

UÇUCU KÜL KULLANIMININ BETONDAKİ ETKİLERİ

İlker Bekir TOPÇU¹, Mehmet CANBAZ²

ÖZET: Endüstriyel bir atık olan uçucu külün betonda bağlayıcı malzeme olarak kullanımının özelliklere etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla Çayırhan Termik Santrali'nden elde edilen uçucu kül, Eskişehir bölgesi agregaları ve PKÇ/B 32.5R çimentosu kullanılarak beton numuneleri üretilmiştir. Numuneler 300, 350, 400 kg/m³ dozaj ve bu dozajların her biri için çimento yerine % 20 ve % 40 oranında uçucu kül katılarak elde edilmiştir. Üretim sırasında taze betonlarda çökme, VeBe, yayılma ve birim ağırlık deneyleri yapılmış ve sonuçları değerlendirilmiştir. Laboratuvar ortamında bekletilen numuneler 7, 28 ve 60 günün sonunda yapılan deneylerle uçucu külün beton üzerindeki fiziksel ve mekanik etkileri belirlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELEER: Beton, Uçucu Kül, İşlenebilirlik, Basınç Dayanımı.

INFLUENCES OF USE OF FLY ASH IN CONCRETE

ABSTRACT: Usability of fly ash, which is an industrial by-product, in concrete as an additive was investigated. The concrete specimens were produced with fly ash of Çayırhan Power Plant, aggregates of Eskişehir region, and PKÇ/B 32.5R cement. The cement dosages were 300, 350 and 400 kg/m³, the cement replacement of fly ash are 20 and 40 %. Slump, VeBe, Flow-test and fresh unit weight tests were carried out during specimen production when it is fresh. The mechanical and physical influences of fly ash on the concrete properties were determined after production of 7, 28 and 60 days.

KEYWORDS: Concrete, Fly Ash, Workability, Compressive Strength.

^{1, 2} *Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Batı Meşelik Kampüsü, 26480 Eskişehir*

I. GİRİŞ

Uçucu küller (UK) betonda mineral katkı olarak kullanılan yapay bir puzolandır ve çoğunlukla kendi başlarına bağlayıcı olmadıkları halde, sönmüş kireçle hidrasyon reaksiyonuna girerek suda sertleşirler. UK'ler elektrik üreten termik santrallerden elde edilir. Genellikle endüstride kullanılmayan düşük kalorili kömürlerin çok ince öğütülerek termik santral fırınında yakılması sırasında yukarıya yükselen UK'ler, bacanın üst kısmında elektrofiltreler veya siklon adı verilen toz tutucularda, elektrostatik veya mekanik yöntemlerle tutularak depolanırlar. Küllerin parçacıkları küresel olup çapları 1-300 µm mertebesindedir [1].

UK'ler beton teknolojisinde ya çimento ile birlikte doğrudan betona katılarak, ya da betonda kum yerine kullanılabilirler. Çimento üretimi sırasında klinkere katılıp öğütülerek uçucu küllü çimento olarak da değerlendirilebilirler. Kum yerine kullanıldığında özgül yüzey artarsa da kumdan az da olsa tasarruf sağlanır. UK'lerin puzolanik özellikleri de olduğundan bunları çimento yerine kullanmak daha avantajlıdır. UK'ler daha büyük özgül yüzey ve inceliğe sahip olduklarından bağlayıcı hacminin artmasını ve çimentodan ekonomi yapılmasını sağlarlar. Araştırmalar ağırlıkça % 20 oranında UK kullanılmasının beton basınç dayanımı açısından olumlu sonuçlar verdiğini göstermiştir [2]. Bunun yanında UK kullanılması ile betonun erken yaştaki basınç ve eğilme dayanımları düşmekte[3, 4], prizi geciktirmektedir [5]. Küçük danelerden oluştuğu için UK katkılı beton daha düzgün yüzeye sahiptir. Birim ağırlıkları düşük olduğu için betonun birim ağırlığının azalmasına sebep olur. UK katkılı betonun hidrasyon ısısı düşük olduğu için termik rötre ve çatlama olmaz dolayısıyla kütle betonları için uygundur.

UK'ler küresel bir yapıya sahip olduklarından su gereksinimini arttırmazlar ve düşük bir su-çimento oranı ile istenilen işlenebilirlik sağlarlar. UK'ler sulu ortamda kireci bağladıkları için betonu dış etkilere daha dayanıklı yapar, su geçirimsizliğini azaltır. UK'ler toprak stabilizasyonu, gaz beton üretimi, hafif agrega ve tuğla üretiminde kullanılabilirler [6,7]. UK'lü betonlarda kür sıcaklığının arttırılması basınç dayanımını iyileştirmiş, birim ağırlıkları düşürmüş ve hacimce su emmelerde artışa neden olmuştur

