



UÇUCU KÜL TÜR VE MİKTARININ ÇİMENTO MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

THE EFFECT OF FLY ASH TYPE AND QUANTITY ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENT

Serkan SUBAŞI^a, Yılmaz KOÇAK^b, Mehmet EMİROĞLU^c

^a Düzce Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümü, Düzce, Türkiye, serkansubasi@duzce.edu.tr

^b Düzce Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümü, Düzce, Türkiye, yilmazkocak@duzce.edu.tr

^c Düzce Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümü, Düzce, Türkiye, mehmetemiroglu@duzce.edu.tr

Özet

Bu araştırmanın amacı farklı sınıflardaki uçucu küllerin ve ikame miktarlarının çimento harçlarının basınç, eğilme dayanımı ve birim ağırlık üzerine olan etkilerini araştırmaktır.

Bu amaçla, Çayırhan termik santralinden temin edilen F sınıfı uçucu kül ve Orhaneli termik santralinden temin edilen C sınıfı uçucu kül çimento numunelerinin hazırlanmasında kullanılmıştır. Numuneler hazırlanırken karışım içerisinde çimento ile %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında Çayırhan ve Orhaneli termik santrallerinin uçucu külleri ikame edilerek, her bir karışım için 3 adet 40x40x160 mm boyutlarında prizma örnekleri hazırlanmıştır. Her bir grup için karışımında kullanılacak su miktarı ASTM C230, C109 ve C1437 standartlarında belirtilen akma çapına göre akma tablası deneyi gerçekleştirilerek belirlenmiştir. Numuneler üzerinde birim ağırlık, eğilmede çekme ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar istatistiksel analizlere tabi tutularak değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak, C sınıfı uçucu kül ikameli çimento harçlarının dayanım değerleri, F sınıfı uçucu küllere göre daha düşük çıkmıştır. C sınıfı uçucu kül ikame miktarı arttıkça basınç dayanım değerleri azalmıştır. Ancak bu azalmaya rağmen uçucu kül ikameli çimento harçlarının basınç dayanımlarının standart değerler arasında olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Çimento, uçucu kül, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ikame.

Abstract

The aim of this study is to investigate the effects of different types and substitution amount of fly ashes on compressive, flexural strength and weight tests of cement mortars.

For this purpose, F type fly ash obtained from Çayırhan thermal power plant and C type fly ash obtained from Orhaneli thermal power plant was used for preparing the mortar samples. These fly ashes were substituted instead of cement 0%, 5%, 10%, 15% and 20% by weight and three prisms mortar specimens having 40x40x160 mm dimensions were prepared. Water amount of the mortar were determined by using flow table test according to the ASTM C230, C109 and C1437 for both groups. Compressive strength, flexural strength and unit weight tests were carried out on the mortar specimens. The test results were evaluated by using statistical analysis.

As a result, the strength values of the C type fly ashes were lower than the cement mortars with the F type of fly ashes substitution. While increasing the substitution rate of the C type fly ash, mortar strength were decreased. Despite this reduction, however, substitutions of fly ash-cement mortars compressive strength were determined to be between the standard values.

Keywords: Cement, fly ash, compressive strength, flexural strength, substitution.

1. Giriş

Beton içerisinde gerek katkı gerekse ikame malzemeleri olarak değerlendirilen uçucu kül, silis dumanı, doğal puzolanlar, yüksek fırın cürufu, pirinç kabuğu küllü gibi mineral katkıları puzolanik özellikleri ve ekolojik nedenlerden dolayı çimento ve beton sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır [1-3]. Bu puzolanik malzemeler çimento yerine katkı ya da ikame yoluyla değerlendirilmektedir [4, 5]. Bunun yanı sıra uçucu kül ve silis dumanı gibi puzolanların kullanımıyla yüksek dayanımlı betonlar üretilebilmektedir [6, 7]. Bu puzolanik malzemelerin arasında hem ekonomik hem de ekolojik yararları nedeniyle en yaygın kullanılanlarından biri de uçucu küldür (UK) [1].

