basıncı (MPa)	10	10	10	10	10	10	10	10
Tuğla çapı (cm)	4,16	4,11	4,13	4,14	4,3	4,3	4,25	4,20
Alan (cm ²)	13,58	13,32	13,45	13,45	14,51	14,51	14,25	13,85
Tuğla yüksekliği (cm)	5,41	5,54	5,25	5,38	5,32	5,10	5,20	5,50
Hacim (cm ³)	73,47	73,79	70,61	72,36	77,19	74,00	74,10	76,18
Ağırlık (g)	88,95	94,09	86,06	87,27	92	84,49	87,70	89,70
Yoğunluk (gr/cm ³)	1,21	1,28	1,22	1,21	1,19	1,14	1,18	1,18
Pişme büzülmesi (%)	8,57	9,67	9,23	9,01	5,49	5,49	6,59	7,69
Kırılma yükü (kg)	2400	1720	1570	2140	1120	960	1740	1890
Basınç dayanımı (MPa)	17,67	12,91	11,67	15,91	7,72	6,62	12,21	13,65

Tablo 5.13 %2 ve %4 oranlarında atık barajı malzemesi kullanılarak 900 °C pişirilen tuğlaların basınç dayanım test veri ve sonuçları

	% 2				% 4			
Tuğla kodu	1	2	3	4	1	2	3	4
Uçucu kül (%)	98	98	98	98	96	96	96	96
Bor (%)	2	2	2	2	4	4	4	4
Nem (%)	20	20	20	20	20	20	20	20
Pres basıncı (MPa)	10	10	10	10	10	10	10	10
Tuğla çapı (cm)	4,20	4,16	4,15	4,20	4,22	4,23	4,24	4,20
Alan (cm ²)	13,85	13,58	13,58	13,85	13,98	14,11	14,11	13,85
Tuğla yüksekliği (cm)	5,05	5,11	5,09	5,63	4,83	4,96	4,88	5,33
Hacim (cm ³)	69,94	69,39	69,12	77,98	67,52	69,99	68,86	73,82
Ağırlık (g)	83,10	85,53	84,86	91,74	79,47	81,55	84,43	91,06
Yoğunluk (g/cm ³)	1,19	1,23	1,23	1,18	1,18	1,17	1,23	1,23
Pişme büzülmesi (%)	7,69	8,57	8,79	7,69	7,25	7,03	6,81	7,69
Kırılma yükü (kg)	1405	1930	1870	2190	1340	1060	1855	2550
Basınç dayanımı (MPa)	10,14	14,21	13,77	15,81	9,59	7,51	13,15	18,41

Tablo 5.14 %6 ve %8 oranlarında atık barajı malzemesi kullanılarak 900 °C pişirilen tuğlaların basınç dayanım test veri ve sonuçları

	% 6				% 8			
Tuğla kodu	1	2	3	4	1	2	3	4
Uçucu kül (%)	98	98	98	98	96	96	96	96
Bor (%)	2	2	2	2	4	4	4	4
Nem (%)	20	20	20	20	20	20	20	20
Pres basıncı (MPa)	10	10	10	10	10	10	10	10
Tuğla çapı (cm)	4,03	4,01	4,05	4,11	4,03	4,00	4,00	4,19
Alan (cm ²)	12,81	12,69	12,94	13,32	12,81	12,56	12,56	13,85
Tuğla yüksekliği (cm)	5,21	5,21	5,44	5,46	5,24	5,33	5,36	5,39
Hacim (cm ³)	66,74	66,11	70,39	72,73	67,12	66,94	67,32	74,65
Ağırlık (g)	90,64	91,81	95,38	93,53	93,04	93,65	94,40	91,14
Yoğunluk (g/cm ³)	1,36	1,39	1,36	1,29	1,39	1,40	1,40	1,22
Pişme büzülmesi (%)	11,43	11,87	10,99	9,67	11,43	12,09	12,09	7,91
Kırılma yükü (kg)	2190	3830	2460	2950	1770	2600	2330	2300
Basınç dayanımı (MPa)	17,10	30,18	19,01	22,15	13,82	20,7	18,55	16,61