[8]. Kür sıcaklığı 20 °C iken 28. günden sonra, kür sıcaklığı 40 °C iken 7. günden sonra UK'ün puzolanik reaksiyona başladığı görülmüştür [9]. UK ve Portland çimentosu ile üretilen harçlarda basınç dayanımı düşmektedir. Bu harçlarda yüksek miktarlarda UK kullanıldığında priz sürelerinde gecikme olmakta ve büzülme oranı artmaktadır [10]. UK ile yapılan bir çalışmada [2], PÇ 32.5 çimentosu, Orhaneli termik santrali külü ve akışkanlaştırıcı kullanarak çeşitli karışımlar hazırlanmış ve sonuçta % 20 UK kullanıldığında kontrol betonuna yakın basınç dayanımları elde edilmiş ve UK ile birlikte akışkanlaştırıcı da kullanıldığında birim ağırlıklarda azalma meydana gelmiş, akışkanlaştırıcı kullanılmadığında birim ağırlıklar artmıştır. Bir başka çalışmada Afşin Elbistan Termik santrali UK kullanılmış ve % 15 civarında UK'ün çimento yerine kullanılmasının uygun olacağı belirtilmiştir. Ayrıca UK'lü harçların ısı yalıtımı özellikleri incelenmiş ve UK'e % 10 oranında katılacak çimento, kireç veya çimento + kireç bağlayıcılarından biri ile yalıtım amaçlı sıvalar yapılabileceği gibi ayrıca UK'ün sandviç dolgu duvarlarda dolgu malzemesi olarak kullanılabilceği belirtilmiştir [11].

UK'lü betonların donma-çözülme deneyleri sonunda kayıpların daha az olduğu, betona katkı olarak katılması durumunda basınç dayanımlarını artırdığı belirtilmiştir [12]. Baraj gibi kütle betonu dökülen yapılarda hidrasyon ısısı düşük çimento [13] ve geçirimsiz betonların tercih edilmesi [14] ve UK çimento yerine kullanılması hidrasyon ısısını ve betonun kompasitesini iyileştirmesi nedeni ile DSİ ve TCK gibi kuruluşlar UK'lü betonun kullanılmasına öncülük etmişlerdir [15]. Farklı elektrik santrallerinden alınan UK'lerle yapılan bir çalışmada, UK'lerin kimyasal, minerolojik yapıları ile hidrasyon ve puzolanik reaksiyonlarının oluşumu ve hızları bakımından birbirinden farklı olduğu tespit edilmiştir. UK'lerin kimyasal yapılarına göre sınıflandırılması bazı UK'lerin birden fazla sınıfın özelliklerine sahip olması veya bir sınıf oluşturabilecek kadar değişik karakteristiklere sahip olması nedeni ile uygun değildir [16]. UK çimento üretimi sırasında katılması durumunda ise çimentonun öğütülme işlemi kolaylaştırmakta ve öğütülme süresi kısaltmakta yani daha az enerji ile daha dayanımlı çimento elde edilmektedir [17].

Yüksek dayanımlı betonlarda çimento yerine % 25 oranında UK kullanılması ile basınç dayanımları ve elastisite modülleri düşmekte, çekme ve eğilme dayanımları artmaktadır. Aynı zamanda yüzeysel aşınma artmakta ve kimyasal etkilere dayanıklılığı sülfürik asit

hariç artmaktadır [18]. Sıcaklık artışı ile yüksek oranda UK katılmış betonlarda elastisite modülleri ve basınç dayanımları azalmaktadır [19]. Düşük işlenebilirliği olan betonlarda UK çimento oranının 0.5 ve üzerine çıkması da basınç dayanımını arttırmaktadır. Çökmesiz ve akışkanlaştırıcı katılmış UK çimento oranının 0.75 olan betonların dayanıklılığı dış yüzey uygulamaları için yeterlidir. UK'lü betonlar, 325-400 dozaj ve UK çimento oranı 0.75 civarında olması halinde beton yapılarda yeterli dayanım, dayanıklılık ve yüzey uygulamaları için uygundur [20]. Yapılan bir çalışmada UK çimento üretimi sırasında % 7.5 oranında kullanılmasının betonun mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilediği belirtilmektedir [21]. Klor geçirgenliği, aşınma dayanımı, donma çözülme gibi dayanıklılık faktörleri incelenen bir çalışmada betonda %15 oranında UK kullanımı uygun olacağı belirtilmiştir [22]. Günümüzde betonun dayanımının yanı sıra dayanıklılığının da önemli olduğu görülmüştür. Bu amaçla daha dayanıklı beton üretmek için betonun rötreden dolayı oluşan mikro çatlaklarının azaltılması, daha az çimento ile yüksek oranda UK kullanarak istenilen dayanımların sağlanması yönünde çalışmalar yapılmaktadır. Beton üretiminde yüksek oranda UK kullanmak betonun dayanım özelliklerini iyileştirdiği gibi ekonomi sağlar ve çevre kirliliğini azaltır [23-26].