UK, termik santrallerde elektrik üretimi sırasında kömürün yanması sonucu baca çıkışlarında elektro filtreler yardımıyla tutulan atık bir malzemedir. Uçabilen ve çok ince taneli olan bu küllere, UK adı verilmektedir [8]. ASTM C 618'e göre UK'lar F (Düşük kireçli UK'lar) ve C (Yüksek kireçli UK'lar) sınıfı olarak iki gruba ayrılmıştır. F sınıfı UK'lar, puzolanik özelliğe sahip olan ve $SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ (S+A+F) toplamı %70'in üzerinde olan küllerdir. C sınıfı UK'lar ise puzolanik özelliğinin yanı sıra kendiliğinden de bir miktar bağlayıcı özelliğe sahip, S+A+F toplamı %50'nin üzerinde olan küllerdir [1, 8, 9].

UK, çimento harcı ya da beton içerisinde katkı veya ikame malzemesi olarak kullanılmaktadır. Çimento yerine kullanılan UK sayesinde doğal kaynaklar korunmakta, CO_2 emisyonu azalmakta ve enerji tasarrufu sağlanmaktadır [10, 11]. Ayrıca UK kullanılması ile alkali agrea gelişiminin kontrolü, çevresel etkilere karşı kimyasal direnç, hidrasyon ısı ve betonun rötresinin azalması gibi avantajlar sağlanmaktadır [12-15]. Bu avantajları nedeniyle yaygın olarak kullanılan UK'lar betonun dayanım ve/veya dayanıklılık özelliklerini geliştirmektedir [16, 17].

Bu çalışmada, çimento numunelerinin hazırlanmasında F sınıfı ve C sınıfı UK'lar kullanılmıştır. UK ikamesi ile üretilen çimento numuneleri üzerinde birim ağırlık, eğilmede çekme ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiş, sonuçlar istatistiksel analizlere tabi tutularak değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Çimento: Ankara SET Çimento Fabrikası üretimi olan CEM I 42.5 R çimentosu (PC) kullanılmıştır (Çizelge 1).

Çizelge 1. Çimento fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal Kompozisyon (%)	
SiO ₂	20,32
Al ₂ O ₃	5,59
Fe ₂ O ₃	3,09
CaO	62,50
MgO	1,74
SO ₃	3,29
Na ₂ O	0,34
K ₂ O	0,91
Kızdırma kaybı	1,18
Çözünmeyen kalıntı	0,31
Serbest CaO	0,93
Fiziksel Özellikler	
Priz başlangıcı (sa: dak)	01:58
Priz sonu (sa: dak)	02:57
Hacim sabitliği (mm Toplam)	2
Özgül yüzey (cm ² /g)	3172
Mekanik Özellikler	
Basınç dayanımı (MPa)	
2. Gün	30,8
7. Gün	39,5
28.Gün	56,0

Uçucu kül: Çayırhan termik santralinden temin edilen F sınıfı UK (UK1) ve Orhaneli termik santralinden temin edilen C sınıfı UK (UK2) kullanılmıştır (Çizelge 2).

Çizelge 2. Uçucu kül kimyasal analiz sonuçları

Bileşenler (%)	UK1	UK2
SiO ₂ (S)	51.64	41.77
Al ₂ O ₃ (A)	14.32	13.95
Fe ₂ O ₃ (F)	9.31	4.84
CaO	6.54	17.95
MgO	4.02	7.04
SO ₃	2.62	2.59
Na ₂ O	2.36	2.94
K ₂ O	2.27	2.14
S+A+F	75.27	64.56

Kum: Harç örneklerinin hazırlanmasında TS EN 196-1'e uygun SET Trakya Çimento Sanayi tarafından üretilen CEN referans kumu kullanılmıştır.

Karışım suyu: Ankara ili Beşevler bölgesi şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

2.2. Metot

2.2.1. Deney numunelerinin hazırlanması

Numuneler hazırlanırken karışım içerisinde %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında Çayırhan ve Orhaneli termik santrallerine ait olan UK'lar çimento ile ikame edilerek, her bir karışım için 3 adet 40x40x160 mm boyutlarında prizma örnekleri hazırlanmıştır. Her bir UK ikamesi için karışımında kullanılacak su miktarı ASTM C230, C109 ve C1437 standartlarında belirtilen akma çapına göre akma tablası deneyi gerçekleştirilerek belirlenmiştir [18-20]. Karışımlarda kullanılan su/çimento (s/ç) oranları Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 3. Yayılma tablası deney sonuçlarına göre belirlenen su/çimento oranları

