



Uçucu Külün Boyutu ile Pozzolanik Aktivitesi Arasındaki İlişkinin İncelenmesi

Investigation of The Relation Between Fineness of Fly Ash and Its Pozzolanic Activities

Barış Akkaya* , İhsan Toroğlu

Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, uçucu külün tane boyutu ile pozzolanik aktivitesi arasındaki ilişki araştırılmıştır. Bu amaçla, çalışmamıza esas olan uçucu kül numunesi ayrı ayrı 150µm, 106µm, 75µm ve 45µm'lık eleklerden elenmiştir. Elde edilen elek altı fraksiyonları (-150µm, -106µm, -75µm ve -45µm) ve elenmemiş original uçucu kül, standartta (TS EN 196-1/2009) belirtilen şekilde Portland çimentosu ile karıştırılarak bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Bu karışımlar ile hazırlanan beton örnekleri 2, 7, 28 ve 60 günlük kür işlemine tabi tutulmuş ve tek eksenli basınç dayanımları ölçülmüştür. Elde edilen dayanım sonuçları, bağlayıcı kısım olarak sadece Portland çimentosu içeren kontrol beton örneklerinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucu 7 ve 28 günlük kür sonunda en yüksek pozzolanik aktivite değerleri 75 µm'dan ince uçucu küller (-75 µm) için sırasıyla %82.1 ve %87.4 olarak hesaplanırken 106 µm'dan ince uçucu küller (-106 µm) için %86.0 ve %87.4 olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bağlayıcı madde, Kür işlemi, Pozzolanik aktivite, Uçucu kül

Abstract

In this study, the effect of fly ash's fineness on its pozzolanic activity was analyzed. For this purpose, the fly ash samples were sieved by using the screens with the apertures of 150, 106, 75 and 45 µm one by one. The unscreened original fly ash and fly ash undersize (-150, -106, -75 and -45µm) were mixed separately with Portland cement and prepared as an additional material of concrete specimens. The concrete specimens were exposed to the curing procedure of 2,7,28 and 60 days. In order to investigate the fly ashes' pozzolanic activities in terms of their fineness, the uniaxial compressive strength of these concrete specimens was measured and compared to control concrete specimens prepared with Portland cement. The highest pozzolanic activities of fly ash within the undersize 75 µm (-75 µm) were measured such as 82,1% and 87,4% respectively for the curing time of 7 and 28 days and 86.0% and 87.4% for the fly ash within the undersize 106 µm (-106 µm) for the same curing periods.

Keywords: Binding materials, Curing procedure, Pozzolanic activities, Fly ash

1. Giriş

Enerji üretiminin en önemli kısmı halen daha fosil yakıtların yakılması ile gerçekleşmektedir. Bu tür enerji üretiminde kullanılan yakıtın kül içeriğine bağlı olarak, yüksek miktarda atık malzeme ortaya çıkmaktadır. Bu atık malzemeler çevreye doğrudan zarar vermenin yanında, dolaylı olarak belirli bir noktada toplanma ve bekletilme sorunlarını da beraberlerinde getirmektedirler. Enerji üretimindeki günümüz teknolojisi dikkate alındığında yüksek oranda atık malzeme ile karşılaşılması kaçınılmaz olacaktır.

En yaygın enerji üretimi kömürün yakılması ile yapılmaktadır. Kömürün yakılması ile kül olarak ortaya çıkan atık miktarı kömürün türüne göre değişim göstermektedir. Örnek olarak taş kömürünün yakıldığı işlemlerde kül miktarının toplam kömür miktarına oranı %10-15 arasında iken, linyit kömürünün yakıldığı işlemlerde bu oran %20-50 arasında değişmektedir. Elde edilen kül miktarının %75 - 80'ini uçucu küller oluşturur ve tane boyutları 0.5-200 µm'dur. Toplam oluşan kül içinde taban külünün payı ise %20-25'dir. Taban küllerinin boyutları 1-15 mm arasındadır (Güler vd. 2005).

Uçucu küller miktar yönünden, taban küllerine göre çok daha fazla oluşurlar ve çok daha hafif ve küçük taneli oldukları için baca gazı ile birlikte sistemi terk etme eğilimindedirler. Taban külü ise özgül ağırlığının yüksek olması ve iri taneli olması nedeniyle termik santral kazanının

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: barisakkaya2010@gmail.com

Barış Akkaya orcid.org/0000-0001-8703-696X

İhsan Toroğlu orcid.org/0000-0003-4443-9835

tabanında birikme eğilimindedir ve kontrolü nispeten daha kolaydır. Bu temel farklılıklar nedeniyle uçucu küller taban küllerine göre çok daha ciddi bir sorun haline gelmektedir. Günümüzde dünya genelinde, termik santrallerde yıllık 600 milyon tonun üzerinde uçucu kül oluşmaktadır. Bu miktarın 13 milyon tonu, 12 termik santrale sahip Türkiye’de meydana gelmektedir. Türkiye’deki termik santrallerin nemli bir kısmının yakıt olarak linyit kullanması da dikkate alınırsa uçucu kül ve taban külü sorunu bir kez daha önem kazanmaktadır (Türker vd. 2009).

