

**KÜL SINIFLANDIRMA TESİSİNDE FARKLI AKIŞ KOLLARI İÇİN
ÇİMENTO VE BETON KALİTE DEĞERLENDİRMESİNİN
YAPILMASI**

**CEMENT AND CONCRETE QUALITY ASSESSMENT FOR
DIFFERENT STREAMS IN THE ASH CLASSIFICATION PLANT**

ERGİN SARP ZENCİRCİ

DR. ÖĞR. ÜYESİ OKAY ALTUN

TEZ DANIŞMANI

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Maden Mühendisliğinin Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır.

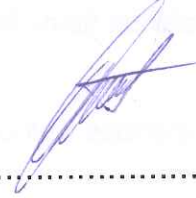
2019

Ergin Sarp ZENCİRCİ'nin hazırladığı "KÜL SINIFLANDIRMA TESİSİNDE FARKLI AKIŞ KOLLARI İÇİN ÇİMENTO VE BETON KALİTE DEĞERLENDİRMESİNİN YAPILMASI" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Yaşar UÇBAŞ
Başkan



Dr. Öğr. Üyesi Okay ALTUN
Danışman



Prof. Dr. Volkan BOZKURT
Üye



Prof. Dr. Ahmet Hakan BENZER
Üye



Doç. Dr. Namık Atakan AYDOĞAN
Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü tarafından YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak \ \ tarihinde onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

Beyan ederim.

17/01/2019

ERGİN SARP ZENCİRCİ

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan "*Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge*" kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi/H.Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren ay ertelenmiştir.
- Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmiştir.

17/01/2019


ERGİN SARP ZENCİRCİ

ÖZET

KÜL SINIFLANDIRMA TESİSİNDE FARKLI AKIŞ KOLLARI İÇİN ÇİMENTO VE BETON KALİTE DEĞERLENDİRMESİNİN YAPILMASI

ERGİN SARP ZENCİRCİ

Yüksek Lisans, Maden Mühendisliği

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Okay ALTUN

Ocak 2019, 67 sayfa

Dünyada ve ülkemizde giderek artan nüfus ve sanayileşme, yoğun enerji ihtiyaçlarını beraberinde getirmekte ve bu sebeple enerji üretimi giderek artmaktadır. Ülkemizde enerji üretiminde termik santraller önemli bir role sahiptir. Türkiye’de özellikle düşük kalorili kömürlerin kullanıldığı santrallerde büyük kapasiteler tercih edilmiştir. Kömürler toz haline getirildikten sonra termik santrallerde yakılarak istenilen enerji üretimi sağlanırken, bunun yanında atık olarak uçucu kül üretilmektedir. Uçucu küller doğaya doğrudan salınamazlar. Bu sebeple filtre aracılığıyla tutularak depolanmaktadırlar. Fakat bu kül depolanma işleminin çevreye olağan etkileri bulunmaktadır. Öte yandan, uçucu küller su ile olan reaktivitesi dolayısıyla beton ve çimento sektörü tarafından tercih edilmektedir. Dünya’da harcanan toplam enerjinin %2’si çimento üretim işleminde harcanmaktadır. Aynı zamanda, insan kaynaklı karbondioksit salınımının %7’si çimento sektörü tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu kadar büyük enerji tüketimine ve karbon salınımına sahip çimento sektörü, uçucu kül kullanımı ile daha çevreci hale gelebilecektir.

Bu tez çalışması kapsamında, Seyitömer uçucu külünün çimento sektöründe kullanım olanaklarının araştırılması ve Seyitömer uçucu külü hakkında kapsamlı

bilgiler elde edilmesi amaçlanmıştır. Yapılan çalışmada Seyitömer kül sınıflandırma tesisinden alınan kül numuneleri ve Bursa Çimento Fabrikasından alınan CEM I 42.5 ve Cem II/A-M (P-L) 42.5 R numuneleri kullanılmıştır. Çalışma 3 ana başlık altında gerçekleştirilmiştir.

İlk kısımda kül sınıflandırma tesisinde bulunan havalı sınıflandırıcının parametreleri değiştirilerek farklı incelikte kül numuneleri elde edilmiş ve %25 oranında çimentoya katılarak dayanım testlerine tabii tutulmuştur. En ince kül değerinde (D_{50} : 19 μ m) 7 günlük dayanımda %10, 28 günlük dayanımda ise %7,8 artış sağlanmıştır.

Çalışmanın ikinci kısmında; ham, atık ve ince/ürün akış kolundan alınan numuneler Bond değirmeni yardımıyla farklı incelik değerlerine öğütülmüştür. Elde edilen farklı inceliklerdeki uçucu küller, %25 oranında çimentoya katılmıştır. Yapılan değerlendirmelerde benzer inceliklere sahip farklı akış kollarından kül içeren çimento numunelerinde yakın dayanım değerleri elde edilmiştir. Ek olarak, numuneler beton testlerine de tabii tutulmuştur. Atık ve ham kül öğütüldüğünde referans olarak belirlenen ince/ürün kül ile benzer çökme değerleri yakalamıştır.

Çalışmanın son kısmında, birlikte öğütme kullanılarak erken dayanımda meydana gelen kaybın önüne geçilmesi ve kül eklemesinin artırılabilirliği incelenmiştir. Birlikte öğütmenin uygulandığı karışım numunelerin dayanım değerleri yalnızca külün öğütüldüğü karışımlardan daha yüksek çıkmıştır. Birlikte öğütme ile kül katkısı %45'e kadar çıkartılabilmiş ve karışımın 28 günlük dayanımı referans numunesinden hala %4,6 yüksek elde edilmiştir. Ek olarak, kalite verileri göz önünde bulundurularak ince öğütme sistemi ile yapılabilecek olası iyileştirme değerlendirmelerinde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Uçucu kül, İnce öğütme, Çimento, Yüksek erken dayanım

ABSTRACT

CEMENT AND CONCRETE QUALITY ASSESSMENT FOR DIFFERENT STREAMS IN THE ASH CLASSIFICATION PLANT

ERGIN SARP ZENCİRCİ

Master of Science, Mining Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Okay ALTUN

January 2019, 67 pages

Increasing population and industrialization in the world and in our country bring intensive energy needs and therefore energy production is gradually increasing. In our country, thermal power plants have an important role in energy production. In Turkey mainly at low-power plants that use coal, large capacity are preferred. After the coal is turned into powder, it is burned in thermal power plants to produce the desired energy, while fly ash is produced as waste. Fly ashes cannot be released directly into the nature. For this reason, they are stored with the filter. However, this ash storage process has the ordinary effects on the environment. On the other hand, fly ash is preferred by concrete and cement industry due to its reactivity with water. 2% of the total energy consumed in the world is consumed in the cement manufacturing process. At the same time, 7% of the human-induced carbon dioxide emissions are realized by the cement sector. The cement sector with such large energy consumption and carbon emissions will be more environment friendly with the use of fly ash.

In this thesis, it is aimed to investigate the possibilities of use of Seyitömer fly ash in cement industry and to obtain comprehensive information about Seyitömer fly ash. In this study, ash samples taken from Seyitömer ash classification plant and CEM I

42.5 and CEM II / A-M (P-L) 42.5 R samples taken from Bursa Cement Plant were used. The study was carried out under 3 main headings.

In the first part, different fly ash samples were obtained by varying the parameters of air classifier in the ash classification plant, and 25% was added to cement and subjected to strength tests. 10% strength at 7 days strength and 7.8% increase at 28 days strength has been achieved with the finest ash value (D_{50} : 19 μ m).

In the second part of the study; samples taken from the raw, waste and fine/product flow streams are ground to different fineness values with the aid of Bond mill. The fly ash obtained from different subtleties was added to the cement by 25%. In the evaluations, similar strengths were obtained from the different flow streams of the cement samples containing ash in the near strength values were obtained. In addition, samples were also subjected to concrete tests. When the waste and raw ash were ground, it had similar slump and spreading values as the reference ash.

In the last part of the study, it was investigated to prevent loss in early strength by using inter grinding and increase the ash addition. The strength values of the mixture samples where inter grinding was applied were higher than the mixtures where only the ash was ground. The ash additive can be increased up to 45% by inter grinding and the 28-day strength of the mixture is still higher than the reference sample by 4.6%. In addition, possible improvement evaluations were made with the fine grinding system in view of the quality data.

Keywords: Fly ash, Fine grinding, Cement, High-early age strength

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince Maden Mühendisliği Bölüm Başkanlığı görevinde bulunan Sayın Prof. Dr. Ahmet Hakan Benzer ve Sayın Prof. Dr. Zafir Ekmekçi'ye,

Yüksek lisans çalışmalarım boyunca fikir ve bilgileriyle yol gösteren, motivasyon desteği ile bu çalışmayı mümkün kılan kıymetli danışman hocam, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Okay Altun'a,

Olumlu görüşleri, fikirleri ve eleştirileri ile tezimin son halini almasına katkıda bulunan jüri üyelerim Prof. Dr. Yaşar Uçbaşı, Prof. Dr. A. Hakan Benzer, Prof. Dr. Volkan Bozkurt ve Doç. Dr. Namık Atakan Aydoğan'a;

Numunelerin temininde sağladıkları yardım ve laboratuvar çalışmalarında gösterdikleri destek dolayısıyla Bursa Çimento A.Ş. genel müdürü Osman Nemli ve performans müdürü Levent Onat'a,

Bilgi ve tecrübelerini paylaşarak çalışmalarına katkı sağlayan Dr. Deniz Altun ve Dr. Nurettin Alper Toprak'a,

Süreç içerisinde manevi desteklerini esirgemeyen saygıdeğer hocalarım Dr. Emre Yılmazkaya ve Dr. Özgür Özcan'a,

Manevi desteklerini her zaman hissettiğim ve yanımda olan sevgili çalışma arkadaşlarım ve dostlarım Serdar Sait Çolak ve Ecem Karahan'a,

Çalışmalarım sırasında gösterdikleri sabır, özen ve yardımlarından dolayı çalışma arkadaşlarım Ertuna Çakır, Cem Sarıkaya, Seda Özçelik ve Ahad Aghlamandi Harzanagh'a,

Yardımlarından dolayı bölüm teknisyenleri Mustafa Yılmaz, Işın Aslıyüksek'e ve bölüm sekreterleri Sıddık Yılmazoğlu ve Birgül Atay'a,

Manevi desteği, sabrı ve sevgisi ile yanımda olan Ece Kocamaz'a,

Sağladıkları maddi ve manevi destek için annem Elçin Balta Zencirci, babam Nusret Zencirci, kardeşim Gizem Zencirci ve tüm dostlarıma en içten duygularıyla teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR.....	v
ÇİZELGELER.....	viii
ŞEKİLLER.....	ix
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1. Çimento Üretimi.....	3
2.2. Çimento Üretiminde Kullanılan Mineral Katkılar	5
2.3. Uçucu Küller	8
2.3.1. Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri	8
2.3.2. Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri	11
2.3.3. Uçucu Küllerin Çimento ve Betondaki Kullanımı.....	12
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	17
3.1. Kullanılan Ekipmanlar	17
3.1.1. Havalı Sınıflandırıcı	17
3.1.2. Bond Değirmeni	18
3.1.3. Lazerli Ölçüm Cihazı	18
3.1.4. Vicat Aleti.....	19
3.1.5. Çökme Test Düzeneği.....	19
3.2. Deney Numuneleri.....	20
3.2.1. Havalı sınıflandırıcı üzerinde yapılan çalışmalar	22
3.2.2. Sınıflandırıcı akış kollarında yapılan çalışmalar ve kalite verileri üzerine etkilerinin incelenmesi	24
3.2.3. İnce/ürün akış kolu üzerinde yürütülen çalışmalar.....	28
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	31
4.1. Havalı Sınıflandırıcı parametrelerinin değiştirilmesi ile yapılan dayanım çalışmaları.....	31
4.2. Havalı Sınıflandırıcı Etrafında Akış Kollarında Yürütülen Öğütme Çalışmaları ...	32
4.3. İnce/ürün Kül Üzerinde Yapılan Çalışmalar	40
4.3.1. İnce Akış Kolu Üzerinde Farklı Katkı Oranlarının ve Farklı Öğütme Yöntemlerinin Denendiği Çalışmalar	40
4.3.2. Çimento ve Uçucu Külün Karışım İçerisindeki Öğütme Davranışı.....	45
5. SONUÇLAR	48
6. ÖNERİLER.....	50
7. KAYNAKLAR	53

ÖZGEÇMİŞ.....	58
---------------	----

ÇİZELGELER

Sayfa

Çizelge 2.1. Bazı doğal ve yapay puzolanların yüzde (%) oksit miktarları	5
Çizelge 2.2. F ve C sınıfı uçucu küllere ait kimyasal kompozisyonlar	11
Çizelge 2.3. Türkiye'deki uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları	12
Çizelge 3.1. Havalı sınıflandırıcının teknik özellikleri	18
Çizelge 3.2. Bilya şarj özellikleri	18
Çizelge 3.3. Numunelere ait kimyasal kompozisyonlar	21
Çizelge 3.4. Numune isimleri ve kısaltmaları	24
Çizelge 3.5. Farklı akış kollarındaki uçucu küllere ait kimyasal kompozisyonlar	25
Çizelge 3.6. Numunelere ait Blaine, bakiye ve özgül ağırlık analizleri	26
Çizelge 3.7. En uygun uçucu kül oranının belirlenmesi için yapılan test çalışması	30
Çizelge 3.8. Karışımlara ait Blaine, %su, priz başlangıç ve bitiş süreleri, genleşme ve D_{50} değerleri	30
Çizelge 4.1. Uçucu küllere ait D_{50} ve Blaine değerleri	31
Çizelge 4.2. Havalı Sınıflandırıcı etrafında yürütülen incelik çalışmasının özgül ağırlık değerleri üzerine etkisi	33
Çizelge 4.3. Farklı akış kollarına ait kimyasal kompozisyonlar	33
Çizelge 4.4. Farklı incelikteki uçucu küllerin dayanım sonuçları	36
Çizelge 4.5. Ham küle ait beton dayanım ve çökme değerleri	38
Çizelge 4.6. Atık küle ait beton dayanım ve çökme değerleri	39
Çizelge 4.7. İnce/ürün küle ait beton dayanım ve çökme değerleri	39
Çizelge 4.8. Uçucu küllerin ve karışımların D_{50} değerleri	42
Çizelge 4.9. Priz sürelerinin karşılaştırılması	44
Çizelge 4.10. Besleme ve ürüne ait tane boyu dağılımları	46
Çizelge 4.11. Besleme ve ürünün fraksiyonel kül içerikleri	46
Çizelge 4.12. Uçucu kül ve diğer bileşenlerin fraksiyonel yüzdeleri	47

ŞEKİLLER

Sayfa

Şekil 2.1. Çimento Üretim Hattı: [11].....	3
Şekil 2.2. Farklı kül tutma mekanizmalarına ait tane boyu dağılımları.....	9
Şekil 3.1. Havalı sınıflandırıcının basit gösterimi.....	17
Şekil 3.2. Bond değirmeni.....	18
Şekil 3.3. Lazerli ölçüm cihazı.....	19
Şekil 3.4. Vicat Aleti.....	19
Şekil 3.5. Çökme deneyinde kullanılan aletler ve deneyin yapılışı[69].....	20
Şekil 3.6. Numunelere ait tane boyu dağılımları.....	22
Şekil 3.7. İnce akış kolundan alınan numunelere ait tane boyu dağılımları.....	23
Şekil 3.8. Farklı akış kollarında yürütülen incelik çalışmasına ait tane boyu dağılımları....	27
Şekil 3.9. Farklı inceliklerdeki uçucu külün ve çimentonun tane boyu dağılımı.....	28
Şekil 3.10. Karışımlara ait tane boyu dağılımları.....	29
Şekil 4.1. Havalı sınıflandırıcı etrafı yapılan incelik çalışması dayanım sonuçları.....	31
Şekil 4.2. Farklı akış kolları için ortalama boy ile Blaine değeri değişimi.....	34
Şekil 4.3. Sırasıyla öğütülmemiş ve öğütülmüş ince/ürün külün morfolojisine ait fotoğraflar (D ₅₀ : 20 µm).....	35
Şekil 4.4. Sırasıyla öğütülmemiş ve öğütülmüş ham külün morfolojisine ait fotoğraflar (D ₅₀ : 20 µm).....	35
Şekil 4.5. Sırasıyla öğütülmemiş ve öğütülmüş kaba/atık külün morfolojisine ait fotoğraflar (D ₅₀ : 19 µm).....	36
Şekil 4.6. Sırasıyla ince/ürün, atık ve ham küllerin aynı D ₅₀ değerindeki dayanımları.....	37
Şekil 4.7. D ₅₀ 20 µm için ham, atık ve ince/ürün kül için çökme değerleri.....	39
Şekil 4.8. Farklı incelikte uçucu küle sahip karışımların referans numunesiyle karşılaştırılması (%30 uçucu kül içeriği).....	40
Şekil 4.9. Karışımlara ait tane boyu dağılımları (%30 Uçucu kül içeriği).....	41
Şekil 4.10. Farklı kül içeriğinde ve farklı incelikteki uçucu kül içeren karışımların karşılaştırılması.....	43
Şekil 4.11. Farklı kül içeriğindeki ve farklı incelikteki uçucu kül içeren karışımlara ait tane boyu dağılımları.....	43
Şekil 6.1. Sınıflandırıcı atık akış kolunun ince öğütme değirmeni ile öğütülmesi.....	51
Şekil 6.2. Sınıflandırıcı ince akış kolunun çimento ile birlikte ince öğütme değirmeni kullanılarak öğütülmesi.....	52

1. GİRİŞ

Dünyada ve ülkemizde giderek artan nüfus ve sanayileşme, enerji ihtiyacını da beraberinde getirmekte ve bu nedenle de enerji üretimine duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır. Türkiye’de kömürün yakıt olarak kullanıldığı termik santrallerin enerji üretiminde %33’lük bir paya sahip olduğu belirtilmektedir [1].

Ülkemizde, özellikle düşük kalorili kömürlerin kullanıldığı santraller yüksek kapasite değerlerinde işletilmektedir. Ancak, düşük kalorili kömürlerin işletilmesi, atık olarak daha yüksek oranlarda uçucu külün açığa çıkmasına da neden olmaktadır. Termik santrallerde kullanılan taş kömürlerinin; %10-15’inin, linyit kömürlerinin ise %20-40’nin uçucu kül olduğu belirtilmektedir [2]. Uçucu küllerin doğaya doğrudan salınmamaları sağlık ve güvenlik açısından bir gerekliliktir [3]. Bu nedenle, uçucu küller filtreler aracılığıyla tutulmakta ve sonrasında iki farklı şekilde depolanmaktadır. Bunlar, doldurma yöntemi ve havuzda biriktirme yöntemi olarak adlandırılmaktadır [3].

Ülkemizdeki kömür santrallerinin uçucu kül depolama bölgeleri incelendiğinde, Tunçbilek santrali uçucu külünün havalı bir sistem yardımıyla 3.5 kilometre uzaklıktaki bir vadide depolandığı, Çatalağzı Santralinin ise deniz kıyısına döküldüğü belirtilmektedir [4].

Yukarıda bahsedildiği üzere, termik santralleri için bir atık olan uçucu kül kimi sanayiler için hammadde olarak kullanılabilir. Özellikle, su ile olan etkileşimi nedeniyle çimento ve beton sektöründe dayanım artırıcı ve maliyet düşürücü olarak tercih edilebilmektedir. Çimento üretimi enerjinin yoğun kullanıldığı bir sanayi koludur. Çimento üretiminde birim enerji tüketimi 89 kWs/t ile 130 kWs/t arasında değişmektedir [5]. Çimento üretimi aşamalarında harcanan enerji, dünyanın toplam enerji tüketiminin %2’sini oluşturmaktadır [6, 7]. Kayda değer miktarda tüketilen enerjinin yanı sıra bu üretimde CO₂ salınımı da yapılmaktadır. 1 ton klinker üretimi ile doğaya yaklaşık 1 ton karbondioksit gazı salınmaktadır [8]. Çimento üretiminde karbon salınımı o kadar yüksektir ki insan kaynaklı CO₂ üretiminin yaklaşık %7’sini oluşturmaktadır [9]. Hem tüketilen enerji miktarının hem de karbondioksit salınımının bu derece yüksek olduğu çimento sektöründe çevreci yaklaşımların

benimsenmesi kaçınılmaz hale gelmiştir. Bu yaklaşımlardan bir tanesi de yapay ya da doğal puzolanların bu endüstrideki kullanım olanaklarının araştırılmasıdır.

