



**Makale
(Article)**

Uçucu Külün Betonun Bazı Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi

Yılmaz Koçak*, Serkan Subaşı*, Mehmet Emiroğlu**

*Düzce Üniversitesi Teknoloji Fak. İnş. Müh. Böl., 81620 Düzce/TÜRKİYE

** Düzce Üniversitesi Tek. Eğt. Fak. Yapı Eğt. Böl., 81620 Düzce/TÜRKİYE

yilmazkocak@duzce.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, çimento ve beton sektöründe yaygın olarak kullanılan uçucu külün, betonun bazı fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, ağırlıkça %0, %10, %20 ve %30 oranlarında uçucu kül, CEM I 42,5 R Portland çimentosu ile ikame edilerek betonlar üretilmiştir. Her bir deney için 3'er adet 15x15x15 cm boyutlarında beton küp numuneler hazırlanmıştır. Beton numunelerine birim ağırlık, su emme, ultrases hızı ölçümü, kapilerite ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen veriler üzerinde istatistiksel analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, uçucu kül ikamesi ile elde edilen betonların su emme ve kapiler su emme miktarlarında artma görülürken; birim ağırlık, ultrases geçiş hızları ve basınç dayanımlarında azalma olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Portland çimentosu, beton, uçucu kül, basınç dayanımı, kapilerite.

Effect of Fly Ash on Some of the Physical and Mechanical Properties of Concrete

Abstract

In this study, effect of the fly ash which is widely used in the cement and concrete industry, on some of the physical and mechanical properties of concrete were investigated. For this purpose, concrete mixes were prepared by substituting the CEM I 42.5 R Portland cement in the rates of 0, 10, 20 and 30% by weight and substituted by equal amounts of fly ash. Three cubic concrete specimens for each test having 15x15x15 cm dimensions were prepared. Unit weight, water absorption, ultrasonic pulse velocity, capillarity and compressive strength tests were performed to concrete specimens. The statistical analyses on the data obtained from tests were carried out. The results show that water absorption and capillarity amounts were found to increase with increasing fly ash content while a decrease in unit weight, ultrasonic pulse velocity and compressive strength amounts were found.

Keywords: Portland cement, concrete, fly ash, compressive strength, capillarity.

1. GİRİŞ

Çimento ve puzolanlar inşaat endüstrisinde yaygın bir biçimde kullanılan temel yapı malzemeleridir. Yapay puzolanik malzemeler sınıfında yer alan uçucu kül (UK) hem ekonomik avantajı hem de çevreye katkısı nedeniyle çimento ve beton teknolojisinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

UK, termik santrallerde elektrik üretimi sırasında düşük kalorili toz halindeki kömürün yanması sonucu baca çıkışlarında elektro filtreler yardımı ile tutulan çok ince taneciklerden oluşmaktadır. Atık malzeme olarak ortaya çıkan, uçabilen ve çok ince taneli olan yapay puzolan sınıfındaki bu küllere, UK adı

Bu makaleye atıf yapmak için

Koçak Y., Subaşı S., Emiroğlu M., "Uçucu Külün Betonun Bazı Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi" Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi 2011,7(1) 14-27

How to cite this article

Koçak Y., Subaşı S., Emiroğlu M., "Effect of Fly Ash on Some of the Physical and Mechanical Properties of Concrete" Electronic Journal of Construction Technologies, 2011,7(1) 14-27

verilmektedir [1]. ASTM C 618'e göre UK'ler F ve C sınıfı olarak iki gruba ayrılmıştır. F sınıfı UK'ler, antrasit veya bitümlü kömürlerden elde edilen ve puzolanik özelliğe sahip olan $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (S+A+F) toplamı %70'in üzerinde olan küllerdir. C sınıfı UK'ler genellikle linyit veya düşük bitümlü kömürlerden elde edilen ve puzolanik özelliğinin yanı sıra kendiliğinden de bir miktar bağlayıcı özelliğe sahip S+A+F toplamı %50'nin üzerinde olan küllerdir. UK; %60–90 camsı bileşen içeren, çapları 1–200 μm arasında değişiklik gösteren, yoğunluğu, 2,1–2,7 g/cm^3 olan küresel şekilli ve gri renkli bir yapıya sahiptir [1-2-3]. UK'nin çimento ve betonda kullanılması ile ekonomiklik sağlanması[4], permeabiliteyi azaltması [5], alkali silika reaksiyonu gelişiminin kontrolü [6], kimyasal direnç sağlanması [7], atıkların değerlendirilmesi [8-9] ve betonun rötresinin azaltılması [10] gibi avantajlar sağlanmaktadır. Ayrıca priz başlama ve priz sonu süresini, katkı oranına bağlı olarak artırması gibi avantajları nedeniyle üzerinde yoğun araştırmaların yapıldığı bir malzemedir [11-12]. Bu olumlu özellikleri nedeniyle UK ile üretilen betonların uzun süre dayanıklılığı ve kalıcılığı sağlanmış olmaktadır.

Betonun kalitesi, dayanım ve dayanıklılıkla ifade edilmektedir. Dayanım ve dayanıklılık da betonun fiziksel ve mekanik özelliklerinin bir bütün olarak araştırılmasıyla belirlenebilmektedir. Yapılan bu çalışmada, Türkiye'de yaygın olarak bulunan ve endüstriyel bir atık olan UK'nin beton içerisine ikame edilerek, betonun bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bunun için çimento ile ağırlıkça %0 (referans), %10, %20 ve %30 oranlarında UK ikame edilerek hazırlanmış beton numunelerin; çökme, birim ağırlık, su emme, ultrases hızı ölçümü, kapiler su emme ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Yapılan her deney sonucu için 3'er adet etüv kurusu 15x15x15 cm boyutlarında beton numunesi kullanılmıştır. Basınç dayanımı için 7, 28 ve 90 gün kür edilen, diğer deneyler için ise sadece 90 gün kür edilen beton numuneleri üzerinde deneyler yapılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlarla UK ikameli betonların fiziksel ve mekanik özellikleri hakkında bilgi edinilmesinin önemli olduğu düşünülmektedir.