Beton üretiminde uçucu külün çimento yerine belli oranda kullanılabilmesi, çevresel yönden iki şekilde fayda sağlamaktadır. Bunlardan birincisi çimento kullanımının azalması ve buna bağlı olan CO₂ salınımının düşük olmasıdır. İkincisi ise, atık malzeme olan uçucu külün depolanmasına gerek kalmaz ve böylece bu malzemenin çevreyi kirletme etkileri azaltılmış olur (Güler vd. 2005.) Uçucu küllerin çevreye olabilecek bu zararları azaltmanın en akla yatkın yolu uçucu küllerini endüstriyel olarak değerlendirmeye tabi tutmaktır (NTPC Limited, 2010).

Uçucu küller, günümüz teknolojisinde, puzolanik özellikleri, çok ince ve homojen boyut dağılımı ve dolayısı ile yüksek özgül yüzey alanına sahip olması, düşük ısı iletkenliği, yüksek elektrik yalıtkanlığı gibi çok etkili mühendislik özelliklerinden dolayı değerli bir endüstriyel girdi haline gelmiştir (Erdođdu ve Türker 1998.) Uçucu kül, başlıca puzolanik özelliği nedeniyle inşaat sektöründe beton üretiminde, homojen boyut dağılımı ve bağlayıcı özelliği ile yol yapımında kullanılmaktadır. Ayrıca, yalıtım özelliği nedeniyle elektrik mühendisliğinde, bitkiler için gerekli elementleri içermesi ve toprağın nem tutabilme özelliğini arttırması nedeni ile toprak ıslahında ve tarım sektöründe kullanım alanı bulmaktadır (Yiğit vd. 2000, Tokyay vd. 1990, Erdoğan 1993). Bunlara ilave kullanım alanları olarak; Su tutma özelliği nedeni ile tuğla imalinde, demir, alüminyum, titanyum, vanadyum ve uranyum gibi metallerin kazanımında, hafif yapı elemanları üretiminde ve petrol kuyu sondajlarında, metal yüzeylerinin temizlenmesinde, duvar harçlarında, akustik bloklarda, dolgu malzemesi olarak çatı malzemelerinde, kağıt, lastik, suni gübre sanayinde, çevresel amaçlı zararlı maddelerin tutulmasında absorban olarak kullanılması sayılabilir (Yiğit vd. 2000, EİE İdaresi Genel Müdürlüğü. 1979, Morrison 1977, Tokyay ve Çetin 1991).

Uçucu külün boyutu azaldıkça betonun tek eksenli basınç dayanımının arttığı gözlemlenmiştir (Erdođdu ve Türker 1998). Bu durumda uçucu kül içinde bulunan iri malzemenin, çimento içinde kullanılabilmesi için iri malzemenin kırılıp/

öğütülmesi gerekmektedir. Bu durum ise yüksek enerji tüketimine neden olmaktadır (Nielsen 1999, Workman ve Eloranta 2004, Tosun ve Konak 2015). Bu nedenle bu çalışmada, iri boyutlu uçucu kül tanelerinin eleme yardımı ile ayrılması sağlanmış ve elek altına geçen birikimli ince malzemenin çimento ikamesi olarak kullanılmasının etkileri incelenmiştir. Ayrıca beton deneylerinde kullanılan uçucu kül örnekleri en büyük tane boyutlarına göre isimlendirilmiş ve sınıflandırılmıştır.

2. Gereç ve Yöntem

Deneyler için kullanılan uçucu küller Zonguldak ilinde bulunan Eren Enerji termik santraline bağlı pulverize yakma sistemi ile çalışan kömür yakma kazanlarının elektrostatik toz tutma sistemlerinden (Electrostatic Precipitator, ESP) temin edilmiştir. Portland çimentosu CEM I 42.5R tipi çimentodur. Beton örnekleri için standartlara uygun olarak hazırlanan harç, üç kısım agrega, bir kısım bağlayıcı madde ve yarım kısım su kullanılarak hazırlanmıştır. Agrega malzemesi olarak standart rilem kumu kullanılmıştır. Beton harçlarında bağlayıcı madde olarak altı farklı kombinasyon kullanılmış ve karşılaştırılmıştır. Bu bağlayıcı kombinasyonları, Çizelge 1’de belirtilmişlerdir. Yarım kısım su olarak ise saf su kullanılmıştır (TS EN 196–1/2009).