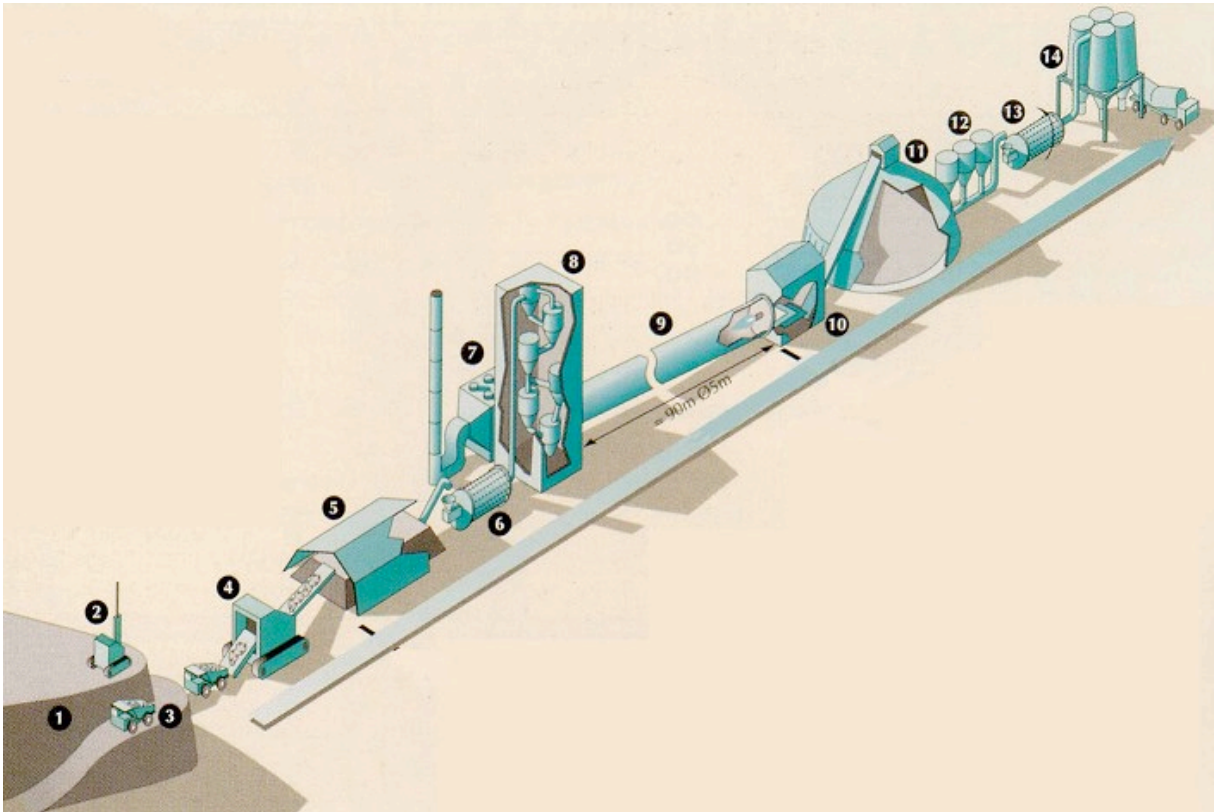
Bu tez kapsamında, kül sınıflama tesisinde sınıflandırma işlemine tabi tutulan Seyitömer uçucu külünün, çimento ve beton özelliklerine yönelik detaylı analizler sunulmaktadır. Günümüze kadar yapılan çalışmalarda, çimento ve kül inceliğindeki değişimlerin çimento dayanımı üzerindeki etkileri incelendiği ve yüksek kül katkılı çimentoların araştırıldığı bilinmektedir. Öte yandan, sınıflandırma işleminin kül kimyasal yapısı üzerindeki etkileri, kül ve çimentonun birlikte öğütülmesinin etkileri, öğütme ve sınıflandırma işlemlerinin kül tane şekli üzerindeki etkileri, çoklu bileşenli yapıdaki kül ve çimentonun davranımının incelenmesi gibi başlıklar literatürdeki önemli eksiklikler olarak göze çarpmakta olup; bu çalışma da belirtilen eksikliklerin giderilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada, kül sınıflama tesisi akım şemasının daha enerji verimli bir hale getirilmesi bu bağlamda üretim miktarının arttırılmasına yönelik çözüm önerileri sunulmuştur. Böylelikle elde edilen sonuçların diğer kül sınıflama tesisleri için de örnek teşkil edebileceği ve sonraki çalışmalara ışık tutabileceği düşünülmektedir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Çimento Üretimi

En önemli yapı malzemelerinden biri sayılan çimentonun üretimindeki ara ürün olan klinker, %3-6 oranında alçı taşı ve/veya uygun oran ve özellikte katkı maddeleri ile birlikte belirli bir inceliğe öğütülmesi sonucunda, havada ve su ortamında sertleşen hidrolik bir bağlayıcıdır [10].

Tanımdan da anlaşılacağı üzere çimento üretimi için öncelikle ara ürün olan klinkerin üretilmesi gerekmektedir. Klinker, istenilen reçeteye bağlı olarak farklı oranlarda kireçtaşı, kil ve demir cevherinin karıştırılıp öğütülmesi sonrasında, yüksek sıcaklıkta işletilen fırınlarda pişirilmesi ve soğutulması sonucunda elde edilmektedir [10]. Çimento üretimi prosesine ait akım şeması Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Çimento Üretim Hattı: 1. Ocak, 2, 3. Madencilik işleri 4. Kırıcı, 5. Ön Homojenizasyon, 6. Farin Değirmeni, 7. Filtre, 8. Ön Isıtıcı, 9. Döner Fırın, 10. Soğutucu, 11. Klinker Stoklama, 12. Katkılar, 13. Çimento Öğütme, 14. Çimento Siloları – Sevkiyat [11]

Şekil 2.1'den anlaşılacağı üzere çimento hammadde bileşenleri boyut küçültme işlemine tabii tutulduktan sonra harmanlanır ve bu hammadde karışımına farin adı verilir. Farin daha sonra kalsinasyon işlemi için döner fırınlara gider. Enerji tasarrufu sağlamak için bazı çimento fabrikalarında farin bir ön ısıtmaya tabii tutulur. Seri haldeki siklonlardan oluşan ön ısıtma kulelerinden geçiş yapan farin, döner fırından gelen sıcak hava sayesinde kısmen kalsine olur. Daha sonra farin, uzunluğu 50 ila 75 metre arasında değişen çapı ve 3 ila 7 metre arasında değişen içi refrakter tuğla ile astarlanmış 1.5 ila 4 devir yapan döner fırına girer [10, 12]. Klinker oluşumu döner fırınlarda farinin sinterleşme sıcaklığında pişirilmesi sürecinde gerçekleşen bir dizi tepkime sonucunda meydana gelmektedir [13]. Döner fırından çıkan kor halindeki klinker bir ara üründür. Basınçlı hava yardımıyla hareketli plakalardan kayarak ilerleyen klinker soğutularak yaklaşık 80 °C'ye kadar düşürülür. Çimento üretimi prosesinde ki son aşama, klinkerin bir miktar alçı taşı ile birlikte öğütülmesi işlemidir [14].

Cembureau 2017 [15] raporuna göre, 4,65 milyar ton olan dünyadaki toplam çimento üretiminin %52'si Çin tarafından sağlanmaktadır. Türkiye çimento üretiminde 75,4 milyon ton ile dünyada 5. iken, Avrupa'da en fazla çimento üreten ülke konumundadır. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğinin (2017) [16] açıkladığı verilere göre ise Türkiye'nin çimento kapasitesi 135,6 milyon ton olarak belirtilmiştir. Yüksek kapasitelere sahip çimento sektörü, aynı zamanda enerjinin yoğun kullanıldığı bir alandır. Tesisin modernliğine göre değişmek ile birlikte, 1 ton çimento üretiminde 1,5 ton hammadde kullanılmakta olup [10] enerji tüketimi 89 kWh/t ile 130 kWh/t arasında değişmektedir [5]. Bu enerjinin %50'si öğütme prosesinde harcanmaktadır [7]. Çimento sektörü insan kaynaklı CO₂ salınımının %7'sinden sorumludur [9].

Çimento sektöründeki yüksek kapasite, yoğun enerji tüketimi ve emisyon değerleri klinker tüketiminin azaltılmasına yönelime neden olmuş ve katkılı çimentolara olan ilginin ve araştırmaların artmasına sebep olmuştur. Çimento üretimi sırasında klinker ile alçı kullanılmakta olup üretilen çimento tipine bağlı olarak farklı mineral katkılarda eklenebilmektedir [10, 16]. Kullanılan mineral katkılar doğal olarak veya endüstriyel atıklardan ya da ikincil ürünlerden ortaya çıkmış olabilir. Dolayısıyla, üretimi için çok az enerji gereklidir [18]. Proses atıklarının veya ikincil ürünlerin özellikle çimento ve beton sektöründe kullanımı; atık bertarafı, maliyet azaltımı ve

gaz salınımı değerlerinde düşüş gibi nedenlerden dolayı giderek daha fazla tercih edilmektedir.

2.2. Çimento Üretiminde Kullanılan Mineral Katkılar

Çimento sektöründe klinker kullanımını azaltmak amacıyla farklı mineral katkıları kullanılmaktadır. Mineral katkıları aynı zamanda puzolanlar olarak da adlandırılmaktadır. Mineral katkıları ince tane boyuna sahip olup çimentoya öğütme esnasında ya da sonradan katılabilmektedir. Mineral katkıların sınıflandırılması için literatürde birçok yöntem bulunsa da en yaygın olarak kullanılanı Massazza'nın puzolanların kökenine göre yaptığı sınıflandırmadır [13].

Volkanik cam, volkanik tuf, zeolit, tras, kalsine kil ve şist doğal puzolanlar olarak adlandırılırken; uçucu kül, taban külü, silis dumanı ve cürufalar yapay puzolanlar olarak adlandırılmaktadır. Bazı doğal ve yapay puzolanlarının yüzde (%) oksit miktarları Çizelge 2.1'de verilmektedir [19].

Çizelge 2.1. Bazı doğal ve yapay puzolanların yüzde (%) oksit miktarları

Doğal Puzolan	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Alkali (%)
Volkanik cam	65,1	14,5	5,5	3	1,1	6,5
Volkanik tuf	52,1	18,3	5,8	4,9	1,2	6,6
Diatomlu toprak	86	2,3	1,8	-	0,6	0,4
Pişirilmiş kil	42,2	16,1	7	21,8	1,9	1,3
Yapay Puzolan	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Alkali (%)
Y.F. Cürufu	40,2	11	0,8	34,5	9,4	3,6
Silis Dumanı	93,7	0,3	0,6	0,3	0,3	0,6
Uçucu kül	51,5	23,9	6,1	10,5	2,4	3,1

ASTM C 618'e [20] göre kendiliğinden bağlayıcılık özelliğine az da olsa sahip olan ya da hiç olmayan fakat uygun nem ve sıcaklık sağlandığında kireç ile reaksiyona girerek bağlayıcı özelliklere sahip ürün elde edilmesini sağlayan, toz halindeki silisli veya silisli-alüminli maddelere puzolanlar veya mineral katkı denmektedir.

Puzolanların çimento ve beton sektöründe kullanılmasının birçok yararı bulunmaktadır:

- Çimento üretim işleminin ekonomikliği [21],
- Su ve hava geçirgenliğinde azalma [22],
- Alkali agrega gelişiminin kontrolü [23],
- Kimyasal direnç [24],
- Hafiflik [24, 25],
- Atıkların geri dönüşümü [27],
- Beton büzülmesinde azalma [27, 28],
- Dayanımda artış [29, 30, 31, 32],
- Hidratasyon ısısının kontrolü [34],

Cüruflar, metalürji tesislerinde üretim esnasında ortaya çıkan atıklardır. Kimyasal içerikleri ve özellikleri elde edildikleri ana ürün tipine ve üretim şekline göre farklılık göstermektedir. Uygun ve hızlı bir şekilde soğutulmuş demir-çelik cürufu, kurşun cürufu, bakır cürufu ve fosfor cürufu puzolanik özellikler sergilemektedir. Bu cürufların çimento bileşeni olarak kullanılabilmesi için ince tane boyuna sahip olması gerekmektedir [35]. Cürufların ince tane boyuna indirilmesi işlemi öğütme ile yapılmakta ve çimento üretimi ile kıyaslandığında enerji tasarrufu sağlamaktadır. Shi ve Qian [36], granüle yüksek fırın cürufunun öğütülmesi için harcanan toplam enerji, çimento üretiminde harcanan enerjinin %10'una tekabül ettiğini ifade etmektedir.

Çimento ve beton sektöründe kullanılan bir diğer katkı maddesi ise Silis dumanıdır. Silis dumanı, silikon metal veya ferro-silikon endüstrisinin bir yan ürünüdür. Silis dumanı veya silika füme, 0,02-0,25 µm tane boylarında küresel şekilde taneler içermektedir. Çok ince tane boyu (çimentonun ortalama tane boyundan 100 defa daha ince) su ihtiyacının artmasına sebep olmaktadır. Yüksek oranda amorf yapıda SiO₂ içeren silis dumanının yüksek puzolanik özelliğe sahip olduğu belirtilmektedir [18].

Termik santrallerde enerji üretimi için yakılan toz kömürün bir yan ürünü olarak küller ortaya çıkmaktadır. Genel olarak küller; taban külü, ham kül ve uçucu kül olarak üçe

ayrılmaktadır [37]. Dünyada artan enerji eğilimi de göz önünde bulundurulduğunda, uçucu kül üretiminin 750 milyon ton/yıl olacağı düşünülmektedir [38]. Türkiye’de ise yıllık yaklaşık 18 milyon ton uçucu kül üretilmektedir [39]. Puzolanlar içerisinde en yaygın kullanıma sahip olanın uçucu kül olduğu belirtilmektedir [40].

2.3. Uçucu Küller

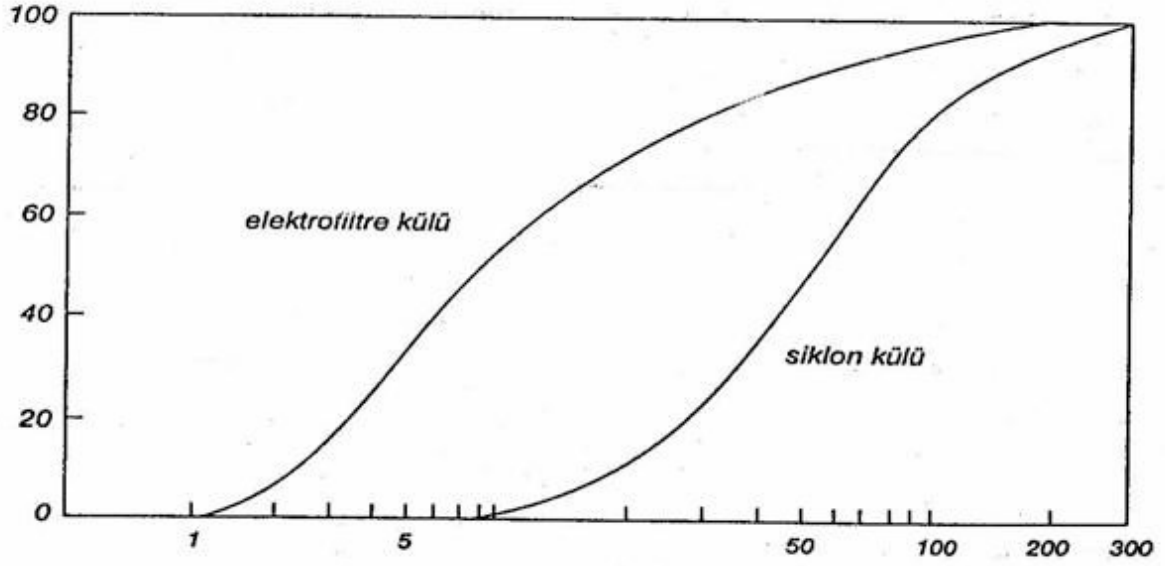
Makine Mühendisleri Odası tarafından 2017 [41] yılında hazırlanan rapor, Türkiye’de 39 adet termik santral bulunduğunu belirtmektedir. Pulverize (öğütülmüş) kömürün yakıt olarak kullanıldığı termik santrallerde enerji üretimi sırasında uçucu kül de açığa çıkmaktadır. Termik santrallerde üretilen bu uçucu kül, çevreye vereceği zararlardan dolayı elektrostatik veya mekanik yöntemlerle filtrelerde tutulmaktadır. Farklı filtreleme yöntemleri uçucu külün inceliğini etkilemektedir. Uçucu külden daha ağır, iri olan ve tabanda toplanan küller taban külü olarak tanımlanmaktadır. Atık malzeme olarak ortaya çıkan küllerin %75-80’ini uçucu küller, %20-25’ini ise taban külleri oluşturmaktadır [42].

Puzolanik özelliklere sahip olması nedeniyle uçucu küller belirli proseslerden (sınıflandırma veya öğütme) geçtikten sonra özellikle çimento ve beton sektöründe kullanılabilir. Aynı zamanda uçucu küllerin, puzolan grubundaki diğer maddelere kıyasla çimento ve betonda katkı maddesi olarak kullanılması yönünden daha uygun özelliklere sahip olduğu belirtilmektedir [39, 42, 43]

2.3.1. Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri

Uçucu küller 1 µm ile 100 µm arasında ve 2500 ila 6000 cm²/g Blaine değerinde ve ince tane boyu dağılımına sahip küresel şekilde taneler olmaları sebebiyle su ihtiyacı bakımından bir avantaj sağlamaktadır [40]. Yüksek özgül yüzey alanının uçucu külün kalsiyum hidroksit ile tepkimeye girmeye hazır olduğu anlamına geldiği belirtilmiştir [40].

Uçucu küller özgül ağırlık, renk, incelik, nem gibi fiziksel özellikler üzerinden değerlendirilebilmektedir. Bu özellikler uçucu külün elde edildiği termik santralde kullanılan kömürün kompozisyonuna, kömürün öğütülme inceliğine, yanma oranına, yanma verimliliğine ve aynı zamanda uçucu kül tutucu sisteme göre farklılık göstermektedir [39, 44, 45]. Farklı kül tutma mekanizmaları farklı tane boyu dağılımları ortaya çıkarmaktadır [46] (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Farklı kül tutma mekanizmalarına ait tane boyu dağılımları

Uçucu küllerin inceliği, betonun işlenebilirliğini ve uçucu külün pozolanik aktivite derecesini etkilemektedir. Bunlara ek olarak, uçucu kül inceliğinin beton karışım suyunu ve hava sürükleyici katkı maddesi ihtiyacını da etkilediği belirtilmektedir [43]

Uçucu küllerin özgül ağırlığı incelik ve mineralojik yapıdan etkilenmektedir. İçi dolu küresel tanecikler özgül ağırlığın artmasına sebep olurken, içi boş süngerimsi tanecikler özgül ağırlığın azalmasına neden olmaktadır [47]. Aynı zamanda yanmamış karbon içeriği de özgül ağırlığın azalmasına neden olmaktadır. Demir içeriğinin artması da uçucu külün özgül ağırlığını artırmaktadır. Uçucu külleri oluşturan bazı partiküllerin özgül ağırlıkları manyetit-spinel 4.0, kuvars 2.65, mullit 3.03, karbon 1.2–2.0, alüminyum silikat ve camlar 2.5 – 2.7 şeklindedir [48].

Uçucu küllerin renkleri çoğunlukla yanmamış karbon içeriği ile ilişkilidir. Başka bir deyişle, uçucu küllerin rengi santralde kullanılan kömürle ve bu kömürün yakılma prosesi ile ilişkilidir. Genellikle yanmamış karbon içeren taneler iri boylarda yoğunlaşmıştır. Bu da ince kül ile kaba kül arasındaki renk farkının yanmamış karbon içeriğinden kaynaklandığı anlamına gelmektedir [40].

Uçucu küllerin inceliğinin saptanmasında en yaygın kullanan yöntemlerden birisi 45 µm elek üstü bakiyesidir. Aynı zamanda Blaine test yöntemi de uçucu külün en çok kullanıldığı çimento ve beton sektöründe incelik tayini için kullanılmaktadır. Fakat, çimento sektöründe kullanılan Blaine metodu uçucu kül için güvenilir olmamaktadır.

Uçucu kül içerisindeki süngerimsi içi boşluklu yapılar havaya karşı bir direnç yaratarak Blaine değerlerinde sapma yaratabilir. Genel olarak uçucu külün inceliği ile Blaine değeri arasında bir korelasyon bulunmaktadır [6, 39, 48]. Öte yandan, Blaine yöntemi kullanılarak yapılan incelik tayininin uçucu külün içerisindeki yapısal düzensizliklerden ve boşluklu yapılardan etkilendiği belirtilmektedir [50]. Bunlara ek olarak lazerli tane dağılım analizi, hidrometre analizi, azot absorpsiyonu, X-ışınları sedimantasyonu gibi yöntemler de uçucu küllerin inceliklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır [39, 50].

Su ihtiyacı, uçucu kül inceliğinden etkilenmektedir. İnce uçucu kül kullanıldığında su ihtiyacı artarken, iri uçucu külün kullanıldığı durumlarda su ihtiyacında azalma olduğu görülmektedir. Bunlara ek olarak, küresel taneler ne kadar çok ise su ihtiyacının da o kadar az olacağı yorumunda bulunulabilir [40].

Uçucu kül tanecikleri çoğunlukla camsı, katı, içi boş ve küresel şekle sahiptir. İçi boş ve iri taneler senosfer olarak adlandırılırken, ince küresel taneler plerosfer olarak adlandırılmaktadır. Bu iki tip uçucu külün arasında kalan küller; yarı saydamlık, ışık geçirmezlik, az boşluk, çok boşluk, yuvarlak, uzun gibi şekillere sahip olabilmektedir [40].

Senosfer olarak adlandırılan küller karbondioksit ve nitrojen ile dolu haldedirler ve genellikle koyu renktedirler. Bu tür küller sudan hafif veya suya yakın özgül ağırlıklarda oldukları için yüzeye çıkma eğilimi sergilerler. Perdahlama sonucunda ise betonda koyu renkli izler bırakırlar. Bu sebeple, bu tarz küller beton içerisinde tercih edilmeyen bir yapı oluştururlar [43].

2.3.2. Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri

Uçucu küllerin kimyasal özellikleri yakıt olarak kullanılan kömürün tipinden ve yanma işleminden etkilenmektedir. Örneğin; en yaygın kullanılan F sınıfı uçucu külü bitümlü kömürün yakıt olarak kullanıldığı santrallerde açığa çıkarken, linyitin veya yarı bitümlü kömürün kullanıldığı santrallerde ise C sınıfı uçucu kül ortaya çıkmaktadır [51]. Uçucu küller ana kimyasal bileşen olarak yapılarında SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO ve Na_2O bulundurmaktadırlar (Çizelge 2.2). Ek olarak, yapılarında alkali oksitler Na_2O , K_2O , TiO_2 vb.de bulunabilmektedir.