2. MALZEME ve METOT

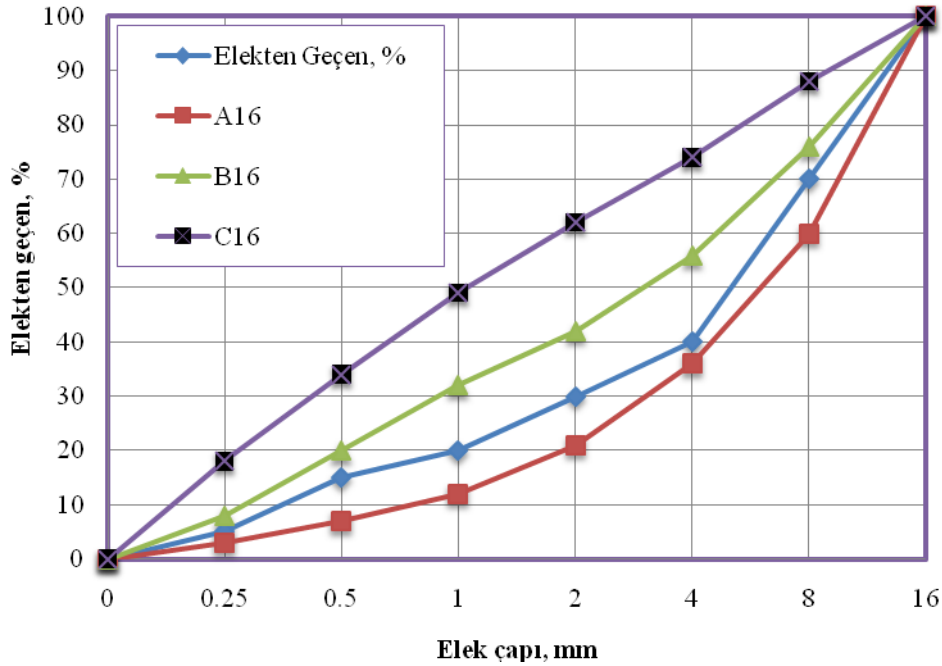
2.1. Malzeme

Deney numunelerinin hazırlanmasında beton içerisinde bağlayıcı olarak Nuh Çimento Fabrikasının ürettiği CEM I 42,5 R Portland çimentosu (PÇ) ve puzolan olarak ise Bursa Orhaneli termik santralinden elde edilen UK kullanılmıştır. Kullanılan çimentoya ve UK'ye ait fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. PÇ ve UK'nin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri

Malzeme	PÇ	UK		PÇ	UK
Kimyasal bileşenler, %			Fiziksel özellikler		
SiO_2 (S)	20,52	51,27	Blaine inceliği, cm^2/g	3444	3430
Al_2O_3 (A)	4,33	23,18	Özgül ağırlık, g/cm^3	3,16	2,21
Fe_2O_3 (F)	3,78	10,31	Kıvam (su/çimento, %)	27,1	-
CaO	64,77	6,09	90 μm elek bakiye, %	0,3	25,8
MgO	1,26	3,45	32 μm elek bakiye, %	12,5	10,6
SO_3	2,30	1,10	Priz süresi, dakika		
Cl^-	0,0078	0,0035	Başlangıç	185	-
$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	0,59	2,68	Bitiş	236	-
Kızdırma kaybı	1,50	0,73	Basınç dayanımı (MPa)		
Serbest kireç	1,19	0,22	2 gün	26,4	-
Çözünmeyen kalıntı	0,55	77,40	7 gün	44,8	-
S+A+F	-	84,77	28 gün	60,5	-

Beton karışımı içerisinde 0–16 mm boyutları arasında, Düzce yöresinden elde edilen doğal kırma taş agrega kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan agreganın granülometri eğrisi Şekil 1’de verilmiştir. Karışım suyu olarak Düzce ili Konuralp yerleşkesi şehir şebeke suyu katılmıştır.



Şekil 1. Agrega granülometri eğrisi

2.2. Metot

2.2.1. Deney numunelerinin hazırlanması

Beton numunelerinin karışımları TS 802 standardına uygun olarak tasarlanmıştır [13]. Ağırlıkça %0 (referans), %10, %20 ve %30 oranlarındaki UK, çimento ile yer değiştirilerek karışımlar hazırlanmıştır. Tasarımı gerçekleştirilen betonların karışım miktarları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Beton karışım miktarları (1 m³)

Malzeme		Referans (%0 UK)	%10 UK	%20 UK	%30 UK
Agrega	8-16 mm	535	535	535	535
	4-8 mm	542	542	542	542
	2-4 mm	178	178	178	178
	1-2 mm	178	178	178	178
	0,5-1 mm	86	86	86	86
	0,25-0,50 mm	175	175	175	175
	0-0,25 mm	93	93	93	93
	Su	195	195	195	195
PÇ	350	315	280	245	
UK	0	35	70	105	

Karışımlarda çimento dozajı 350 kg/m³, su/çimento oranı 0,55 olarak belirlenmiştir. Hazırlanan taze betonlar, yapılan çökme deneyi ile çökme miktarları belirlendikten sonra 15x15x15 cm boyutlarındaki küp kalıplara dökülmüştür. Her deney için 3 beton numunesi hazırlanmıştır.

2.2.2. Deneyler

Çalışmada betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini belirleyebilmek için çökme, birim ağırlık, su emme, ultrases hızı ölçümü, kapilerite basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır.

Slamp olarak da adlandırılan çökme deneyi TS EN 12350-2'ye uygun olarak yapılmıştır [14]. Sertleşmiş betonun birim hacim ağırlığı, numunelerin hacimlerinin su ile yer değiştirme metodu uygulanarak TS EN 12390-7'ye uygun olarak tespit edilmiştir [15]. Hazırlanan UK ikameli betonların su emme miktarlarındaki değişimi belirlemek amacıyla TS 3624 standardına uygun olarak deneyler gerçekleştirilmiştir [16]. Beton numunelerde ultrases geçiş hızı ölçümü beton presinde kırılacak olan numuneler üzerinde ASTM C597-83 "Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete" standardında belirtilen esaslara uygun olarak yapılmıştır [17].