2.1. ESP Sistemi

Termik santral kazanındaki yakıtın yanması sonucu oluşan uçucu kül çok hafif ve ince tanelerden oluştuğu için yanma sonucu oluşan baca gazı ile fanlar yardımıyla kazan çıkışına doğru taşınır. Termik santralde kullanılan ESP sistemi, santral kazanının çıkışında bulunur. Bu tür toz tutucular, zıt elektrik yükü ile yüklenmiş elektrotların arasından geçen uçucu kül tanelerinin, negative elektrik yükü ile oluşturulan elektrik alan içerisinde, pozitif yöne doğru saptırılması ilkesine dayalı olarak çalışmaktadır. Termik santrallerde en yaygın kullanılan toz tutma sistemidir.

Çizelge 1. Bağlayıcı maddelerine göre beton örnekleri.

	İsim	Bağlayıcı Madde
Kontrol Betonu	C _p	P _ç
Elenmemiş Uçucu Kül İkameli Beton	C _k	P _ç + U _k
Boyutlarına göre uçucu kül ikameli Betonlar	C ₁₅₀	P _ç + U ₁₅₀
	C ₁₀₆	P _ç + U ₁₀₆
	C ₇₅	P _ç + U ₇₅
	C ₄₅	P _ç + U ₄₅

2.2. Numune Alma ve Hazırlama

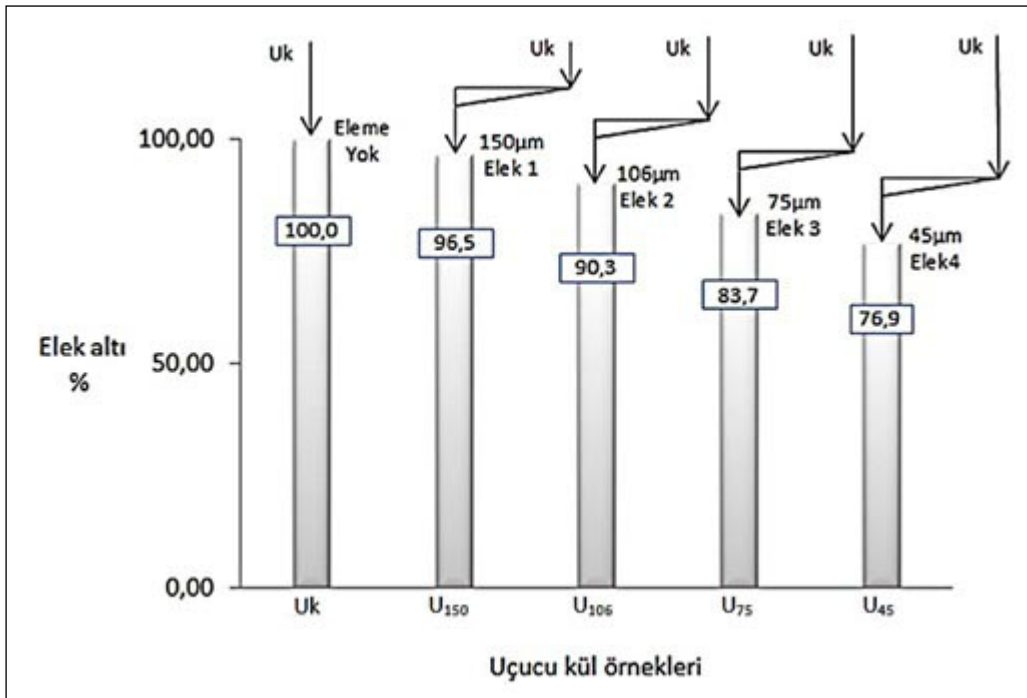
Bu çalışmada, ESP sisteminden toplanan uçucu kül numuneleri, homojen bir şekilde karıştırılmışlardır. Bu orjinal uçucu kül karışımından ve Portland çimentosundan öncelikle genel bir boyut analizi yapmak için temsili numuneler alınmış ve sırası ile 150 μ m, 106 μ m, 75 μ m ve 45 μ m'luk eleklerden elenerek boyut analizleri yapılmıştır. Daha sonra orjinal uçucu kül karışımından, eşit miktarlarda ve aynı özellikte beş farklı numune daha alınmıştır. Bu beş farklı numunedan 1.'si hiç bir elekten elenmemiştir, 2.'si 150 μ m, 3.'sü 106 μ m, 4.'sü 75 μ m ve 5. Numune 45 μ m'luk elekten elenmiştir. Elenmemiş 1. orjinal uçucu kül numunesi ve elenmiş diğer dört numunenin birikimli elek altı ürünleri Portland çimentosu ile ayrı ayrı karıştırılmak üzere hazırlanmıştır. Elek altlarında toplanan birikimli uçucu kül numuneleri (-150 μ m, -106 μ m, -75 μ m ve -45 μ m'luk boyut grupları) kullanılan eleklerle göre sırasıyla U₁₅₀, U₁₀₆, U₇₅ ve U₄₅ şeklinde isimlendirilirken, orijinal uçucu kül numunesi U_k olarak isimlendirilmiştir. Böylece, uçucu küller en büyük tane boyutlarına göre sınıflandırılmışlardır. Örneğin U₁₅₀'nin en büyük tane boyutu 150 μ m 'dur. Şekil 1' de uçucu kül örneklerinin hazırlanışı gösterilmektedir.

