

Termik Santral Atığı Uçucu Külün Portland Çimentosu Özelliklerine Etkisi

Yılmaz KOÇAK

Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, DÜZCE

ÖZET

Sürdürülebilir yapılar için dayanımın yanında dayanıklılık da çok önemlidir. Bu nedenle çimento ve beton teknolojisinde puzolanik malzemeler kullanılmaktadır. Bunlardan biri de uçucu küldür. Bu çalışmada, Seyitömer termik santrali uçucu külünün, çimentoda (PÇ 42,5 R) basınç dayanımı, priz süresi ve su ihtiyacına etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla uçucu kül, ağırlıkça %0, %10, %20 ve %30 oranlarında Portland çimentosu yerine ikame edilmiştir. Uçucu külün, çimentonun basınç dayanımı, priz süresi ve su ihtiyacına olan etkileri standart çimento deneyleriyle tespit edilmiştir. Sonuç olarak, uçucu kül ikameli çimentoların su ihtiyacı ve priz süresinde, Portland çimentosuna göre doğrusal bir artış belirlenmiştir. Bunun yanı sıra 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarında, Portland çimentosu harçlarına göre bir azalma olmuştur. Ancak bu azalmaya rağmen %10 ve %20 oranlarındaki uçucu kül ikameli çimento harçlarının basınç dayanımlarının standart değerler arasında olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Uçucu kül, çimento, priz süresi, su ihtiyacı.

The Effect of Thermic Power Plant Waste Fly Ash on Properties of Portland Cement

ABSTRACT

Durability is very important for sustainable buildings as well as the compressive strength. For this purpose, pozzolanic materials are used for cement and concrete technology. One of these materials is fly ash. In this study, the effect of the fly ash of Seyitömer thermal power plant to compressive strength, setting time and water demand of the cement (OPC 42.5 R) were investigated. For this purpose, fly ash was added as a replacement for Portland cement in amounts of 0, 10, 20 and 30 weight %. The effects of fly ash to compressive strength, setting time and water demand was determined by standard tests of cement. As a result, a linear increase was determined in setting time and water demand of the fly ash replaced cement than Portland cement mortar. Besides, 2, 7 and 28 days compressive strength had a decrease compared to the Portland cement. Despite this reduction, compressive strength of 10% and 20% of the fly ash replaced cement mortars was determined to be between the standard values.

Keywords: Fly ash, cement, setting time, water demand.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Farklı uygulama alanlarında karşılaşılan değişik türdeki yapı sistemlerinde üretilen betonun temel malzemelerinden biri de çimentodur. Klinker üretimi sırasında hem yoğun enerji tüketimi meydana gelmekte hem de kalsinasyon ve yanma sonucu ortaya çıkan CO₂ gazları yüzünden çevreye önemli ölçüde zarar verilmektedir. Bu nedenle çimento üretiminde klinker kullanımının azaltılması için çimento teknolojisinde, gerek katkı gerekse ikame malzemesi olarak doğal (zeolit, tras vb.) ya da yapay (uçucu kül, taban külü, silis dumanı, yüksek fırın cürufu vb.) puzolanik malzemeler kullanılmaktadır. Bu puzolanik malzemelerin arasında en çok kullanılanlarından biri de uçucu küldür (UK) (1).

UK, termik santrallerde elektrik üretimi sırasında kömürün yanması sonucu baca çıkışlarında elektro filtreler yardımıyla tutulan çok ince taneciklerden oluş-

maktadır. Atık malzeme olarak ortaya çıkan, uçabilen ve çok ince taneli olan yapay puzolan sınıfındaki bu küllere, UK adı verilmektedir (1). ASTM C 618'e göre UK'lar F ve C sınıfı olarak iki gruba ayrılmıştır. F sınıfı UK'lar, antrasit veya bitümlü kömürlerden elde edilen ve puzolanik özelliğe sahip olan SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ (S+A+F) toplamı %70'in üzerinde olan küllerdir. C sınıfı UK'lar genellikle linyit veya düşük bitümlü kömürlerden elde edilen ve puzolanik özelliğinin yanı sıra kendiliğinden de bir miktar bağlayıcı özelliğe sahip, S+A+F toplamı ise %50'nin üzerinde olan küllerdir. UK, %60-90 camsı bileşen içeren, çapları 1-150 µm arasında değişiklik gösteren, yoğunluğu, 2,1-2,7 g/cm³ olan küresel şekilli ve gri renkli bir yapıya sahiptir (1,3).