Şekil 5.14 900 °C’de pişirilen tuğlaların % bor atığı içeriklerine göre basınç dayanımı

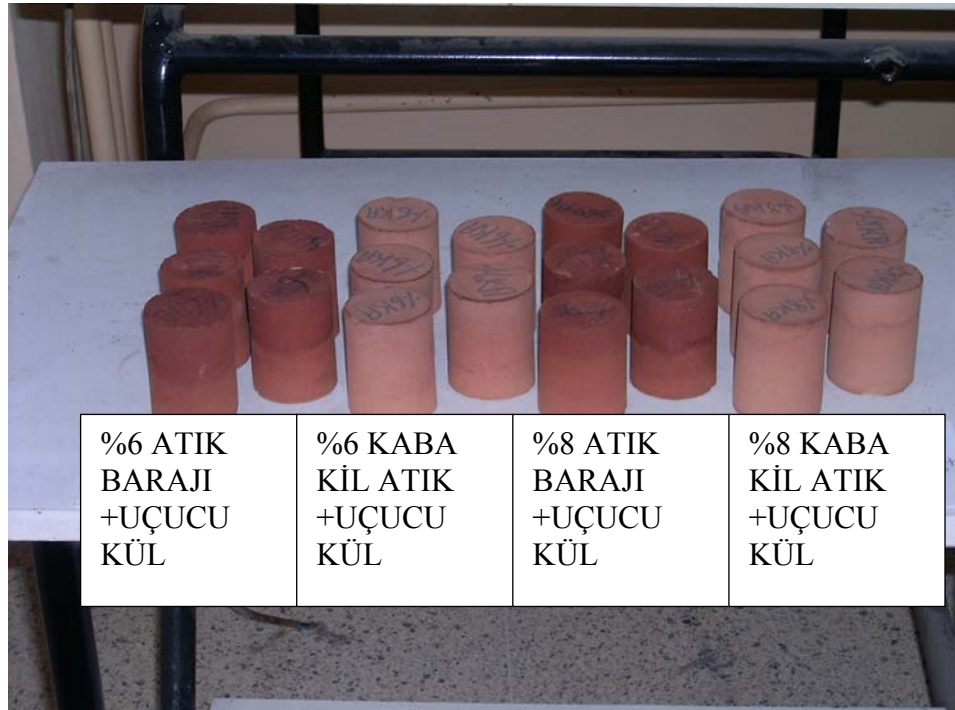
Şekil 5.14 ‘den de görüleceği üzere, kaba kil atık malzemesi ile yapılan tuğlaların içerisindeki, kaba kil atık oranının artmasıyla (%2, %4, %6, %8) tuğlaların basınç dayanımının doğru orantılı olarak attığı gözlenmektedir. Aynı durum atık barajı malzemesi içinde geçerlidir. Buradan anlaşılabileceği üzere, uçucu kül içerisindeki bor atıklarının tuğla dayanımına olumlu etkisinin varlığı görülmektedir. Ancak %6 oranında optimal basınç dayanımı elde edilmiştir. %6’dan daha büyük katkı oranında ise, dayanımın düşüş gösterdiği görülmektedir. Ayrıca kaba kil atık ve atık barajı malzemelerinin tuğla dayanımları üzerindeki etkilerine bakılıp, kıyaslandığı zaman, atık barajı malzemesinin tuğla dayanımını daha fazla attırdığı gözlenmektedir.

5.4.3 800 °C’de Yapılan Tuğla Test Parametreleri

900 °C’de yapılan bu deneysel çalışmaların ardından, Tablo 5.8-10’da verilen karışım oranları kullanılarak, aynı çalışmalar bir de 800 °C için denenmiştir (Şekil 5.15-16). Amaç daha düşük sıcaklıkta da (800 °C) mekanik dayanımın nasıl olacağını tespit etmektir.