Bu çalışmada, Portland çimentosu, P_ç olarak isimlendirilmiştir. Böylece beş'i uçucu kül içeren ve bir tanesi sadece Portland çimentosu içeren toplam altı farklı beton örneği hazırlanmıştır. Beton örneklerinin içerdikleri bağlayıcı maddelelere göre isimlendirilmesi ise Çizelge 1'de gösterilmiştir.

Dayanım karşılaştırmalarının yapılacağı farklı beton örnekleri için ayrı ayrı harçların hazırlanması gereklidir. Bağlayıcı madde kısımlarına göre altı farklı harç elde edilmiştir. Bu harçların birbirlerinden farklı oldukları kısım beton üretiminde bir kısım kullanılan bağlayıcı madde kısımlarıdır. Buna göre, kontrol beton örneği harcı için bağlayıcı madde kısmı %100 oranında Portland çimentosu (P_ç) ile hazırlanırken, diğer beş farklı uçucu küllü (U_k, U₁₅₀, U₁₀₆, U₇₅, U₄₅) harç için %75 Portland çimentosu ve %25 uçucu kül oranında hazırlanmıştır. Bu altı farklı harç karışımının her birinden dört paralel beton örneği hazırlanmıştır. Dört beton örneği sırası ile 2, 7, 28 ve 60 günlük kür işlemlerine tabi tutulmuştur. Böylece, bağlayıcı madde karışımlarına göre altı adet ve bunların her birinden kür sürelerine göre hazırlanan dörder adet olmak üzere toplam 24 adet beton örneği hazırlanmıştır.

2.3. Deneysel Çalışmalar

Bu altı farklı harç karışımı, üç bölmeden oluşan kalıplara dökülmüştür. Kalıpların bölmelerinin her biri 16cm×4cm×4 cm ölçөгindedir. Yaklaşık 20 °C'lik bir sıcaklıkta, en az % 70 bağıl nem'e sahip bir ortamda 24 saatlik bir bekleme süresinin ardından beton örnekleri elde edilir. Beton örnekleri, su altında farklı sürelerdeki kür işlemlerine tabi tutulurlar. Bu kür işlemleri erken dayanımlar için birkaç günden, geç dayanımlar için 1 ya da 2 yıla kadar sürebilir.



Şekil 1. Uçucu kül örneklerinin hazırlanışı..

Kür işlemi sonunda sudan çıkarılan üç adet beton örneği ayrı ayrı ikiye bölünür. İkiye bölme işleminin ardından elde edilen 8cm×4cm×4cm ölçeğindeki altı beton örneği ayrı ayrı tek eksenli basınç dayanımına tabi tutulur. İkiye bölünme ile elde edilen altı beton örneğinin tek eksenli basınç dayanımlarının ortalaması alınarak o harç kombinasyonuna göre hazırlanmış beton örneğinin tek eksenli basınç dayanımı değeri ölçülmüştür (TS EN 196-1/2009) Şekil 2'de tek eksenli basınç dayanımı tayini için gerekli bir akım şeması gösterilmiştir.

Boyutlarına göre farklı uçucu kül içeren beton örneklerinin tek eksenli basınç dayanımı değerleri, kontrol beton örneğinin aynı kür sürelerinin ardından ölçülen tek eksenli basınç dayanımlarına % olarak oranlanmıştır. Böylece uçucu küllerin boyutlarına ve kür sürelerine bağlı olarak puzolanik aktivite değerleri elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Uçucu külün puzolanik aktivitesi aşağıdaki Eşitlik 1'den yararlanılarak hesaplanabilir.

$$PA\% = \frac{\text{Uçucu kül ikameli betonun dayanımı (MPa)}}{\text{Kontrol betonunun dayanımı (MPa)}} * \quad (1)$$