UK'nın inşaat sektöründe yaygın olarak kullanıldığı alanlardan biri de çimento sanayisidir. UK'nın çimento yerine ikame malzemesi olarak kullanılması ile ekonomiklik (4), permabilite azaltması (5), alkali agrega gelişiminin kontrolü (6), kimyasal direnç sağlaması (7), atıkların değerlendirilmesi (8,9) ve betonun rötresini

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: yilmazkocak@duzce.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2011.14.2, 135-140

azaltması (10) gibi avantajlar sağlanmaktadır. Ayrıca çimento ile betonda priz başlama ve priz sonu süresini, katkı oranına bağlı olarak artırması gibi avantajları nedeniyle üzerinde yoğun araştırmaların yapıldığı bir malzemedir (11,12). UK'nın hidrasyon üzerine etkileri kimyasal kompozisyonuna, yüzey alanına ve kimyasal reaktivitesine (amorf faz içeriğine) bağlı olarak değişiklik göstermektedir (13,14). Yeterli puzolanik aktivite gösteren UK'lar her türlü beton yapımında başarı ile kullanılmaktadır. UK'larla yapılan betonların hidrasyon ısısı düşük olduğundan özellikle kütle beton üretiminde önemli bir rol oynamaktadır (15).

Ayrıca endüstriyel bir atık olan ve çevreye zarar veren UK'nın sürdürülebilir beton teknolojisi açısından da önemi büyüktür. Çimentoda gerek katkı gerekse ikame malzemesi olarak kullanılan UK sayesinde, dayanım ve dayanıklılığın artmasıyla kalıcılık sorunları önlenmektedir. Böylelikle de inşa edilen yapılar, kullanım süreleri boyunca sorunsuz bir şekilde hizmet edebilmektedir. Bu çalışmada UK ikamesi ile üretilen çimentoların mekanik ve fiziksel özellikleri tespit edilmiş ve sonuçları değerlendirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Materyal (Material)

Çimento: Bursa Çimento Fabrikası üretimi olan CEM I 42,5 R Portland çimentosu (PÇ) kullanılmıştır. Bu çimentonun üretiminde minör ilave bileşen olarak UK katılmıştır.

Uçucu kül: Kütahya Seyitömer Termik Santrale ait olan UK kullanılmıştır.

Kum: Harç örneklerinin hazırlanmasında TS EN 196-1'e uygun SET Trakya Çimento Sanayi tarafından üretilen %94,05 oranında SiO₂, %0,57 kızdırma kaybı olan Rilem Cembureau Pınarhisar kumu kullanılmıştır.

Karışım suyu: Bursa ili Kestel ilçesi şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

2.2. Metot (Method)

Çalışmada PÇ, %10 uçucu kül ikameli çimento (10 UK), %20 uçucu kül ikameli çimento (20 UK), %30 uçucu kül ikameli çimento (30 UK) olmak üzere toplam dört farklı çimento kullanılmıştır.

Çimento hamuru ve harç karışımlarının hazırlanması TS EN 196-1'e göre yapılmıştır (16). Çimento hamuru örneklerinin TS EN 196-3'e göre kıvam suyu ve priz süresi belirlenmiştir (17). Her bir çimento hamurunun kıvam suyu ve priz süresi 20 °C sıcaklık ve bağlı nemin %65 olduğu bir laboratuvar ortamında Vicat halkası, sondası ve iğnesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Vicat aleti ile priz başlama ve bitiş süreleri, Vicat iğnesinin cam levhaya 4 mm mesafe kalıncaya kadar çimento hamuruna batması için geçen süre priz başlama süresi, iğnenin cam levhaya 0,5 mm mesafe kalıncaya kadar çimento hamuruna batması için geçen süre priz sonu süresi olarak belirlenmiştir.