Gelişen teknoloji ile beraber enerji kullanımı giderek artmaktadır. Bu nedenle endüstriyel atıklardan olan UK miktarı her geçen gün artmaktadır. Termik santrallerde büyük miktarlarda toplanan UK çevreye zarar verdiği gibi toplanması halinde depolama ve yok edilmesi ekonomik olmamaktadır. Bu çalışmada bol miktarda bulunan bu atığın betonda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla UK içermeyen ve % 20 ile % 40 UK içeren betonlar üretilmiştir. Yapılan çalışmada Çayırhan Termik Santraline ait UK ile Eskişehir Çimento Fabrikasının ürettiği PKÇ/B 32.5R çimentosu kullanılmıştır. Yapılan karışımlarda taze ve sertleşmiş beton özellikleri incelenmiştir. İşlenebilirlik ve dayanım açısından uygun UK oranları araştırılmıştır.

II. DENEYSEL ÇALIŞMA

II. 1. Kullanılan Malzemeler

Uçucu kül (UK): Çayırhan Termik Santrali atığı UK kullanılmıştır. Kimyasal özellikleri TS 687'ye göre fiziksel özellikleri ise TS 639'a göre bulunmuş ve kimyasal bileşimi Çizelge 1'de ASTM C 618 ve TS 639'daki sınırlamalarıyla birlikte verilmiştir [8].

Çizelge 1. Uçucu külün kimyasal bileşimi [8]

Oksitler %	UK	ASTM C 618 Limitleri		TS 639 Limitleri
		F Sınıfı	C Sınıfı	
SiO ₂	48.44	-	-	-
Al ₂ O ₃	22.16	-	-	-
Fe ₂ O ₃	9.32	-	-	-
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	79.92	en az 70.0	en az 50.0	en az 70.0
CaO	9.18	-	-	-
MgO	0.71	en çok 5.0	en çok 5.0	en çok 5.0
TiO ₂	1.01	-	-	-
K ₂ O	1.87	en çok 5.0	en çok 5.0	-
Na ₂ O	2.00	en çok 5.0	en çok 5.0	-
SO ₃	2.64	en çok 5.0	en çok 5.0	en çok 5.0
Kızdırma Kaybı	2.43	en çok 12.0	en çok 6.0	en çok 10.0

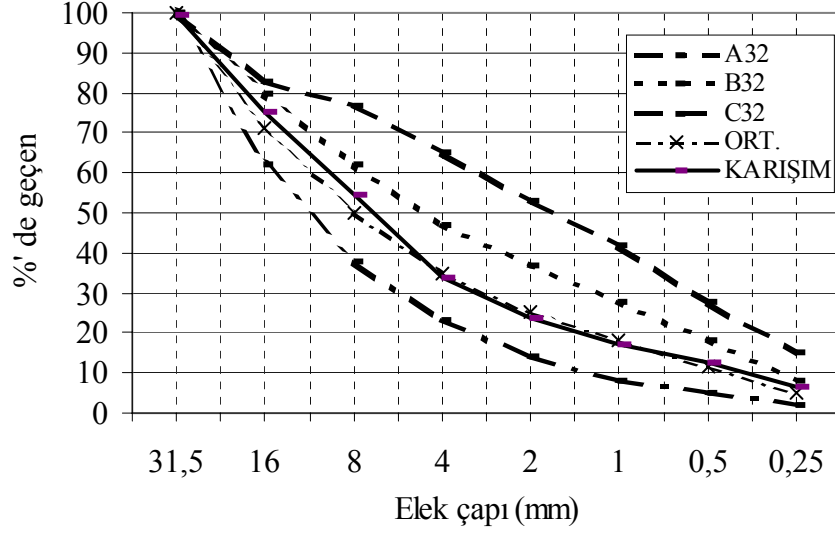
Çimento: Eskişehir Çimento Fabrikasının (EŞÇİM) üretimi olan, TS 12143'nolu TSE standartlı PKÇ/B 32.5R Portland Kompoze Çimentosu kullanılmıştır. Bu çimentoya ait fabrikadan temin edilen özellikler Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Deneyde kullanılan çimentonun özellikleri

PKÇ/B 32.5R			
Kimyasal Bileşim, %		Fiziksel Özellikler	
SiO ₂	31.53	Özgül Ağırlık (kg/m ³)	2850
Al ₂ O ₃	7.06	Özgül Yüzey (m ² /kg)	3574
Fe ₂ O ₃	3.29	Basınç Dayanımları, MPa	
CaO	48.89	2 Günlük	12.8
MgO	1.46	7 Günlük	26.9
SO ₃	2.01	28 Günlük	42.5
Kızdırma Kaybı	4.55		
Tayin Edilemeyen	0.05		
Çözülme Kalıntı	0.27		