Çizelge 2.3. F ve C sınıfı uçucu küllere ait kimyasal kompozisyonlar

Bileşen	F Sınıfı Uçucu Kül	C Sınıfı Uçucu Kül
	CaO < %10	CaO > %10
SiO_2	43,6-64,4	23,1-50,5
Al_2O_3	19,6-30,1	13,3-21,3
Fe_2O_3	3,8-23,9	3,7-22,5
CaO	0,7-6,7	11,5-29
MgO	0,9-1,7	1,5-7,5
Na_2O	0-2,8	0,4-1,9
C (kızdırma kaybı)	0,4-7,2	0,3-1,9

Çizelge 2.3'de görülen analizler 13 farklı F sınıfı uçucu kül ve 9 farklı C sınıfı uçucu kül üzerinde yapılan araştırmanın bir sonucudur [52]. Anlaşılacağı üzere, F ve C tipleri için CaO oranı farklılık göstermekte olup, sırasıyla %10'dan küçük ve %10'dan yüksek olarak sınıflanmaktadır. Çizelge 2.4'te ise Türkiye'deki farklı uçucu küllere ait kimyasal kompozisyonlar verilmektedir [52, 53, 54, 55]. TS EN 197-1 [57] standardındaki sınıflandırmada CaO oranındaki bu farklılıktan yararlanılmaktadır. CaO oranının %10'dan az olduğu ve reaktif silis miktarının %25'den fazla olduğu uçucu küller silisli (V sınıfı) uçucu küller olarak adlandırılmaktadır. CaO oranının %10'dan fazla ve reaktif silis miktarının da %25'den fazla olduğu uçucu küller kalkersi (W sınıfı) uçucu kül olarak adlandırılmaktadır.

Çizelge 2.4. Türkiye'deki uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları

Bileşen	Çatalağzı	Seyitömer	Soma-B	Tunçbilek	Yatağan	Orhaneli	Sugözü	Çayırhan
SiO ₂	56,8	40,6	39,8	56,4	51,2	48,8	52,5	49,13
Al ₂ O ₃	6,8	9,1	22,3	23	22,9	19,6	22,82	15,04
Fe ₂ O ₃	24,1	7,7	4,4	10,1	7,8	6,5	5,34	8,25
S+A+F	87,7	57,4	66,5	89,5	81,9	68,4	80,66	72,42
CaO	1,4	19,9	25,4	2,1	13	10,1	7,16	1,7
MgO	2,4	8,1	1,9	3,3	2,8	4	2,56	4,76
SO ₃	2,9	10,6	4,8	0,4	0,3	4,2	0,2	4,3
K ₂ O	3	1,4	0,4	0,9	1,7	1,7	X	1,76
TiO ₂	1,1	X	0,6	X	X	X	X	X
K.K.	0,6	1,4	0,4	1,1	X	X	3,35	0,52

CaO oranı yükseldikçe uçucu küller bir miktar bağlayıcılığı da beraberinde getirmektedir [34]. CaO miktarının az olduğu uçucu küller ise sadece puzolanik özellik sergilemektedir.

Araştırmacılar külde bulunan yanmamış karbon içeriğinin betona ve çimentoya etkisi üzerine farklı görüşlere sahiptir. Çoğu araştırmacı, yanmamış karbon miktarının az olması gerektiği kanaatindedir. Aynı zamanda SO₃ miktarının harç veya çimento duraylığına zarar verdiği düşünülmektedir [44, 49, 57].

Kızdırma kaybının yanmamış karbon miktarı ile ilişkili olduğu düşünülmektedir [58]. Kaliteli bir yanma prosesine sahip termik santrallerde, yanmamış karbon miktarı azalacağından, kızdırma kaybının daha düşük olması beklenmektedir. Yanmamış karbon reaksiyon esnasında beton içerisindeki alkali oranını artırmakta ve bu sebeple korozyonu hızlandırmaktadır. Aynı zamanda, uçucu kül içerisinde bulunan yanmamış karbon oranı artıkça beton siyah bir renk alır. Ek olarak, yanmamış karbon miktarı su ihtiyacını da arttırmaktadır [59].

2.3.3. Uçucu Küllerin Çimento ve Betondaki Kullanımı

Uçucu küller ile ilgili çalışmalar 1925 yılında başlamış olup [60], günümüzde de devam etmektedir. Ancak betonda ve çimentoda kullanımının artışı 1970'lerde patlak veren enerji krizi ile birlikte ivmelenmiştir.

Türkiye’de uçucu küller ile ilgili ilk çalışma 1964 yılında Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Araştırma Dairesi bünyesinde yapılmıştır [44, 60]. Bu çalışmada, uçucu külün çimento ve betonda katkı malzemesi olarak kullanılması araştırılmıştır. Tunçbilek uçucu külünün %20 oranında kullanıldığı çalışmada, katkılı beton 90 gün dayanımında şahit numune ile aynı dayanıma ulaşırken hidratasyon ısısında da azalma sağladığı ortaya konulmuştur. Bu bilgiler ışığında Gökçekaya Baraj İnşaatında uçucu kül beton katkı malzemesi olarak başarıyla kullanılmıştır [62].

1968 ile 1973 yılları arasındaki sürede iki baraj inşaatında 55.000 tonun üzerinde uçucu kül kullanılmıştır. 1970’de Kütahya-Tavşanlı yolunun 700 metrelik bir bölümünde uçucu kül-çimento karışımı ile zemin düzenlemesi çalışması yapılmıştır.

Türkiye’de çimento sektörünün küle olan ilgisi 1970’lerde artmaya başlamış ve bu yıllarda Seyitömer ve Soma termik santrallerinden alınan uçucu küllerin çimentoda kullanımı ile ilgili denemeler yapılmıştır [63].

Yeğınobalı (1971) [45] tarafından yapılan çalışmada Soma, Çatalağzı ve Tunçbilek uçucu külleri çimentoya %10, %20, %30 ve %40 oranında katılarak hidratasyon ve su ihtiyaçları incelenmiştir. Tüm uçucu küllü çimentoların su ihtiyacı artarken, %20 katkılı numunelerde hidratasyon ısısında düşüş gözlemlenmiştir. Yalnızca Çatalağzı uçucu külünün %20 oranında katıldığı çimento numunesinde hidratasyon ısısında %3 artış gözlenmiştir. Çalışma sonucunda 3 tesisin de elektro filtresinden alınan külün standartlara uyduğu, çimentoda ve betonda kullanılabilirdiği ortaya çıkmıştır.

Massazza (1989) [34] tarafından yapılan araştırmada çimento içerisinde artan uçucu kül miktarının hidratasyon ısısını azalttığı gösterilmiştir. Bu çalışma, uçucu külün büyük kütleye sahip beton uygulamalarında tercih edilebilirliğini kanıtlaması bakımından önemlidir.

Paya vd. (1995) [64] tarafından yapılan araştırmada öğütme süresinin uçucu külün fiziksel özelliklerine etkisi incelenmiştir. Uçucu külün 20 dakika öğütülmesi ortalama tane boyunda %62 oranında bir azalma sağlarken, 60 dakikalık öğütülmesi ile bu azalmanın sadece %15 arttığı belirtilmiştir. Çalışmada 30 µm üstündeki uçucu kül tanelerinin laboratuvar ölçekli değirmende kolaylıkla öğütülebildiği söylenmiştir. Aynı zamanda öğütme süresindeki artışın, senosfer miktarında azalmaya sebep

olduğu için uçucu küllerin özgül ağırlığını arttırdığı; fakat küresel taneleri de ortadan kaldırıldığı belirtilmiştir.

Bouzoubaa vd. (1998) [65] tarafından yapılan araştırmada 3 farklı tesisten alınmış F tipi uçucu külle çalışma gerçekleştirmiştir. Küller standart olarak F tipinde olsalar da aralarında kimyasal farklılıklar mevcuttur. Uçucu küller 10 saate kadar öğütmeye tabii tutulmuştur. 2 saate kadar yapılan öğütmelerde, senosferler ve plerosferlerinin varlığı sebebiyle özgül ağırlıkta önemli bir artışın olduğu belirtilmiştir. 2 saatten fazla olan öğütmelerde bu artış azalmıştır. Uçucu küllerin morfolojilerine bakıldığında, 2 saatlik öğütme sonucunda plerosferlerin ve iri şekilsiz tanelerin parçalandığı, fakat öğütme süresindeki artış ile küresel tanelerin ortadan kalktığı gözlenmiştir. Dayanım değerlerine bakıldığında optimum öğütme süresi 4 saat olarak belirtilmiştir.

Erdoğdu ve Türker (1998) [66] yüksek ve düşük kireç içeriğine sahip iki farklı uçucu kül ile çalışma gerçekleştirmişlerdir. 125, 90, 63, 45 ve 38 μm 'luk elekleri kullanarak fraksiyon çekme işlemi gerçekleştirdikten sonra %25 uçucu kül katkılı çimento dayanımlarını incelemişlerdir. Genel olarak uçucu kül incelidikçe dayanıma olan katkısında artış gözlenmiştir. Fraksiyonlar arasında kimyasal farklılığın görmezden gelinebilecek değerler olmasından kaynaklı dayanımın incelikten etkilendiği yorumunda da bulunulmuştur. Yüksek kireç içeriğine sahip uçucu kül için 45 mikron altı numune için 28 günlük dayanımda %19'luk bir dayanım artışı gerçekleşirken diğer fraksiyonlar için dayanım değeri yakalanamamıştır. Düşük kireç içerikli kül için 63-45 mikron fraksiyonu %99 ile neredeyse 28 günlük dayanımı yakalarken, 45 mikron altı kül numunesi dayanımda %21'lik bir artış sağlamıştır.

Kiattikomol ve arkadaşları (2001) [50] yılında yaptıkları çalışmada Thailand'da bulunan 5 farklı termik santralden aldıkları uçucu kül numunelerini öğütme ve sınıflandırma işlemleri ile farklı inceliklere getirmişlerdir. Farklı inceliklere sahip uçucu küllerin çimentoya katılmasının su ihtiyacı, priz süresi ve dayanım üzerine etkisi incelenmiştir. Besleme havalı sınıflandırıcı kullanılarak iri ve ince tane boyutlarına ayrılmıştır. Daha sonra, iri uçucu kül öğütülerek 2 farklı inceliğe sahip numune elde edilmiştir. İnce olan ise tekrar havalı sınıflandırmaya tabii tutulmuş ve elde edilen daha ince tane boyutundaki uçucu kül testlerde kullanılmıştır. Tüm numuneler için katılacak uçucu kül oranını 20% olarak belirlemiş ve bunların kalite

değerleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yapılan araştırma sonucunda kül içeriğinin priz süresini uzattığı ve kül incelidikçe bu artışın azaldığı gözlenmektedir. Araştırmacılar inceliğin dayanımı olumlu etkilediği yorumunda bulunmuşlardır. Örneğin, 14 gün sonunda D_{50} 'si 30 μm olan uçucu kül içeren numune, şahit numune dayanım kazanım oranının %80'ine ulaşabilmiş iken; D_{50} 'si 15 μm olan uçucu kül şahit numune dayanımını 3 gün sonunda yakalamıştır. Aynı zamanda D_{50} değeri 30 μm olan uçucu kül içerikli numunenin 7 gün ile 14 gün arasındaki dayanım artışı yaklaşık %3 iken D_{50} 'si 2 μm olan uçucu külün bu zaman dilimindeki dayanım artışı %10 civarındadır. Yapılan bu araştırma sonucunda, dayanımın uçucu külün kimyasal kompozisyonundan değil, inceliğinden etkilendiği vurgulanmıştır.

Chindaprasirt vd. (2004) [29], eleme ve havalı sınıflandırma kullanılarak uçucu küllerin inceliği üzerine bir çalışma yapmıştır. Çalışmada Thailand'ın kuzeyinde yer alan Mae Moh termik santralinden alınan F- tipi uçucu kül kullanılmıştır. Eleme yöntemi ile 45 μm altı (4800 cm^2/g) ve 75 μm altı (3900 cm^2/g) numuneler elde edilmiştir. Sınıflandırma yöntemi ile Blaine değerleri 9300 cm^2/g , 4900 cm^2/g ve 1800 cm^2/g olan numuneler hazırlanmış ve bu numuneler ham uçucu kül (3500 cm^2/g) ile kıyaslanmıştır. %40 kül katkısı ile hazırlanan numunelerin aynı işlenebilirlik değerinde dayanım değerleri incelenmiştir. 45 μm ve 75 μm altı uçucu kül içeren numunelerin 3 günlük dayanımda sırasıyla %74 ve %35'lik bir artış yakaladığı gözlemlenmiştir. 28 günlük dayanımlarda ise şahit numuneye kıyasla iri uçucu kül dayanımda %26'lık bir azalma, orta uçucu kül dayanımda %43'lük artış, ince uçucu kül ise dayanımda %117'lik bir artışa neden olmuştur. 45 μm altı uçucu kül ile orta incelikteki uçucu külün Blaine değerleri birbirine yakın iken, 45 μm altı uçucu külün dayanım değerleri daha yüksek çıkmıştır. Bu sonuçlar Blaine yönteminin küllerin tane boyu dağılımının belirlenmesindeki güvenilirliğinin sorgulanmasına sebep olmuştur.

Atakay (2006) [46], Çatalağzı ve Soma termik santrallerinden alınan uçucu küllerin katkılı çimentoda kullanımını incelemiş, kül inceliği ve katkı miktarının çimento özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Temsili örnekler 90, 75, 63, 53, 45 ve 38 μm eleklerden ayrı ayrı elenmiş ve elek altı numuneleri ayrılarak çimentoya %10, %20, %30 ve %40 oranında katılmıştır. Her iki uçucu kül içinde kül inceliği dayanımı olumlu şekilde etkilemiştir. En büyük dayanım farkı değişimi 90 μm altı numune ile ham numune arasında gerçekleşirken, 45 μm altı numune ile 38 μm altı numuneler

kiyaslandığında dayanımda bir değişim gözlemlenememiştir. Priz süreleri ise katkı süreleri artıkça uzarken, uçucu kül incelidikçe kısalmıştır. Çalışmanın son kısmında farklı inceliklere sahip küllerin farklı çimento tipleri için kullanılabileceği bir incelik- katkı oranı optimizasyonu önermişlerdir.

Felekoğlu vd. (2009) [49], tarafından yapılan araştırmada, Soma B uçucu külünün öğütülmesinin dayanım ve su ihtiyacı üzerine etkileri incelenmiştir. Felekoğlu vd., dayanımın incelikten etkilendiğini fakat bunun tek başına yorumlanmaması gerektiğini belirtmişlerdir. Tüm uçucu küller için incelik değerinin ve su ihtiyacının birlikte göz önünde bulundurulması gerektiğini ve Soma B uçucu külü için ise optimum inceliğin 480 m²/kg olduğunu belirtmişlerdir.

Aydın vd. (2010) [39] Soma B uçucu külü ile yaptıkları araştırmada ham ve öğütülmüş uçucu külü %20, %40 ve %60 oranında Cem I 42.5 N'ye ekleyerek incelemelerde bulunmuştur. Ham uçucu külün D₅₀ değeri 43,08µm iken, bu değer öğütüldükten sonra 8,92 µm olmuştur. %20 oranında eklendikleri durumda; ince uçucu külün ham uçucu küle göre dayanımında %38'lik bir artış saptanırken, %60'lık eklenme olduğunda bu artış 3 katına kadar (3 gün dayanımında) çıkmaktadır. İnce uçucu külün %20 ve %40'lik katkısı için 56 gün dayanımı çimento numunesini yakalamış ve geçmiştir. İnce uçucu kül için %20 ve %40 kül katkı oranında 28 gün dayanımı için fark gözlenmemiştir.

Ghıasvand vd. (2017) [67] göre, birlikte öğütme bileşenlerin tane boyu dağılımlarını farklı şekillerde etkilemektedir. Örneğin, öğütülmesi zor olan bileşenler iri boylarda yoğunlaşırken, kolay öğütülenler ince tane boylarında yoğunlaşacaktır. Cem I ve tras ile hazırlanan numunelerde, birlikte ve ayrı öğütme işlemini araştırmışlar ve her durumda birlikte öğütmenin daha ince tane boyu ürettiğini gözlemlemişlerdir. Çimento kıvamı ve priz süreleri farklı öğütme mekanizmasından etkilenmez iken birlikte öğütme daha yüksek dayanım değerleri elde edilmesini sağlamıştır. Örneğin, 7 günlük dayanımda %35 kül katkılı çimentoya uygulanan birlikte öğütme işlemi, ayrı öğütmeye göre %7,5-9,5 oranında dayanımda artış sağlamıştır.

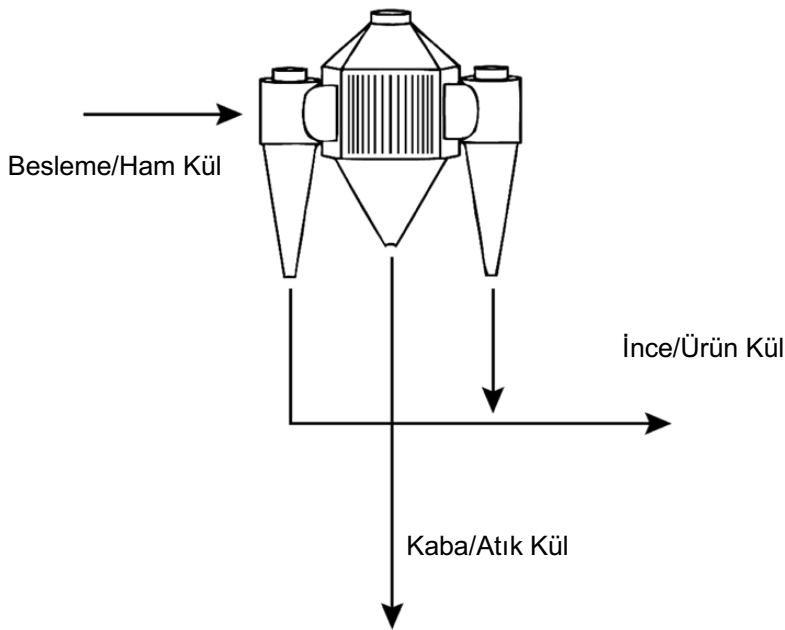
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar, 3 aşamada tamamlanmıştır. İlk olarak Seyitömer Uçucu Kül Sınıflandırma Tesisinde bulunan havalı sınıflandırıcı parametreleri değiştirilerek, farklı incelik değerlerine sahip uçucu kül numuneleri elde edilmiştir. Elde edilen uçucu küller, çimentoya %25 oranında katılarak uçucu külün dayanım üzerine etkileri incelenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında, havalı sınıflandırıcının besleme, ince ve iri akış kollarından alınan uçucu küller Hacettepe Üniversitesi laboratuvarında Bond Değirmeni kullanılarak farklı inceliklere öğütülmüş ve çimentoya %25 oranında katılarak kalite değerleri incelenmiştir. Aynı zamanda, çimento kalitesine ek olarak, beton verileri de değerlendirilmiştir. Çalışmanın son aşamasında, sınıflandırıcının ince akış kolundan alınan uçucu kül farklı inceliklere öğütülerek, farklı oranlarda çimentoya katılmıştır. Birlikte ve ayrı olarak uygulanan öğütme işleminin, kalite verileri üzerine etkileri ve uçucu külün öğütme davranımı üzerine etkisi izlenmiştir.

3.1. Kullanılan Ekipmanlar

3.1.1. Havalı Sınıflandırıcı

Seyitömer kül sınıflandırma tesisinde bulunan havalı sınıflandırıcının basitleştirilmiş şekli ve teknik özellikleri Şekil 3.1 ve Çizelge 3.1’de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Havalı sınıflandırıcının basit gösterimi

Çizelge 3.2. Havalı sınıflandırıcının teknik özellikleri

Rotor	
Motor (kW)	75
Max.Devir (rpm)	632
Fan	
Motor (kW)	132
Kapasite (m ³ /sa)	47,000

3.1.2. Bond Değirmeni

Numunelerin öğütme işlemi, standart Bond değirmeni kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Değirmen, 30,5 cm çap ve 30,5 cm uzunluğa sahip olup iç kısmında köşeli bir kısım bulunmamaktadır. Değirmen dakikada 70 devir yapmaktadır ve içerisinde bulunan bilya şarjı 20.215 kg'dır (

Çizelge 3.3). Testlerde kullanılan Bond değirmeninin görüntüsü Şekil 3.2'te gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Bond değirmeni

Çizelge 3.3. Bilya şarj özellikleri

Bilya Çapı (mm)	Bilya Sayısı
38,1	43
31,75	67
25,4	10
19,05	71
15,87	94
Toplam	285

3.1.3. Lazerli Ölçüm Cihazı

Uçucu küllerin, çimentonun ve karışımların tane boyu dağılımları "Sympatec Lazer Sizer" aleti kullanılarak (Helos-R4) belirlenmiştir (Şekil 3.3). 150 µm elek boyuna

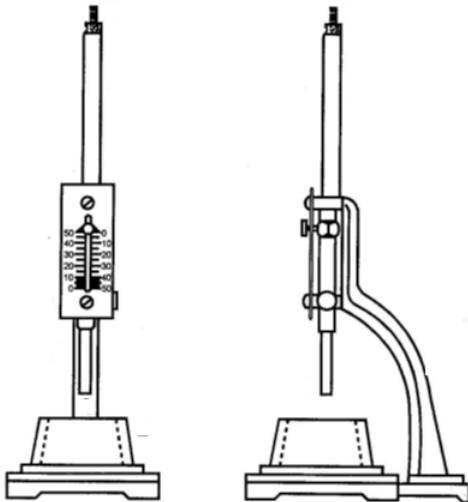
kadar olan numuneler kuru eleme yöntemi ile; 150 µm altı elek boyuna sahip numuneler ise, lazer saçılım cihazı kullanılarak belirlenmiştir [68].



Şekil 3.3. Lazerli ölçüm cihazı

3.1.4. Vicat Aleti

Vicat aleti, numunelerin priz sürelerinin saptanması amacıyla kullanılmıştır. Şekil 3.4 'de gösterilen vicat aleti, taşıyıcı bir gövde ve sondanın yerleştirildiği hareketli bir çubuktan oluşmaktadır. Aynı zamanda, vicat aletinin üzerinde sondanın yer değiştirmesini ölçecek bir gösterge bulunmaktadır. Numunelerin priz süreleri, TS EN 196-3 [68] standardında belirtildiği şekilde saptamıştır.