Basınç dayanımı deneyleri için harç karışımları hazırlanırken; TS EN 196-1'e göre her bir harç karışı-

mında 450 g çimento, 1350 g standart kum ve 225 ml su kullanılarak harç karıştırma makinesinde karıştırılmıştır. Hazırlanan harçlar 40x40x160 mm boyutlarında dikdörtgenler prizması şeklinde üç gözlü kalıplara dökülmüştür. Bu örnekler daha sonra sarsma cihazında bir dakika süre sarsılarak harcın kalıplara yerleşmesi sağlanmıştır. Hazırlanan bu örnekler laboratuvar ortamında 24 saat bekletilmiş ve bu sürenin sonunda örnekler kalıplardan çıkarılarak mukavemet testlerinin yapılması için bir odada (20 °C) kür amacıyla su havuzlarında bekletilmişlerdir. 2, 7 ve 28 gün sonlarında bu havuzlardan alınarak kurulan harç örneklerinin basınç deneyleri, toplam 72 örnek üzerinde TS EN 196-1'e uygun olarak yapılmıştır.

3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Kimyasal Analizler (Chemical Analysis)

Çalışmada kullanılan PÇ ve UK'nın kimyasal analiz sonuçları TABLO 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan malzemelerin kimyasal özellikleri

Malzemeler	PÇ, %	UK, %
Kimyasal kompozisyonlar		
SiO ₂ (S)	21,82	53,39
Al ₂ O ₃ (A)	6,49	16,07
Fe ₂ O ₃ (F)	1,93	13,05
CaO	60,74	6,33
MgO	1,08	5,48
SO ₃	2,62	1,06
Na ₂ O	0,14	1,59
K ₂ O	0,65	1,71
Cl ⁻	0,012	0,005
S+A+F	-	82,51
Kızdırma kaybı	1,65	1,15
Çözünmeyen kalıntı	4,5	73,76
Serbest CaO	0,84	0,11
Reaktif SiO ₂	-	45,18
Reaktif CaO	-	5,58

PÇ yüksek oranda CaO içerirken, düşük oranda Al₂O₃, Fe₂O₃ ve SO₃ bileşiklerinden oluşmaktadır. UK'nın ana bileşeni SiO₂'dir. UK'nın S+A+F miktarı %82,51 olup ASTM C 618'e göre %70 üzerinde ve CaO'nun %10'dan az olması nedeniyle F sınıfı (düşük kireçli) UK sınıfına girmektedir (18). Ayrıca reaktif kireç miktarının %10'ın altında olması (%5,58) nedeniyle TS EN 197-1'de verilen V sınıfı (silisli UK) kapsamına girmektedir (19). V sınıfı UK, reaktif silis miktarının %25'in üzerinde (% 45,18) olması nedeniyle koşulların tamamına uymaktadır (Tablo 1). PÇ'nin kimyasal analizinden Bogue formülüne göre mineralojik yapısı minör ilave bileşen olarak UK kullanılmasından dolayı hesaplanmamıştır. Çünkü katılan UK, çimentonun kimyasal kompozisyonunu klinkere nazaran önemli ölçüde değiştirmiştir.

3.2. Fiziksel Analizler (Physical Analysis)

Çalışmada kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri (Tane boyut aralığı, özgül yüzey alanları ve özgül ağırlıkları) Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Malzemelerin fiziksel özellikleri

Malzemeler	Tane boyut aralığı (elek üstü), %		Özgül ağırlık, g/cm ³	Özgül yüzey, cm ² /g
	> 90 µm	> 45 µm		
PÇ	1,0	8,6	3,09	3830
UK	7,0	32	2,02	4890
10UK	1,6	10	2,88	3880
20 UK	2,4	11,4	2,73	3900
30 UK	3,4	14,8	2,59	4050