Kapiler su emme deneyi her beton için 3 adet deney numunesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deney örneği ağı 90 gün kür periyodu sonrası 105 ± 5 °C sıcaklıktaki etüvde değişmez ağırlığa kadar kurutulmuş ve oda sıcaklığına gelinceye kadar beklenerek tartılmıştır. Değişmez ağırlığa getirilmiş numunelerin yan yüzeyleri parafin ile kaplanarak sadece alt yüzeyinden su emmesi sağlanmıştır. Su seviyesi deney süresince beton alt yüzeyinden itibaren 5 mm olarak sabit tutularak numuneler 0, 30, 50, 90, 175, 255, 360, 1440 ve 7440 dakika sürelerinde tartılarak kapiler su emme katsayıları hesaplanmıştır [18-19-20].

Basınç dayanımı deneyi, her karışım için hazırlanan 3 deney numunesi üzerinde 7., 28. ve 90. gün kür sürelerinde etüv kurusu numuneler üzerinde TS EN 12390-3 standardında belirtilen esaslara uygun olarak yapılmıştır [21]. Deneyde, 3000 kN yükleme kapasiteli, dijital kumanda üniteli ve yükleme hızı ayarlanabilen tek eksenli beton basınç deney cihazı kullanılmıştır.

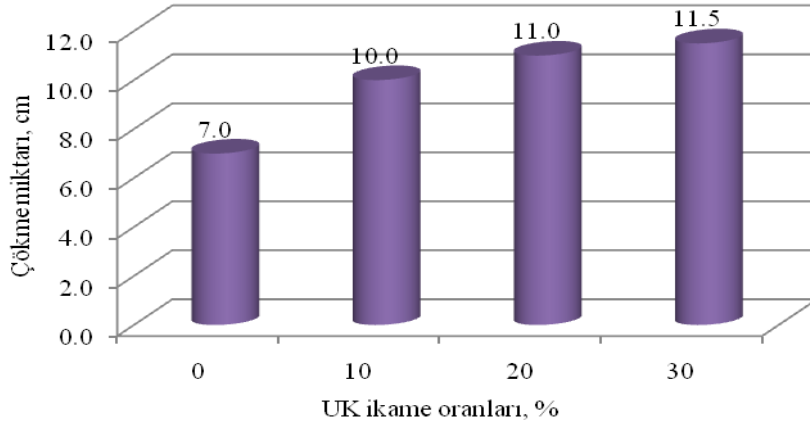
3. DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Betonun taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerindeki değişimi ifade etmek amacıyla; UK ikame oranlarına bağlı olarak sırasıyla beton dökümü esnasında çökme değeri ile sertleşmiş beton birim hacim ağırlık, su emme, ultrases geçiş hızı, kapilerite katsayısı ve basınç dayanımı değerlerini belirlemek için deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneylere ait veriler ve istatistiksel analizler aşağıda özetlenmiştir.

3.1. Çökme Deneyi

Çökme deneyi, taze betonun kıvamını belirlemek amacıyla yapılan ve yaygın olarak kullanılan bir deneydir. Burada amaç taban çapı 20 cm, üs çapı 10 cm ve yüksekliği 30 cm olan metalden bir huni içerisine 3 tabaka halinde ve sıkıştırılarak doldurulan betonun çökmesini belirleyerek kıvamı hakkında bilgi elde etmektir. Üretilen betonlara ait taze betonun çökme deney sonuçları Şekil 2'de verilmiştir.

Üretilen betonlara ait çökme deney sonuçları incelendiğinde, Referans betona göre, %10, %20 ve %30 UK ikameli betonların çökme değerleri sırasıyla 2, 3 ve 3,5 cm artmıştır (Şekil 2). Bu durum bize, beton içerisinde UK ikamesi ile su ihtiyacının azaldığını, bu nedenle de deneylerde su/çimento oranının sabit tutulması yüzünden UK ikameli betonun çökme değerlerinin yükseldiğini göstermiştir. Dolayısı UK ikamesi ile düşük su/çimento oranında betonlar üretilebilecek, bu da dayanım ve dayanıklılık üzerinde olumlu etkilere neden olacaktır [22-23].



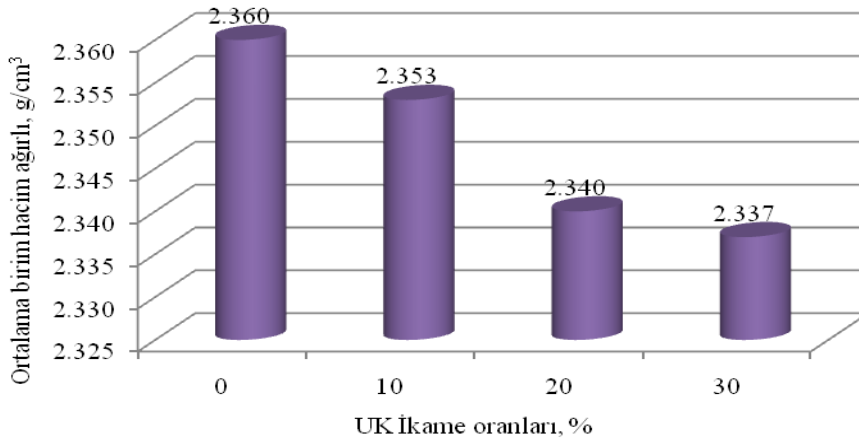
Şekil 2. Taze beton çökme miktarları

3.2. Birim Hacim Ağırlık Deneyi

Hazırlanan numuneler üzerinde 90. gün sonunda gerçekleştirilen birim hacim ağırlık deneyi sonuçlarına ait açıklayıcı istatistikler Tablo 3’de verilmiştir. Bunun yanı sıra elde edilen ortalama birim hacim ağırlık değerlerine ait grafik Şekil 3’de verilmiştir.