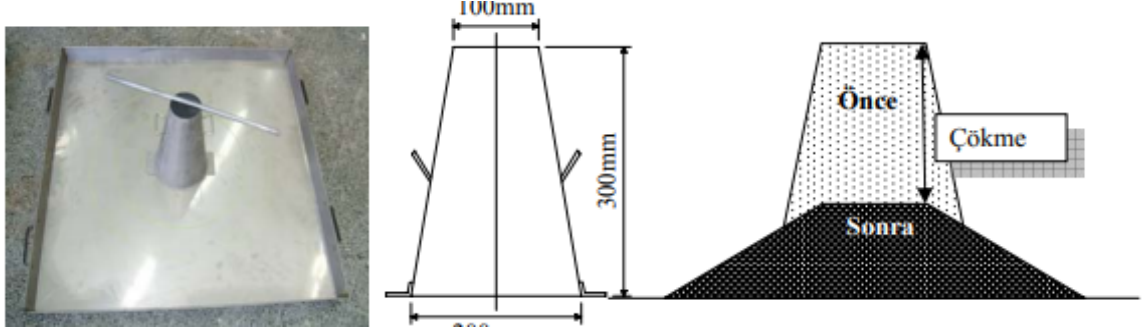


Şekil 3.4. Vicat Aleti

3.1.5. Çökme Test Düzeneği

Çökme testi Dünya'da yaygın olarak kullanılmaktadır [40]. Bu testte numune, koniye doldurulduktan sonra sıkıştırılır ve koni 2-5 saniye arasında sabit hızla kaldırılır.

Şekil 3.5’de çökme test düzeneği gösterilmekte olup çimentonun işlenebilirliğini doğrudan ölçmemekle birlikte kıvamı hakkında bilgi vermektedir. Numunenin ilk ve son hali arasındaki mesafe, santimetre cinsinden ölçülerek çökme değeri olarak kaydedilmektedir.



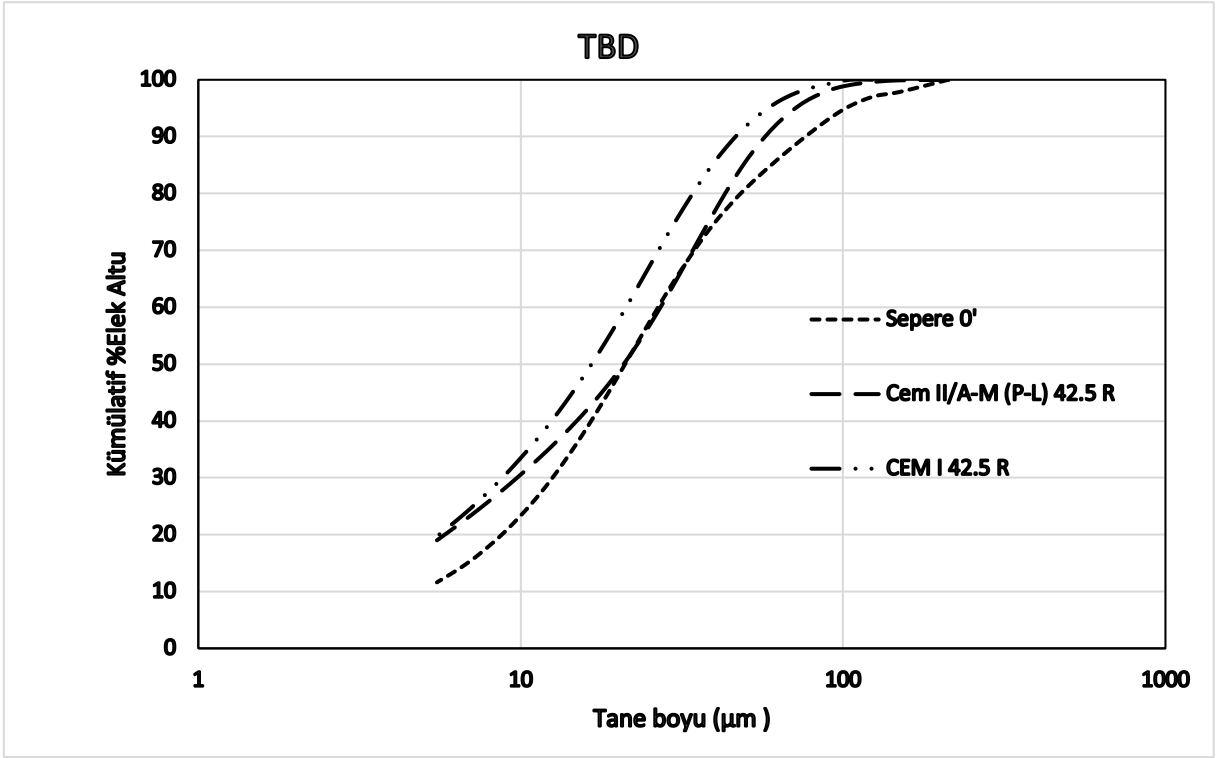
Şekil 3.5. Çökme deneyinde kullanılan aletler ve deneyin yapılışı[69]

3.2. Deney Numuneleri

600 MW kurulu güce sahip olan termik santralde yakıt olarak linyit kömürü kullanılmaktadır. Seyitömer uçucu külü, ASTM C 618’e göre F tipi ve TS EN 197-1 standardına göre V (silisli uçucu kül) tipi bir uçucu küldür. Çalışmada kullanılan çimento, Bursa Çimento Fabrikası A.Ş.’den temin edilen CEM I 42.5 R ve Cem II/A-M (P-L) 42.5 R çimentolardır. Numunelere ait kimyasal kompozisyonlar Çizelge 3.4’de tane boyu dağılımları ise Şekil 3.6’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.4. Numunelere ait kimyasal kompozisyonlar

Bileşen %	Cem I 42.5 R	Cem II/A-M (P-L) 42.5 R	Ince/ürün Uçucu Kül
SiO ₂	23,61	18,73	53,44
Al ₂ O ₃	6,4	5,43	18,19
Fe ₂ O ₃	3,12	2,94	12,44
CaO	54,51	62,47	4,48
MgO	0,97	1,49	4,68
SO ₃	2,63	3,14	1,12
Na ₂ O	0,55	0,54	0,82
K ₂ O	0,96	0,65	2,05
K.K.	4,96	3,82	1,00

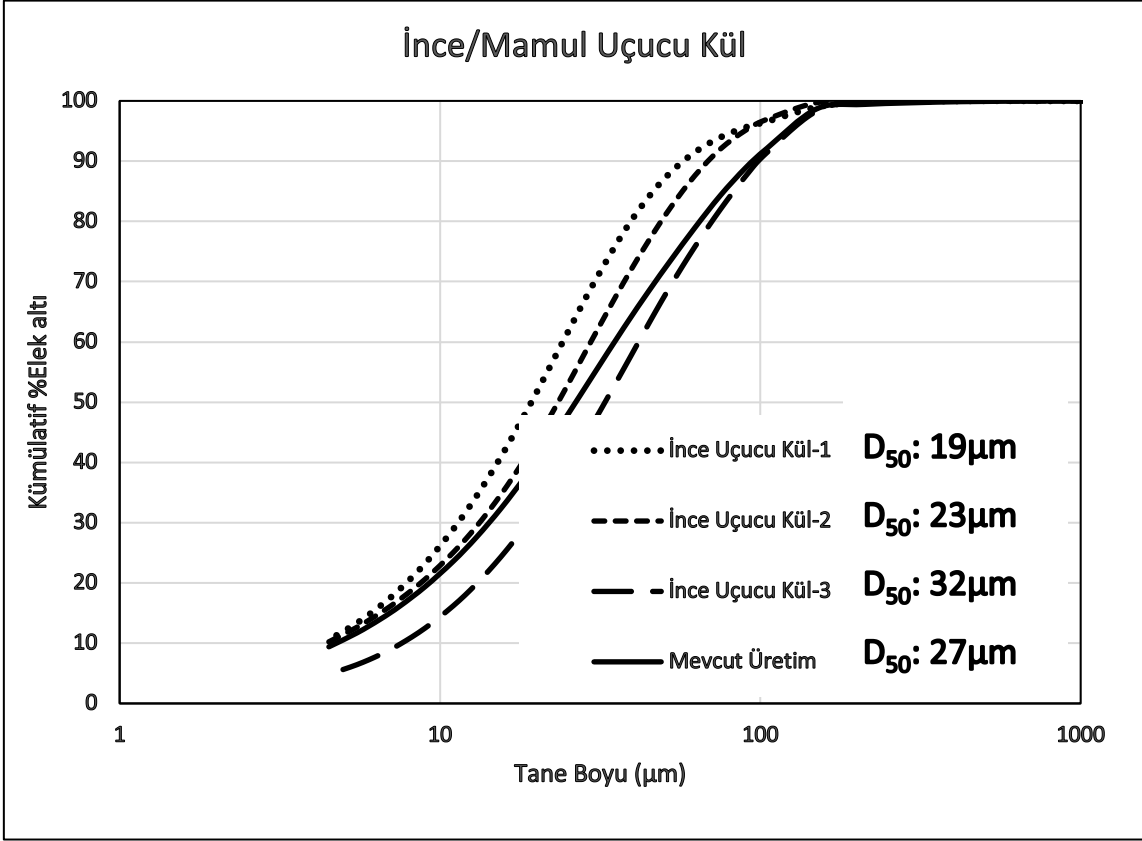


Şekil 3.6. Numunelere ait tane boyu dağılımları

3.2.1. Havalı sınıflandırıcı üzerinde yapılan çalışmalar

Yukarıda özellikleri belirtilmiş havalı sınıflandırıcının çalışma parametreleri değiştirilerek uçucu külün incelik değerleri değiştirilmiş ve uçucu külün çimentoya eklenmesi ile çimentonun dayanım değerleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Farklı incelik değerlerine sahip uçucu külün eklendiği çimento numunesine TS EN 450-1 [70] standardına göre dayanım testleri yapılmıştır. Ayrıca havalı sınıflandırıcının etrafındaki akış kollarından alınan uçucu küllerin tane boyutları lazer ölçüm cihazı ile tespit edilmiş ve Şekil 3.7'de sunulmaktadır. Tane boyu dağılımlarının daha rahat kıyaslanabilmesi için mevcut üretim (ince/ürün kül) ait tane boyu dağılımı ile birlikte Şekil 3.7'de sunulmuştur.

Akış kollarında yapılan bu değişikliğin kimyasal kompozisyona etkisi de araştırılmıştır. Kimyasal analizler, 2017 yılında Bursa Çimento A.Ş. tarafından TS EN 450-1 standardına uygun şekilde Atomik Absorbsiyon Spektrometresi ve Yaş Analiz metotları kullanılarak yapılmıştır. Testler 2017 yılında Bursa Çimento A.Ş. tarafından TS EN 450-1 standardına uygun şekilde yapılmıştır.



Şekil 3.7. İnce akış kolundan alınan numunelere ait tane boyu dağılımları

3.2.2. Sınıflandırıcı akış kollarında yapılan çalışmalar ve kalite verileri üzerine etkilerinin incelenmesi

Çalışmanın ikinci aşamasında, havalı sınıflandırıcı etrafında örnekleme çalışması yapılmıştır. Farklı akış kollarından (ham, atık ve ince/ürün) alınan numuneler farklı inceliklere öğütülmüştür (Şekil 3.8.). Öğütme süreleri belirlenirken farklı akış kollarında benzer D_{50} değerleri hedeflenmiştir. Öğütme testleri, ham ve atık kül için 45, 60 ve 120 dakika; ince/ürün kül için ise 30 ve 60 dakika sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Uçucu küller TS EN 450-1 standardında belirtildiği şekilde %25 oranında çimentoya katılarak dayanım testlerine tabi tutulmuştur. Hazırlanan numunelerin 7 ve 28 gün dayanımları belirlenmiştir. Testlerde gösterim ve yorumlama kolaylığı sağlaması açısından numuneler Çizelge 3.5'deki gibi kodlanmıştır.

Çizelge 3.5. Numune isimleri ve kısaltmaları

Numune Adı	Numune Kodu
Ham kül, öğütülmemiş	H0'
Ham kül, 45 dakika öğütülmüş	H45'
Ham kül, 60 dakika öğütülmüş	H60'
Ham kül, 120 dakika öğütülmüş	H120'
İnce/ürün kül, öğütülmemiş	S0'
İnce/ürün kül, 30 dakika öğütülmüş	S30'
İnce/ürün kül,60 dakika öğütülmüş	S60'
Atık kül, öğütülmemiş	A0'
Atık kül, 45 dakika öğütülmüş	A45'
Atık kül, 60 dakika öğütülmüş	A60'
Atık kül, 120 dakika öğütülmüş	A120'

Ham, atık ve ince/ürün külün kimyasal kompozisyonları Çizelge 3.6'de gösterilmektedir. Uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları TS EN 450-1 standardına göre incelendiğinde, kızdırma kaybı oranının %5'den az olması koşulunun 3 farklı akış kolu için de karşılandığı görülmektedir. TS EN 450-1'e göre eğer kızdırma kaybı %7 değerlerinde ise ulusal standartlara göre uygun olduğu kabul edilmektedir. Bu standartlarda $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ miktarının da en az %70 olması istenmektedir. Bu değer 3 farklı akış kolu için de sağlanmaktadır. Sonuç

olarak, 3 farklı akış kolu için standartta belirtilen 45 µm bakiyesinin %40'dan az olma koşulu sağlanırsa akış kollarındaki tüm uçucu küller kullanılabilir.

Çizelge 3.6. Farklı akış kollarındaki uçucu küllere ait kimyasal kompozisyonlar

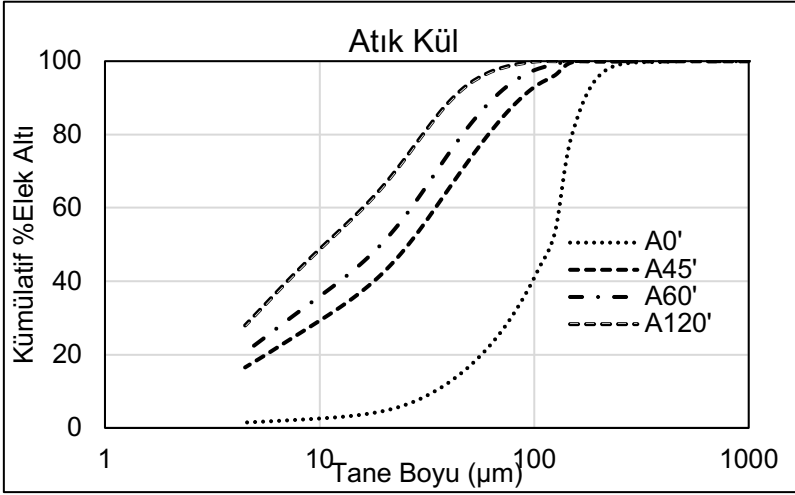
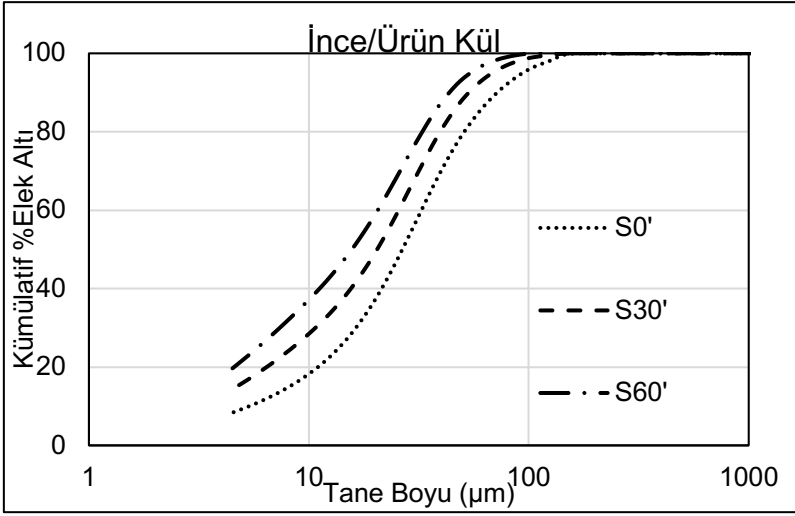
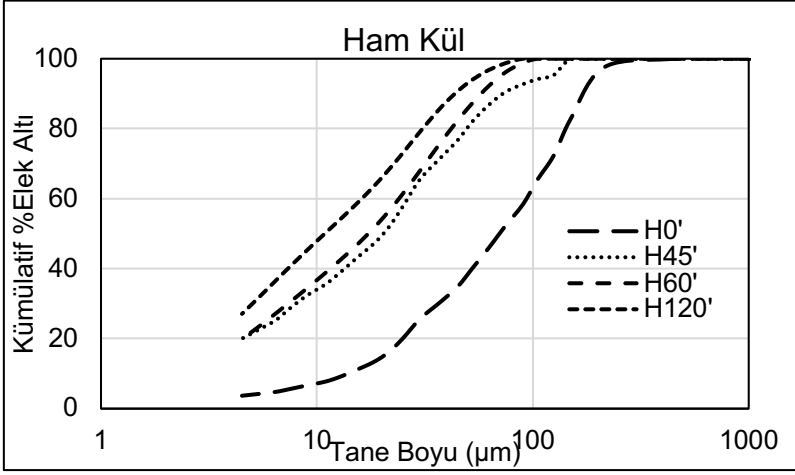
	Ham	İnce/ürün	Atık
SiO ₂	56,17	53,44	56,64
Al ₂ O ₃	18,22	18,19	18,08
Fe ₂ O ₃	11,41	12,44	11,29
CaO	3,85	4,48	3,66
MgO	4,34	4,68	4,28
SO ₃	0,69	1,12	0,57
Na ₂ O	0,80	0,82	0,80
K ₂ O	1,59	2,05	1,51
K.K.	2,07	1,00	2,21

Farklı akış kollarında yapılan çalışmada numunelerin tane boyu dağılımları, 45 µm, 90 µm ve 200 µm bakiye değerleri, özgül ağırlıkları ve Blaine (cm²/gr) değerleri hesaplanmıştır. Analiz sonuçları Çizelge 3.7'da sunulmaktadır.

Çizelge 3.7. Numunelere ait Blaine, bakiye ve özgül ağırlık analizleri

Numune Kodu	Blaine (cm ² /gr)	45µm Bakiye	90µm Bakiye	200µm Bakiye	Özgül Ağırlık
H0'	3300	64,8	44,6	17,6	1,91
H45'	8730	18,2	0	0	2,31
H60'	9440	11,8	0	0	2,37
H120'	11800	5,4	0	0	2,48
S0'	6140	16,4	0	0	2,05
S30'	7780	7,8	0	0	2,24
S60'	8820	4,6	0	0	2,32
A0'	2460	82,4	57,8	22,8	1,87
A45'	8460	24,6	0	0	2,32
A60'	9550	15,4	0	0	2,37
A120'	12000	5,6	0	0	2,48

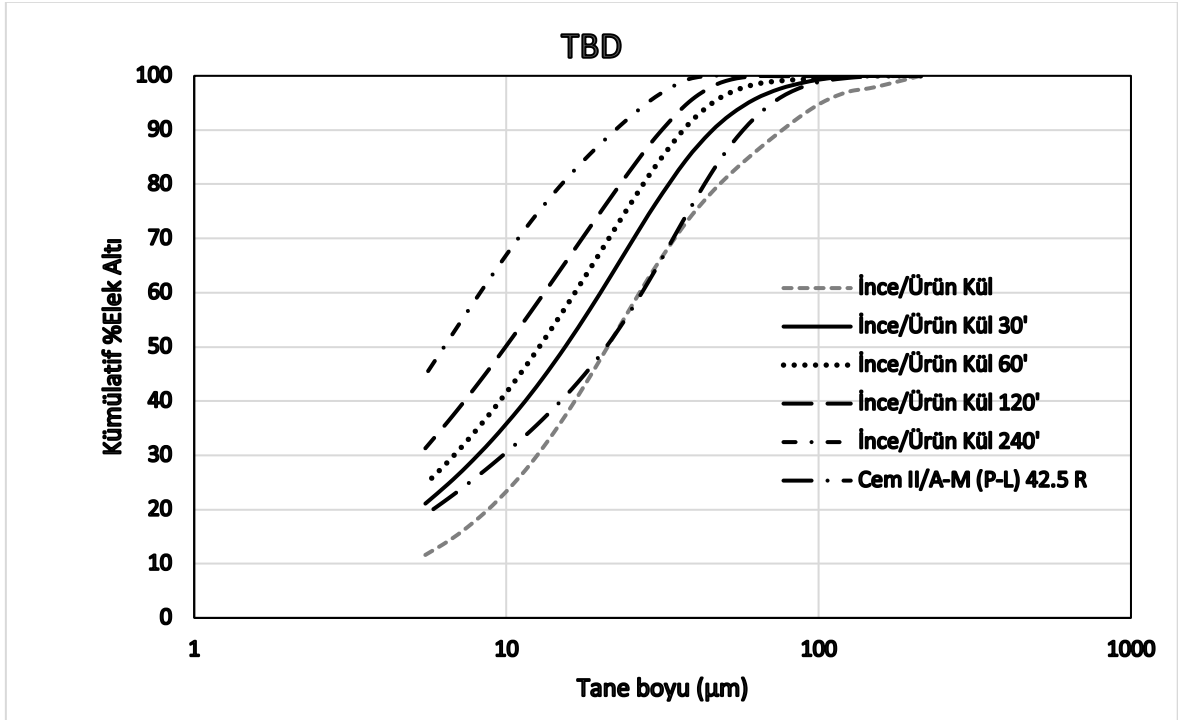
Şekil 3.8 incelendiğinde, atık ve ham uçucu kül numuneleri farklı D₅₀'lere sahip olmasına rağmen, aynı öğütme sürelerinde yakın D₅₀'lere ulaşmışlardır. H45' ile S30' numunesinin ve H120' ile A120' numunesinin D₅₀'si ise aynıdır.