UK İkame Miktarı (%)	UK1		UK2	
	Su (ml)	s/ç Oranı	Su (ml)	s/ç Oranı
%0	290	0.48	290	0.48
%5	310	0.52	320	0.53
%10	330	0.55	330	0.55
%15	340	0.57	330	0.55
%20	350	0.58	340	0.57

2.2.2. Çimento basınç ve eğilme dayanımı tayini

Çimento basınç ve eğilme dayanımı deneyleri 2., 7. ve 28. günlerde her bir grup için 40x40x160 mm boyutlarında hazırlanan 3'er adet numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Basınç ve eğilme dayanımı deneyleri TS EN 196-1 standardında belirtilen kurallara uygun olarak yapılmıştır [21].

Basınç dayanımı R_c , eşitlik 1'den yararlanılarak hesaplanmıştır.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (1)$$

Burada:

R_c : Basınç dayanımı (MPa).

F_c : Kırılmadaki en büyük yük (N).

1600: Numune alanıdır (mm²).

Eğilme dayanımı R_f , eşitlik 2'den yararlanılarak hesaplanmıştır.

$$R_f = \frac{1,5x F_f x l}{b^3} \quad (2)$$

Burada:

R_f : Eğilme dayanımı (MPa)

b : Prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu (mm).

F_f : Prizmanın kırıldığı anda uygulanan kuvvet (N).

l : Mesnet silindireleri arasındaki uzaklık (mm)'dir.

2.2.3. Birim Ağırlık

40x40x160 mm boyutlarında hazırlanmış numuneler eğilme ve basınç deneylerine tabi tutulmadan önce kütleleri ölçülerek birim hacim ağırlık değerleri hesaplanmıştır.

2.2.4. İstatistiksel Metot

DeneySEL çalışmalar sonucunda elde edilen verilere ait açıklayıcı istatistikler verilmiştir. 3 ayrı deney türü için gruplar arasındaki farklılıkların testinde varyans analizi kullanılmıştır. Gruplar arasındaki farklılıkların araştırılmasında Bonferroni çoklu karşılaştırma testi kullanılmıştır. Yapılan karşılaştırma testlerinde yanılma olasılığı $\alpha = 0.05$ olarak kabul edilmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlar sütun grafiklerle görselleştirilmiştir [22].

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Basınç ve Eğilme Dayanımı

Çimento numuneleri üzerinde 2., 7. ve 28. günlerde gerçekleştirilen eğilme ve basınç dayanımı deneylerinden elde edilen basınç dayanımı verilerine ait açıklayıcı istatistikler Çizelge 4'te, eğilme dayanımı verilerine ait açıklayıcı istatistikler Çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelge 4. Basınç dayanımı verilerine ait açıklayıcı istatistikler

Numune Yaşı	UK İkame Oranı (%)	N	UK1		UK2	
			Ortalama Basınç Day. (MPa)	Std. Hata	Ortalama Basınç Day. (MPa)	Std. Hata
2	0	3	28.5133	0.30208	28.5133	0.30208
	5	3	25.5900	0.40374	23.7900	0.43059
	10	3	23.3183	0.21302	20.2850	0.32374
	15	3	22.8883	0.07446	18.2150	0.25482
7	0	3	39.4200	0.26424	38.6067	1.07058
	5	3	37.6283	0.05932	34.0250	0.52288
	10	3	36.6817	0.28715	32.5650	0.07767
	15	3	34.7383	0.42773	31.6017	0.22595
28	0	3	33.1583	0.46995	29.9300	0.69409
	5	3	50.0667	0.62140	50.0667	0.62140
	10	3	47.0817	0.19417	44.6183	0.07474
	15	3	46.2900	0.18644	44.2700	0.09579
	15	3	45.4150	0.25986	43.8233	0.10651
	20	3	44.1817	0.41754	42.0650	0.30029