Şekil 5.15 %2 ve %4 atık barajı malzemesi ve kaba kil atık malzemesi kullanılarak yapılan tuğlaların fırında 800 °C’de pişirildikten sonraki durumları



Şekil 5.16 %6 ve %8 atık barajı ve kaba kil atık malzemesi kullanılarak yapılan tuğlaların fırında 800 °C’de pişirildikten sonraki durumları

Şekil 5.15 ve Şekil 5.16’de gösterilen tuğlaların basınç dayanımlarını tespit etmek amacıyla, her bir 5 serideki tuğlaların 4 tanesi kırma testine tabi tutulmuştur. Böylelikle tuğlaların kırılma yükleri belirlenmiştir. 800 °C’de pişirilen tuğlaların boyutları, kırılma yükleri, yoğunlukları ve basınç dayanımları Tablo 5.15-18’de verilmiştir.

Tablo 5.15 %100 uçucu kül, %2 ve %4 oranlarında kaba kil atık malzemesi kullanılarak 800 °C pişirilen tuğlaların basınç dayanım test veri ve sonuçları

	% 0				% 2				% 4			
Tuğla kodu	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Uçucu kül (%)	100	100	100	100	98	98	98	98	96	96	96	96
Bor (%)	0	0	0	0	2	2	2	2	4	4	4	4
Nem (%)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Pres basıncı (μ PA)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Tuğla çapı (cm)	4,50	4,46	4,45	4,43	4,42	4,44	4,30	4,42	4,49	4,50	4,42	4,50
Alan (cm ²)	15,90	15,61	15,61	15,48	15,34	15,48	14,51	15,34	15,90	15,90	15,34	15,90
Tuğla yüksekliği (cm)	5,79	5,94	5,91	5,87	5,94	5,75	6,00	5,92	6,08	5,68	6,11	5,64
Hacim (cm ³)	92,06	92,72	92,26	90,87	91,12	89,01	87,06	90,81	96,67	90,31	93,73	89,68
Ağırlık (g)	87,64	91,94	91,48	86,51	93,53	87,76	95,57	92,62	95,04	85,43	93,29	90,28
Yoğunluk (g/cm ³)	0,95	0,99	0,99	0,95	1,03	0,99	1,10	1,10	0,98	0,95	1	1,01
Pişme büzülmesi (%)	1,1	1,98	2,20	2,64	2,86	2,42	5,49	2,86	1,32	1,1	2,86	1,1
Kırılma yükü (kg)	55	130	90	50	190	210	220	60	40	110	200	120
Basınç dayanımı (μ PA))	0,35	0,83	0,58	0,32	1,24	1,36	1,52	0,39	0,23	0,69	1,30	0,76

Tablo 5.16 %6 ve %8 oranlarında kaba kil atık malzemesi kullanılarak 800 °C pişirilen tuğlaların basınç dayanım test veri ve sonuçları