Agrega: Eskişehir-Osmaneli kumu ve Söğüt Zenzemiye kırmataşları kullanılmıştır. En büyük tane boyutu 31.5 mm'dir. Agreganın granülometri eğrisi Şekil 1'de verilmiştir. Agregaların karışım granülometrisi TS 706 elek sistemi ve TS 707'de belirtilen referans eğrilerine uygun olarak yapılmıştır. Agreganın birim ağırlığı TS 3529, özgül ağırlığı ise TS 3526'ya göre her karışım için bir deneme yapılmıştır. Buna göre birim ağırlıklar kum

için 1550, kırmataş (8-16) için 1720, kırmataş (16-32) için 1770 kg/m³, özgül ağırlıklar ise kum için 2660, kırmataş (8-16) için 2760, kırmataş (16-32) için 2770 kg/m³ olarak



bulunmuştur.

Şekil 1. Eskişehir-Osmaneli agregası karışımının granülometri eğrisi.

II. 2. Yapılan Deneyler

UK kullanmadan 300, 350, 400 dozajlı üç tip kontrol betonu numuneleri üretilmiştir. Ayrıca her bir dozaj için o dozajın ağırlıkça % 20 ve % 40'ı kadar UK çimento yerine kullanılarak üretim yapılmıştır. Üretime başlarken çökme değeri 10 cm olacak şekilde hesaplanan karışım suyunda düzeltmeler yapılmıştır. Her karışımında taze beton deneylerinden yayılma, VeBe, hava boşluğu ve birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Her bir karışım için dokuz adet $\phi 15 \times 30$ cm boyutlarındaki silindir şeklindeki kalıplara numuneler alınmış numuneler 24 saat laboratuvar ortamında bekledikten sonra kalıbından çıkarılıp kirece doygun, 20 °C sıcaklıktaki havuzda bekletilmiştir. Her karışım için üretilen dokuz numunenin üçünde 7., üçünde 28. geri kalan üçünde ise 60. günün sonunda önce hasarsız deneyler olan ultrases hızı, Schmidt sertliği deneyleri daha sonrada basınç dayanımı deneyi yapılmıştır.

II. 3. Deney Sonuçları

Taze Beton Deney Sonuçları: Çayırhan Termik Santraline ait UK ve Eskişehir Çimento Fabrikasının ürettiği PKÇ/B 32.5R çimentosu ile yapılan farklı beton karışımlarında

taze birim ağırlıkları, VeBe süreleri, hava boşluğu miktarları ve yayılmaları ölçülmüştür.

Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları: UK katkılı ve katkısız numunelerde 7, 28 ve 60. günde yapılan basınç dayanım ve ultrases deneyi sonuçları Çizelge 3’te verilmiştir.

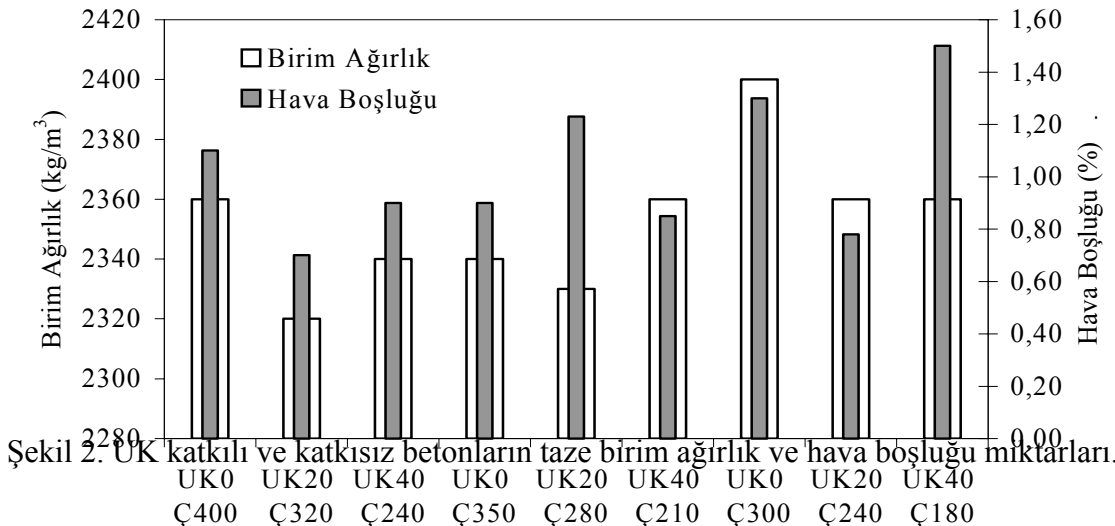
Çizelge 3. Basınç dayanım ve ultrases deneyi sonuçları