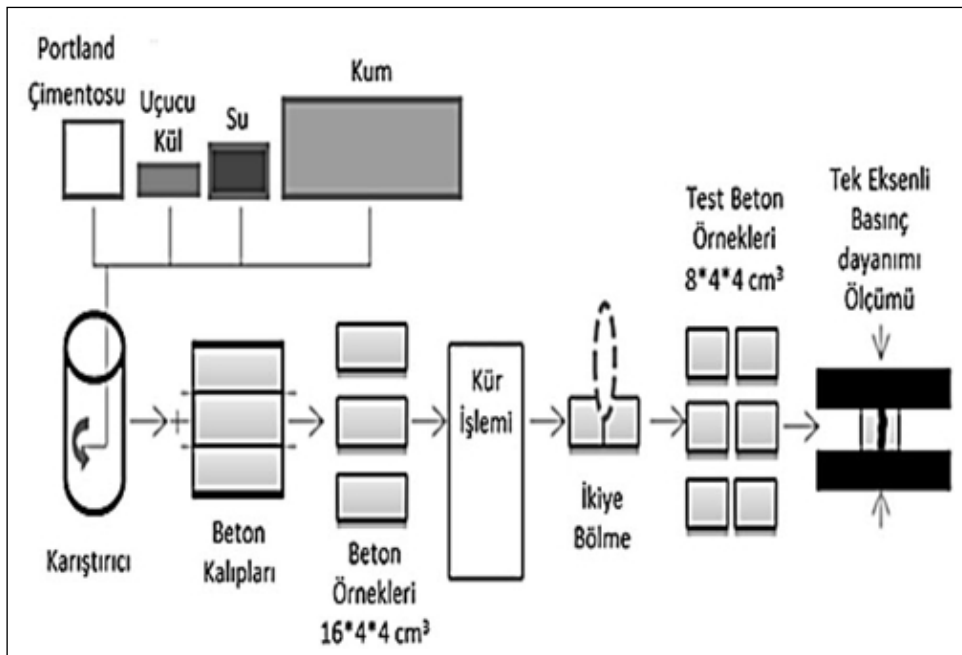
PA% : Puzolanik Aktivite İndeksi

Bütün oranlamalar kontrol beton örneğine göre yapıldığı için Portland çimentosunun (Pç) puzolanik aktivitesi %100 olarak kabul edilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

Yapılan elek analizi karşılaştırmalarından, Portland çimentosunun orijinal uçucu külden daha ince boyutlu olduğu görülebilmektedir. Portland çimentosu ve uçucu külün boyut dağılımlarının karşılaştırdığı birikimli % elek altı değerleri Çizelge 2'de gösterilmiştir. Uçucu küllerin, ayrılan iri boyutlu fraksiyonlarının miktarlarının bilinmesi uygulanacak eleme veya ayırma işleminin ölçeklendirilmesi için önemlidir. Bu miktarlar orijinal uçucu külün elek analizinden doğrudan tespit edilebilirler. Uçucu küllerin iri tane boyutlu gruplarının (+150µm, +106 µm, +75µm ve +45µm) miktarları sırası ile %3.5, %9.7, %16.3 ve %23.1 olduğu Çizelge 2'den bulunabilir.

İri boyutlu tane gruplarının ayırma veya eleme yolu ile ayrılması sonucu elde edilen birikimli uçucu küllerin (U_{150} , U_{106} , U_{75} ve U_{45}) içerisindeki yeni boyut dağılımı oranları da önemlidir. Bu boyut dağılımlarını tespit etmek için yeniden elekler yardımı ile boyut analizi yapmaya gerek yoktur. Bu yeni boyut dağılımları orijinal uçucu külün boyut analizi sonuçlarına göre yeniden düzeltilmiş olarak hesaplanabilir. Örneğin U_{150} uçucu külünün boyut dağılımı +150µm'luk boyut grubu miktarı oranı % 3.5 olduğu ve orijinal uçucu külden uzaklaştırıldığı için bu oranı yüze tamamlayan % 96.5 (-150µm miktarı) oranına göre yeniden hesaplanarak düzenlenmiştir. Aynı işlemler U_{106} , U_{75} ve U_{45} uçucu külü içinde yapılmıştır. Hesap yolu ile düzenlenmiş boyut dağılımı değerleri U_{150} , U_{106} , U_{75} , U_{45} uçucu küllerinin



Şekil 2. Tek eksenli basınç dayanımı tayini akım şeması.

kullanıldıkları beton örneklerinin dayanım değerlerini ne ölçüde etkilediklerinin yorumunu ve kıyaslamasını yapmada önemlidir. Çizelge 3'te düzeltilmiş boyut dağılımı değerleri belirtilmiştir.