Tablo 3. Birim hacim ağırlık değerlerine ait açıklayıcı istatistikler

UK ikame oranı	N	Birim hacim ağırlık (g/cm ³)	Std. sapma	Std. hata	%95 güven aralığında ortalamanın		Min.	Mak.
					Alt sınırı	Üst sınırı		
%0	3	2,3600	0,00000	0,00000	2,3600	2,3600	2,36	2,36
%10	3	2,3533	0,00577	0,00333	2,3390	2,3677	2,35	2,36
%20	3	2,3400	0,00000	0,00000	2,3400	2,3400	2,34	2,34
%30	3	2,3367	0,00577	0,00333	2,3223	2,3510	2,33	2,34



Şekil 3. Ortalama birim hacim ağırlık değerleri

Sonuçlar incelendiğinde numunelerdeki UK ikame oranı arttıkça ortalama birim hacim ağırlık değerlerinin azaldığı görülmüştür (Şekil 3).

Deneysel çalışmalardan elde edilen birim hacim ağırlık değerleri üzerinde UK ikame oranları arasında varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen varyans analizi sonuçları Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 4. Birim hacim ağırlık değerlerine ait varyans analizi sonuçları

Varyansın kaynağı	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Kareler ortalaması	F-testi	P≤0,01
Gruplar arası	0,00109	3,00000	0,00036	21,83333	0,00033
Gruplar içi	0,00013	8,00000	0,00002		
Toplam	0,00123	11,00000			

Varyans analizi sonucuna göre; beton grupları arasında istatistiksel anlamda önemli düzeyde fark olduğu görülmüştür ($p \leq 0,01$) (Tablo 4). Bir başka ifadeyle UK ikame oranına bağlı olarak birim hacim ağırlık değerlerinin önemli düzeyde değiştiği söylenebilir.

Birim hacim ağırlık değerlerindeki değişimin hangi UK ikame oranlarından kaynaklandığını tespit etmek amacıyla Duncan çoklu karşılaştırma testi uygulanmış sonuçları Tablo 5’de verilmiştir.

Tablo 5. Birim hacim ağırlık değerlerine ait Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları

UK ikame oranı	N	Farklı olan gruplar	
		1	2
%30	3	2,3367	
%20	3	2,3400	
%10	3		2,3533
%0	3		2,3600

Elde edilen Duncan testi sonuçlarına göre;

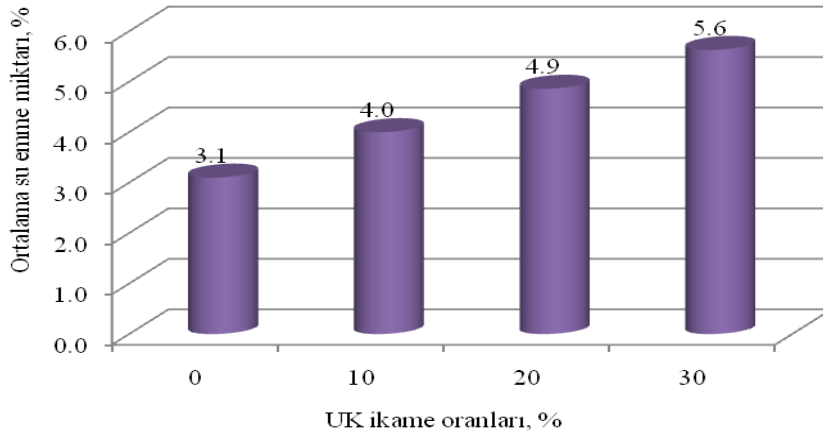
- Referans ve %10 UK ikameli betonlar ile %20 ve %30 UK ikameli betonlarının kendi içlerinde birbirinden istatistiksel anlamda farklı olmadığı,
- Ancak referans ve %10 UK ikameli betonların, %20 ve %30 UK ikameli betonlardan farklı olduğu,
- Referans betonun $2,36 \text{ g/cm}^3$ ile en büyük, %30 UK ikameli betonların ise $2,33 \text{ g/cm}^3$ ile en küçük birim hacim ağırlık değerlerine sahip olduğu,
- Referans betonun, %30 UK ikameli betona göre %1 oranında daha büyük birim ağırlık değerine sahip olduğu görülmüştür (Tablo 5).

3.3. Su Emme Deneyi

Farklı UK ikame oranında hazırlanan numuneler üzerinde 90. gün sonunda gerçekleştirilen su emme deneyi sonuçlarına ait açıklayıcı istatistikler Tablo 6’da verilmiştir. Ayrıca elde edilen ortalama su emme miktarı değerlerine ait grafik Şekil 4’de görülmektedir.

Tablo 6. Su emme miktarı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler

UK ikame oranı	N	Su emme miktarı	Std. sapma	Std. hata	%95 güven aralığında ortalamanın		Min.	Mak.
					Alt sınırı	Üst sınırı		
%0	3	3,1067	0,73323	0,42333	1,2852	4,9281	2,26	3,53
%10	3	4,0300	0,06000	0,03464	3,8810	4,1790	3,97	4,09
%20	3	4,8633	0,06110	0,03528	4,7116	5,0151	4,81	4,93
%30	3	5,6300	0,17692	0,10214	5,1905	6,0695	5,44	5,79



Şekil 4. Ortalama su emme değerleri

Ortalama su emme miktarı değerlerinin UK ikamesi ile doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür (Şekil 4). Su emme değerleri üzerinde UK ikame oranları arasında varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen varyans analizi sonuçları Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. Su emme miktarı değerlerine ait varyans analizi sonuçları

Varyansın kaynağı	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Kareler ortalaması	F-testi	$P \leq 0,01$
Gruplar arası	10,611	3	3,537	24,551	0,000
Gruplar içi	1,153	8	0,144		
Toplam	11,763	11			

Elde edilen varyans analizi sonucuna göre; gruplar arasında istatistiksel anlamda önemli düzeyde fark olduğu görülmüştür ($p \leq 0,01$) (Tablo 7). Diğer bir ifadeyle UK ikame oranına bağlı olarak su emme miktarlarının önemli düzeyde değiştiği söylenebilir.