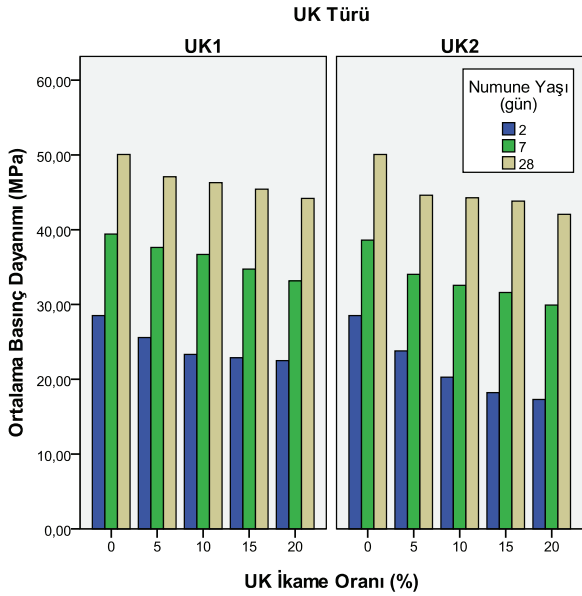
Basınç dayanımı değerleri incelendiğinde bütün numune yaşlarında ve UK ikame oranlarında UK1 ikameli çimento numunelerinin UK2 ikameli numunelere göre daha büyük ortalama basınç dayanımı değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca bütün numune yaşlarında UK ikame oranı arttıkça numunelerin basınç dayanımı değerlerinin azalmakta olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 5. Eğilme dayanımı verilerine ait açıklayıcı istatistikler

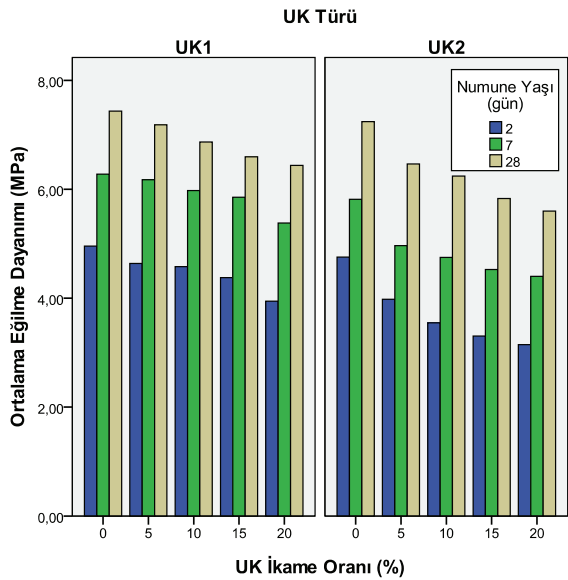
Numune Yaşı	UK İkame Oranı (%)	N	UK1		UK2	
			Ortalama Eğilme Day. (MPa)	Std. Hata	Ortalama Eğilme Day. (MPa)	Std. Hata
2	0	3	4.9567	0.07720	4.7550	0.02386
	5	3	4.6380	0.01222	3.9813	0.08772
	10	3	4.5783	0.00754	3.5477	0.03254
	15	3	4.3780	0.12368	3.3053	0.08980
7	0	3	3.9443	0.07766	3.1477	0.02783
	0	3	6.2780	0.00603	5.8167	0.06822
	5	3	6.1740	0.04678	4.9653	0.05710
	10	3	5.9767	0.04891	4.7480	0.09640
28	15	3	5.8543	0.03717	4.5277	0.01272
	20	3	5.3803	0.15648	4.4010	0.05659
	0	3	7.4333	0.05855	7.2423	0.09613
	5	3	7.1843	0.03689	6.4657	0.01288
	10	3	6.8667	0.09992	6.2420	0.05750
	15	3	6.5953	0.02500	5.8293	0.05505
	20	3	6.4367	0.03610	5.5987	0.05569

Eğilme dayanımı değerleri incelendiğinde bütün numune yaşlarında ve UK ikame oranlarında basınç dayanımı değerlerinde olduğu gibi UK1 ikameli çimento

numunelerinin UK2 ikameli numunelere göre daha büyük ortalama eğilme dayanımı değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca bütün numune yaşlarında UK ikame oranı arttıkça numunelerin eğilme dayanımı değerlerinin azalmakta olduğu tespit edilmiştir. Her iki UK türünde farklı yaşlarda ve UK ikame oranlarında sahip olduğu basınç dayanımı değerleri Şekil 1'de, eğilme dayanımı değerleri ise Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 1. Ortalama basınç dayanımı değerlerine ait grafik