PÇ’nin tane boyutları UK’ya nazaran daha düşüktür. UK’nın özgül yüzey alanı ise PÇ’ye nazaran oldukça yüksektir (Tablo 2). Bu da UK’nın son derece küçük taneciklerden oluşan içi boş küresel bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. PÇ’nin özgül ağırlığı 3,09 g/cm³ iken, %30 oranında UK ikamesinde özgül ağırlık 2,59 g/cm³’e kadar düşmüştür (Tablo 2). Bu durum UK’nın düşük özgül ağırlığa sahip olmasından kaynaklanmaktadır Düşük özgül ağırlığa sahip olan UK, PÇ’ye katıldığı zaman elde edilen UK ikameli çimentoların da özgül ağırlığını düşürmektedir (Tablo 2).

3.3. UK İkame Oranının Kıvam Suyu ve Genleşme Değerlerine Etkisi (The Effect of Fly Ash Substitution Ratio on Water Demand and Volume Expansion)

TS EN 196-3’e göre çimento hamuru örneklerine yapılan deney sonucunda elde edilen normal kıvam suyu ve hacim genleşme değerleri Tablo 3’de verilmiştir.

Normal kıvam suyu çimentolarda kimyasal yapı, özgül yüzey ve porozite gibi değerlere bağlı olarak de-

ğişmektedir (20). Çimentoya katılan UK oranı arttıkça işlenebilirlik ve dolayısıyla özdeş kıvamın elde edilebilmesi için gereken su miktarının göreceli bir artışı söz konusudur (Tablo 3). Bu artışın 10 UK kodlu çimento hamurunda %9, 20 UK kodlu çimento hamurunda %15 ve 30 UK kodlu çimento hamurunda %27, oranında artmaktadır. Bu sonuçlara göre özellikle 10 UK ve 20 UK kodlu çimento hamuru örneklerinde, su/çimento oranının fazlaca yükseltilmesine gerek duyulmadan, tane inceliğinden dolayı, özdeş taze beton kıvamının elde edilmesine önemli derecede katkı sağladığı söylenebilir.

Çimentoda bulunan fazla miktarda MgO ve CaO zamanla çimento hamurunda genişlemeye yol açmaktadır. Bu genişmeler beton içerisinde çatlama ve hasarlara neden olmaktadır (21). Çimentodan kaynaklanan hacim genişmelerini belirlemek için Le Chatelier deneyi yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre (Tablo 3) en fazla hacim genleşme değeri 10 UK kodlu çimento hamurunda 2 mm, PÇ, 20 UK ve 30 UK kodlu çimento hamurunda ise 1 mm olarak meydana gelmiştir. Sonuçlardan hacim genişmelerinin ortalama 1-2 mm arasında değiştiği ve TS EN 196-3’te belirtilen 10 mm sınır değerinden düşük çıktığı görülmüştür.

3.4. UK İkame Oranının Priz Süresine Etkisi (The Effect of Fly Ash Substitution Ratio on Setting Time)

TS EN 196-3’e göre çimento hamuru örneklerine yapılan deneylerden elde edilen priz başlama ve priz sonu süreleri Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 4’e göre, PÇ’ye UK ikamesi ile elde edilen çimento hamuru örneklerinin priz başlama ve priz sonu sürelerinin, PÇ hamuru örneklerine göre tüm karışım oranlarında doğrusal olarak uzadığı görülmektedir. UK ikameli çimentoda, ikame oranıyla doğru orantılı olarak priz başlama süresinde 10 UK kodlu çimento hamurunda %26, 20 UK kodlu çimento hamurunda %49 ve 30 UK kodlu çimento hamurunda %88 oranında bir

Tablo 3. Çimento hamuru örneklerinin normal kıvam suyu ve genleşme değerleri

Çimento hamuru örnekleri	Çimentolar							
	PÇ	10UK	20UK	30UK	PÇ	10UK	20UK	30UK
	Normal kıvam suyu, %				Genleşme, mm			
1	31,10	33,75	37,10	39,84	1	2	1	1
2	31,90	34,20	37,40	40,20	2	2	2	1
3	31,50	34,74	33,75	40,40	1	3	1	2
Ortalama	31,5	34,2	36,1	40,1	1	2	1	1
Endeks, %	100	109	115	127	100	200	100	100