Varyans analizinde belirlenen farklılığın hangi UK ikame oranlarından kaynaklandığını tespit edebilmek amacıyla Duncan çoklu karşılaştırma testi uygulanmış sonuçları Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. Su emme miktarı değerlerine ait Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları

UK ikame oranı	N	Farklı olan gruplar			
		1	2	3	4
%0	3	3,1067			
%10	3		4,0300		
%20	3			4,8633	
%30	3				5,6300

Elde edilen Duncan testi sonuçlarına göre;

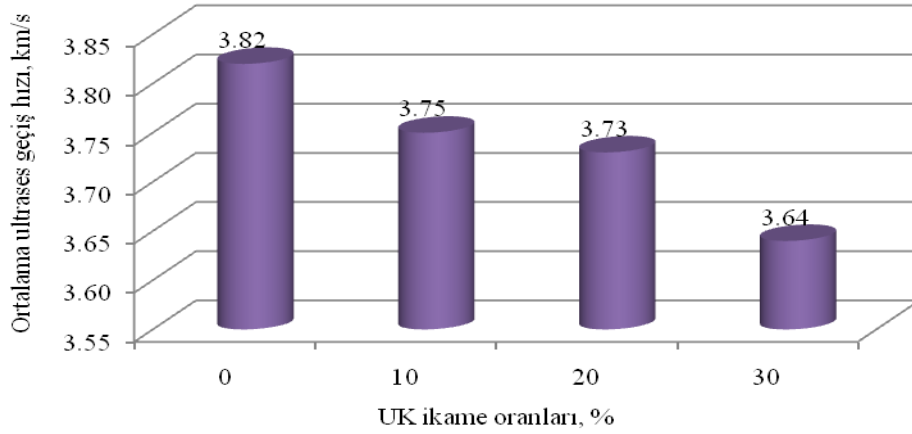
- Bütün UK ikame oranlarında su emme miktarlarının istatistiksel olarak birbirinden farklı olduğu,
- %30 UK ikameli betonların %5,6 oranı ile en büyük, referans betonların ise %3,1 oranı ile en küçük su emme miktarına sahip olduğu,
- UK ikame miktarı arttıkça numunelerdeki su emme miktarlarının da arttığı,
- Referans betonların %30 UK ikameli betonlara göre %45 daha küçük su emme miktarına sahip olduğu görülmektedir (Tablo 8).

3.4. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi

Farklı UK ikame oranında hazırlanan numuneler üzerinde 90. gün sonunda gerçekleştirilen ultrases geçiş hızı deneyi sonuçlarına ait açıklayıcı istatistikler Tablo 9'da verilmiştir. Ayrıca elde edilen ortalama ultrases geçiş hızı değerlerine ait grafik Şekil 5'de görülmektedir.

Tablo 9. Ultrases geçiş hızı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler

UK ikame oranı	N	Ultrases geçiş hızı (km/s)	Std. sapma	Std. hata	%95 güven aralığında ortalamanın		Min.	Mak.
					Alt sınırı	Üst sınırı		
%0	3	3,8200	0,04359	0,02517	3,7117	3,9283	3,79	3,87
%10	3	3,7533	0,00577	0,00333	3,7390	3,7677	3,75	3,76
%20	3	3,7300	0,01732	0,01000	3,6870	3,7730	3,71	3,74
%30	3	3,6400	0,06083	0,03512	3,4889	3,7911	3,60	3,71



Şekil 5. Ortalama ultrases geçiş hızı değerleri

Elde edilen sonuçlara göre ortalama ultrases geçiş hızı değerlerinin UK ikamesi ile ters orantılı olduğu görülmüştür (Şekil 5).

Ultrases geçiş hızı değerleri üzerinde UK ikame oranları arasında gerçekleştirilen varyans analizi sonuçları Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10. Ultrases geçiş hızı değerlerine ait varyans analizi sonuçları

Varyansın kaynağı	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Kareler ortalaması	F-testi	$P \leq 0,01$
Gruplar arası	0,050	3	0,017	11,197	0,003
Gruplar içi	0,012	8	0,001		
Toplam	0,062	11			

Elde edilen varyans analizi sonucuna göre; gruplar arasında istatistiksel anlamda önemli düzeyde fark olduğu ($p \leq 0,01$) ve UK ikame oranına bağlı olarak ultrases geçiş hızının önemli düzeyde değiştiği görülmüştür (Tablo 10).

Varyans analizinde belirlenen farklılığın hangi UK ikame oranlarından kaynaklandığını tespit edebilmek amacıyla UK ikame oranları arasında Duncan çoklu karşılaştırma testi uygulanmış ve sonuçları Tablo 11’de verilmiştir.

Tablo 11. Ultrases geçiş hızı değerlerine ait Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları

UK ikame oranı	N	Farklı olan gruplar		
		1	2	3
%30	3	3,6400		
%20	3		3,7300	
%10	3		3,7533	3,7533
%0	3			3,8200

Duncan testi sonuçlarına göre;

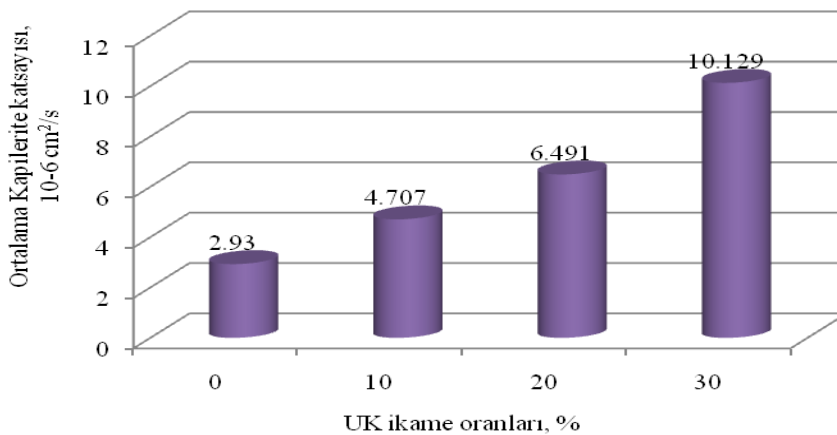
- Referans betonun ultrases geçiş hızının %20 ve %30 UK ikameli betonlardan farklı, %10 UK ikameli betondan farksız olduğu,
- %30 UK ikameli betonların 3,64 km/s ile en küçük, referans betonların ise 3,82 km/s ile en büyük ultrases geçiş hızına sahip olduğu,
- UK ikame miktarı arttıkça numunelerdeki ultrases geçiş hızının azaldığı,
- Referans betonların %30 UK ikameli betonlara göre %5 oranında daha büyük ultrases geçiş hızına sahip olduğu görülmektedir (Tablo 11).