Şekil 2. Ortalama eğilme dayanımı değerlerine ait grafik

Her iki UK türünde 28 günlük dayanım değerleri üzerinde UK ikame oranları arasında basınç ve eğilme dayanımı değerleri bakımından farklılık olup olmadığını test edebilmek amacıyla gruplar arasında varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen varyans analizi sonucunda $p \leq 0,05$ anlamlılık düzeyinde her iki UK türünde UK ikame oranları arasında basınç ve eğilme dayanımı değerleri arasında önemli bir fark olduğu görülmüştür. Diğer bir ifadeyle UK ikame oranına bağlı olarak dayanım değerleri önemli ölçüde değişmektedir. Bütün grupların karşılaştırılması için Bonferroni çoklu karşılaştırma testi kullanılmıştır. Basınç dayanımı için elde edilen çoklu karşılaştırma sonuçları Çizelge 6'da, eğilme dayanımı için elde edilen sonuçlar ise Çizelge 7'de verilmiştir.

Çizelge 6. Basınç dayanımı değerleri Bonferroni çoklu karşılaştırma testi sonuçları

UK Türü	UK İkame Oranı (%)	UK1					Basınç Day. (MPa)
		0	5	10	15	20	
UK1	0		f [*]	f [*]	f [*]	f [*]	50.0667
	5	f [*]				f [*]	47.0817
	10	f [*]				f [*]	46.2900
	15	f [*]					45.4150
	20	f [*]	f [*]	f [*]			44.1817
UK2	0		f [*]	f [*]	f [*]	f [*]	50.0667
	5	f [*]				f [*]	44.6183
	10	f [*]				f [*]	44.2700
	15	f [*]				f [*]	43.8233
	20	f [*]	f [*]	f [*]	f [*]		42.0650

Karşılaştırma testi sonuçlarına göre; referans numunenin her iki UK türünde de ikameli gruplardan basınç dayanımı değerleri bakımından farklı olduğu, UK1 de %15 ve %20 ikameli numunelerin birbirinden farklı olmadığı, ancak diğerlerinden farklı olduğu, UK2 de ise %20 oranında ikameli numunelerin diğer bütün gruplardan farklı olduğu görülmüştür.

UK1 ikameli numunelerde en büyük basınç dayanımına sahip olan referans numune en küçük dayanımına sahip %20 ikameli numunelere göre %12 oranında daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğu, UK2 ikameli numunelerde ise referans numune %20 ikameli numuneye göre %16 oranında daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğu görülmüştür.

Çizelge 7. Eğilme dayanımı değerleri Bonferroni çoklu karşılaştırma testi sonuçları

UK Türü	UK İkame Oranı (%)	UK1					Eğilme Day. (MPa)
		0	5	10	15	20	
UK1	0			f [*]	f [*]	f [*]	7.43
	5			f [*]	f [*]	f [*]	7.18
	10	f [*]	f [*]			f [*]	6.86
	15	f [*]	f [*]				6.59
	20	f [*]	f [*]	f [*]			6.43
UK2	0		f [*]	f [*]	f [*]	f [*]	7.24
	5	f [*]				f [*]	6.46
	10	f [*]				f [*]	6.24
	15	f [*]	f [*]	f [*]			5.82
	20	f [*]	f [*]	f [*]			5.59

Çizelge 7 incelendiğinde karşılaştırma testi sonuçlarına göre; referans numunenin UK1 de %5 ikameli numuneler hariç diğer bütün ikameli gruplardan farklı olduğu, UK2 de ise referans numunenin bütün gruplardan farklı olduğu görülmektedir. Ayrıca her iki UK türünde de %15 ve %20 oranında ikameli grupların birbirinden istatistiksel anlamda farklı olmadığı tespit edilmiştir.

UK1 numunelerinde en büyük eğilme dayanımına sahip olan referans numunenin, en küçük dayanımına sahip %20 ikameli numunelere göre %13 oranında daha yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu, UK2 numunelerinde ise referans numunenin, en küçük değere sahip %20 ikameli numunelere göre %23 oranında daha yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu görülmüştür.