Tablo 4. Çimento hamuru örneklerinin priz süresi

Çimento hamuru örnekleri	Çimentolar							
	PÇ	10UK	20UK	30UK	PÇ	10UK	20UK	30UK
	Priz başlama süresi (dakika)				Priz sonu süresi (dakika)			
1	145	175	230	280	190	210	325	340
2	165	190	240	300	210	230	345	420
3	155	220	225	295	210	240	350	415
Ortalama	155	195	232	292	203	227	340	392
Endeks, %	100	126	149	188	100	111	167	193

uzama meydana gelmektedir. Priz sonu sürelerinde ise 10 UK kodlu çimento hamurunda %11, 20 UK kodlu çimento hamurunda %67 ve 30 UK kodlu çimento hamurunda %93 oranında bir uzama meydana gelmektedir.

Genel olarak ortalama priz başlama süreleri kıyaslandığında 155 dakika ile en az sürenin PÇ çimento hamurunda, en fazla uzamanın ise 392 dakika ile 30 UK kodlu çimento hamurunda olduğu görülmektedir (Tablo 4). Bu süreler değerlendirildiğinde tüm çimento hamuru örneklerinde minimum priz başlama süresinin (60 dakika) üzerinde bulunduğu ve maksimum priz sonu sürelerinin (600 dakika) altında olduğu görülmektedir (19). Priz süresinin uygun aralıklarda olmasından dolayı da taze betonun taşınmasında ve yerleştirilmesinde güçlük çekilmeyeceği, dayanımın istenilen zaman aralığında kazanılabileceği, kalıp sökme sürelerinin uygun zamanlarda yapılabileceği ve böylelikle de betonun dış iklim koşullarından etkilenmeyeceği söylenebilir (22).

3.5. UK İkame Oranının Basınç Dayanımına Etkisi (The Effect of Fly Ash Substitution Ratio on Compressive Strength)

Puzolanlar, betonda klinkerin hidratasyonu sonucu oluşan Ca(OH)_2 ile tepkimeye girmekte ve bu nedenle betona su karıştırıldıktan sonra, bir süre ortamda Ca(OH)_2 'ın toplanma süresince Portland çimentosuna seyreltici bir etki yapmaktadır. Ancak zamanla ortamda Ca(OH)_2 birikmesi, puzolanların da sistemin dayanımını artıran etkilerinin ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Bu nedenle, puzolan kullanımıyla betonun erken dayanımında bir düşüş olması beklenmekte, ileriki yaşlardaki dayanımlarının ise PÇ çimento harçlarının sonuçlarına ulaşması hatta bunları geçmesi beklenmektedir (23,24).

TS-EN 196-1'e göre çimento harç örneklerinin basınç dayanımı deneyleri yapılmış ve sonuçları Tablo 5'de verilmiştir.

Basınç dayanımı test sonuçlarına göre (Tablo 5), UK oranı arttıkça erken dayanım düşmektedir. Bunun

Tablo 5. Çimento harç örneklerinin basınç dayanımları

Çimento harç örnekleri		PÇ	10UK	20UK	30UK	TS EN 197-1 Standart değerler, N/mm^2
Hidratasyon günleri	Örnek no	Basınç dayanımı, N/mm^2				
2 gün	1	28,7	24,7	20,3	9,8	$\geq 20,0$
	2	30,2	23,6	18,8	11,7	
	3	30,3	24	19,5	13,2	
	4	29,1	23,7	18,5	10,7	
	5	29,7	24,5	19,7	11,0	
	6	29,4	23,5	18,9	12	
	Ortalama Endeks, %	29,6 100	24,0 81,2	19,3 65,2	11,4 38,6	
7 gün	1	46,9	40,0	32,7	14,0	$\geq 20,0$
	2	46,5	39,5	32,4	15,3	
	3	46,4	39,0	33,3	14,5	
	4	46,4	37,0	32,4	14,9	
	5	46,2	40,0	32,9	14,2	
	6	46,9	38,1	32,0	14,7	
	Ortalama Endeks, %	46,6 100	38,9 83,6	32,6 70,1	14,6 31,4	
28 gün	1	59,5	50,9	47,3	33,8	$\geq 42,5$
	2	59,6	50,4	46,7	26,3	
	3	57,2	52,3	50,0	34,1	
	4	57,5	52,4	45,9	30,6	
	5	59,6	52,0	48,0	30,0	
	6	57,6	51,0	47,0	32,3	
	Ortalama Endeks, %	58,5 100	51,5 88,03	47,5 81,17	31,2 53	