Beton Cinsi	Basınç Dayanımı, MPa			Ultrases Geçiş Hızı, km/s		
	7 gün	28 gün	60 gün	7 gün	28 gün	60 gün
UK 0 + Ç400	16.2	22.6	27.0	3.83	4.48	3.90
UK 20 + Ç320	8.4	14.7	21.8	3.65	4.17	3.65
UK 40 + Ç240	4.5	12.6	18.6	3.18	4.14	3.13
UK 0 + Ç350	9.7	16.3	23.7	3.69	4.12	3.76
UK 20 + Ç280	7.3	14.1	21.2	3.71	4.30	3.66
UK 40 + Ç210	4.4	10.8	15.3	3.25	4.13	3.26
UK 0 + Ç300	7.9	12.0	22.2	3.62	4.03	3.71
UK 20 + Ç240	5.9	10.6	15.9	3.35	3.99	3.26
UK 40 + Ç180	2.1	7.3	14.7	2.68	3.85	2.69

III. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

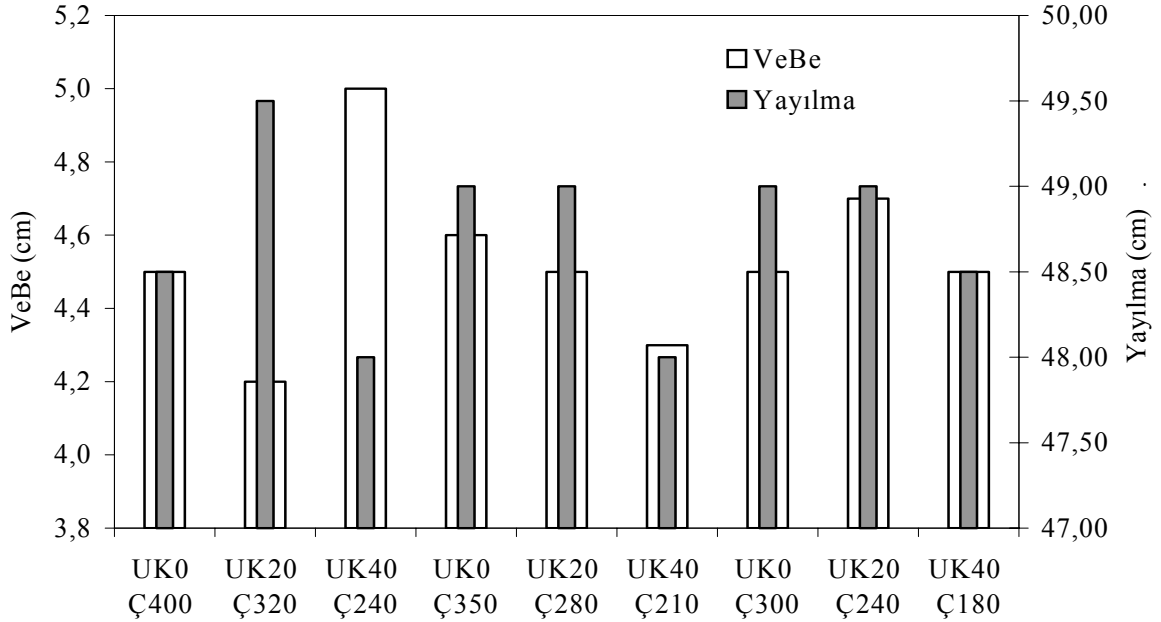
III.1 Taze Beton Deneyleri

Yapılan taze birim ağırlık deneylerinin sonuçları Şekil 2’de görüleceği gibi 2320-2400 kg/m³ arasındadır. Her bir dozaj serisi için birim ağırlıklar % 20 ve % 40 UK içeren betonlar, UK içermeyen betonlarla karşılaştırılmıştır. Buna göre UK katılmasıyla birim ağırlıklarda % 4’lük bir değişim olmuştur. Betonun taze iken plastik şekil değiştirmesini ölçmek ve kalıba yerleşmesi hakkında fikir sahibi olduğumuz VeBe deneyi sonuçları Şekil 3’ten de görülebileceği gibi 4.2-5.0 sn arasındadır. Yapılan karşılaştırmada en büyük değişim 400 dozajlı betonlarda görülmüştür. Buna göre % 20 UK içeren betonda UK içermeyen taze betona göre VeBe süresi % 7 azalırken UK miktarı % 40 olduğunda



Şekil 2. UK katkılı ve katkısız betonların taze birim ağırlık ve hava boşluğu miktarları.

VeBe süresinde % 11'lik bir artış görülmüştür. Çimento miktarı azaldıkça VeBe sürelerindeki bu değişim azalmıştır. UK katkılı ve katkısız betonlarda hava boşluğu miktarları da ölçülmüştür. Şekil 2'de gösterildiği gibi hava boşluğu % 0.7-1.5 arasındadır. UK içeren ve içermeyen serilerde karşılaştırmalar yapıldığında hava boşluğu değişim oranlarının çok yüksek ve düzensiz olduğu görülmüştür. UK katkılı ve katkısız betonlarda yapılan yayılma deneyi sonucunda Şekil 3'te gösterilen yayılma miktarı 48-49.5 cm arasındadır. Çizelge 4'ten de görülebileceği gibi bu yayılma miktarındaki değişim \pm % 2 civarındadır. Üretim sırasında çökme miktarı 10 cm'e göre ayarlandığı ve gerektiğinde karışım suyu miktarında azaltma veya ekleme yoluna gidildiği için yayılma miktarında çok büyük bir değişim görülmemiştir.