3.2. Birim Ağırlık

Çimento numuneleri üzerinde 2., 7. ve 28. günlerde gerçekleştirilen birim ağırlık deneyinden elde edilen verilere ait açıklayıcı istatistikler Çizelge 8'de verilmiştir.

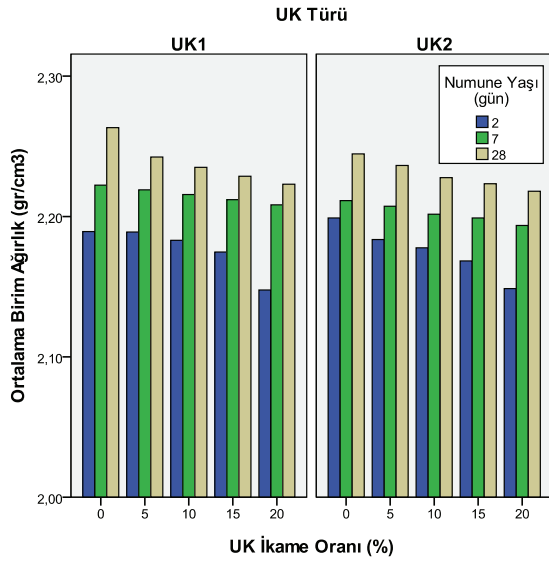
Birim ağırlık değerleri incelendiğinde bütün numune yaşlarında ve UK ikame oranlarında UK1 ikameli çimento numunelerinin UK2 ikameli numunelere göre daha büyük ortalama birim ağırlık değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca bütün numune yaşlarında UK ikame oranı arttıkça numunelerin birim ağırlık değerlerinin azalmakta olduğu tespit edilmiştir. Her iki UK türünde farklı yaşlarda ve UK ikame oranlarında sahip olduğu birim ağırlık değerleri Şekil 3'te görülmektedir.

Her iki UK türünde 28 günlük veriler üzerinde UK ikame oranları arasında birim ağırlığı bakımından farklılık olup olmadığını test edebilmek amacıyla gruplar arasında varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen varyans analizi sonucunda $p \leq 0,05$ anlamlılık düzeyinde her iki UK türünde, UK ikame oranları arasında birim ağırlık değerleri arasında istatistiksel anlamda önemli bir fark olduğu görülmüştür. Diğer bir ifadeyle UK ikame oranına bağlı olarak çimento numunelerinin birim ağırlık değerleri önemli ölçüde değişmektedir. Bütün

grupların karşılaştırılması için Bonferroni çoklu karşılaştırma testi kullanılmıştır. Birim ağırlık değerleri için elde edilen çoklu karşılaştırma sonuçları Çizelge 9'da verilmiştir.

Çizelge 8. Birim ağırlık verilerine ait açıklayıcı istatistikler

Numune Yaşı	UK İkame Oranı (%)	N	UK1		UK2	
			Ortalama Birim Ağırlık (gr/cm ³)	Std. Hata	Ortalama Birim Ağırlık (gr/cm ³)	Std. Hata
2	0	3	2.1893	0.00133	2.1990	0.00231
	5	3	2.1890	0.00153	2.1837	0.00033
	10	3	2.1830	0.00058	2.1777	0.00033
	15	3	2.1747	0.00333	2.1683	0.00176
	20	3	2.1477	0.00784	2.1487	0.00441
	Total	15	2.1767	0.00439	2.1755	0.00455
7	0	3	2.2223	0.00033	2.2113	0.00067
	5	3	2.2190	0.00058	2.2073	0.00120
	10	3	2.2157	0.00067	2.2017	0.00088
	15	3	2.2120	0.00058	2.1990	0.00000
	20	3	2.2083	0.00033	2.1937	0.00067
	Total	15	2.2155	0.00134	2.2026	0.00168
28	0	3	2.2633	0.01284	2.2447	0.00273
	5	3	2.2423	0.00240	2.2363	0.00088
	10	3	2.2350	0.00000	2.2277	0.00033
	15	3	2.2287	0.00088	2.2233	0.00133
	20	3	2.2230	0.00000	2.2180	0.00265
	Total	15	2.2385	0.00435	2.2300	0.00263