Sonuç olarak çimento hamurunun priz süresi, çimento yerine ikame edilen UK oranlarında beklendiği gibi doğrusal olarak uzamaktadır. Dolayısıyla UK'nın priz süresini uzatması sayesinde de hidratasyon hızını yavaşlattığı, hidratasyon ısı ve sıcaklığını düşürerek büzülme tehlikesine karşı etkili olduğu söylenebilir.

sebebi, deney süresinin 28 günle sınırlandırılmış olması ve UK'nın henüz tamamen hidrate olamaması olarak değerlendirilebilir (24).

Portland çimentosu ile üretilen harç örnekleri, kütlece %10 oranında UK içeren çimento ile üretilmiş

harç örneklerine göre, 2 gün sonunda %19 oranında bir dayanım düşüklüğü sergilemektedir. Bununla birlikte, bu fark, 7 gün sonunda %16 iken, 28 gün sonunda %12 oranında gerçekleşmiştir. Bu durum UK ikameli çimento harç örneklerinin dayanım kazanma hızlarının, Portland çimentosuna göre daha yavaş olduğunu göstermektedir, ancak zamanla bu farkın aşılabileceğinin de işaretini vermektedir. %20 oranında UK içeren çimento ile üretilmiş harç örneğinin basınç dayanımı, Portland çimentosu ile üretilen harç örneğinin 2 gün sonunda %35'i, 7 gün sonunda %30'u ve 28 gün sonunda ise %19'u oranında azalmıştır. %30 oranında UK içeren çimento ile üretilmiş harç örneklerinin ortalama basınç dayanımları, elde edilen önceki sonuçların aksine Portland çimentosunun 2. gün sonunda %61'i, 7 gün sonunda %69 ve 28 gün sonunda ise %47'si oranında azalmıştır.

Genel olarak değerlendirilirse 2 gün sonunda ortalama basınç dayanımları %10 oranında UK içeren çimento ile üretilmiş harç örneklerinde 24 N/mm^2 değeri ile minimum basınç dayanımı olan 20 N/mm^2 değerinin üzerinde gerçekleşmiştir. 28 gün sonunda ise %10 oranında UK içeren çimento ile üretilmiş harç örneklerinde $51,5 \text{ N/mm}^2$ ve %20 oranında UK içeren çimento ile üretilmiş harç örneklerinde ise $47,5 \text{ N/mm}^2$ değerleri ile $42,5 \text{ N/mm}^2$ olan minimum basınç dayanımı değerinin üzerinde elde edilmiştir. Bu durumda özellikle yüksek dayanım gösteren çimentolara göreceli olarak yüksek oranda UK katılmasıyla, ilk aşamada daha düşük dayanımlı bir standart çimento elde edilebileceğini ortaya koymaktadır. Ancak uzun sürede bu yöntemle puzolanların özelliklerinden dolayı dayanımdan taviz verilmeden dayanıklılık şartı da sağlanmış olacağı düşünülmektedir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre UK'nın kimyasal analiz sonucunda V sınıfı olduğu tespit edilmiştir. Tane boyut aralığına göre UK'nın iri, PÇ'nin ise ince tane boyut yapısına sahip olduğu belirlenmiştir. Buna rağmen UK'nın özgül yüzey alanının yüksek olması, onun gözenekli bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca UK'nın özgül ağırlığının daha düşük olması, UK ikameli çimentoların da özgül ağırlığının azalmasına neden olmuştur. Diğer taraftan UK oranının artması ile işlenebilirlik koşullarının iyileştiği, bu bağlamda özdeş kıvamın elde edilebilmesi için gereken su miktarının nispeten bir miktar artmakta olduğu görülmüştür. Ayrıca UK oranının artmasıyla priz başlama (40-137 dakika) ve priz sonu sürelerinde (24-189 dakika) doğrusal bir uzamanın yanında, çimento hamurunun hacim genleşme değeri de uygun değerlerde oluşmuştur.