Şekil 3.8. Farklı akış kollarında yürütülen incelik çalışmasına ait tane boyu dağılımları

3.2.3. İnce/ürün akış kolu üzerinde yürütülen çalışmalar

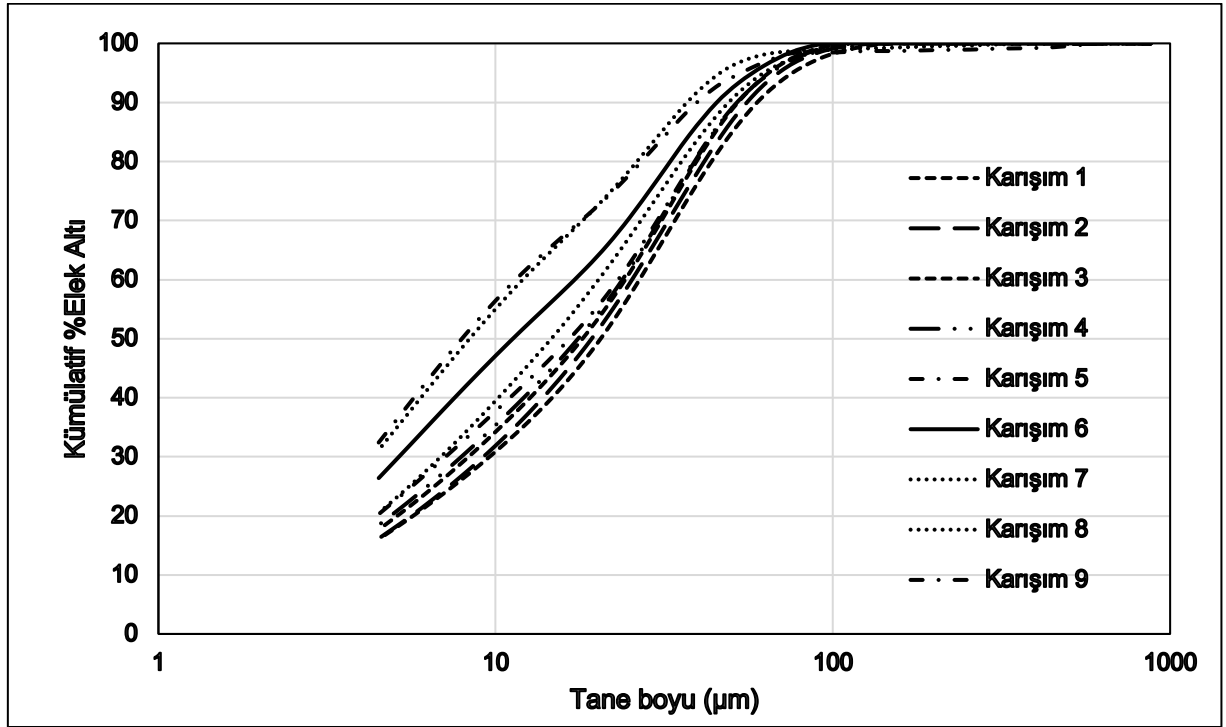
Çalışmanın 3. ve son kısmında, ince/ürün akış kolundan alınan uçucu kül 30, 60, 120 ve 240 dakika öğütülerek çimentoya farklı oranlarda katılmıştır. Aynı zamanda farklı katkı oranlarında uçucu kül ve çimento birlikte 120 dakika öğütülerek testlere tabii tutulmuştur. Çalışmalarda Cem II/A-M (P-L) 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır. Çimento numunesi hali hazırda %18 uçucu kül içermektedir. Çimentonun ve farklı inceliğe öğütülmüş uçucu küllerin tane boyu dağılımları Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9. Farklı inceliklerdeki uçucu külün ve çimentonun tane boyu dağılımı

Diğer bölümlerden farklı olarak, uçucu kül farklı katkı oranlarında çimento ile karıştırılmıştır (Çizelge 3.8). Farklı sürelerde (30, 60, 120 ve 240 dakika) öğütülen uçucu küller %30 oranı yakalanacak şekilde çimento ile karıştırılmıştır. 120 dakika öğütülen kül için toplam katkı oranı %40 iken, 240 dakika öğütülen uçucu kül %45 oranı yakalanacak şekilde çimento ile karıştırılmıştır. Birlikte öğütme koşullarının incelendiği testlerde %30 ve %45 kül içerikli karışımlar 120 dakika öğütülmüştür. Bunlara ek olarak, öğütülmemiş uçucu kül çimentoya katılarak %30 kül oranı yakalanmıştır. Ek olarak, çimento tek başına şahit numune olarak hazırlanmıştır. Karışımlara ait tane boyu dağılımı Şekil 3.10'da gösterilmektedir. Çalışmanın bu kısmında uçucu kül katkılı çimentonun, erken dayanımda neden olduğu kaybın

ortadan kaldırılması hedeflenmiştir. Karışımlar Blaine, su ihtiyacı(%), priz süresi ve genleşme tayini testlerine de tabi tutulmuşlardır (Çizelge 3.9).



Çizelge 3.8. En uygun uçucu kül oranının belirlenmesi için yapılan test çalışması

	Kül Oranı	Öğütme Tipi	Öğütme Süresi
Karışım 1	30	Öğütülmemiş	0'
Karışım 2	30	Sadece Uçucu Kül	30'
Karışım 3	30	Sadece Uçucu Kül	60'
Karışım 4	30	Sadece Uçucu Kül	120'
Karışım 5	30	Sadece Uçucu Kül	240'
Karışım 6	45	Sadece Uçucu Kül	120'
Karışım 7	40	Sadece Uçucu Kül	240'
Karışım 8	30	Birlikte Öğütme	120'
Karışım 9	45	Birlikte Öğütme	120'

Çizelge 3.9. Karışımlara ait Blaine, %su, priz başlangıç ve bitiş süreleri, genleşme ve D₅₀ değerleri

	Blaine (g/cm ³)	%Su	Priz başlangıcı (Saat)	Priz Bitişi (Saat)	Genleşme (mm)	D ₅₀ (µm)
Karışım 1	4400	36,2	04:30	05:50	0,3	20,5
Karışım 2	4680	36,8	04:55	06:20	0,9	19,28
Karışım 3	4900	35	04:25	05:45	0,5	18,09
Karışım 4	5040	34	04:15	05:35	0,8	17,58
Karışım 5	5180	37	04:20	05:25	0,2	16,6
Karışım 6	6640	37,5	05:25	06:25	0,1	11,27
Karışım 7	6080	38,8	05:40	07:00	0	14,67
Karışım 8	7870	31,8	03:30	04:30	0	8,41
Karışım 9	9010	35,9	04:35	05:35	0	7,98
Çimento	4180	30,4	03:25	04:25	0,3	20,52

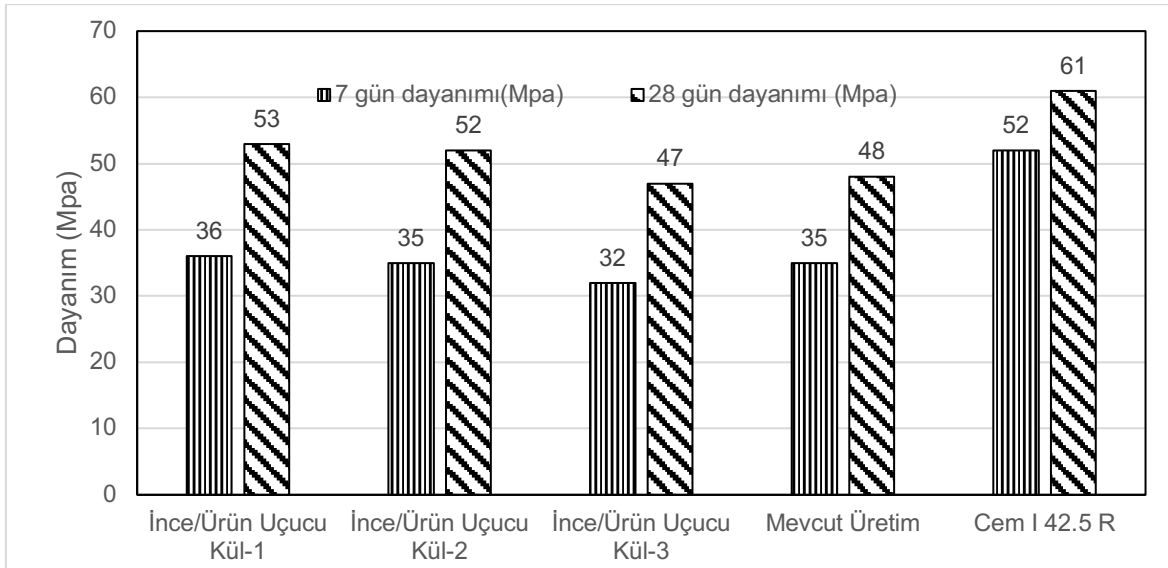
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Havalı Sınıflandırıcı parametrelerinin değiştirilmesi ile yapılan dayanım çalışmaları

Tez kapsamında uçucu kül üzerinde yürütülen çalışmalar 3 aşamada gerçekleştirilmiştir. Sonraki bölümlerde çalışmaların detayları sunulmaktadır. Havalı sınıflandırıcının hava hızı sabit tutularak farklı rotor hızlarında (411-392-372 rpm) farklı inceliklerde uçucu küller elde edilmiştir. Sınıflandırıcının farklı çalışma koşullarında ince akış kollarından alınan uçucu kül numuneleri TS EN 450-1 standardında belirtildiği üzere %75 çimento ve %25 uçucu kül olacak şekilde karıştırılarak dayanım testlerine tabi tutulmuştur. Tesiste, normal çalışma koşullarında elde edilen uçucu kül referans numune olarak belirtilirken, Cem I 42.5 R çimento numunesi ise dayanım grafiğinde belirtilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. Uçucu küllere ait D₅₀ ve Blaine değerleri

	Uçucu Kül D ₅₀ (µm)	Blaine cm ² /gr
Ince/ürün 1	19	6430
Ince/ürün 2	23	5980
Ince/ürün 3	33	5320
Mevcut Üretim	27	5380



Şekil 4.1. Havalı sınıflandırıcı etrafı yapılan incelik çalışması dayanım sonuçları

Dayanım sonuçları incelendiğinde uçucu kül inceldikçe numunelerin 7 ve 28 gün dayanımlarının arttığı gözlenmiştir. En yüksek dayanım değerine ince/ürün 1 numunesinde ulaşılmış olmasına karşın şahit (uçucu kül içermeyen) numunenin dayanım değerlerine ulaşamamıştır. Uçucu kül içerikli numunelerin 28 gün dayanımları kıyaslandığında D_{50} 25 μm değerinin altına indiği durumda dayanım değerleri referans numunesini yakalamış ve geçmiştir. Dayanım artışı D_{50} 23 μm değerine sahip numune için %7,8, D_{50} 19 μm değerine sahip numune için %11 civarındadır. Atakay [46], F-tipi uçucu kül ile yaptığı çalışmada benzer sonuçlar elde etmiştir. %25 kül katkısının kullanıldığı numunede D_{50} 'nin 32 μm 'dan 20 μm 'a inmesi ile dayanımda %12'lik bir artış gerçekleşmiştir.

Dayanım sonuçları incelendiğinde, Seyitömer uçucu külünün D_{50} değerinin 25 μm üzerine çıktığı koşulda, çimento dayanımını olumsuz yönde etkilediği anlaşılmıştır.

4.2. Havalı Sınıflandırıcı Etrafında Akış Kollarında Yürütülen Öğütme Çalışmaları

Çizelge 4.2' de numunelerin özgül ağırlık değerleri sunulmaktadır. Özgül ağırlık, artan demir-oksit oranı ile artarken yanmamış karbon oranı ile azalmaktadır [71]. Burada gözlemlenen özgül ağırlık farkı aynı zamanda senosfer adı verilen yapının iri tane boylarında yoğunlaşmasından da kaynaklanabilmektedir.

Çizelge 4.2. Havalı Sınıflandırıcı etrafı özgül ağırlık değerleri

	Özgül Ağırlık
Ham kül-öğütülmemiş	1,91
İnce/ürün kül-öğütülmemiş	2,05
Atık kül-öğütülmemiş	1,87

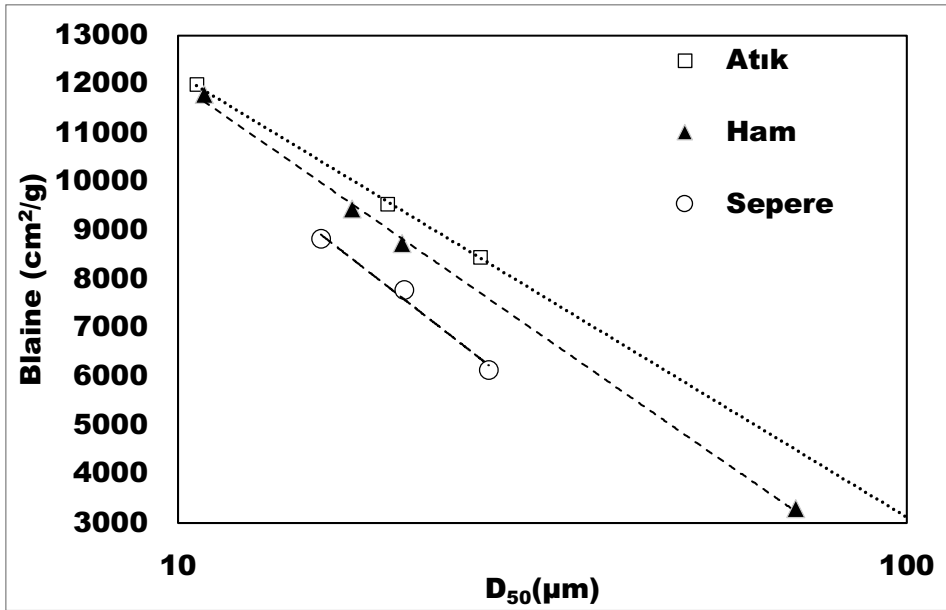
Çizelge 4.3’de farklı akış kollarından alınan uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları sunulmaktadır. Literatürde de belirtildiği üzere [28, 45, 49], sınıflandırma işlemi uçucu külün kimyasal kompozisyonunu etkilemektedir. Özellikle SiO₂, SO₃, CaO ve K.K.’nin tane boyuna bağlı olarak farklılık arz ettiği anlaşılmaktadır. Sınıflandırıcının atık akış kolunda, ince/ürüne kıyasla SO₃, CaO miktarının azaldığı ve K.K. ve SiO₂ miktarının ise arttığı gözlenmektedir. Literatürde, sınıflandırma işleminin kimyasal kompozisyon üzerine etkisi ile ilgili farklı yorumlar bulunmaktadır. Erdoğan ve Türker [66] ve Jaturapitakkul vd. [72] çalışmalarında SO₃ miktarının iri tane boylarında daha az olduğu konusunda hemfikirlerdir. Kumar vd. [73] ise fraksiyonlarına ayırdığı uçucu külün kimyasal kompozisyonlarını incelemiş ve iri boylarda artan K.K. oranının artan yanmamış karbon oranından kaynaklanabileceği yorumunda bulunmuştur. Benzer sonuçlar Seyitömer uçucu külünün kimyasal kompozisyonunu gösteren Çizelge 4.3.’te gösterilmektedir. Sınıflandırıcının iri akış kolunda K.K. daha yüksektir. Yılmaz [58], kızdırma kaybı (K.K.) ile yanmamış karbon oranı arasında bir ilişki olduğunu ileri sürmüştür.

Çizelge 4.3. Farklı akış kollarına ait kimyasal kompozisyonlar

Bileşen	Ham	Atık	İnce/ürün
SiO ₂	55,52	56,42	52,06
Al ₂ O ₃	18,23	18,02	18,00
Fe ₂ O ₃	11,74	11,37	12,60
CaO	4,4	4,18	5,30
MgO	4,34	4,16	4,66
SO ₃	0,99	0,71	1,61

Na ₂ O	0,87	0,77	0,85
K ₂ O	1,78	1,57	2,19
Cl	0,005	0,007	0,01
K.K.	1,35	1,5	0,73

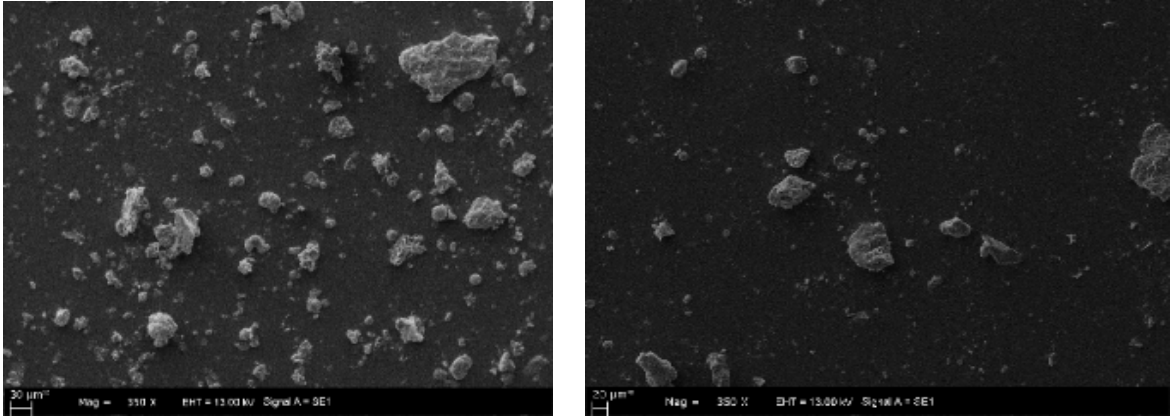
Literatürde de belirtildiği üzere, malzeme inceldikçe Blaine değeri artmaktadır [40, 49, 74]. Fakat, yürütülen tez çalışmasında eğilimlerin malzeme karakteristiğinden etkilendiği sonucuna varılmıştır. Bir başka deyişle, ince/ürün, ham ve atık kolundaki uçucu küllerin eğilimlerinin birbirinden farklı olduğu sonucuna varılmıştır. Benzer yaklaşım Kiattikomol vd. [50] tarafından da ileri sürülmüş ve uçucu küllerin şekil karakteristiğinin, içerdiği düzensizliklerin ve boşluklu yapıların Blaine ölçümlerini etkilendiği belirtilmiştir. Bu çalışmada, şekil, boyut ve kimyasal kompozisyonun, aynı D₅₀'ye sahip uçucu küllerin Blaine değerlerinde farklılıklar ortaya çıkmasına sebep olduğu görülmüştür (Şekil 4.2).



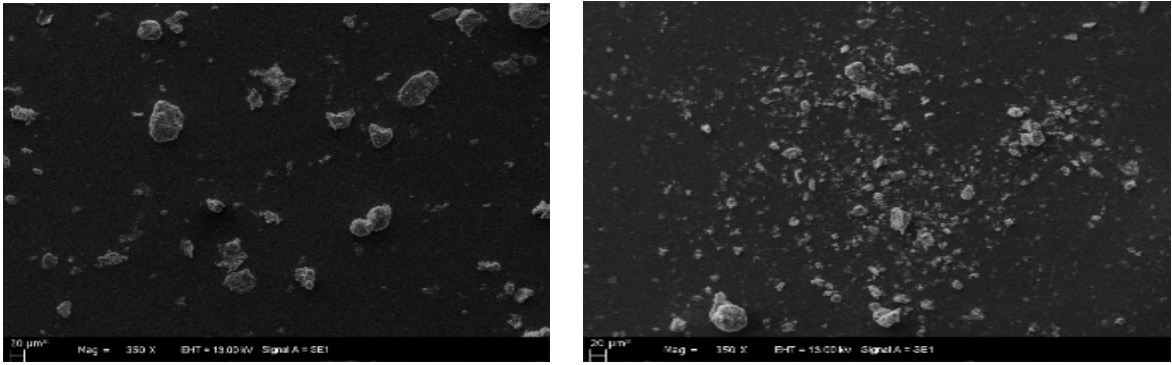
Şekil 4.2. Farklı akış kolları için ortalama boy ile Blaine değeri değişimi

Uçucu küller çoğunlukla küresel yapıdaki tanelerden oluşmaktadır. Bu küresel tanelerin artması işlenebilirliği artırırken, su ihtiyacını azaltmaktadır. Bu sebeple, farklı akış kollarında yürütülen öğütme çalışmalarının şekil faktörü üzerine etkileri incelenmiştir. Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 incelendiğinde öğütmenin ürün şekline doğrudan bir etkisi olduğu gözlemlenebilmektedir. Öğütme ile küresel tanelerin

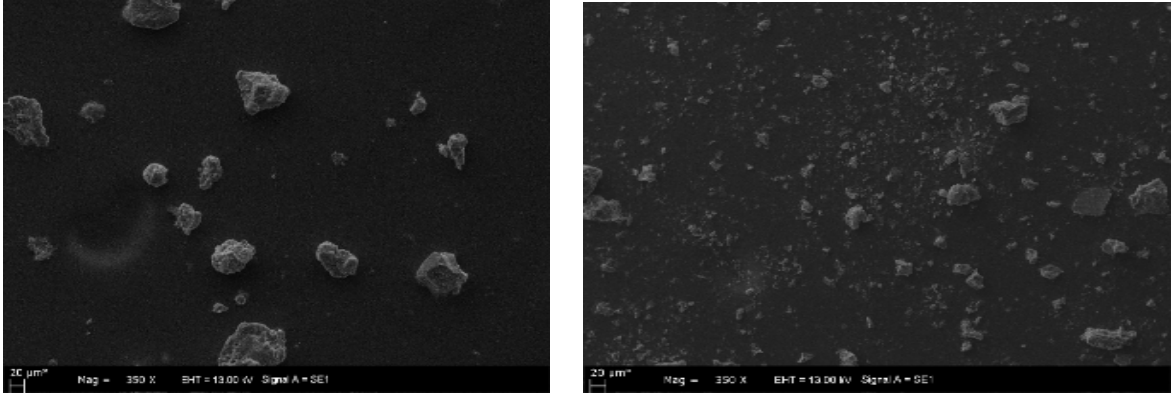
ortadan kalktığı ve şekilsiz, köşeli yapıların miktarında artış olduğu görülmüştür. Ince/ürün akış kolunda, küresel ve camsı taneciklerin 10 µm tane boyunda yoğunlaşırken, atık akış kolunda ise küresel fakat camsı olmayan taneler 45 µm tane boyunda yoğunlaşmaktadır. Paya [64] ve Bouzoubaa [65]'da yaptıkları çalışmalarda benzer sonuçlara ulaşmış ve öğütmenin küresel tanecikler üzerine olumsuz etkileri olduğu yorumunda bulunmuşlardır.