Şekil 3. Ortalama birim ağırlık değerlerine ait grafik

Çizelge 9. Birim ağırlık değerleri Bonferroni çoklu karşılaştırma testi sonuçları

UK Türü	UK İkame Oranı (%)	UK1					Birim Ağırlık (gr/cm ³)
		0	5	10	15	20	
UK1	0				f [*]	f [*]	2.263
	5						2.242
	10						2.235
	15	f [*]					2.229
	20	f [*]					2.223
UK2	0			f [*]	f [*]	f [*]	2.245
	5				f [*]	f [*]	2.236
	10	f [*]				f [*]	2.228
	15	f [*]	f [*]				2.223
	20	f [*]	f [*]	f [*]			2.218

Çizelge 9 incelendiğinde karşılaştırma testi sonuçlarına göre; UK1 numunelerinde birim ağırlık değerleri bakımından referans numunenin %15 ve %20 ikameli numunelerden farklı, %5 ve %10 ikameli numunelerden farksız olduğu, UK2 numunelerinde ise referans numunenin %5 ikameli numuneler hariç diğer bütün ikameli gruplardan farklı olduğu görülmektedir.

UK1 numunelerinde en büyük birim ağırlığa sahip olan referans numunenin, en küçük birim ağırlığa sahip %20 ikameli numunelere göre %2 oranında daha yüksek değere sahip olduğu, UK2 numunelerinde ise referans numunenin, en küçük değere sahip %20 ikameli numunelere göre %2 oranında daha yüksek birim ağırlığa sahip olduğu görülmüştür.

4. SONUÇLAR

Araştırma kapsamında Çayırhan termik santralinden temin edilen F sınıfı UK1 ve Orhaneli termik santralinden temin edilen C sınıfı UK2, çimento numunelerinin içerisinde ağırlıkça %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında ikame edilmiş ve her bir karışım için hazırlanan 3 adet prizma örnekler üzerinde birim ağırlık, eğilme çekme ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar üzerinde gerçekleştirilen istatistikî değerlendirmeler sonucunda *basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve birim ağırlık* değerlerinin bütün numune yaşlarında ve UK ikame oranlarında;

- F-sınıfı UK1 kodlu çimento numunelerinin C-sınıfı UK2 kodlu numunelere göre daha büyük değerlere sahip olduğu,
- Referans numunelerin, %20 ikameli F-sınıfı UK ikameli numunelere göre basınç, eğilme ve birim ağırlık değerleri bakımından sırasıyla %12, %13 ve %2 oranlarında daha büyük değerlere sahip olduğu,
- Referans numunelerin, %20 ikameli C-sınıfı UK ikameli numunelere göre basınç, eğilme ve birim ağırlık değerleri bakımından sırasıyla %16, %23 ve %2 oranlarında daha büyük değerlere sahip olduğu,
- Referans numuneye göre %5 ve %10 oranındaki F-sınıfı UK ikameli numunelerde, dayanım ve birim ağırlık değerlerinde çok küçük bir azalmanın olduğu görülmüştür.

Çalışmada elde edilen sonuçlara göre UK ikameli çimento harçlarında 28 gün sonundaki basınç dayanımı değerlerinin TS EN 197-1 CEM 1 42.5 R standardının öngördüğü en düşük dayanımın (42.5 MPa) üzerinde çimentolar elde edilmiştir. Ancak 20 UK2 kodlu çimento harcında 42.06 MPa değeri ile standart değerin %99 oranında (standart değere çok yakın) bir değer elde edilmiştir. Özellikle dayanım yanında dayanıklılığında önemli olduğu düşünüldüğünde, yüksek dayanımlı çimentolara (PC) uygun oranda UK ikamesi veya katkısı ile standartların öngördüğü dayanımdan vazgeçilmeksizin yüksek dayanıklılığa sahip çimentoların üretilebileceği düşünülmektedir. Ayrıca yapılan çalışmada UK ikameli çimentolar basınç dayanım deneyleri açısından 28 gün yaşa kadar değerlendirilmiştir. Eğer UK ikameli çimentoların ileriki yaşlardaki basınç dayanımları incelenirse, UK'nın puzolanik özelliğinden dolayı dayanımın daha da artacağı düşünülmektedir.