Beton üretiminde genellikle 28 günlük kür işlemi, yapı tasarımları, beton oranı ve beton içerisinde çimento reaksiyonu evrelerinin doğal bir sonucu olarak standart bir öneme sahipken bazı durumlar için erken dayanım süreleri (2, 7, 14 gün) gerekebilir (NTPC Limited, 2010). Beton örneklerinin, kür süreleri (2, 7, 28 ve 60 gün) arttıkça tek eksenli basınç dayanımlarının arttığı Çizelge 4' te görülmektedir. Ayrıca, 2, 7 ve 28 günlük kür süreleri için orijinal uçucu kül (U_k) ile hazırlanan beton örneklerinin (C_k) dayanım değerleri, elenmiş uçucu küllerin (U_{150} , U_{106} , U_{75} ve U_{45}) ilavesi ile elde edilen beton örneklerinin (C_{150} , C_{106} , C_{75} ve C_{45}) dayanım değerlerinden oldukça düşüktür ve ancak 60 günlük kür sürelerinden sonra, uçucu küllü beton örneklerinin dayanım değerlerini yakalamıştır. Bu durumda uzun kür süreleri için uçucu kül üzerine uygulanacak bir eleme işlemi çokta bir etki sağlamayacaktır. Uçucu küllerin elendikleri elek boyutu azaldıkça içerisinde kullanıldıkları beton örneklerinin dayanımlarının doğrudan

artmadığı Çizelge 4'te görülmektedir. Ancak özellikle 106 μ m'dan ince boyutlu uçucu küller (U_{106}) ile hazırlanan C_{106} beton örneklerinin 2,7 ve 28 günlük kür süreleri için dayanımlarının en yüksek değerlerde olduğu göze çarpmaktadır. Bu değerler kür sürelerine göre sırası ile 26.1, 32.1 ve 42.9 MPa'dır. 75 μ m'dan ince uçucu küller (U_{75}) ile hazırlanan C_{75} beton örneklerinin ise 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda dayanım değerleri en yüksek değerlere ulaşmıştır. Bu değerler de sırası ile 30.6 MPa ve 42.9 MPa olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar bize orijinal kül ile en ince boyutlu küller arasında optimum bir elek altı uçucu kül örneğinin varlığını göstermektedir. Eğer doğrudan dayanım değerleri ile uçucu külün ince boyutu arasında bir ilişki olsaydı, en ince boyutlu uçucu külün (U_{45}) ilave edildiği beton örneklerinin (C_{45}) özellikle erken dayanımlarda (2, 7, 28 gün), diğer uçucu küllerin ilave edildiği beton örneklerine göre en yüksek dayanım ve puzolanik aktivite sonuçlarını vermesi gerekirdi.

Genel olarak, uçucu külden 45 μ m'dan ince tanelerin % oranları birçok standart için kritik bir öneme sahiptir. İnce boyutlu uçucu kül yüksek özgül yüzey alanı ile daha fazla kireç ile reaksiyona girme ve dolayısı ile yüksek puzolanik aktivite

Çizelge 2. Portland çimentosu ve uçucu külün boyut dağılımları.

Boyut	P_ϕ		U_k			
	Miktar	$\sum EA$	Miktar	$\sum EA$	Kod	$\sum E\ddot{U}$
(μ m)	%	(%) \uparrow	%	(%) \uparrow	U_x	(%) \downarrow
+150	0	100.0	3.5	100.0	U_k	3.5
-150+106	2.3	100.0	6.2	96.5	U_{150}	9.7
-106+75	6.3	97.7	6.6	90.3	U_{106}	16.3
-75+45	4.6	91.4	6.8	83.7	U_{75}	23.1
-45	86.8	86.8	76.9	76.9	U_{45}	100.0
Toplam	100.0		100.0			

EA: Elek Altı, E \ddot{U} : Elek Üstü, P ϕ : Portland Çimentosu, U $_k$: Orijinal Uçucu Kül.

Çizelge 3. Deneylede kullanılan malzemelerin düzeltilmiş boyut dağılımları.

Boyut (μ m)	P_ϕ	U_k	U_{150}	U_{106}	U_{75}	U_{45}
+150	0	3.5	-	-	-	-
-150 +106	2.3	6.2	6.4	-	-	-
-106 +75	6.3	6.6	6.8	7.2	-	-
-75 +45	4.6	6.8	7.1	7.6	8.1	-
-45	86.8	76.9	79.7	85.2	91.9	100.0
Toplam	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