Şekil 4.3. Sırasıyla öğütülmemiş ve öğütülmüş ince/ürün külün morfolojisine ait fotoğraflar (D_{50} : 20 µm)



Şekil 4.4. Sırasıyla öğütülmemiş ve öğütülmüş ham külün morfolojisine ait fotoğraflar (D_{50} : 20 µm)

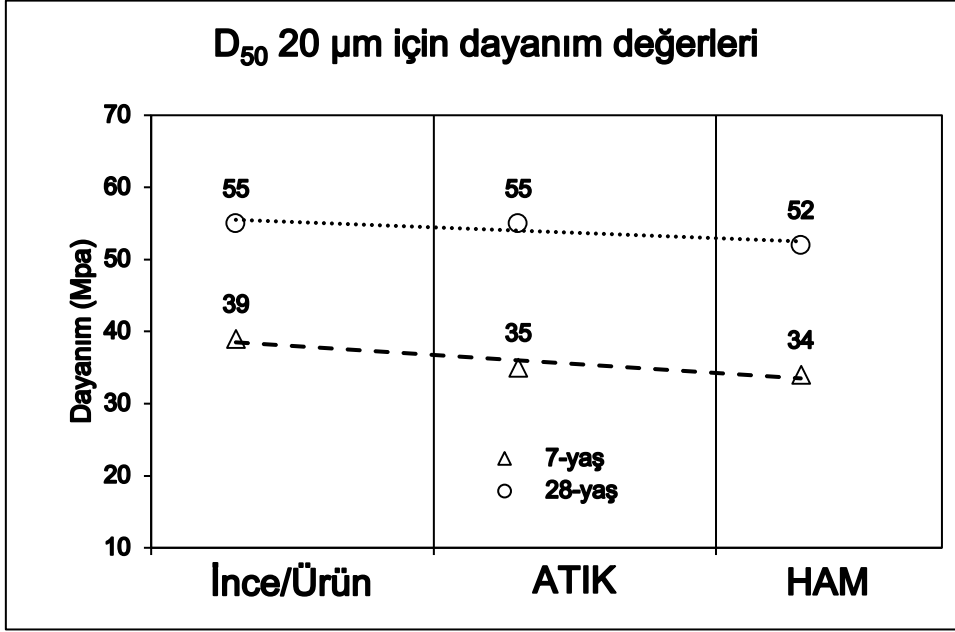


Şekil 4.5. Sırasıyla öğütülmemiş ve öğütülmüş kaba/atık külün morfolojisine ait fotoğraflar (D_{50} : 19 μm)

TS EN 450-1 standardında belirtildiği prosedür kullanılarak numunelerin basma dayanım değerleri ölçülmüştür (Çizelge 4.4).

Çizelge 4.4. Farklı incelikteki uçucu küllerin dayanım sonuçları

Numune Kodu	7-gün (MPa)	28-gün (MPa)	Uçucu Kül D_{50} (μm)
H0'	18	21	70
H45'	34	52	20
H60'	37	47	17
H120'	39	62	10
S0'	34	46	26
S30'	39	55	20
S60'	41	54	15
A0'	11	14	118
A45'	37	49	26
A60'	35	55	19
A120'	43	59	10
Şahit	52	61	-



Şekil 4.6. Sırasıyla ince/ürün, atık ve ham küllerin aynı D₅₀ değerindeki dayanımları

Çizelge 4.4'de görüldüğü üzere, D₅₀ değerinin 20 µm olduğu durumda ham kül katkılı çimentoya kıyasla ince/ürün kül katkılı çimentonun 7 günlük ve 28 günlük dayanım değerleri sırasıyla %14,7 ve %5,8 artmıştır. Bununla birlikte, D₅₀'nin 10 mikron olduğu durumda atığın 28 günlük dayanım değeri ham külden daha düşüktür (Çizelge 4.4). Sonuç olarak, uçucu külün kimyasal kompozisyonun dayanım üzerine etkileri hakkında mutlak bir sonuç elde etmek zordur (Şekil 4.6). Kiattikomol ve arkadaşları da [50] benzer sonuçlara varmıştır. Çalışmalarında uçucu külün sınıflandırmadan kaynaklanan kimyasal değişikliklerinin dayanıma önemli bir etkisi bulunmadığını vurgulamışlardır. Öte yandan, atık veya ham külün öğütülmesi ile ince/ürün kül ile benzer özellikler sergileyeceğinden, öğütülerek kullanılması mümkün hale gelecektir.

Ham, ince/ürün ve atık akış kolundan alınan numuneler farklı inceliklere öğütülmüş ve temsili bir şekilde bölündükten sonra çimento ve beton testleri için ayrılmıştır. Beton testleri ilgili standarda uygun şekilde Bursa Çimento Fabrikası A.Ş. tarafından gerçekleştirilmiştir. Kullanılan çimento, uçucu kül, su, kum ve mıcır oranları sabit tutularak, beton sınıfı C30/37 olacak şekilde dayanım ve çökme testlerine tabii tutulmuşlardır. Her test için uçucu kül miktarı sabit tutulmuştur (30%).

Son yıllarda, taze betonun özelliklerinden biri olan “işlenebilirlik” giderek önem kazanmaktadır. İşlenebilirlik, genel anlamda en az enerji kullanılarak betonun taşınması ve yerleştirilmesi işlemi olarak tanımlanabilmektedir [40]. İşlenebilirliğin iyileştirmesi üzerine yapılan çalışmalar, kendiliğinden yerleşen beton adı verilen yeni bir beton türünün de ortaya çıkmasına neden olmuştur [74, 75]. İşlenebilirlik aynı zamanda betonun pompalanabilirliği, kıvamı, akışkanlığı ve sıkışabilirliği kavramlarını da kapsamaktadır [39, 76].

Beton sektörü tarafından işlenebilirliğinin belirlenmesi için yaygın olarak çökme test düzeneği tercih edilmektedir (ASTM C143[78], TS EN 12350-2[79]).

Ham küle ait beton verileri incelendiğinde (Çizelge 4.5), öğütme süresi arttıkça dayanım değerlerinin de arttığı gözlenmektedir. Ham külün 45 dakika (H45') öğütülmesi sonucunda, referans olarak belirlenen ince/ürün küle ait beton sonuçlarına çok yakın değerler edilmiştir. Ham uçucu kül, çökme testlerinde referans numuneye yakın fakat daha düşük değerler vermiştir. Benzer sonuçlara atık kül için de ulaşılmıştır. Dayanım değerleri malzeme incelidikçe artmış ve 45-60 dakika öğütme süresi sonunda ise ince/ürün külü yakalamıştır (Çizelge 4.6). Çökme başlangıç değerleri ince/ürün küle yakınken, 30 dakika değerleri ince/ürün külden düşük çıkmıştır. En iyi değerler, 60 dakika öğütme sonunda elde edilmiştir. Ham küle kıyasla atık küllerin çökme (30 dakika) sonuçları çok düşük çıkmıştır. Bu da işlenebilirlikte azalmanın ortaya çıkacağı anlamına gelmektedir.

Ince/ürün külün çökme değerleri ise ham ve atık kül kadar öğütmeden etkilenmediği test sonuçlarından anlaşılmaktadır. Ince/ürün uçucu külün 30 dakika öğütülmesi sonucunda dayanımda %7'lik bir artış sağlanırken, benzer çökme değerlerinde uçucu kül eldesi mümkündür (

Çizelge 4.7).

Çizelge 4.5. Ham küle ait beton dayanım ve çökme değerleri

	Ham (0')	Ham (45')	Ham (60')	Ham (120')	Ince/ürün (0')
D ₅₀	70	20	17	11	27
3 gün dayanımı	19	21	20	21	22
7 gün dayanımı	29	32	33	36	33
28 gün dayanımı	42	50	53	56	52
Çökme Başlangıç (cm)	21	23	22	21	24

Çökme (30 dakika) (cm)	23	19	21	19	22
------------------------	----	----	----	----	----

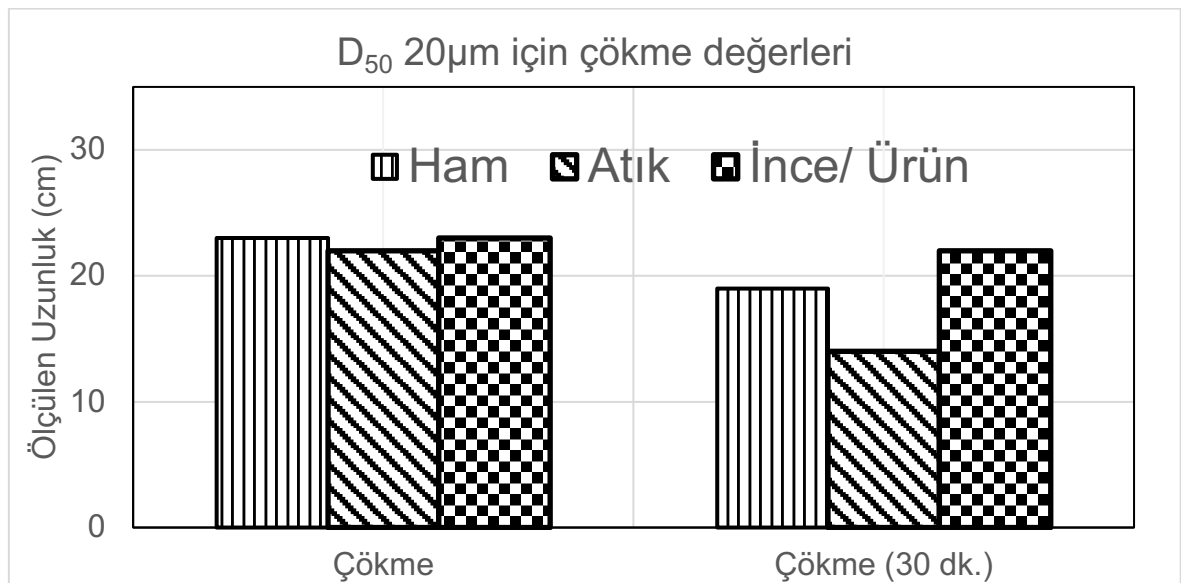
Çizelge 4.6. Atık küle ait beton dayanım ve çökme değerleri

	Atık (0')	Atık (45')	Atık (60')	Atık (120')	Ince/ürün (0')
D ₅₀	118	26	19	11	27
3 gün dayanımı	19	20	20	19	22
7 gün dayanımı	27	31	31	34	33
28 gün dayanımı	41	50	50	55	51
Slump Başlangıç (cm)	20	22	22	21	24
Slump (30 dakika) (cm)	17	10	14	12	22

Çizelge 4.7. Ince/ürün küle ait beton dayanım ve çökme değerleri

	Ince/ürün (0')	Ince/ürün (30')	Ince/ürün (60')
D ₅₀	27	20	116
3-gün dayanımı	22	23	22
7-gün dayanımı	33	35	34
28-gün dayanımı	51	55	55
Slump Başlangıç (cm)	24	23	22
Slump (30 dakika) (cm)	22	22	22

Benzer D₅₀ değerleri (20 µm) için, çökme değerleri Şekil 4.7'de gösterilmektedir. Aynı incelikteki küllerinin çökme değerlerinde ince/ürün kül, ham ve atık küle kıyasla daha iyi sonuçlar vermiştir. 30 dakika öğütme sonunda bulunan çökme değerlerinde ise en büyük fark atık küle meydana gelmiştir.

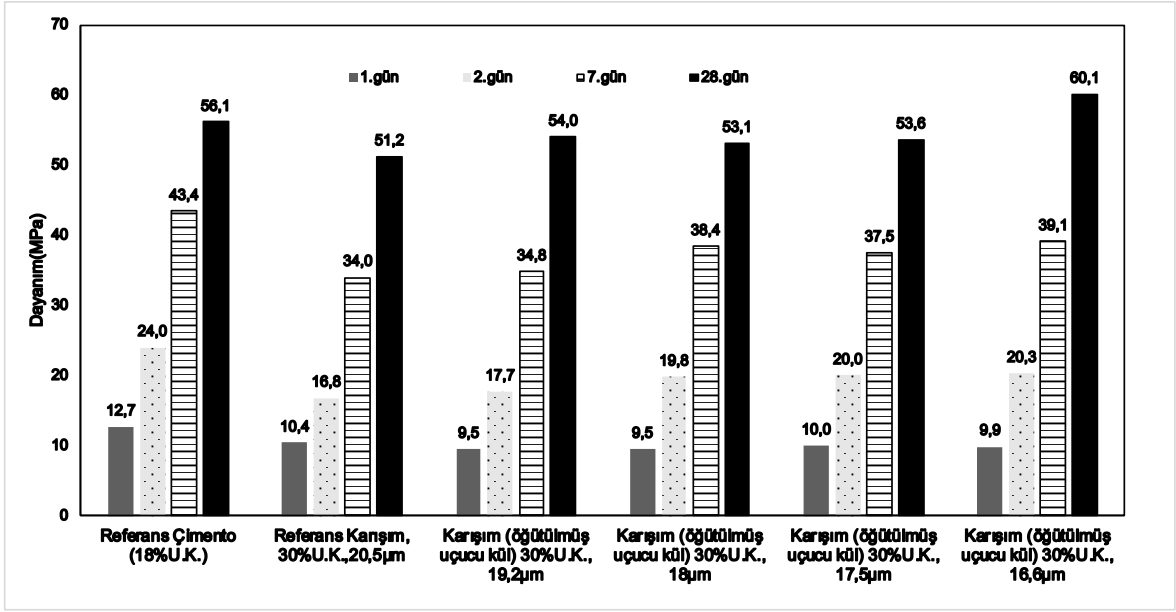


Şekil 4.7. D₅₀ 20 µm için ham, atık ve ince/ürün kül için çökme değerleri

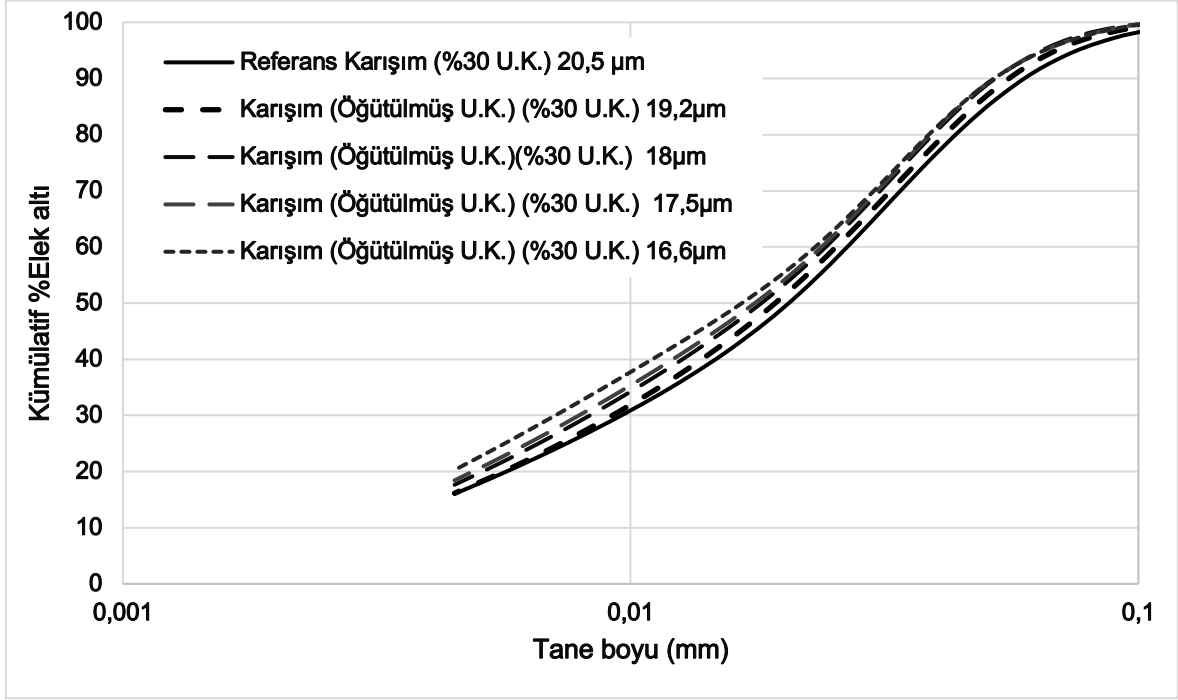
4.3. İnce/ürün Kül Üzerinde Yapılan Çalışmalar

4.3.1. İnce Akış Kolu Üzerinde Farklı Katkı Oranlarının ve Farklı Öğütme Yöntemlerinin Denendiği Çalışmalar

İnce/ürün akış kolu üzerinde yapılan çalışmalarda, kül miktarının artırılması ve betonun erken dayanımının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu kısımda çimento ve külü birlikte öğütmenin çimento kalitesi üzerine etkileri incelenmiş ve sadece kül öğütme işlemleri ile karşılaştırılmıştır. Ek olarak, bu kısımdaki amaçlardan bir tanesi erken dayanımın değişiminin incelenmesi olduğundan, 1 ve 2 gün dayanımları da test matrisine eklenmiştir. Sonuçlar Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8. Farklı incelikte uçucu küle sahip karışımların referans numunesiyle karşılaştırılması (%30 uçucu kül içeriği)



Şekil 4.9. Karışımlara ait tane boyu dağılımları (%30 Uçucu kül içeriği)

Şekil 4.8 incelendiğinde tane boyunun ve kül içeriğinin dayanım parametrelerine olan etkileri incelenmiştir. Karışımlara ait tane boyu dağılımları ise Şekil 4.9'da sunulmaktadır. Hali hazırda %18 kül içeriğine sahip referans numunesinin kül içeriği %30'a çıkarılmış ve farklı inceliklerin dayanım üzerine etkisi incelenmiştir. Dayanım değerleri incelendiğinde, 28 gün dayanımında 56,1 MPa'dan 51,2 MPa'a bir düşüş gözlemlenmiştir. Yüzdesele bir şekilde ifade etmek gerekirse bu %8,7'lik bir dayanım kaybını ifade etmektedir. Literatür incelendiğinde benzer sonuçlar araştırmacılar tarafından elde edilmiştir. Songpiriyakij ve Jaturapitakkul [80] F-tipi uçucu kül ile dayanım değerlerini ön planda tutan bir araştırma gerçekleştirmiştir. Çimentoya eklenen %15 oranındaki uçucu kül beton dayanımında %10'luk bir düşüşe neden olurken, %25 oranındaki uçucu kül ise %15'lik bir düşüşe neden olmuştur. Karahan ve Atiş (2007) [55], Sugözü uçucu külünü kullandıkları çalışmalarında betona %10 ila %45 oranında uçucu kül katkısının dayanıma olan etkilerini araştırmışlardır. %10 oranında uçucu kül içeren çimentonun 28 gün dayanımında %6'lık bir düşüş gözlemlenirken, %45 oranında kül içeren çimentonun aynı dayanımdaki düşüşü %28 oranına ulaşmıştır.

Şekil 4.8'de dayanım değerlerine ek olarak numunelerin %50'sinin geçtiği tane boyları mikron cinsinden verilmiştir. Bu testlerde, kül miktarının sabit tutulduğu (referans numune hariç) ve çimentonun öğütülmediği düşünülüğünde, karışımların

D₅₀'lerinin değişiminin dayanım üzerinde doğrudan etkisi olduğu görölmektedir. Uçucu küllerin D₅₀'değerleri de ek olarak Çizelge 4.8'de verilmiştir.