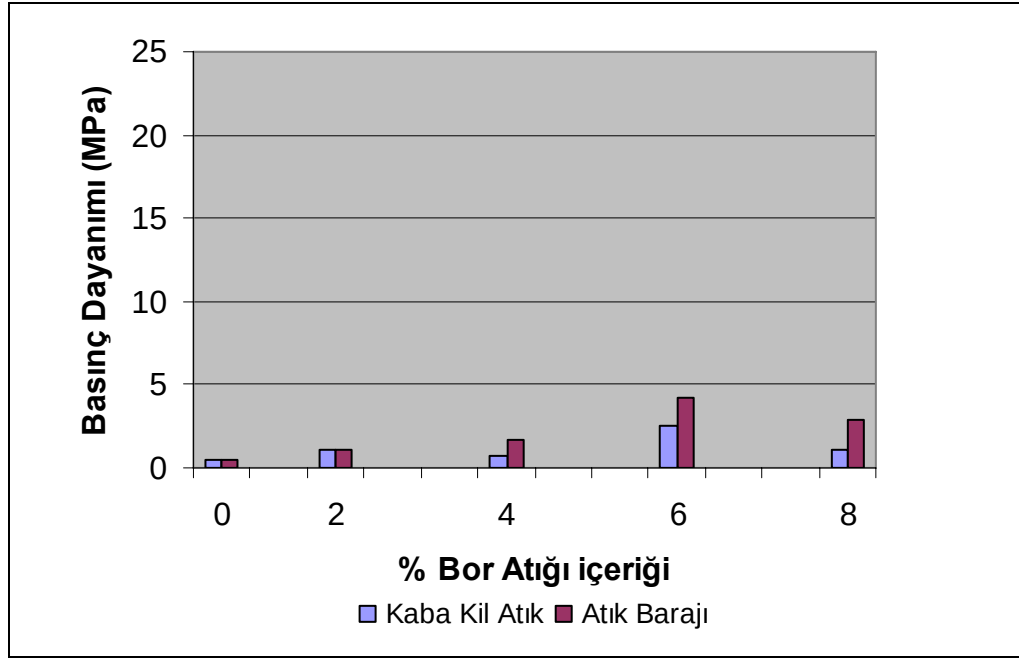
	% 6				%8			
Tuğla kodu	1	2	3	4	1	2	3	4
Uçucu kül (%)	94	94	94	94	92	92	92	92
Bor (%)	6	6	6	6	8	8	8	8
Nem (%)	20	20	20	20	20	20	20	20
Pres basıncı (μ PA)	10	10	10	10	10	10	10	10
Tuğla çapı (cm)	4,38	4,33	4,38	4,41	4,51	4,49	4,48	4,42
Alan (cm ²)	15,06	14,79	15,06	15,34	16,04	15,90	15,76	15,34
Tuğla yüksekliği (cm)	5,84	5,65	5,72	5,84	6,01	5,88	5,99	5,91
Hacim (cm ³)	87,95	83,56	86,14	89,59	96,40	93,49	94,40	90,66
Ağırlık (g)	92,02	89,71	88,30	92,84	94,14	94,56	95,12	94,74
Yoğunluk (g/cm ³)	1,05	1,07	1,03	1,04	0,98	1,01	1,00	1,05
Pişme büzülmesi (%)	3,74	4,84	3,74	3,08	0,88	1,32	1,54	2,86
Kırılma yükü (kg)	360	620	360	420	100	130	160	270
Basınç dayanımı (μ PA)	2,39	4,19	2,39	2,74	0,62	0,82	1,02	1,76

Tablo 5.17 %2 ve %4 oranlarında atık barajı malzemesi kullanılarak 800 °C pişirilen tuğlaların basınç dayanım veri ve sonuçları

	% 2				% 4			
Tuğla kodu	1	2	3	4	1	2	3	4
Uçucu kül (%)	98	98	98	98	96	96	96	96
Bor (%)	2	2	2	2	4	4	4	4
Nem (%)	20	20	20	20	20	20	20	20
Pres basıncı (μPA)	10	10	10	10	10	10	10	10
Tuğla çapı (cm)	4,38	4,48	4,44	4,41	4,41	4,33	4,44	4,50
Alan (cm ²)	15,06	15,76	15,48	15,34	15,34	14,79	15,48	15,90
Tuğla yüksekliği (cm)	5,52	5,59	5,72	5,69	5,92	5,82	5,72	5,33
Hacim (cm ³)	83,13	88,10	88,55	87,28	90,81	86,08	88,55	84,75
Ağırlık (g)	91,22	84,22	88,32	87,79	95,00	92,75	88,12	85,16
Yoğunluk (gr/cm ³)	1,10	0,96	1	1	1,05	1,08	1	1
Pişme büzülmesi (%)	3,74	1,54	2,42	3,08	3,08	4,84	2,42	1,1
Kırılma yükü (kg)	270	100	90	180	290	360	230	170
Basınç dayanımı (μPA)	1,79	0,64	0,58	1,17	1,89	2,43	1,49	1,07