indeksinin elde edilmesini sağlamaktadır (Balkema 1992). Fakat bu tüm uçucu küllerin 45 μm 'dan ince elenmesini zorunlu kılmaz. Bu durum, yapılan bu çalışmada da çok açık görülmektedir. 45 μm 'dan ince taneli uçucu kül (U_{45}) ile ikame edilen beton örneğinin uzun dönemli kür süreleri sonunda kontrol beton örneğinin dayanım değerini geçtiği, fakat erken dönemlerde düşük dayanımlar gösterdiği yine Çizelge 4' te görülmektedir. Çünkü betonun donma süreci uzun kür sürelerini kapsamaktadır (NTPC Limited, 2010). Bu da uçucu külün puzolanik aktivitesini uzun dönemde kontrol betonunda kullanılan portland çimentosunun bile üzerine çıkarabilir. U_{45} 'in ilave edilmesi ile hazırlanmış C_{45} betonunun tek eksenli basınç dayanımı 60 günlük kür süresinin sonunda 50.5 MPa olarak ölçülürken Aynı değer, aynı şartlarda kontrol betonu için 50.3 MPa olarak ölçüldüğü Çizelge 4'te görülmektedir. Bu da Çizelge 5' te görüldüğü gibi U_{45} uçucu külünün 60 günlük kür süresi için puzolanik aktivitesinin %100.4 olarak hesaplanmasını sağlamıştır.

Tüm uçucu kül katkılı beton örneklerinin (C_k , C_{150} , C_{106} , C_{75} ve C_{45}) dayanım değerlerinin aynı kür süreleri için, kontrol beton örneklerinin (C_p) dayanım değerlerine % olarak oranlanması ile uçucu kül örneklerinin puzolanik aktivite değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler Çizelge 5'te gösterilmiştir

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, uçucu kül ile Portland çimentosunun boyut özellikleri arasındaki fark dikkate alınmıştır ve uçucu külün Portland çimentosundan daha iri boyutlu taneler içerdiği saptanmıştır. Uçucu külde daha fazla miktarlarda bulunan iri boyut gruplarının eleme yoluyla uzaklaştırılması sonucu Portland çimentosu ve uçucu kül arasındaki boyut farkı azaltılmıştır. Böylece Portland çimentosu ve uçucu kül karışımlarından oluşan bağlayıcı maddeler içerisinde daha homojen bir boyut dağılımı elde edilmiştir. Özellikle 106 μm ve 75 μm 'luk elekler yardımıyla elek altında ayrı ayrı toplanmış birikimli uçucu küller (U_{106} ve U_{75}) ve Portland çimentosu (P_c) belirli bir oranda (%25-%75) ayrı ayrı karıştırıldığında üretilen betonların dayanımları için oldukça olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Hiçbir sınıflandırma yapılmamış orijinal uçucu kül (U_k) ile hazırlanmış kontrol beton örneklerinin puzolanik aktivite indekslerinin 7 ve 28 günlük kür süreleri için sırasıyla %71.8 ve %76.7 olduğu hesaplanmıştır. U_{106} ve U_{75} uçucu kül örnekleri ile hazırlanan beton örneklerinin (C_{106} ve C_{75}) 7 günlük kür süresi sonunda tek eksenli basınç dayanımı değerlerinin sırasıyla 32.1Mpa

ve 30.6MPa olduğu ölçülmüştür. Bu kür süresi (7 gün) için en yüksek puzolanik aktivite indeksi değerleri sırası ile %86.0 ve %82.1'dir. 28 günlük kür sürelerinde C_{106} ve C_{75} beton örneklerinin tek eksenli basınç dayanımlarının her ikisi de aynı ve 42.9 MPa olarak ölçülmüştür. Bu iki aynı değere karşılık gelen puzolanik aktivite indeksi değerleri %87.4 olarak hesaplanmıştır. Bu da eğer kullanılması istenen orijinal uçucu külden büyük boyutlu taneler uzaklaştırılırsa daha yüksek dayanımlı betonlar üretilebileceğini göstermektedir ya da beton dayanımının çok önemli olmadığı durumlar için daha fazla uçucu külün kullanılabilmesinin önünü açacaktır.

Dikkat edilirse, ayırma yapılacak boyut incelidkçe, ayırma boyutunun üzerinde kalacak olan iri tanelerin miktarı artmaktadır. Bu, zaten daha ince boyutta ayırma yapmanın zorluğu yanında, bir de yüksek kapasitede ayırma gerekliliğini ve de bu miktarın da tekrar değerlendirilmesi sorununu beraberinde getirecektir. Bu eleme ile ayrılan iri boyutlu uçucu küllerin agrega yerine kullanılması dikkate alınabilir. Hem erken dayanımlardaki (2, 7, 28 gün) yüksek puzolanik aktiviteleri, hem de bu boyutlar üzerindeki

Çizelge 4. Beton örneklerinin dayanım değerleri.