3.5. Kapiler Su Emme Deneyi

Farklı UK ikame oranında hazırlanan numuneler üzerinde 90. gün sonunda gerçekleştirilen deneyler sonucunda hesaplanan kapilerite katsayısı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler Tablo 12’de verilmiştir. Ayrıca elde edilen ortalama kapilerite katsayısı değerlerine ait grafik Şekil 6’da görülmektedir.

Tablo 12. Kapilerite katsayısı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler

UK ikame oranı	N	Kapilerite katsayısı, $(10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s})$	Std. sapma (10^{-7})	Std. hata (10^{-7})	%95 güven aralığında ortalamanın			
					Alt sınırı (10^{-6})	Üst sınırı (10^{-6})	Min. (10^{-6})	Mak. (10^{-6})
%0	3	2,93	4,008	2,314	1,934	3,925	2,5	3,2
%10	3	4,707	0,581	0,335	4,562	4,851	4,6	4,7
%20	3	6,491	7,754	4,477	4,565	8,417	5,6	7,0
%30	3	10,129	4,881	2,818	8,917	11,341	9,6	10,6



Şekil 6. Ortalama kapilerite katsayıları

Ortalama kapilerite katsayısı değerlerinin UK ikamesi ile doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür (Şekil 6).

Kapilerite katsayısı değerlerine göre UK ikame oranları arasında varyans analizi gerçekleştirilmiş ve sonuçları Tablo 13’de verilmiştir.

Tablo 13. Kapilerite katsayısı değerlerine ait varyans analizi sonuçları

Varyansın kaynağı	Kareler toplamı (10^{-11})	Serbestlik derecesi	Kareler ortalaması (10^{-11})	F-testi	$P \leq 0,01$ (10^{-7})
Gruplar arası	8,5	3,00	2,8	113,10	6,9
Gruplar içi	0,2	8,00	0,01		
Toplam	8,7	11,00			

Varyans analizi sonucuna göre; gruplar arasında istatistiksel anlamda önemli düzeyde fark olduğu görülmüştür ($p \leq 0,01$) (Tablo 13). Bu durumda UK ikame oranına bağlı olarak kapilerite katsayısı değerlerinde önemli düzeyde değişiklikler olduğu söylenebilir.

Varyans analizinde belirlenen farklılığın hangi UK ikame oranlarından kaynaklandığını tespit edebilmek amacıyla Duncan çoklu karşılaştırma testi uygulanmış ve sonuçları Tablo 14’de verilmiştir.

Tablo 14. Kapilerite katsayısı değerlerine ait Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları

UK ikame oranı	N	Farklı olan gruplar			
		1 (10^{-6})	2 (10^{-6})	3 (10^{-6})	4 (10^{-6})
%0	3	2,930			
%10	3		4,707		
%20	3			6,491	
%30	3				10,129

Elde edilen Duncan testi sonuçlarına göre;

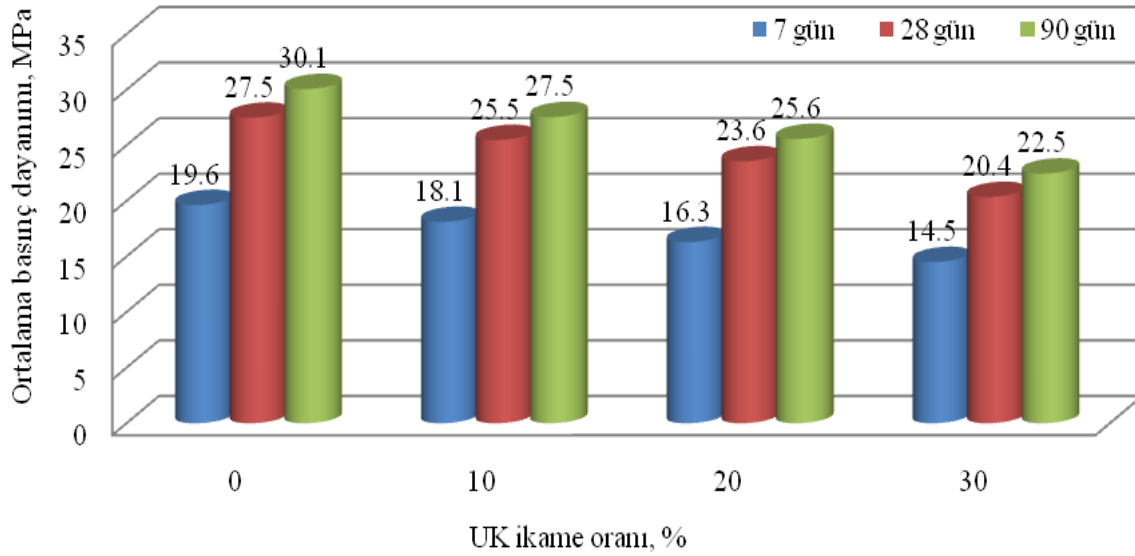
- Bütün UK ikame oranlarında kapilerite katsayısının istatistiksel olarak birbirinden farklı olduğu,
- %30 UK ikameli betonların $10,129 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ ile en büyük, referans betonların ise $2,93 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ ile en küçük kapilerite katsayısına sahip olduğu,
- UK ikame miktarı arttıkça numunelerdeki kapilerite katsayısının da arttığı,
- Referans betonların %30 UK ikameli betonlara göre 3,5 kat daha küçük kapilerite katsayısına sahip olduğu görülmektedir (Tablo 14).