Tablo 5.18 %6 ve %8 oranlarında atık barajı malzemesi kullanılarak 800 °C pişirilen tuğlaların basınç dayanım test veri ve sonuçları

	% 6				% 8			
Tuğla kodu	1	2	3	4	1	2	3	4
Uçucu kül (%)	98	98	98	98	96	96	96	96
Bor (%)	2	2	2	2	4	4	4	4
Nem (%)	20	20	20	20	20	20	20	20
Pres basıncı (μ PA)	10	10	10	10	10	10	10	10
Tuğla çapı (cm)	4,36	4,30	4,35	4,30	4,44	4,38	4,41	4,31
Alan (cm ²)	14,92	14,51	14,92	14,51	15,48	15,06	15,34	14,65
Tuğla yüksekliği (cm)	5,91	5,58	5,70	5,85	5,94	5,88	5,64	5,69
Hacim (cm ³)	88,18	80,97	85,04	84,88	91,95	88,55	86,52	83,36
Ağırlık (g)	96,04	88,47	91,23	93,40	94,97	94,96	89,84	91,72
Yoğunluk (g/cm ³)	1,09	1,09	1,07	1,10	1,03	1,07	1,04	1,10
Pişme büzülmesi (%)	4,18	5,49	4,40	5,49	2,42	3,74	3,08	5,27
Kırılma yükü (kg)	690	550	540	720	340	490	480	1060
Basınç dayanımı (μ PA)	4,63	3,79	3,62	4,96	2,20	3,25	3,13	7,24



Şekil 5.17 800 °C’de pişirilen tuğlaların % bor atığı içeriklerine göre basınç dayanımı

Şekil 5.17’de görüldüğü gibi 800 °C’de pişirilen tuğlaların basınç dayanımlarının, 900 °C’de pişirilen tuğlalara göre çok düşük çıktığı gözlenmektedir. Ancak 800 °C’de yapılan bu testlerde, 900 °C’de yapılan testlerde ölçülen basınç dayanımlarına bir paralellik olduğu söylenebilir. % 6 atık barajı ve % 6 kaba kil atık malzemesi ile yapılan tuğlaların basınç dayanımlarının diğerlerine oranla biraz daha yüksek olduğu gözlenmektedir. Bu durum 900 °C içinde geçerlidir.

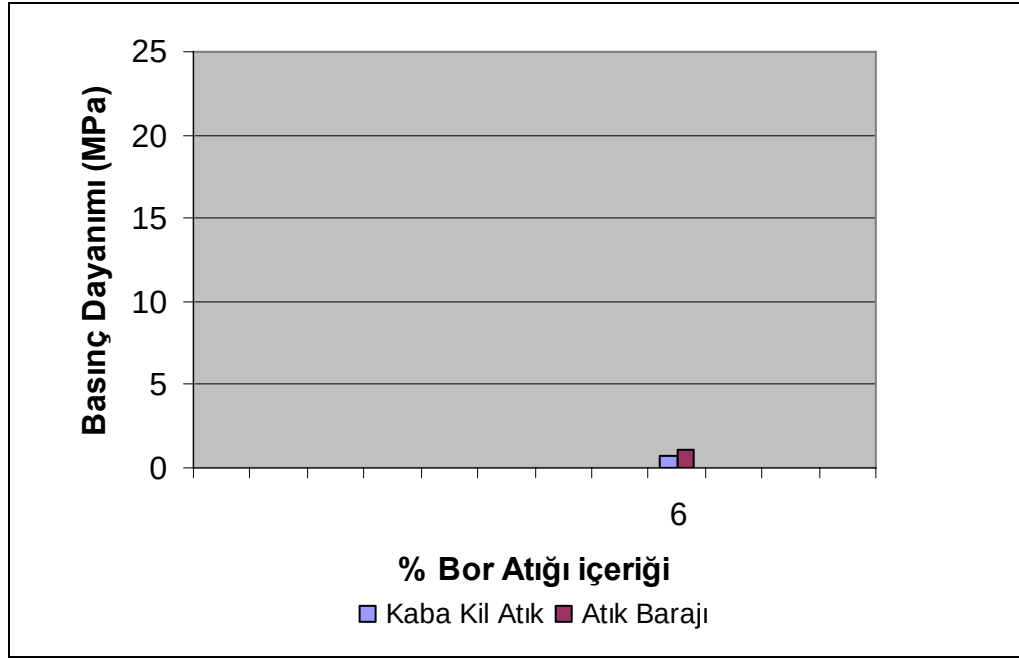
5.4.4 850 °C’de Yapılan Tuğla Test Parametreleri