Şekil 3. UK katkılı ve katkısız betonların VeBe süreleri ve yayılma miktarları.

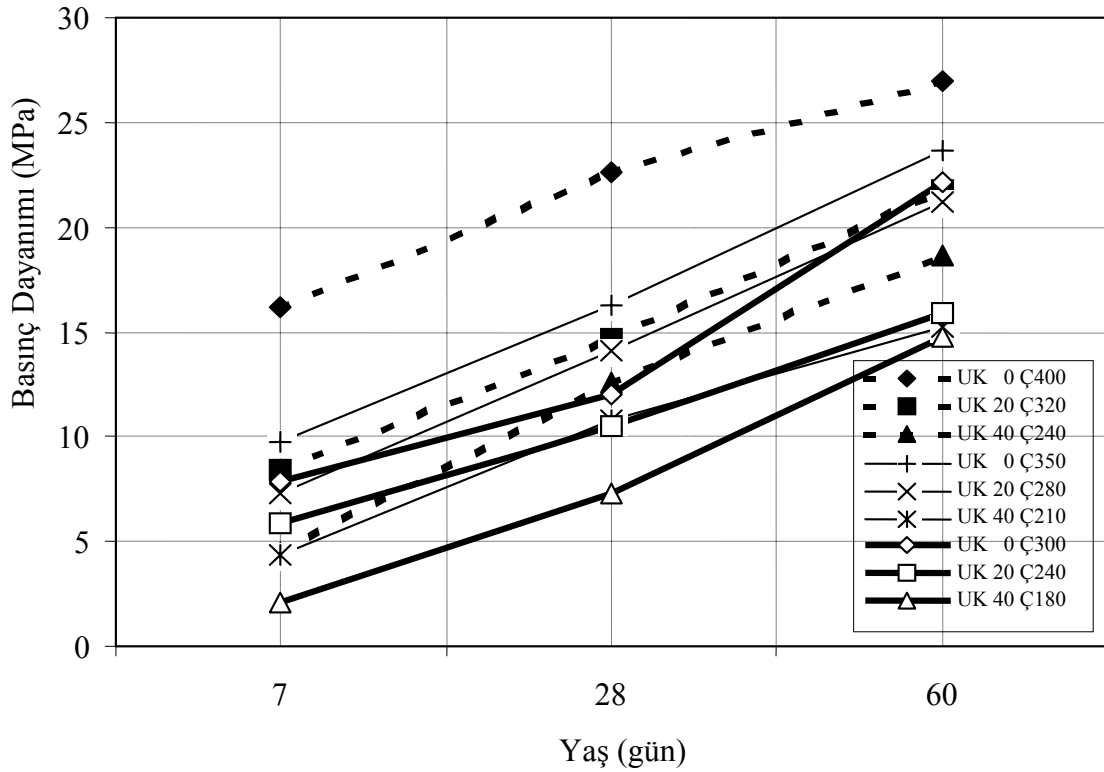
Çizelge 4. Taze beton deneyi sonuçlarının karşılaştırılması

	Birim Ağırlık Değişim Oranı (%)	VeBe Değişim Oranı (%)	Hava Boşluğu Değişim Oranı (%)	Yayılma Değişim Oranı (%)
UK 0 + Ç400	100	100	100	100
UK 20 + Ç320	98	93	64	102
UK 40 + Ç240	99	111	82	99
UK 0 + Ç350	100	100	100	100
UK 20 + Ç280	100	98	137	100
UK 40 + Ç210	101	93	94	98
UK 0 + Ç300	100	100	100	100

UK 20 + Ç240	98	104	60	100
UK 40 + Ç180	98	100	115	99

III.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri

Basınç dayanımlarının farklı kür sürelerine göre değişimleri Şekil 4'te verilmiştir. Çimento yerine UK kullanılması basınç dayanımında azalmaya sebep olmuştur. Yapılan karşılaştırmalara göre UK kullanılmadığında 7 günde kazandığı dayanım 60 günde kazanacağı dayanımın ancak % 46'sı olurken, UK kullanıldığında ilk 7 günlük dayanımlar oldukça düşük olduğu görülmüştür. % 20 UK kullanıldığında ilk 7 günlük dayanımı 60 günlük dayanımının % 37'si olurken bu oran % 40 UK kullanıldığında % 22 olmaktadır. 28 günlük dayanımlarda ise UK katkısız kontrol betonlarında 60 günlük



Şekil 4. UK katkılı ve katkısız betonların 7, 28 ve 60 günlük basınç dayanımları.

dayanımın % 69'nu kazanırken bu oran % 20 UK kullanıldığında % 67, % 40 UK kullanıldığında % 62 olmaktadır. Bu sonuçlardan da görülebileceği gibi UK miktarı ne kadar arttırılırsa dayanım o kadar geç kazanılmaktadır.