Bunların yanı sıra UK ikameli çimentolar, ilk günlerde Portland çimentosundan (PÇ) daha düşük bir basınç dayanımı oluşturmuştur. Ancak ilerleyen hidratasyon günlerinde bu fark gittikçe azalmaktadır. Özellikle dayanımın yanında dayanıklılığında önemli

olduğu düşünüldüğünde, yüksek dayanımlı çimentolara (PÇ) uygun oranda UK ikamesi veya katkısı ile standartların öngördüğü en düşük dayanımdan ($32,5 \text{ N/mm}^2$) vazgeçilmeksizin yüksek dayanıklılığa sahip çimentoların üretilebileceği görülmektedir. Bu çalışmada 28 gün sonunda 10 UK kodlu çimento harcında ortalama $51,5 \text{ N/mm}^2$ ve 20 UK kodlu çimento harcında ortalama $47,5 \text{ N/mm}^2$ basınç dayanımına sahip çimentolar elde edilmiştir. Ancak 30 UK kodlu çimentolarda hidratasyon süresinin artmasına rağmen basınç dayanımının düşmesi, bu oranın bu özellikteki çimentoya ikame malzemesi olarak kullanılmasının uygun olmadığını göstermiştir.

Sonuç olarak endüstriyel bir atık olan UK'nın çimentoda kullanımı ile hem ekonomik hem de ekolojik yarar sağlayan bir çimento üretilebilecektir. Günümüzde sürdürülebilir yapıların üretimi için dayanım dışında dayanıklılık sayesinde kalıcılık da önemli bir parametredir. Yapılan çalışmada UK ikameli çimentoların fiziksel özellikleri ve standart çimento deneyleri açısından değerlendirmiştir. Ancak UK ikameli çimentoların, standart çimento deneyleri yanında ileriki yaşlardaki basınç dayanımları ile yapısal değişikliklerin izlenebildiği DTA-TG, FT-IR, XRD, SEM ve zeta potansiyel gibi modern tekniklerle ayrıntılı olarak incelenmesinin yararlı olacağı düşünülmektedir. Bu sayede de, bu tür çimentolarla inşa edilen yapıların sürdürülebilir yapıların amacına uygun olarak sorunsuz bir şekilde yıllarca hizmet edebileceği öngörülmektedir.

5. TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Yazar, bu çalışmadaki standart çimento deneylerindeki katkılarından dolayı Bursa Çimento Fabrikası Kalite Kontrol Şefi Sabiha KAN'a ve Bursa Çimento Fabrikası yetkililerine teşekkür eder.

6. KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Aruntaş, H.Y., "Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli", *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21 (1): 193-203, (2006).
2. Yalçın, H., Gürü, M., "Çimento ve beton", ISBN / ISSN: 9944-341-16-9, *Palme Yayıncılık*, Ankara, Türkiye, (2006).
3. Erdoğan, T. Y., "Beton", ISBN / ISSN: 975-7064-67-x, *ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim AŞ.*, Ankara, Türkiye, (2007).
4. Ernst, W., Nathan, M., Lynn, P., "Potentials for energy efficiency improvement in the US cement industry", *Energy*, 25 (12): 1189-1214, (2000).
5. Shiqun, L., Della, M.R., "Investigation of relations between porosity, pore structure, and C1- diffusion of fly ash and blended cement pastes", *Cement and Concrete Research*, 16 (5): 749-759, (1986).
6. Canpolat, F., Yılmaz, K., "Doğal zeolit ve uçucu kül katkılı ve katkısız harçların sülfat dayanıklılığı", *Osmangazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2: 1-15, (2002).
7. Saraswathy, V., Muralidharan, S., Thangavel, K., Srinivasan, S., "Influence of activated fly ash on corrosion-resistance and strength of concrete", *Cement and Concrete Composites*, 25 (7): 673-680, (2003).