800 °C ve 900 °C’de yapılan çalışmaların ışığı altında, %6 oranında bor atık malzemesi içeren tuğlalar optimal olarak kabul edilmiştir.

Çalışmanın bu aşamasında optimal olarak kabul edilen, %6 oranında kaba kil atık ve atık barajı içeren uçucu küllü tuğlalar hazırlanarak 850 °C’de pişirilmiştir. Buradaki amaç ara sıcaklık olan 850 °C’de tuğlaların basınç dayanımlarının ne olacağını gözlemlemektir. Bu testlerin sonuçları Tablo 5.19 ve Şekil 5.18’de verildiği gibidir.

Tablo 5.19 %6 oranında bor atıkları kullanılarak 850 °C’de pişirilen tuğlaların basınç dayanım test veri ve sonuçları

	%6 Kaba kil atık					%6 Atık barajı				
Tuğla kodu	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Uçucu kül (%)	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94
Bor (%)	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Nem (%)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Pres basıncı (μ PA)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Tuğla çapı (cm)	4,53	4,52	4,50	4,50	4,53	4,46	4,48	4,48	4,45	4,48
Alan (cm ²)	16,18	16,04	15,90	15,90	16,18	15,61	15,76	15,76	15,61	15,76
Tuğla yüksekliği (cm)	5,95	6,16	5,95	6,28	5,89	6,08	5,94	6,10	5,84	6,02
Hacim (cm ³)	96,27	98,81	94,61	99,85	95,30	94,91	93,61	96,14	91,16	94,88
Ağırlık (g)	91,73	95,52	93,64	96,20	93,42	96,36	95,35	96,39	94,30	96,17
Yoğunluk (g/cm ³)	0,95	0,97	0,99	0,96	0,98	1,02	1,02	1,00	1,03	1,01
Pişme büzülmesi (%)	0,44	0,66	1,10	1,10	0,44	1,98	1,54	1,54	2,20	1,54
Kırılma yükü (kg)	80	100	110	140	120	160	210	200	195	120
Basınç dayanımı (μ PA))	0,49	0,62	0,69	0,88	0,74	1,03	1,33	1,27	1,25	0,76



Şekil 5.18 %6 bor oranının da 850 °C’de pişirilen tuğlaların % bor atığı içeriklerine göre basınç dayanımı

Şekil 5.18’de görüleceği üzere 850°C’de elde edilen tuğlaların mekanik dayanımları oldukça düşüktür.

5.5 Optimal şartlarda yapılan diğer testler

Yapılan pişirme testleri sonucunda 900°C’de pişirilmiş %6 oranında bor atığı içerikli, uçucu küllü tuğlalar, en yüksek basınç dayanımına sahip oldukları için optimal olarak bu tuğlalar seçilmiştir.

5.5.1 Isı İletim Katsayısının Tespiti

Optimum şartlarda hazırlanmış uçucu küllü tuğlaların ısı iletim katsayıları SHOWA DENKO marka Shotherm QTM tipi cihazı ile Hot-Wire yöntemiyle tespit edilmiştir. %6 oranında kaba kil atık malzemesi ile yapılan uçucu küllü tuğlaların ısı iletim katsayısı $0,28 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ve %6 oranında atık barajı içeren tuğlaların ise $0,48 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ olarak tespit edilmiştir.