Sonuç olarak sürdürülebilirlik açısından değerlendirildiğinde, UK'nın çimento ve beton içerisinde kullanılmasının atıkların geri dönüşümü ve çevre kirliliğinin azaltılmasına çok büyük katkı sağlayacağı, aynı zamanda da mekanik açıdan istenilen özellikte çimento ve beton harçlarının elde edilebileceği düşünülmektedir.

Kaynaklar

- Erdoğan, T. Y., "Beton", ISBN / ISSN: 975706467x, *ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.*, Ankara, Türkiye, (2003).
- Mehta, P. K., "Concrete: Structure, Properties, and Materials", ISBN / ISSN: 978-0071462891, *Prentice-Hall*, NJ, Englewood, USA, (1986).
- Neville, A.M., "Properties of concrete", ISBN / ISSN: 0-582-23070-5, *Pearson Education Limited*, England, (2006).
- Gleize P.J.P., Cyr, M., Escadeillas, G. "Effects of metakaolin on autogenous shrinkage of cement pastes", *Cement Concrete Compos.* 29: (2), 80-87, (2007).
- Sabir BB, Wild S, Bai, J., Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review, *Cement Concrete Compos.* 23 (6): 441-454, (2001).
- Poon CS, Kou SC, Lam L. "Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete", *Const. Build. Mater.*, 20 (10): 858-865, (2006).
- Parande A.K., Babu B. R., Karthik, M. A., Deepak Kumar K. K., Palaniswamy, N., "Study on strength and corrosion performance for steel embedded in metakaolin blended concrete/mortar", *Const. Build. Mater.*, 22 (3): 127-134, (2008).

- [8]. Aruntaş, H.Y., "Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli", *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21 (1): 193-203, (2006).
- [9]. Yalçın H., Gürü M., "Çimento ve Beton", ISBN / ISSN: 9944-341-16-9, *Palme Yayıncılık*, Ankara, Türkiye, (2006).
- [10]. Perez, R., Lopeza, F., Renard, J.M., Nietob, L., Charlet, G., Montes-Hernandez, "Mineral sequestration of CO₂ by aqueous carbonation of coal combustion fly-ash", *Journal of Hazardous Materials* 161, 1347-1354, (2009).
- [11]. Ahmaruzzaman, A M., "Review on the utilization of fly ash", *Progress in Energy and Combustion Science*, 1-37, (2009).
- [12]. 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).
- [13]. 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).
- [14]. Erdoğan, S.T., Erdoğan T.Y., "Puzolanik minerel katkılar ve tarihi geçmişleri", 2. *Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu*, TMMOB Kimya Mühendisleri Odası Ankara Şubesi ve TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi, Ankara, Türkiye, 263-275, (2007).
- [15]. Chindaprasirt, 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).
- [16]. Garcés, P., Andion, L. G., Zornoza, E., Bonilla, M., Paya, J., "The effect of processed fly ashes on the durability and the corrosion of steel rebars embedded in cement-modified fly ash mortars", *Cement & Concrete Composites*, 32(3): 204-210, (2009).
- [17]. Wang, S., Lamazos, E., Baxter, L., Fonseca, F., "Durability of biomass fly ash concrete: Freezing and thawing and rapid chloride permeability tests", *Fuel*, 87: 359-364, (2008).
- [18]. American Standards of Testing Materials (ASTM), "Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement" *ASTM C230/C230M-98e2*, West Conshohocken, 1-6, (2004).
- [19]. American Standards of Testing Materials (ASTM), "Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar" *ASTM C1437-99*, West Conshohocken, 1-2, (2004).
- [20]. American Standards of Testing Materials (ASTM), "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)", *ASTM C109/C109M-99*, West Conshohocken, 1-9, (2004).
- [21]. Türk Standartları Enstitüsü (TSE), "Çimento deney metotları-Bölüm 1: Dayanım tayini", *TS EN 196-1*, Ankara, Türkiye, (2002).
- [22]. Kalaycı, S., "SPSS Uygulamalı Çok Değişkenli İstatistik Teknikleri", ISBN / ISSN: 9759091143, *Asil Yayın Dağıtım Ltd. Şti.*, 3. Baskı, Ankara, (2008).