Yedi günlük ile 60 günlük dayanımlar arasında oldukça büyük farklar varken, 28. gün sonunda UK katkılı ve katkısız betonlar arasında 60 günde kazanılan dayanıma göre bu farkların oldukça azaldığı görülmüştür. Basınç dayanımı 400 dozajlı seride % 20 UK

ilavesiyle % 34, % 40 ilavesiyle ise % 49 düşmüştür. 350 dozajda % 20 UK çimento yerine kullanıldığında basınç dayanımında UK katkısız kontrol betonuna göre % 16'lık bir azalma meydana gelmiştir. % 40 UK kullanılması durumunda ise dayanım % 41 azalmıştır. 300 dozajda yapılan karşılaştırmaya göre % 20 UK kullanıldığında basınç dayanımında % 22'lik azalma meydana gelirken % 40 UK kullanıldığında bu azalma miktarı % 49 olmaktadır. Bu sonuçlara göre % 20 UK kullanımı ile yaklaşık % 24'lük, % 40 UK kullanımı ile % 46'lık bir basınç dayanımı kaybı oluşmuştur. UK çimento yerine kullanılmayıp sabit dozaj üzerine belirli oranlarda katılması durumunda basınç dayanımında artışlar meydana gelmektedir. UK 240 kg/m³ sabit dozajda % 20'den % 40'a çıkardığımızda 60 günlük numunelerde % 17'lik bir artış gözlenmiştir.

Çizelge 3'te verilen UK katkılı ve katkısız 60 günlük beton numunelerinin ultrases geçiş hızları incelendiğinde, 400 dozajlı seride % 20 UK katıldığında UK katkısız kontrol betonlarına göre ultrases geçiş hızlarında % 6'lık bir azalma olduğu, bu oranın % 40 UK katıldığında % 20'e çıktığı görülmüştür. 350 dozajlı seride % 20 UK katıldığında kontrol betonlarının ultrases geçiş hızlarına göre % 3'lük azalma meydana gelirken % 40 UK katıldığında ultrases hızlarında % 13 azalma meydana gelmiştir. 300 dozajlı betonlarda ise % 20 UK kullanıldığında kontrol betonlarının ultrases hızlarına göre % 12'lik bir azalma görülmüştür. % 40 UK kullanıldığında bu azalma % 27 olmaktadır

V. SONUÇ VE ÖNERİLER

İşlenebilirlik açısından yapılan incelemelerde dozaj azaldıkça UK katılan betonlarda UK katkısız kontrol betonlarına göre VeBe süresinin azaldığı görülmüştür. UK kullanımının beton basınç dayanımını azalttığı ve UK miktarının artırılması durumunda dayanımın daha da geç kazanıldığı anlaşılmıştır. 2000 yılı birim fiyatları ile yapılan maliyet analizinde çimento yerine % 20 UK kullanılması ile beton birim maliyetinde ortalama % 10'luk, % 40 UK kullanılması ile de % 18'lik bir ekonomik kazanç elde edilmektedir. Ayrıca endüstriyel bir atık olması UK betonda kullanılması ile bu atığın depolanması maliyetini de düşecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Kocataşkın, F., “Yeni Gelişen Beton Malzemeleri”, İleri Beton Teknolojisi Ders Notları, İTÜ İnşaat Fakültesi, 1987, İstanbul.
- [2] Sümer, M., “Uçucu Kül Atıklarının Beton Üretiminde Değerlendirilmesi”, I. Ulusal İnşaat & Çevre Sempozyumu, Salihli, Bildiriler Kitabı, ss. 179-185, 1994.
- [3] Li, B., Liang, W. and He, Z., “Study on High-Strength Composite Portland Cement with a Larger Amount of Industrial Wastes”, Cement and Concrete Research, Vol. 32, pp. 1341-1344, 2002.
- [4] Naik, T.R., Singh, S.S. and Ramme B.W. “Effect of Source of Fly Ash on Abrasion Resistance of Concrete”, Journal of Materials in Civil Engineering, pp. 417-426, September-October 2002.
- [5] Fu, X., Wang, Z., Tao, W., Yang, C., Hou, W., Dong, Y. and Wu, X., “Studies on Blended Cement with Large Amount of Fly Ash”, Cement and Concrete Research, Vol. 32, pp. 1153-1159, 2002.
- [6] Temiz, H. ve Yeğınobalı, A., “UK ve SD Katkılı Çimento Hamur ve Harçlarının Bazı Özellikleri”, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Semp., Bildiri Kitabı,, ss. 213-227, 1995, Ankara.
- [7] Tokyay, M. Ve Arıöz, Ö., “Uçucu Kül-Desülfürizasyon Alçısı Esaslı Tuğlalar Hakkında Deneysel Bir Çalışma”, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Semp. 3, Bildiri Kitabı, ss. 171-186, 1997, Eskişehir.
- [8] Koral, S. ve Özkul, H., “Endüstriyel Atıklardan Desülfojips ve Uçucu Külün Bağlayıcı Malzeme Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması”, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Semp. 3, Bildiri Kitabı, ss. 197-208, 1997, Eskişehir.
- [9] Hanehara, S., Tomosawa, F., Kobayakawa, M. and Hwang, K., “Effects of Water/Powder Ratio, Mixing Ratio of Fly Ash in Cement Paste”, Cement and Concrete Research, Vol. 31, pp. 31-39, 2001.