3.2.6. Basınç Dayanımı Deneyi

Dört farklı UK ikame oranında hazırlanan numuneler üzerinde 7., 28. ve 90. günlerde gerçekleştirilen basınç dayanımı deney sonuçlarına ait açıklayıcı istatistikler Tablo 15’de verilmiştir. Ayrıca elde edilen ortalama basınç dayanımı değerlerine ait grafik Şekil 7’de görülmektedir.

Tablo 15. Basınç dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler

Numune yaşı, gün	UK ikame oranı	N	Basınç dayanımı (MPa)	Std. Sapma	Std. Hata	%95 güven aralığında ortalamanın		Min.	Mak.
						Alt sınırı	Üst sınırı		
7	%0	3	19,63	0,45	0,26	18,51	20,75	19,20	20,10
	%10	3	18,11	1,28	0,74	14,94	21,29	16,80	19,35
	%20	3	16,30	1,21	0,70	13,29	19,31	15,20	17,60
	%30	3	14,50	2,04	1,18	9,44	19,56	12,80	16,76
28	%0	3	27,49	1,07	0,62	24,84	30,14	26,50	28,62
	%10	3	25,48	0,91	0,52	23,23	27,74	24,45	26,15
	%20	3	23,56	2,25	1,30	17,98	29,15	21,10	25,50
	%30	3	20,35	3,05	1,76	12,77	27,94	17,40	23,50
90	%0	3	30,06	1,17	0,68	27,15	32,97	28,92	31,26
	%10	3	27,54	1,04	0,60	24,95	30,13	26,42	28,48
	%20	3	25,57	2,03	1,17	20,53	30,62	23,40	27,42
	%30	3	22,45	2,90	1,67	15,26	29,65	19,58	25,37



Şekil 7. Ortalama basınç dayanımı değerleri

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde UK ikame oranı arttıkça basınç dayanımı değerlerinin azaldığı, numune yaşına bağlı olarak ise basınç dayanımı değerlerinin arttığı görülmüştür (Şekil 7).

Farklı UK ikame oranlarında hazırlanan beton grupları arasında her bir numune yaşında ayrı ayrı varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen varyans analizi sonuçları Tablo 16'da verilmiştir.

Elde edilen varyans analizi sonucuna göre; bütün numune yaşlarında UK ikame oranına bağlı olarak beton basınç dayanımı değerlerinin istatistiksel olarak önemli düzeyde değiştiği görülmüştür ($p \leq 0,01$) (Tablo 16).

Tablo 16. Basınç dayanımı değerlerine ait varyans analizi sonuçları

Numune yaşı, gün	Varyansın Kaynağı	Kareler Toplamı	Serb. Dere.	Kareler Ortalaması	F-testi	p<0,01
7	Gruplar Arası	44,485	3	14,828	7,957	0,009
	Gruplar içi	14,908	8	1,864		
	Toplam	59,393	11			
28	Gruplar Arası	83,000	3	27,667	6,771	0,014
	Gruplar içi	32,691	8	4,086		
	Toplam	115,691	11			
90	Gruplar Arası	92,785	3	30,928	8,270	0,008
	Gruplar içi	29,918	8	3,740		
	Toplam	122,703	11			

Farklı beton yaşlarında UK ikame oranları arasındaki farklılıkları tespit edebilmek için UK ikame oranları arasında Duncan çoklu karşılaştırma testi uygulanmış ve sonuçları Tablo 17’de verilmiştir.

Tablo 17. Basınç dayanımı değerlerine ait Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları

Numune yaşı, gün	UK ikame oranı	N	Farklı Olan Gruplar		
			1	2	3
7	%30	3	14,5033		
	%20	3	16,3000	16,3000	
	%10	3		18,1167	18,1167
	%0	3			19,6333
28	%30	3	20,3533		
	%20	3	23,5667	23,5667	
	%10	3		25,4833	
	%0	3		27,4900	
90	%30	3	22,4567		
	%20	3	25,5733	25,5733	
	%10	3		27,5400	27,5400
	%0	3			30,0600

Elde edilen Duncan testi sonuçlarına göre;

- Tüm numune yaşlarında %30 UK ikameli betonların en düşük, referans betonların ise en büyük basınç dayanımına sahip olduğu,
- 7 günlük numunelerde referans betonların %20 ve %30 UK ikameli betonlardan istatistiksel olarak önemli düzeyde farklı olduğu, %10 UK ikameli betonlardan ise önemli düzeyde fark olmadığı,
- 28 günlük numunelerde referans betonların %30 UK ikameli betonlardan farklı olduğu, diğer UK ikame oranlarındaki betonlardan ise farklı olmadığı,
- 90 günlük numunelerde referans betonların %20 ve %30 UK ikameli betonlardan farklı olduğu, %10 UK ikameli betonlardan ise farklı olmadığı,
- Referans betonlara göre, %10, %20 ve %30 UK ikameli 90 günlük betonların basınç dayanımı değerlerinin sırasıyla %8, %15 ve %25 oranında daha düşük çıktığı belirlenmiştir (Tablo 17).