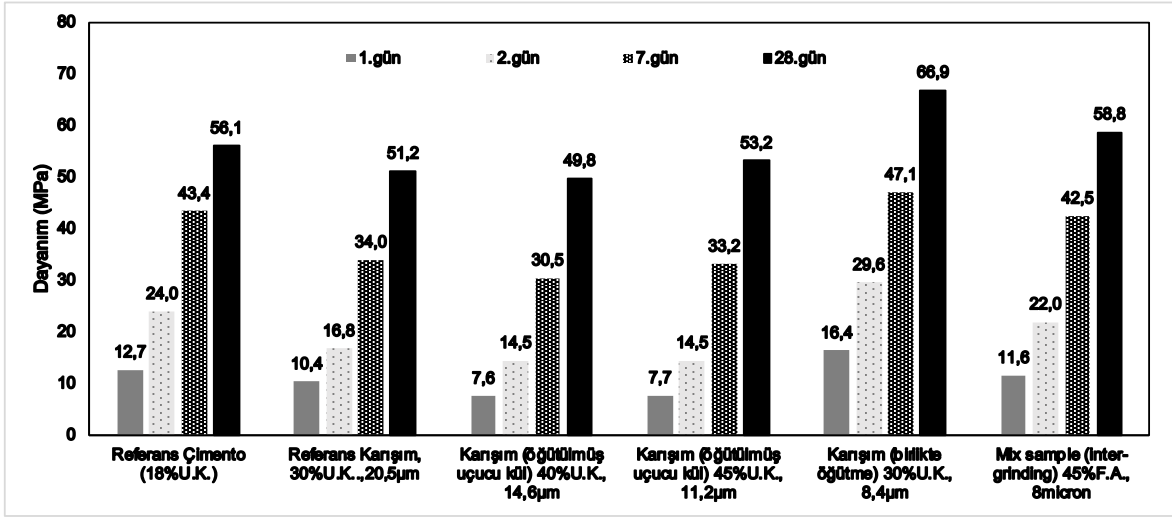
Çizelge 4.8. Uçucu küllerin ve karışımların D₅₀ değerleri

D ₅₀ (µm)	
Uçucu kül	Karışım
15,4	19,2
12,8	18
10	17,5
6,3	16,6

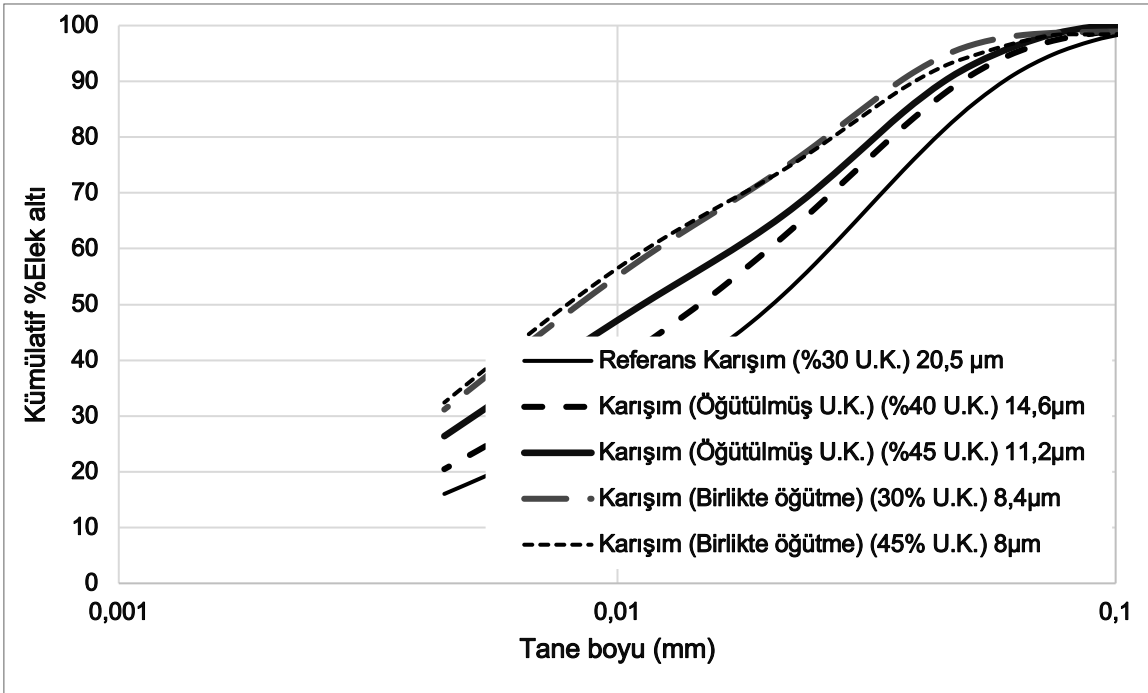
Sonuçlar incelendiğinde, %30 uçucu kül içeriğine sahip karışımlarda uçucu kül incelidikçe 28 gün dayanımda artış gözlenmektedir. Fakat erken dayanımlarda (1 gün) bu etki gözlemlenememiştir. Uçucu kül incelse dahi çimentonun erken dayanımda gerçekleşen kaybın önüne geçememektedir. Uçucu külün D₅₀ değerinin 15.4 µm'den 10 µm'ye indirilmesi ile 2 gün dayanımında %19'luk bir artış sağlanmıştır. 7 gün dayanımında ise bu artış %10,3 olmuştur. Sonuç olarak, D₅₀ 6.3 µm değeri dışında, 28 gün dayanımında %30 kül katkılı numuneler referans numuneyi yakalayamamıştır. En ince değerde (6,3 µm) 28 gün dayanımdaki artış %7,1 olmuş, fakat erken dayanımında %22'lik bir kayıp yaşanmıştır. Bu bilgiler ışığında, yüksek oranlarda ince öğütölmüş uçucu kül içeren çimentonun erken dayanım sorununu (mevcut teknolojiler düşünöldüğünde) ekonomik olarak ortadan kaldırmakta tek başına zorlanacağı yorumunda bulunulabilir.

Şekil 4.10'da yalnız uçucu külün öğütölmemesinin ve uçucu kül ile çimentonun birlikte öğütölmemesinin dayanım açısından farklılıkları ve yüksek uçucu kül içeren test numunelerinin dayanım sonuçları gösterilmektedir. Bu karışımlara ait tane boyu dağılımı ise Şekil 4.11'de verilmiştir. %45 oranında uçucu kül içeren çimentonun (D₅₀:11,2 µm) 28 gün dayanımında %5,1 azalma meydana gelmiştir. Aynı çimento numunesinin ise 1 gün dayanımındaki kayıp %40 civarındadır. Çimentoda gerçekleşen bu dayanım kaybının birlikte öğütme sayesinde engellendiği görölmektedir. %30 ve %45 kül içeriğine sahip çimentolara birlikte öğütmenin uygulandığı durumda 28 gün dayanım değerleri 66,9 MPa ve 58,8 MPa olmuş ve referans değerinin üzerinde (56,1 MPa) değerler elde edilmiştir. Birlikte öğütme yöntemi kullanılarak uçucu kül miktarı %45'e çıkarılabilmektedir. Erken dayanımlar

göz önünde bulundurulduğunda dayanım değerleri daha çarpıcı şekilde farklılaşmaktadır. Kül içeriğinin %30 olduğu öğütülmemiş kül içeren karışım ile birlikte öğütme uygulanan karışım karşılaştırıldığında 1 gün dayanımındaki artış yüzdesel olarak %57 civarındadır. Referans çimentoyla karşılaştırıldığında ise bu artış %41 olmaktadır. Kül içeriğinin %45 olduğu ve çimentoya birlikte öğütme uygulanan karışım için ise erken dayanımdaki azalma göz ardı edilebilir seviyededir.



Şekil 4.10. Farklı kül içeriğinde ve farklı incelikteki uçucu kül içeren karışımların karşılaştırılması



Şekil 4.11. Farklı kül içeriğindeki ve farklı incelikteki uçucu kül içeren karışımlara ait tane boyu dağılımları

Çalışma göstermiştir ki uçucu kül ve çimentonun birlikte öğütülmesi dayanım kazanımı konusunda daha etkili olmaktadır.

Çizelge 4.9. Priz sürelerinin karşılaştırılması

	Priz başlangıç (saat)	Priz bitiş (saat)
Referans çimento (%18)	3:25	4:25
Referans karışım, %30, D ₅₀ : 20,5 µm	4:30	5:50
Karışım (sadece uçucu kül öğütüldü) %30, D ₅₀ :19,2µm	4:55	6:20
Karışım (sadece uçucu kül öğütüldü) %30, D ₅₀ : 18µm	4:25	5:45
Karışım (sadece uçucu kül öğütüldü) %30, D ₅₀ :17,5µm	4:15	5:35
Karışım (sadece uçucu kül öğütüldü) %30, D ₅₀ : 16,6µm	4:20	5:25
Karışım (sadece uçucu kül öğütüldü) %40, D ₅₀ :14,6 µm	5:40	7:00
Karışım (sadece uçucu kül öğütüldü) %45, D ₅₀ :11,2µm	5:25	6:25
Karışım (birlikte öğütme) %30, D ₅₀ : 8,4µm	3:30	4:30
Karışım (birlikte öğütme) %45, D ₅₀ : 8 µm	4:35	5:35

Çizelge 4.9’da sunulan veriler priz sürelerinin, öğütme şekline, ürün ve uçucu kül inceliğinden doğrudan etkilendiğini göstermektedir. Referans çimento ve uçucu kül numunesine bakarak kül içerikleri arasındaki değişimler incelenebilir. Uçucu kül içeriği %18’den %30’a çıktığı durumda priz sürelerinin arttığı açıkça görülmektedir. Sadece uçucu külün öğütüldüğü ve kül içeriğinin %30’dan %45’e çıkarıldığı durumda da priz sürelerinde artış saptanmıştır. Atakay’da [46] yaptığı çalışmada kül içeriğindeki artış ile priz süresindeki artış arasında benzer sonuçlara ulaşmıştır. Çelik ve ark [81] çimento harcı içerisine %30 uçucu kül eklenmesi ile priz başlangıç süresinde 50 dakika, priz bitiş süresinde ise 75 dakika artış gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, daha yüksek kül içerikli çimentolarda daha uzun priz sürelerine de ulaşmak mümkündür. Songpiriyakij ve Jaturapitakkul [80] yaptıkları araştırmada uçucu kül içeriği ile priz süresi arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Araştırmalarında, kül içeriğinin %15’den %35’e çıkarılması ile priz süresinin de kademeli olarak arttığı görülmüştür.

Kül inceliğinin priz sürelerine olan etkisi %30 uçucu kül içerikli karışım ile kıyaslanarak yorumlanabilmektedir. Çizelge 4.9’da görüldüğü üzere kül inceliğinin

19,5 mikrondan 16,6 mikrona düşürülmesinden priz süreleri etkilenmiştir. Kül inceliğinin düşürülmesi priz başlangıcında 30 dakika azalmaya neden olurken, priz bitişinde bu azalış 55 dakikaya çıkmıştır. Bu kısımdaki çalışmalarda birlikte öğütmenin de priz süreleri üzerine etkisi incelenmiştir. Karışımın birlikte öğütülmesi ile D_{50} değerlerinde daha ince boyutlar elde edilmiş ve böylece priz süreleri referans çimento ile aynı değerlere ulaşmıştır. Priz süreleri göz önünde bulundurulduğunda çimentodaki kül içeriği için limit değer, %30 olarak değerlendirilebilir. Öte yandan, daha uzun öğütme sürelerinin de denenmesinin faydalı olacağı düşünülmektedir.

4.3.2. Çimento ve Uçucu Külün Karışım İçerisindeki Öğütme Davranışı

Karışımın daha kolay öğütülebilir bileşeni daha inceye öğütülebilme eğilimindedir. Benzer sonuçlar, çimento öğütme işlemleri için çok bileşenli model yapıları geliştirmeye odaklanan diğer araştırmacılar tarafından da çizilmiştir [81, 82]. Birlikte öğütme işlemiyle daha yüksek dayanım sonuçlarının elde edilmesinin nedenini araştırmak için farklı öğütme şekillerinin uçucu kül ve çimento öğütme davranışları üzerine etkileri incelenmiştir. Bu bağlamda, Bond değirmeninde çimento, kül ve bunların karışımı 15 ve 30 dakika olmak üzere ayrı ayrı öğütülmüştür. Daha sonra karışım numunesi fraksiyonlarına ayrılmıştır. Karışım, %15 uçucu kül ve %85 CEM II/A-M (P-L) 42.5R' den oluşmaktadır.

Uçucu kül davranışının incelenmesi için fraksiyonlarına ayrılan ürünler, uçucu kül ve çimento olarak ikiye ayrılmıştır. Çimento içerisinde bulunan uçucu kül miktarı CEN/TR 196-4 [84] standardında uygun şekilde belirlenmiştir.

Çizelge 4.10'da ölçümlerin sonuçları gösterilirken,

Çizelge 4.11'de boyut hesaplamalarının sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.10 ve

Çizelge 4.11'den anlaşılacağı üzere, uçucu kül ve diğer bileşenler farklı öğütme davranışı sergilemişlerdir. 15 dakika öğütülen uçucu kül, diğer bileşenlere göre daha iri bir dağılıma sahiptir. Buradan, uçucu külün dayanım değerlerinde artış yakalanabilmesi için belirli bir öğütme enerji seviyesinin gerekli olduğu anlaşılmaktadır. Öte yandan, 30 dakikalık öğütme sonucunda uçucu kül, diğer bileşenlere kıyasla daha ince tane boyutu dağılımına ulaşmıştır (Çizelge 4.12). Sonuç olarak, karışımda meydana gelen dayanım gelişimi uçucu külün bu

davranışına bağlanabilir. Dayanım gelişimi için tane boyu limiti, bu test prosedürü ile incelenebilir.

Çizelge 4.10. Besleme ve ürüne ait tane boyu dağılımları

[μm]	Besleme	15 Dakika Öğütme	30 Dakika Öğütme
-150+106	0,45		
-106+53	3,75		
-53+38	18,6	17	4
-38	77,2	83	96
Toplam	100	100	100

Çizelge 4.11. Besleme ve ürünün fraksiyonel kül içerikleri

[μm]	Besleme	15 Dakika öğütme	30 Dakika öğütme
-150+106	100		
-106+53	56,8		
-53+38	36,25	40,08	33,05
-38	36,06	36,5	37,29

Çizelge 4.12. Uçuşu kül ve diğer bileşenlerin fraksiyonel yüzdeleri

[µm]	%			
	15 dakika öğütme		30 dakika öğütme	
	Uçucu kül	Diğer bileşenler	Uçucu kül	Diğer bileşenler
-53+38	18,36	16,2	3,56	4,26
-38	81,64	83,8	96,44	95,74

5. SONUÇLAR

Bu tez kapsamında, Seyitömer kül sınıflandırma tesisinde farklı akış kollarından alınan uçucu küllerin çimento ve beton analizleri değerlendirilmiştir. Çalışma, 3 ana başlık altında gerçekleştirilmiştir.

1. Sınıflandırıcının ince akış kolundaki uçucu kül inceliği, sınıflandırıcı parametreleri yardımıyla değiştirilmiştir. Farklı incelikteki uçucu kül %25 oranında çimentoya katılmıştır.
2. Tezin 2. kısmında, sınıflandırıcı etrafından alınan atık, ince/ürün ve ham uçucu küller farklı incelik değerlerine öğütülüp çimentoya %25 oranında katılarak beton ve çimento verilerine etkileri incelenmiştir.
3. Sınıflandırıcının ince akış kolundan alınan numuneler üzerinden yürütülen çalışmanın bu kısmında, birlikte öğütme yöntemi ile kül miktarının artırılabilmesi ve erken dayanımda yaşanan kaybın önüne geçilebilmesi araştırılmıştır.

Birinci bölümde yapılan çalışmada, uçucu kül inceliğinin 7 ve 28 gün dayanımlarına doğrudan bir etkisi olduğu göze çarpmıştır. 7 günlük dayanımda %10 artış, 28 günlük dayanımda ise %7,8 artış yakalandığı görülmüştür.

İkinci bölümde, tüm akış kolları için dayanımı arttıran en önemli etkinin külün inceliği olduğu yorumu yapılabilmektedir. Ek olarak, aynı D_{50} değerine sahip farklı akış kollarından alınan numunelerin benzer özellikler sergilediği gözlenmiştir. Kaba akış kolundan gelenler atık olarak bertaraf edilmek yerine, uygun incelik değerine getirildiğinde çimento üretiminde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Çalışmanın 3. bölümünde, birlikte öğütme yöntemi ile kül içeriğinin artırılabilmesi ve erken dayanımda yaşanan kaybın azaltılması hedeflenmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki, uçucu kül ve çimentonun birlikte öğütülmesi ile diğer karışımlardan daha yüksek dayanım sonuçlarına ulaşılmıştır. Bu işlemle, uçucu kül içeriği %45'e çıkarılarak referans numunesinin 28 günlük dayanımından %4,6 daha yüksek dayanım değeri yakalanmıştır. Hatta, %30 oranında kül içeren karışıma birlikte

öğütme uygulanması ile 1 günlük dayanımda aynı oranda kül içeren öğütülmemiş karışıma kıyasla %57, referans çimento numunesine kıyasla ise %29'luk bir artış gözlenmiştir. Dayanım değerleri incelendiğinde, birlikte öğütme yöntemiyle sağlanan gelişim sayesinde daha yüksek kül içerikli çimentoların üretilebileceği görülmüştür. Dayanım sonuçları göz önünde bulundurularak, kül sınıflandırma tesisinde kullanılabilir olası akım şemaları değerlendirilmiştir. Böylece tesis kapasitesinde artış sağlanırken, enerji verimliliğinin de iyileştirilmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu çalışma kapsamında, birlikte öğütmenin tane boyu dağılımını nasıl etkilediğini açıklamak için bileşenlerin davranışları incelenmiştir. Yapılan çalışmalar, uçucu kül ve diğer bileşenlerin öğütme süresine bağlı olarak farklı davranışlar sergilediğini ortaya çıkarmıştır. Öğütme süresi arttıkça, uçucu kül inceliği diğer karışımlardan daha ince tane boyutuna ulaşmıştır. Bu davranışın ürün dayanım özellikleri üzerine olumlu etkilerinin olabileceği düşünülmektedir.

6. ÖNERİLER

Tez çalışmasında, öğütme işlemleri için Bond değirmeni kullanılmıştır. Fakat ince boylarda daha verimli olduğu bilinen, yatay kuru karıştırmalı değirmenin öğütme için kullanılması ve detaylı ekonomik analizinin yapılması önerilmektedir. Aynı zamanda, farklı ince öğütme ekipmanları kullanılarak kül öğütülmesinin, enerji sarfiyatı ve ürün kalitesi üzerine etkilerinin incelenmesinin hem akademik hem de sanayi anlamında önemli yararları olacağı düşünülmektedir.

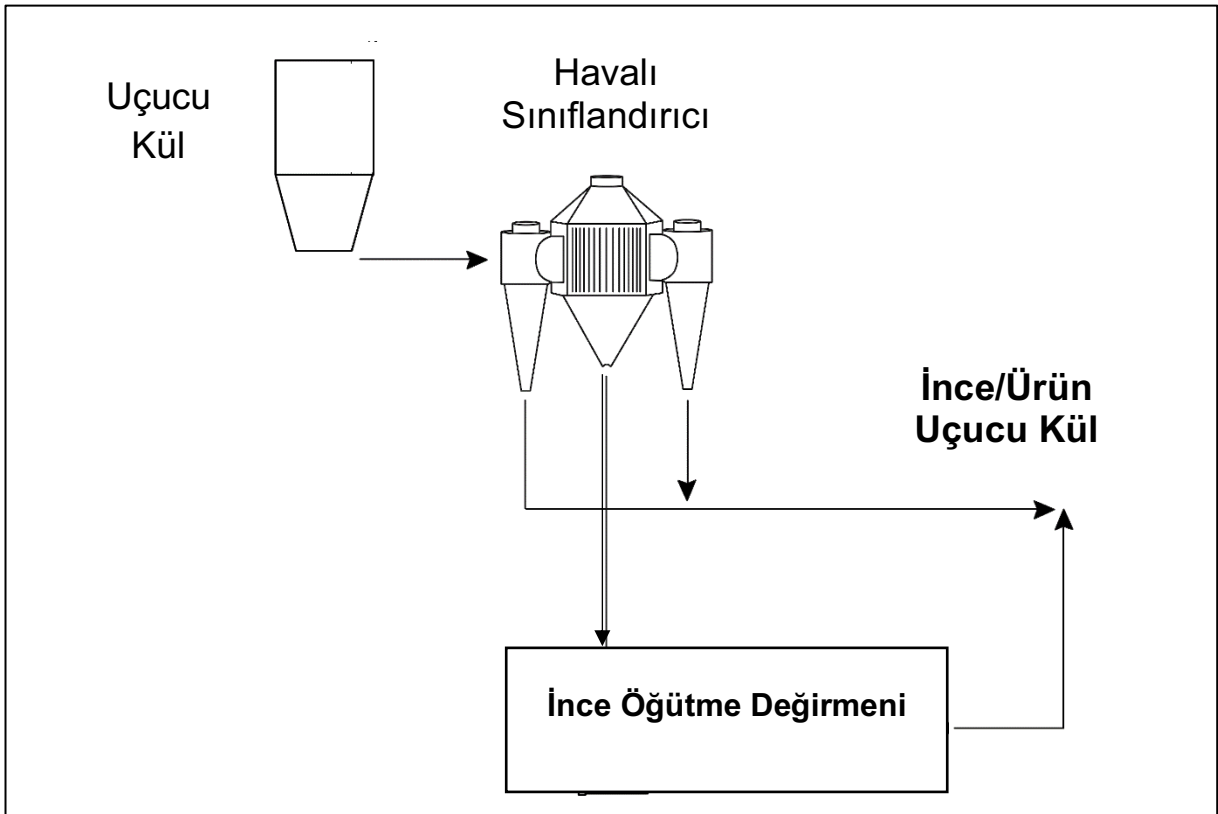
Uçucu külün kimyasal özelliklerinin dayanım değerleri üzerine etkilerinin incelendiği araştırmalar literatürde mevcuttur. Aynı şekilde, uçucu külün farklı yöntemler kullanılarak zenginleştirilmesi de giderek önem kazanmıştır. Farklı zenginleştirme yöntemlerinin ekonomik analizleri yapılarak bu yöntemlerin ürün dayanımına olan katkılarının incelenmesi önerilmektedir.

Bu çalışma kapsamında yürütülen çalışmaların farklı termik santral külleri için de yürütülmesi önerilmektedir. Bilindiği üzere, termik santrallerin yakma potansiyelleri farklı olabilmekte ve bu farklılık sonuçları etkilemektedir.