[10] Turanlı, L., Erdoğan, T. ve Karaer, K., “Çayırhan Uçucu Külünün Portland Çimentosu-Uçucu Külü Hamur ve Harçlarının Özelliklerine Etkileri”, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Semp. 3, Bildiri Kitabı, ss. 283-293, 1997, Eskişehir.

[11] Yıldırım, M.Ş. ve Yıldırım, V., (1994). “Afşin-Elbistan Uçucu Külü İle Üretilen Beton ve Harçların Mekanik ve Isı Yalıtımı Özellikleri Üzerine Bir Araştırma”, I. Ulusal İnşaat & Çevre Sempozyumu, Salihli, Bildiriler Kitabı, ss. 186-195.

[12] Atanur, A. ve Yağız, F., “Türkiye’de Elde Edilen Uçucu Küllerin Menşeleri, Özellikleri ve Bu Uçucu Küllerin Agregat-Çimento Karışımlarında Portland Çimentosunun Bir Kısımını İkame Edebilmek İmkanlarının Araştırılması”, Teknik Bülten Sayı 30, Karayolları Gen. Müd. Araştırma Fen Heyeti Müd. Yay., 1970, Ankara.

[13] Atiş, C.D., “Heat Evolution of high-Volume Fly Ash Concrete”, Cement and Concrete Research, Vol. 32, pp. 751-756, 2002.

[14] Ghosh, A. and Subbarao, C., “Microstructural Development in Fly Ash Modified with Lime and Gypsum”, Journal of Materials in Civil Engineering, pp. 65-70, January-February 2001.

[15] Gül, R. ve Yıldız, İ., “Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanılması”, DSİ Teknik Bülteni, Sayı 87, ss. 57-64, 1996, Ankara.

[16] Tokyay, M., “Uçucu Küllerin Mineralojik Kompozisyonlarının Hidratasyona ve Puzolanik Reaksiyonlara Etkileri”, Türkiye İnşaat Mühendisliği X. Teknik Kongresi, ss. 389-401, 1989, Ankara.

[17] Kılınçkale, F., “Uçucu Küllü Çimento Üretiminde Uçucu Kül Öğütme Şeklinin Çimento Özelliklerine Etkisi”, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Semp., Bildiri Kitabı, ss. 33-44, 1995, Ankara.

- [18] Yazıcı, Ş. ve Baradan, B., “Uçucu Kül Katkılı Yüksek Dayanımlı Beton”, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Semp., Bildiriler Kitabı, ss. 59-72, 1995, Ankara.
- [19] Ghosh, S. and Nasser, K.W., “Effects of High Temperature and Pressure on Strength and Elasticity of Lignite Fly Ash and Silica Fume Concrete”, ACI Materials Journal, Vol. 93, pp. 51-60, January-February 1996.
- [20] Haque, M. N., Langan, B.W. and Ward, M.A., “High Fly Ash Concretes”, ACI Journal, 81-8, pp. 54-60, January-February 1984.
- [21] Elkhadiri, I., Diouri, A., Boukhari A., Aride, J. and Puertas, F., “Mechanical Behaviour of Various Mortars Made by Combined Fly Ash and Limestone in Moroccan Portland Cement”, Cement and Concrete Research, Vol. 32, pp. 1597-1603, 2002.
- [22] Yoon, Y.S., Won, J.P., Woo, S.K. and Song, Y.C., “Enhanced Durability Performance of Fly Ash Concrete for Concrete-Faced Rockfill Dam Application”, Cement and Concrete Research, Vol. 32, pp. 23-30, 2002.
- [23] Mehta, P.K., “Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development”, Concrete International, pp. 23-28, July 2002.
- [24] Mehta, P.K., “Reducing the Environmental Impact of Concrete”, Concrete International, Vol. 23, pp. 61-66, October 2001.
- [25] Mehta, P.K., “Building Durable Structures in the 21st Century”, Concrete International, Vol. 23, pp. 57-63, March 2001.
- [26] Mehta, P.K., “Durability-Critical Issues for the Future”, Concrete International, pp. 27-33, July 1997.