4. SONUÇLAR

Referans ve UK ikameli beton numuneler üzerinde gerçekleştirilen çökme, birim ağırlık, su emme, ultrases hızı ölçümü, kapilerite ve basınç dayanımı verilerinin değerlendirilmesi sonucunda elde edilen bulguların,

- PÇ'nin kimyasal analizler sonucunda yüksek oranda CaO, düşük oranda Al₂O₃, Fe₂O₃ ve SO₃ bileşiklerinden oluştuğu,
- UK'nin kimyasal analizler sonucunda F sınıfında olduğu ve iyi bir puzolanik (S+A+F=0,85) özellik taşıdığı,
- Fiziksel analizler sonucunda Portland çimentosuna göre UK'nin, özgül ağırlığının düşük, inceliğinin ise yakın olduğu,
- Çökme değerlerinin Referans betona göre, %10, %20 ve %30 UK ikameli betonların sırasıyla 2, 3 ve 3,5 cm daha fazla olduğu,
- Birim hacim ağırlık değerlerinin Referans beton için 2,36 g/cm³ ile en büyük, %30 UK ikameli betonlar içinse 2,33 g/cm³ ile en küçük olduğu,
- Su emme miktarının %30 UK ikameli betonlarda %5,6 oranı ile en büyük, referans betonlarda ise %3,1 oranı ile en küçük değere sahip olduğu,
- Ultrases geçiş hızının %30 UK ikameli betonlarda 3,64 km/s ile en küçük, referans betonların ise 3,82 km/s ile en büyük değere sahip olduğu,
- Kapilerite katsayılarının %30 UK ikameli betonlarda 10,129.10⁻⁶ cm²/s ile en büyük, referans betonların ise 2,93.10⁻⁶ cm²/s ile en küçük değere sahip olduğu,
- Basınç dayanımı değerlerinin 90 günlük beton numunelerinde referans betonlara göre, %10, %20 ve %30 UK ikameli betonların basınç dayanımı değerlerinin sırasıyla %8, %15 ve %25 oranında daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Elde edilen deneysel sonuçlar bir bütün olarak değerlendirildiğinde, UK ikameli betonlarda su emme ve kapiler su emme miktarlarda artma, birim hacim ağırlıkları ve ultrases geçiş hızlarında ise azalma meydana gelmiştir. Yapılan bu çalışma sonucunda referans betonun basınç dayanımı değerine %92 oranında yaklaşan %10 UK ikame oranının en uygun ikame oranı olduğu ve UK ikame miktarı arttıkça basınç dayanımı değerlerinin de azaldığı belirlenmiştir. Ancak UK kullanımı ile betonun birim maliyetinde ekonomik kazanç sağlanması, depolama maliyetinin azaltılması ve çevreye olan zararlı etkilerinin azaltılması, UK'nin çimento ve beton sektöründe kullanımının önemini arttırmaktadır. Bu nedenle her ne kadar basınç dayanımında bir azalma olsa da uygun oranda UK kullanımının önemli olduğu ve elde edilen basınç dayanımı sonuçlarının olumlu olduğu düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Aruntaş, H.Y., 2006, "Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli", Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21 (1), 193-203
2. Yalçın H., Gürü M., 2006, "Çimento ve Beton", Palme Yayıncılık, Ankara
3. Erdoğan, T.Y., 2003, "Beton", ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim AŞ., Ankara
4. Ernst, W., Nathan M., Lynn P., 2000, "Potentials for energy efficiency improvement in the US cement industry", Energy, 25 (12), 1189-1214
5. Shiqun, L., Della, M.R., 1986, "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
6. Canpolat, F., Yılmaz, K., 2002, "Doğal zeolit ve uçucu kül katkılı ve katkısız harçların sülfat dayanıklılığı", Osmangazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2, 1-15

7. Saraswathy, V., Muralidharan, S., Thangavel, K., Srinivasan, S., 2003, "Influence of activated fly ash on corrosion-resistance and strength of concrete", *Cement and Concrete Composites*, 25 (7), 673-680
8. Fu, X., Wang, Y., Huang, S., Hou X., Hou, W., 2003, "The influences of siliceous waste on blended cement properties", *Cement and Concrete Research*, 33 (6), 851-856
9. Fu, X., Wang, Z., Tao, W., Yang, C., Hou, W., Dong, Y., Wu, X., 2002, "Studies on blended cement with a large amount of fly ash", *Cement and Concrete Research*, 32 (7), 1153-1159
10. Chindapasirt, P., Homwuttiwong, S., Sirivivatnanon, V., 2004, "Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar", *Cement and Concrete Research*, 34 (7), 1087-1092
11. Çelik, M.H., Aruntaş, H.Y., Baran Y., 2003, "Seyitömer ve çayırhan uçucu küllerinin Portland çimentosu-uçucu kül pastasının priz başlama ve sonu sürelerine etkisi", *Politeknik Dergisi*, , 6 (1), 397-409
12. Dorum, A., Tekin, İ., 2004, "Uçucu kül ikameli çimento harcının basınç dayanımı ve priz zamanına distile su etkisinin araştırılması", *Politeknik Dergisi*, 7 (3), 243-250
13. TS 802, 1985, "Beton Karışım Hesapları", Türk Standartları Enstitüsü (TSE), Ankara
14. TS EN 12350-2", 2003, "Beton-Taze Beton Deneyleri-Bölüm 2: Çökme (Slamp) Deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
15. TS EN 12390-7, 2003, "Beton – Sertleşmiş Beton Deneyleri, Bölüm 7: Sertleşmiş Betonun Yoğunluğunun Tayini", Türk Standartları Enstitüsü, , Ankara
16. TS 3624, 2006, "Sertleşmiş Betonda Özgül Ağırlık, Su Emme ve Boşluk Oranı Tayin Metodu", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
17. ASTM C 597-97, 1998, "Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete", *Annual Book of ASTM Standards*, Easton, MD, USA
18. T. Gonen, S.Yazicioglu, 2007, "The influence of mineral admixtures on the short and long-term performance of concrete", *Build.Env.*, 42, 3080–3085
19. T. Gönen, S.Yazıcıoğlu, 2007, "The influence of compaction pores on sorptivity and carbonation of concrete", *Const. Build. Mater.*, 21, 1040–1045
20. B. Demirel ve O. Keleştemur, 2010, "Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume", *Fire Safety Journal*, 45, 385–391
21. TS EN 12390-3, 2003, "Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 3: Deney Numunelerinin Basınç Dayanımının Tayini", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
22. TOPÇU, İ.B., CANBAZ, M., 2001, "Uçucu kül kullanımının betondaki etkileri", *Gazi Üniversitesi Müh.Mim.Fak.Dergisi*, 14 (2), 11-23
23. Nochaiya T., Wongkeo, W., Chaipanich, A., 2010, "Utilization of fly ash with silica fume and properties of Portland cement-fly ash-silica fume concrete", *Fuel*, 89, 768–774