8. Fu, X., Wang, Y., Huang, S., Hou X., Hou, W., “The influences of siliceous waste on blended cement properties”, *Cement and Concrete Research*, 33 (6): 851-856, (2003).
9. Fu, X., Wang, Z., Tao, W., Yang, C., Hou, W., Dong, Y., Wu, X., “Studies on blended cement with a large amount of fly ash”, *Cement and Concrete Research*, 32 (7): 1153-1159, (2002).
10. Chindapasirt, P., Homwuttiwong, S., Sirivivatnanon, V., “Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar”, *Cement and Concrete Research*, 34 (7): 1087-1092, (2004).
11. Çelik, M.H., Aruntaş, H.Y., Baran Y., “Seyitömer ve Çayırhan uçucu küllerinin Portland çimentosu-uçucu kül pastasının priz başlama ve sonu sürelerine etkisi”, *Politeknik Dergisi*, , 6 (1): 397-409, (2003).
12. Dorum, A., Tekin, İ., “Uçucu kül ikameli çimento harcının basınç dayanımı ve priz zamanına destile su etkisinin araştırılması”, *Politeknik Dergisi*, 7 (3): 243-250, (2004).
13. Drazan, J., Zelic, J., “The effect of fly ash on cement hydration in aqueous suspensions”, *Ceramics– Silikaty*, 50 (2): 98-105, (2006).
14. Roy, D.M., Arjunan, P., Silsbee, M.R., “Effect of silica fume, metakaolin, and low-calcium fly ash on chemical resistance of concrete”, *Cement and Concrete Research*, 31: 1809–1813, (2001).
15. Erdoğan, S.T., Erdoğan, T.Y., “Puzolanik mineral katkıları ve tarihi geçmişleri”, 2. *Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu*, 263-275, Ankara, Türkiye, (2007).
16. Türk Standartları Enstitüsü (TSE), “Çimento deney metotları-Bölüm 1: Dayanım tayini”, *TS EN 196-1*, Ankara, Türkiye, (2002).
17. Türk Standartları Enstitüsü (TSE), “Çimento deney metotları- Bölüm3: Priz süresi ve hacim genişleme tayini”, *TS EN 196-3*, Ankara, Türkiye, (2002).
18. ASTM, “Standard specifications for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as mineral admixture in Portland cement concrete”, *ASTM C 618-85*, Philadelphia, USA, (1985).
19. Türk Standartları Enstitüsü (TSE), “Çimento-Bölüm 1: Genel çimentolar-bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri”, *TS EN 197-1*, Ankara, Türkiye, (2002).
20. Yang, M., Neubauer, C.M., Jennings, H.M., “Interparticle potential and sedimentation behavior of cement suspensions: Review and results from paste”, *Advanced Cement Based Materials*, 5 (1), 1-7 (1997).
21. Topçu, İ.B., Karakurt, C., “Uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun çimento üretiminde katkı olarak kullanımı”, 7. *Ulusal Beton Kongresi*, 395-404, İstanbul, Türkiye, (2007).
22. Şimşek, O., “Yapı malzemesi II”, ISBN / ISSN: 975-93655-1-0, *Ankara Üniversitesi Basımevi*, Ankara, Türkiye, (2000).
23. Erdoğan, K., Tokyay, M., Türker, P., “Traslar ve traslı çimentolar”, *TÇMB/AR-GE/Y99.2*, Ankara, Türkiye, (1999).
24. Yetkin, Ş., Çavdar, A., “Doğal puzolan katkı oranının çimentonun dayanım, işlenebilirlik, katılaşma ve hacim genişmesi özelliklerine etkisi”, *Fırat Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 17 (4): 687-692, (2005).