5.5.2 Su Emme

%6 oranında atık içeren iki tip uçucu küllü tuğların su emme değerleri aşağıdaki gibidir.

Tablo 5.20 %6 oranın da atık içeren tuğların su emme değerleri

Kaba kil atık			Atık barajı		
İlk Ağırlık	Son Ağırlık	% Su Emme	İlk Ağırlık	Son Ağırlık	% Su Emme
94,25	125,12	32,75	94,47	122,38	29,54

Buradan da görüleceği üzere, su emme değerleri genel tuğla standartlarına göre (TS 705) oldukça yüksektir. Bu nedenle bu tuğlaların yapı sektöründe kullanılması, bu özelliği bakımından uygun görülmemektedir.

Su emme oranlarının daha düşük seviyelere çekilebilmesi için tuğlaya hidrofobik özellik kazandırabilecek malzemelerinde, katkı maddesi olarak kullanılabilirliğinin ayrıca araştırılması yerinde olacaktır.

BÖLÜM ALTI

SONUÇLAR

Seyitömer Termik Santrali uçucu külleri ile Kütahya Emet bor atıklarından kaba kil atık ve atık barajı atıklarından optimal olarak elde edilen tuğlaların özelliklerine ait sonuçlar Tablo 5.21’de verilmiştir.

Tablo 5.21 Optimum olarak belirlenen tuğla özellikleri

	Uçucu Kül + Kaba Kil Atık ile Yapılan Tuğla Karışım Oranları	Uçucu kül + Atık Barajı ile Yapılan Tuğla Karışım Oranları	Standart Tuğla (TS 705)
Uçucu kül (%)	%94	%94	tuğla tipi 1.8/100
Bor (%)	%6	%6	
Nem (%)	%20	%20	
Pres basıncı (MPa)	10	10	
Piştirme süresi (h)	1	1	
Piştirme sıcaklığı (°C)	900	900	
Pişme büzülmesi (%)	9,12	10,99	
Yoğunluk (g/cm ³)	1,23	1,35	1,8
Basınç Dayanımı (MPa)	15,54	22,11	min 7,8
İletkenlik (W/m ⁻¹ K ⁻¹)	0,28	0,48	0,7
Su Emme (%)	32,75	29,54	max 18

Bu çalışmada şu önemli sonuçlara varılmıştır:

- 1) Seyitömer uçucu küllerinin ve 700 °C de kalsine edilmiş %6 oranında Kütahya emet bor atıklarının %20 nem oranında karıştırılarak, 10 MPa pres basıncı ile sıkıştırılması sonucunda basınç dayanımları yüksek tuğlalar elde edilmiştir.
- 2) Kaba kil atık katkılı uçucu küllü tuğlaların basınç dayanımlarının, atık barajı katkılı tuğlalara göre daha düşük olduğu görülmektedir.

- 3) Optimum pişirme sıcaklığı 900 °C olarak belirlenmiştir. Çünkü 800 °C ve 850 °C sıcaklıklarında daha düşük basınç dayanımları elde edilmiştir.
- 4) Kaba kil atık katkılı uçucu küllü tuğlaların yoğunlukları 1,23 g/cm³, atık barajı katkılı tuğlaların yoğunlukları ise 1,35 g/cm³ civarındadır. Buradan görüldüğü üzere bu tuğlalar, geleneksel tuğlalardan (yoğunluk 1,5-1,8 g/cm³) daha hafiftirler.
- 5) Kaba kil atık katkılı uçucu küllü tuğlaların ısı iletim katsayısı 0,28 W/m⁻¹ K⁻¹ ve atık barajı katkılı tuğlaların ise 0,48 W/m⁻¹ K⁻¹ tespit edilmiştir. Bu tuğlaların TS 705 standartlarında tanımlanan tuğlalara (1800 kg/m³ pişmiş tuğlada: 0,7 W/m⁻¹ K⁻¹) ısı yalıtımının daha yüksek olduğu belirlenmiştir.
- 6) Bu çalışmada elde edilen uçucu küllü tuğlaların su emme oranları %28-33 arasındadır.