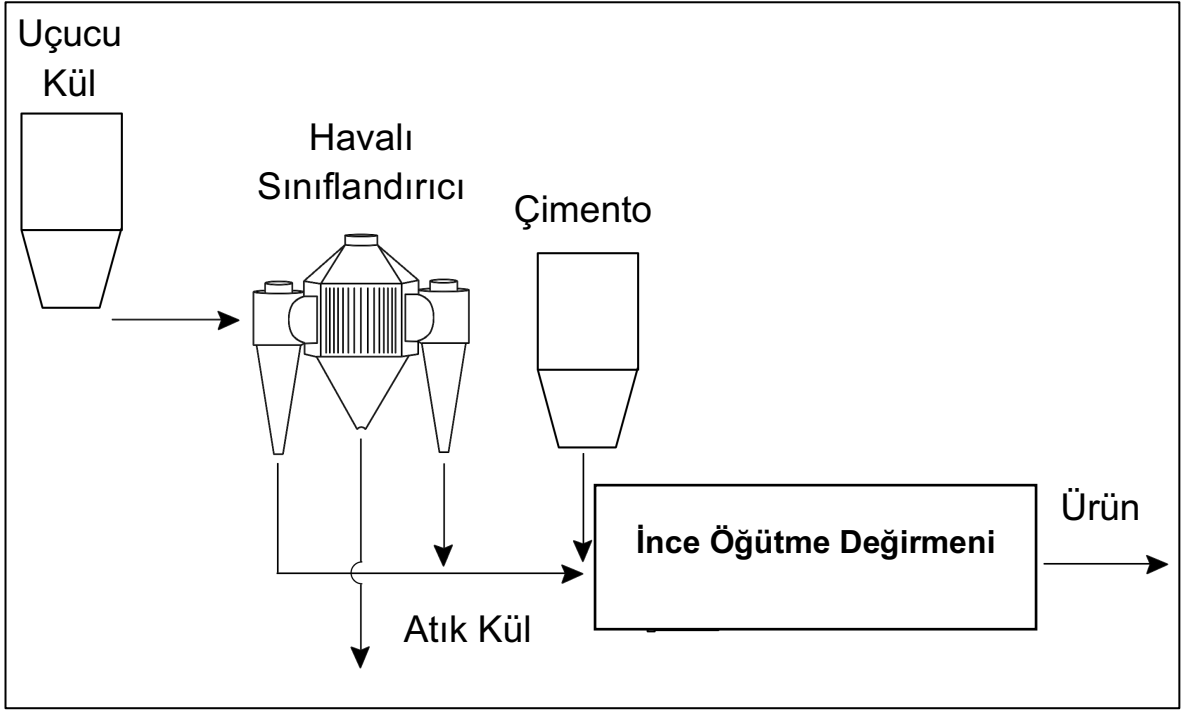
Kül katkısının hidrasyon ısını azalttığı bilinmektedir. Aynı etkinin, birlikte öğütülen karışımlar için de geçerli olup olmadığı kontrol edilmelidir. Farklı tane boyutundaki uçucu küllerin öğütülerek aynı incelik değerlerine getirilmesi ile kimyasal kompozisyon ve dayanım değerleri arasındaki bağıntılar güçlendirilmelidir.

Kül sınıflandırma tesisi etrafında yapılan kapsamlı çalışmalarda, devrenin üretim verimliliğini artırılması için alternatifler değerlendirilmiştir. Şekil 4.6'da gösterildiği gibi, farklı akış kollarında gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda benzer D_{50} 'lerde yakın dayanım değerleri yakalanmıştır. Bu durumda, tüm akış kollarının istenilen incelik değerlerine indirildikleri durumda çimentoya eklenebileceği anlamına gelmektedir. Bu sayede, üretim miktarında artış sağlanabilecektir. Bu sistem, devrenin verimini arttırırken enerji tüketiminin de azalmasına neden olacaktır. Şekil 6.1 ve **Error! Reference source not found.** 6.2, kül sınıflandırma tesisinde kullanılabilecek olası ince öğütme teknolojilerini göstermektedir.

Şekil 6.1’de görüldüğü üzere, atık ürün değirmende öğütülebilir ve son ürün silosuna verilebilir. Çünkü, iki akış kolu da benzer incelik değerlerinde yakın kalite verilerine ulaşabilmektedir. Buna ek olarak, ince külün öğütülmesinin de çimento dayanımı üzerine olumlu etkileri olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Öte yandan, birlikte öğütmenin uygulandığı karışımlarda hem erken dayanım değerlerindeki düşüş dengelenmiş hem de kül eklemesi artırılabilmiştir. Bu sebeple, kuru karıştırmalı değirmen çimento ile külün birlikte öğütülmesinde de kullanılabileceği düşünülmektedir (**Error! Reference source not found.** 6.2). Daha ayrıntılı değerlendirmelerin yapılabilmesi için ince öğütme değirmenlerinin enerji sarfiyatlarının da belirlenmesi gerekmektedir. Bu sayede, kullanılacak devre dizaynları hakkında daha kapsamlı bilgiler verilebilecektir. Gelecek çalışmalarda bu tasarımlar geliştirilecektir.



Şekil 6.1. Sınıflandırıcı atık akış kolunun ince öğütme değirmeni ile öğütülmesi



Şekil 6.2. Sınıflandırıcı ince akış kolunun çimento ile birlikte ince öğütme değirmeni kullanılarak öğütülmesi

7. KAYNAKLAR

- [1] T. Karayığit, A. ve Onacak, “Çayırhan Termik Santrali Uçucu Küllerinden Zeolit Elde Edilmesi”, **1999**.
- [2] A. Dwivedi ve M. K. Jain, “Fly ash – waste management and overview : A Review”, *Recent Res. Sci. Technol.*, c. 6, sayı 1, ss. 30–35, **2014**.
- [3] Ü. Şengül, “Uçucu Kül ve Çevresel Etkileri”, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilim. Derg.*, c. 7, sayı 1, ss. 89–104, **2007**.
- [4] O. C. Çiçekli, “Uçucu kül inceliğinin yüksek dozajlı betonun özelliklerine etkisi”, **1996**.
- [5] IEA, “Energy Technology Perspectives 2015 - Mobilising Innovation to Accelerate Climate Action”, **2015**.
- [6] A. Norholm, “Notes on energy conservation”, içinde *FL Smidth and Co. a/s*, **1995**.
- [7] M. S. E. Villa, F. Spada, “İtalcementi Group Crushing and Grinding Course”, **2005**.
- [8] M. A. Nisbet, “Information The Reduction of Resource Input and Emissions Achieved by Addition of Limestone to Portland Cement”, *Portl. Cem. Assoc.*, c. 9781, sayı 847, ss. 0–10, **1996**.
- [9] P. K. Mehta, “Reducing the environmental impact of concrete”, *Concr. Int.*, ss. 61–66, **2001**.
- [10] W. H. Duda, *Cement-data-book: internationale Verfahrenstechniken der Zementindustrie*. **1976**.
- [11] H. DüNDAR, “Farkli Soğutma Hizlarında Soğutulan Çelikhane Cüruflarının Öğütme Parametrelerinin İncelenmesi”, Hacettepe Üniversitesi, **2006**.
- [12] O. Labahn, *Cement engineers' handbook*. Bauverlag, **1971**.
- [13] F. P. Glasser, *Lea's chemistry of cement and concrete*. **1998**.
- [14] S. Popovics, *Concrete Materials: Properties, Specifications, And Testing*, c. Second edi. **1992**.
- [15] Cembureau, “Activity Report”, **2017**.
- [16] “Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğı”, **2017**.
- [17] A. Yeginobali, “Çimentoda Yeni Standartlar Ve Mineral Katkılar”, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğı AR-GE Enstitüsü*, ss. 56–61, **2004**.
- [18] J. Bapat, “Mineral admixtures in cement and concrete”, *Cem. Concr. Res.*, s. 283, **2013**.
- [19] T. Y. Erdoğan, “Concrete”, *Metu Press*, **2003**.
- [20] ASTM, “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete”, *Annual Book of ASTM Standards*, ss. 3–6, **2010**.
- [21] E. Worrell, N. Martin, ve L. Price, “Potentials for energy efficiency improvement in the US cement industry. Energy, 25 (2000), pp.”, *Energy*, c. 25, sayı 12, ss. 1189–1214–1189–1214, **2000**.
- [22] S. Li ve D. M. Roy, “Investigation of relations between porosity, pore structure, and C1-diffusion of fly ash and blended cement pastes”, *Cem. Concr. Res.*, c. 16, sayı 5, ss. 749–759, **1986**.

- [23] R. Sersale ve G. Prigione, "Portland-zeolite-cement for minimizing alkali-aggregate expansion", *Cem. Concr. Res.*, c. 17, sayı 3, ss. 404–410, **1987**.
- [24] V. Saraswathy, "Influence of activated fly ash on corrosion-resistance and strength of concrete", *Cem. Concr. Compos.*, c. 25, sayı 7, ss. 673–680, **2003**.
- [25] and M. T. Aruntaş, H. Y., "Katkılı Çimento Üretiminde Diatomitin Puzolanik Malzeme Olarak Kullanılabilirliği.", *Çimento ve Bet. Dünyası*, c. 1, sayı 4, ss. 33–41, **1996**.
- [26] K. M. A. Hossain, "Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concrete", *Cem. Concr. Res.*, c. 34, sayı 2, ss. 283–291, **2004**.
- [27] X. H. and W. H. X. Fu, Y. Wang, S. Huang, "The influences of siliceous waste on blended cement properties", *Cem. Concr. Res.*, c. 33, sayı 6, ss. 851–856, **2003**.
- [28] V. Kanna, R. A. Olson, ve H. M. Jennings, "Effect of shrinkage and moisture content on the physical characteristics of blended cement mortars", *Cem. Concr. Res.*, c. 28, sayı 10, ss. 1467–1477, **1998**.
- [29] P. Chindaprasirt, S. Homwuttiwong, ve V. Sirivatnanon, "Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar", *Cem. Concr. Res.*, c. 34, sayı 7, ss. 1087–1092, **2004**.
- [30] and S. A. Pekmezci, B. Y., "Optimum usage of a natural pozzolan for the maximum compressive strength of concrete", *Cem. Concr. Res.*, c. 34, sayı 12, ss. 2175–2179, **2004**.
- [31] L. Turanlı ve B. Uzal, "Effect of material characteristics on the properties of blended cements containing high volumes of natural pozzolans.", *Cem. Concr. Res.*, c. 34, sayı 12, ss. 2277–2282, **2004**.
- [32] B. Yılmaz, A. Uçar, B. Öteyaka, ve V. Uz, "Properties of zeolitic tuff (clinoptilolite) blended portland cement", *Build. Environ.*, c. 42, sayı 11, ss. 3808–3815, **2007**.
- [33] B. Yılmaz ve A. Olgun, "Studies on cement and mortar containing low-calcium fly ash, limestone, and dolomitic limestone", *Cem. Concr. Compos.*, c. 30, sayı 3, ss. 194–201, **2008**.
- [34] F. Massazza, "Puzolanlar", içinde *Puzolanlı Çimentolar ve Kullanım Alanları*, **1989**.
- [35] S. Fujimoto, "Reducing Specific Power Usage in Cement Plants", *World Cem.*, c. 7, ss. 22–35, **1993**.
- [36] J. Shi, C., Qian, "High Performance Cementing Materials from Industrial Slags – A Review", *Resour. Conserv. Recycl.*, c. 29, sayı 3, ss. 195–207, **2000**.
- [37] A. Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., & Yeğınobalı, "Türkiye'deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri", *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, **2003**.
- [38] R. S. Blissett ve N. A. Rowson, "A review of the multi-component utilisation of coal fly ash", *Fuel*, c. 97, sayı 23, ss. 1–23, **2012**.
- [39] S. Aydın, Ç. Karatay, ve B. Baradan, "The effect of grinding process on mechanical properties and alkali-silica reaction resistance of fly ash incorporated cement mortars", *Powder Technol.*, c. 197, sayı 1–2, ss. 68–72, **2010**.
- [40] A. . Neville, *Properties of concrete*, 4th editon. London: Longman, **1995**.
- [41] Makine Mühendisleri Odası, "TÜRKİYE'DE TERMİK SANTRALLER", **2017**.
- [42] M. P. Ramme, B. W., & Tharaniyil, *Coal combustion products utilization handbook*. **2004**.
- [43] T. Y. Erdogan, "Admixtures for Concrete", *The Middle East Technical University*

Press, Ankara, **1997**.

- [44] J. Bapat, "Mineral admixtures in cement and concrete", **2013**.
- [45] A. Yeğınobalı, "Uçucu Kül, Tras ve Yüksek Fırın Cürufunun Betonda Katkı Maddesi Olarak Kullanılması ve Optimum Uçucu Kül Karışım Oranlarının Tayini", Ankara, **1971**.
- [46] O. Atakay, "The use of fly ash in production of blended cement - effects of fineness and dosage.", Hacettepe University, **2006**.
- [47] Y. Atanur, A., Baydar, A., Demir, A., Temoçin, C., Yağız, F., Kızılkılıç, N. ve Kocaçıtak, S., Gürsu, "Türkiye Uçucu Küllerinin Özellikleri ve Kullanılma Olanakları", *Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Direktörlüğü*, Ankara, s. 158, **1979**.
- [48] T. Karayığıt, A. ve Onacak, "Çayırhan Termik Santrali Uçucu Küllerinden Zeolit Elde Edilmesi", *Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu, YDAPÇAG-534 nolu proje*, s. 188, **1999**.
- [49] B. Felekoğlu, S. Türkel, ve H. Kalyoncu, "Optimization of fineness to maximize the strength activity of high-calcium ground fly ash - Portland cement composites", *Constr. Build. Mater.*, c. 23, sayı 5, ss. 2053–2061, **2009**.
- [50] S. Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C., Songpiriyakij, S. and Chutubtim, "A Study of Ground Coarse Fly Ashes with Different Fineness from Various Sources as Pozzolanic Materials", *Cem. Concr. Compos.*, c. 23, sayı 4–5, ss. 335–343, **2001**.
- [51] K. Tokyay, M. ve Erdoğan, "Uçucu Küllerin Karakterizasyonu", *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğı*, s. 70, **1998**.
- [52] A. Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., & Yeğınobalı, "Türkiye'deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri.", *TÇMB*, Ankara, **2003**.
- [53] T. İlhan, "Sülfo Kalsik ve Siliko Kalsik Uçucu Küller İyileştirme ve Rolkritlerde Kullanımı", İstanbul Teknik Üniversitesi, **1995**.
- [54] M. Tokyay, "Characterization of Turkish fly ashes", *Turkish Cement Manufacturers Associations*, Ankara, s. 70, **1998**.
- [55] and C. D. A. Karahan, Okan, "Sugözü Uçucu külünün beton katkısı olarak kullanılabilirliğı", içinde 7. *Ulusal Beton Kongresi*, **2007**, ss. 405–415.
- [56] C. D. Atış ve O. Karahan, "Properties of steel fiber reinforced fly ash concrete", *Constr. Build. Mater.*, c. 23, sayı 1, ss. 392–399, **2009**.
- [57] T. "197-1 EN, "Çimento-Bölüm 1", *EN, TS. 197-1*, ss. 33–42, **2002**.
- [58] S. Yılmaz, "Seyitömer Termik Santral Atık Uçucu Küllerinin Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi", İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Y. Lisans Tezi, İstanbul.", İstanbul Teknik Üniversitesi, **1992**.
- [59] T. H. Ha vd., "Effect of unburnt carbon on the corrosion performance of fly ash cement mortar", *Constr. Build. Mater.*, c. 19, sayı 7, ss. 509–515, **2005**.
- [60] A. Wang, C. Zhang, ve W. Sun, "Fly ash effects : I . The morphological effect of fly ash", *Cem. Concr. Res.*, c. 33, ss. 2023–2029, **2003**.
- [61] B. Alataş, T., Yıldırım, "Afşin-Elbistan Termik Santrali Uçucu Külünün Yol Stabilizasyonunda Kireç ile Birlikte Kullanımı", *Endüstriyel Atıkların İnşaat Mühendisliğinde Kullanılması sempozyumu*, Eskişehir, ss. 21–35, **1997**.
- [62] Ö. L. Bayazıt, "uçucu külün gökçekaya barajında kullanılması ve ekonomisi", içinde *B.M.(AEK) Uluslar arası Kül Sempozyumu*, **1970**.
- [63] A. Atanur, "Uçucu Küllerin Kimyasal ve Fiziksel Vasıfları ve Yapı Malzemesi Olarak

- Kullanılması”, Ankara, **1971**.
- [64] J. Payá, J. Monzó, E. Peris-Mora, M. V. Borrachero, R. Tercero, ve C. Pinillos, “Early-strength development of portland cement mortars containing air classified fly ashes”, *Cem. Concr. Res.*, c. 25, sayı 2, ss. 449–456, **1995**.
- [65] V. M. Bouzoubaa, N., Zhang, M. H., Bilodeau, A., & Malhotra, “Laboratory-produced high-volume fly ash blended cements: physical properties and compressive strength of mortars”, *Cem. Concr. Res.*, c. 28, sayı 11, ss. 1555–1569, **1998**.
- [66] K. Erdoğan ve P. Türker, “Effects of fly ash particle size on strength of portland cement fly ash mortars”, *Cem. Concr. Res.*, c. 28, sayı 9, ss. 1217–1222, **1998**.
- [67] E. Ghiasvand ve A. A. Ramezani pour, “Effect of grinding method and particle size distribution on long term properties of binary and ternary cements”, *Constr. Build. Mater.*, c. 134, ss. 75–82, **2017**.
- [68] H. G. Merkus, *Particle size measurements: fundamentals, practice, quality (Vol. 17)*. Springer Science & Business Media. ISO 690, **2009**.
- [69] C. Özel, “Katkılı Betonların Reolojik Özelliklerinin Taze Beton Deney Yöntemlerine Göre Belirlenmesi”, Süleyman Demirel Üniversitesi, **2007**.
- [70] T. “450-1 EN, “Uçucu kül-Betonda kullanılan-Bölüm 1: Tarif, özellikler ve uygunluk kriterleri.”, *Türk Standartları Enstitüsü*, **2008**.
- [71] S. L. S. A. Xu, “Hydration and Properties of Fly Ash Concrete”, *MACC*, ss. 174–225, **1992**.
- [72] S. Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., & Songpiriyakij, “A study of strength activity index of ground coarse fly ash with Portland cement”, *Sci. Asia*, c. 25, ss. 223–229, **1999**.
- [73] S. P. Kumar, S.; Kumar, R.; Bandopadhyay, A.; Alex, T.C.; Mehrotra, “High strength geopolymeric materials through mechanical activation of fly ash”, içinde *In: Proceedings of the international conference fly ash India*, **2005**, s. X12.1-11.
- [74] R. S. Iyer ve B. R. Stanmore, “96/02672 - Surface area of fly ashes”, *Fuel Energy Abstr.*, c. 37, sayı 3, s. 188-, **1996**.
- [75] A. R. Mutlu, M., Sağlam, “Taze betonda işlenebilmenin ölçülmesi ve deney aletlerinin irdelenmesi”, *SİKA Teknik Bülten*, s. 4:11-17, **2000**.
- [76] N. Roussel, “A theoretical frame to study stability of fresh concrete”, *Materials and Structures*, s. 39:81-91, **2006**.
- [77] C. Şahin, R., Taşdemir, M. A., Gül, R., & Çelik, “Taze Beton Özelliklerinin Optimizasyonu”, *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, ss. 127–135, **2007**.
- [78] ASTM C143M, “Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete”, *ASTM Int.*, sayı 1, ss. 1–4, **2015**.
- [79] T. EN, “12350-2, **2002**.” Beton-Taze Beton Deneyleri-Bölüm 2: 1-9.”
- [80] C. Songpiriyakij, S., & Jaturapitakkul, “A Study of Ground Mea Moh Fly Ash as a Pokolan for Increasing Concrete Strength”, *KMUTT Res. Dev. J.*, c. 18, sayı 2, ss. 51–65, **1995**.
- [81] K. Celik, C. Meral, A. Petek Gursel, P. K. Mehta, A. Horvath, ve P. J. M. Monteiro, “Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder”, *Cem. Concr. Compos.*, c. 56, ss. 59–72, **2015**.
- [82] H. Dündar ve H. Benzer, “Investigating multicomponent breakage in cement

- grinding”, *Miner. Eng.*, c. 77, ss. 131–136, **2015**.
- [83] D. Altun, H. Benzer, ve O. Altun, “Modelling of component behaviour around a cement grinding circuit Modelling of component behaviour around a cement grinding circuit”, *ZKG Int.*, c. 10, October, ss. 58–67, **2017**.
- [84] CEN/TR 196-4, “Methods of testing cement – Part 4: Quantitative determination of constituents”, **2007**.



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 17/01/2019

Tez Başlığı / Konusu: KÜL SINIFLANDIRMA TESİSİNDE FARKLI AKIŞ KOLLARI İÇİN ÇİMENTO VE BETON KALİTE DEĞERLENDİRMESİNİN YAPILMASI (CEMENT AND CONCRETE QUALITY ASSESSMENT FOR DIFFERENT STREAMS IN THE ASH CLASSIFICATION PLANT)

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 69 sayfalık kısmına ilişkin, 17/01/2019 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 6'dır.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: ERGİN SARP ZENCİRCİ
Öğrenci No: N15227961
Anabilim Dalı: MADEN MÜHENDİSLİĞİ
Programı: CEVHER HAZIRLAMA
Statüsü: Y.Lisans Doktora Bütünleşik Dr.

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR

DR. ÖĞR. ÜYESİ OKAY ALTUN

(Unvan, Ad Soyad, İmza)

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Ergin Sarp Zencirci

Doğum yeri : Ankara

Medeni Hali : Bekar

E-posta : sarpzencirci@hacettepe.edu.tr

Adresi : Ümit Mah. 2432. Cad. No:86 Mimosalar Sitesi A/2 Ümitkoy,
Çankaya Ankara

Eğitim

Lise : Ümitköy Anadolu Lisesi (2005-2009)

Lisans : Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü (2009-2015)

Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü (2015-2018)

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce, TOEFL IBT (88\120)

İş Deneyimi

-

Deneyim Alanları

-

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

Tezden Üretilmiş Yayınlar

Zencirci, E.S., O., Altun., Benzer., H., Onat., L., & Nemli.,O.,(2018). Improving early-age strength of fly ash-cement and Increasing fly ash content with Inter-grinding. ZKG, (10), 58-69.

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

Zencirci, E.S., O., Altun., Benzer., H., Onat., L., & Nemli.,O.,(2017),.Fine grinding of fly ash and it's effect on cement recipe. Conference: 15th European Symposium on Comminution & Classification