Beton Örnekleri	Tek Eksenli Basınç Dayanımları (MPa)			
	Kür Süresi (gün)			
	2	7	28	60
C_p	30.0	37.3	49.1	50.3
C_k	22.8	26.8	37.7	48.4
C_{150}	25.2	30.0	40.6	47.5
C_{106}	26.1	32.1	42.9	46.3
C_{75}	24.3	30.6	42.9	46.7
C_{45}	24.5	26.6	41.9	50.5

Çizelge 5. Uçucu küllerin puzolanik aktivite indeksi değerleri.

Bağlayıcı Maddeler	Puzolanik Aktivite İndeksi%			
	Kür Süresi (gün)			
	2	7	28	60
P_c	100.0	100.0	100.0	100.0
U_k	76.0	71.8	76.7	96.3
U_{150}	84.0	80.4	82.8	94.4
U_{106}	86.9	86.0	87.4	91.9
U_{75}	80.9	82.1	87.4	92.8
U_{45}	81.6	71.2	85.3	100.4

(+106µm ve +75µm) kısımlarının (sırasıyla %9.7 ve %16.3) orijinal uçucu kül içerisindeki düşük oranları nedeniyle 106µm ve 75 µm boyutları optimum ayırma boyutları olarak değerlendirilebilirler.

5. Teşekkür

Yazarlar bu çalışmada, termik santral atıklarını inceleme olanağı tanıyan Eren Enerji Termik Santrali yönetimi ve Üretim Mühendisi Halil Gönül'e. Değerli görüşlerini aldığımız Prof. Dr. Sait Kızıgut ve Araş. Gör. Mehmet Bilen'e teşekkürü borç bilirler.

6. Kaynaklar

- Balkema, AA. 1992.** Fly Ash As Addition to Concrete, Rotterdam/ Brookfield, 143p.
- EİE İdaresi Genel Müdürlüğü, 1979.** Türkiye Uçucu Küllerinin Özellikleri ve Kullanım Olanakları, Enerji Çevre Sempozyumu, Mersin
- Erdoğan, TY. 1993.** Atık Hammaddelerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı, Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Sempozyumu, Ankara,.
- Erdođdu, K., Türker, P. 1998.** Effects of fly ash particle size on strength of Portlan cement Fly ash mortars, *Cement Concrete Res.*, 28 (9): 1201-1352.
- Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü., Mordođan, H. 2005.** Uçucu küllerin kullanım alanları; Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, IMCET, İzmir.
- Morrison, RE. 1977.** A Review of Fly Ash Specifications, Symposium on Fly Ash Utilization, Pittsburg USA
- Nielsen, K. 1999.** Economic effects of blasting on the crushing and grinding of ores. In Proc 6th Int Symp on Rock Fragmentation by Blasting, pp 251-256. Symp Series S21, SAIMM, Johannesburg,
- NTPC Limited, 2010.** Resource For High Strength and Durability of Structures at Lower Cost, 03,04,2013,
- Tokyay, M., Ramyar, K., Turanlı, L., Erdoğan, T., Yeğinoğlu, A. 1990.** Termik Santral Küllerinin Çimento ve Beton Katkı Maddesi Olarak Kullanılma Olanaklarının Etüd ve Envanteri, Proje Raporu, T.C. Başbakanlık ve Çevre Müsteşarlığı, Ankara,
- Tokyay, M., Çetin, B. 1991.** Preslenmiş ve Buhar Kürü Uygulanmış Uçucu Kül-Kireç Tuğlalarının Dayanım ve 287 Su Emme Özellikleri, *İMO T. Der.*, 2 (4): 385-394.
- Tosun, A., Konak, G. 2015.** Development of a model estimating energy consumption values of primary and secondary crushers, *Arab. J. Geo.*, 8(2): 1133-1144.
- TS EN 196-1, 2009.** Çimento Deney Metotları Bölüm 1: Dayanım Tayini, Türk Standartları Ankara, 27 s.
- Türker, P., Erdoğan B., Katnaş F., Yeğinoğlu, A. 2009.** Türkiyedeki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, TÇMB Yayınları, 4. Baskı, TÇMB.
- Workman, L., Eloranta, J. 2004.** The effects of blasting on crushing and grinding efficiency and energy 3 consumption. In Proc ISEE 29th Ann Conf Expl & Blasting Techn, I, 131-140.
- Yiğit, E., Toroğlu, İ., Kızıgut, S., Çuhadarođlu, D., Çolak, K., Ünlü, T., Kaymakçı, E., Pilevneli, CC., Bacak, LK., Özarlan, A., Geniş, M., Bilir, E., Keskin, Y. 2000.** Çatalağzı Termik Santrali Küllerinden Yapı Malzemesi Üretimi ve Zonguldak Çevresinde Kullanım Olanakları, Nihai Rapor, Proje No:97K122470, ÇATES, Zonguldak,