Sonuç olarak bu çalışmada geliştirilen tuğla tipinin ekonomiye katma değer getirecek bir ürün olarak inşaat sektöründe kullanılabileceği görülmektedir. Bu tip tuğlaların üretilerek ekonomiye kazandırılmalarının yanı sıra termik santraller için yılda 10 milyon tonun üzerinde çevresel bir sorun olarak duran uçucu küllerin değerlendirilecek olmasının getireceği katkı şüphesiz daha büyüktür. Ancak, burada elde edilen tuğlaların su emme oranlarının düşürülmesi yönünde çalışmalar yaparak elde edilebilecek dayanımlı tuğlaların sektörde yer alabilmesi daha kolay olabilecektir. Dolayısıyla bu çalışmanın devamı kapsamında hidrofobik özellik kazandırabilecek katkı maddelerinin araştırılması ve tuğlaların çevresel etkilerinin araştırılması yerinde olacaktır.

KAYNAKLAR

- Ağar, E., ve Kara,D. (2003), “Termik Santral Uçucu Küllerinin Tuğla Yapımında Kullanılabilirliğinin Araştırılması”. D.E.Ü. Maden Müh. Bitirme Tezi, İzmir.
- Aruntaş, H., (2006), “Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli”. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, Cilt: 21, No: 1, 193-203, 2006.
- Bayat, O., & Toraman, O. O. Y. (1996), in proc. 1st. Int. Symp. On Mine Enviroment of Engineering, Kütahya Dumlupınar and Brunell Universty, pp. 222-229.
- Çalık, A. (2002), “Türkiye’nin Bor Madenleri ve Özellikleri”. *Mühendis ve Makine Dergisi*, Sayı: 508, 36-41 Ankara
www.mmo.org.tr/muhendis&makina/arsiv/2002/mayis/guncel_turkiye_bor.htm_91k
- Demir, İ. (2005), “Uçucu Külün Hafif Yapı Malzemesi Üretiminde Kullanılması” A.K.Ü., T.E.F., Y.E.B., *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi* 2005. (1) 21-24 Afyon.
- DPT, 2001 (Bor Tuzları-Trona-Kaya Tuzu- Sodyum Sülfat-Stransiyum) Çalışma Grubu Raporu Cilt: II, Ankara
- EGİAD Dergisi*, 2004 “Dünya Bor Stratejisi ve Borun Türkiye İçin Önemi”
- TEAŞ, (1999), Seyitömer ve Tunçbilek Termik Santralleri Küllerinin Kimyasal Analiz Raporları

Tokyay, M., ve Erdoğan, K., (1998), Türkiye Termik Santrallerinde Elde Edilen Uçucu küllerin Karakterizasyonu, TÇMB Yayınları, No: 98,3, Ankara.

Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğınboğalı, A. (2004). “Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Fiziksel Özellikleri”. (2. Baskı). Ankara, TÇMB / ARGE / 103.03

Yazıcı, H. (2004), “Termik Santral Atığı Yapay Alçı-Uçucu Kül- Taban Külü Esaslı Yapı Malzemesi Geliştirilmesi”. D.E.Ü.F.B.E. Doktora Tezi, 2004, İzmir.

Birlik TV ,(04.09.2005) Güncellenme tarihi,.”Bor Elementi”.

<http://www.btv.com.tr/ekonomi.ht>

http://www.boraxtr.com/boraxtr/Anadosya/bor_madennedir.html

Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, (2006) <http://www.etimaden.gov.tr>

Türkiye Mühendis ve Mimarlar Odaları Birliği (2006),

http://www.maden.org.tr/genel/bizden_detay.php?kal

<http://www.maden.org.tr/yeni3/yayınlar/raporlar/borraporu.htm> (Türkiye Mühendis ve Mimarlar Odaları Birliği) (TMMOB’un sayfası)