

# Uçucu Kül İkameli Çimento Numunelerinin Mekanik Özelliklerine Yüksek Sıcaklığın Etkisi

Serkan SUBAŞI<sup>1</sup>, Betül İŞBİLİR\*<sup>2</sup>, İsmail ERCAN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, DÜZCE

<sup>2</sup>Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enst., Yapı Eğitimi A.B.D., DÜZCE

<sup>3</sup>Düzce Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi., Eğitim Bil. Bölümü, DÜZCE

## ÖZET

Sürdürülebilir bir beton elde etmek için beton mekanik ve fiziksel özellikleri incelenirken çevresel faktörler de ele alınarak beton tasarımı yapılmalıdır. Betonarme yapılarda yangın durumu göz önüne alındığında yüksek sıcaklık sürdürülebilir beton tasarımında etkili bir çevresel faktör olup betonun mekanik ve fiziksel özelliklerinde ciddi kayıplara sebep olmaktadır. Bu çalışmada, sürdürülebilir bir beton elde etmek için çevresel faktörlerde önemli bir yeri olan yüksek sıcaklığın uçucu kül ikameli çimentolar üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yapılan çalışmada çimento belli oranlarda (%5-10-20) uçucu kül ile ikame edilmiş ve TS EN 196-1 standardında belirtilen referans kum kullanılarak 40x40x160 mm boyutlarında harç numuneleri hazırlanmıştır. Her bir grup karışımında gerekli olan su miktarı ASTM C230, C109 ve C1437 standartlarında belirtilen akma çapına göre akma tablası deneyi ile belirlenmiştir. Hazırlanan numuneler 100-200-300-400-500-600°C sıcaklıklarına maruz bırakılarak basınç ve eğilme dayanımı deneyleri TS EN 196-1 standardına uygun olarak yapıldıktan sonra elde edilen veriler istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak; %5 oranında uçucu kül ikamesi ile çimento mekanik ve fiziksel özelliklerinde iyileşmeler sağlanmıştır. %10'a kadar uçucu kül ikamesi ile çimento harçları yüksek sıcaklık etkisinden daha az zarar görmüştür. Tüm uçucu kül ikame oranlarında sıcaklık artışına paralel olarak dayanım değerleri düşmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Uçucu Kül, Pozolan, Beton, Yüksek Sıcaklık, Sürdürülebilirlik

## Effect of High Temperature on Mechanical Properties of Cement Samples with Fly Ash Substitution

### ABSTRACT

To achieve a sustainable concrete, environmental factors should also be taken into account while examining the mechanical and physical properties of concrete. High temperature is an effective environmental factor in the design of sustainable concrete, and cause serious losses on the mechanical and physical properties of concrete considering fire situation on the reinforced concrete structures. In this study, the effects of high temperature, which has an important role for environmental factors, on the fly ash substituted cement paste is examined to achieve a sustainable concrete. In the study, 40x40x160 mm cement mortar samples having (5-10 and 20%) rates of fly ash substitution were prepared with using reference sand specified in the TS EN 196-1 Standard. The amount of water required in each group is determined by using Flow Table test according to the ASTM C230, C109 and C1437 Standards. The prepared samples were exposed to 100-200-300-400-500 and 600 Celsius degree before the compressive and bending strength experiments according to the TS EN 196-1 Standards, and then the data obtained were statistically evaluated. As a result, improvements were provided on mechanical and physical properties of cement with 5% fly ash substitution. The cement mortars were less damaged from the high temperature up to 10% fly ash substitution. Strength values were decreased parallel to the temperature increase in all fly ash substituted mixtures.

**Keywords:** Fly Ash, Pozzolan, Concrete, High Temperature, Sustainability

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Etkili bir çevresel faktör olan yangın durumu yüksek sıcaklık etkisi ile betonarme yapıların özelliklerinde bozulmalar meydana getirmektedir. Yüksek sıcaklık etkisi ile betonda renk değişimi, çatlaklar ve parçalanmalar dolayısıyla basınç dayanımı ve elastisite modülünde azalmalar görülür. Bunların yanı sıra çelik akma dayanımının düşmesi sebebiyle beton ile çelik arasındaki aderans bozulur.

Konut, okul, fabrika, işyeri gibi binalar, tünel, köprü, petrol platformu gibi yapılar, işlevleri gereği veya yangın nedeni ile yüksek sıcaklık etkisinde kalabilirler. Yüksek sıcaklığın kaynaklarından biri olan yangının betona ve betonarme yapılara etkisi 1922'den günümüze kadar araştırılmaktadır. 10 yıl öncesine kadarki çalışmalarda yüksek sıcaklığın normal dayanımlı betona etkileri üzerinde odaklanılmıştı. Ancak günümüzde modern yapılarda, endüstri yapılarında, tünellerde veya özel hizmet amaçlı inşa edilen yapılarda kimyasal ve mineral katkıların kullanımı ile yüksek performanslı ve yüksek dayanımlı betonlar üretilmeye başlanmıştır. Bu betonların yüksek sıcaklık etkisindeki davranışı iyi bi-

\* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: betulisbilir@duzce.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2011.14.2, 141-148

linmelidir. Çünkü içyapıdaki sıklık yangın direncini azaltır ve yüksek dayanımlı betonu normal betona göre daha riskli duruma getirir. Örneğin Danimarka'da bulunan Great Belt Tünelinde ve Channel Tünelde, 1994 ve 1996 yıllarında çıkan yangınlarda, yüksek sıcaklık etkisi ile betonda meydana gelen patlama ve parça atmalar nedeni ile beton kesitindeki azalmalar ağır hasarlara yol açmıştır. Özellikle yangın gibi yüksek sıcaklığın oluşturduğu hasarlara ülkemizde de çok sık rastlanmaktadır [1].

Birçok ülke, yangından korunma amacıyla kabul edilebilir minimum seviyeyi oluşturmak için hükme dayalı zorunluluklar getirmiştir. Bu zorunluluklar, binaların tasarımında mimar ve mühendisler için rehber görevini üstlenmektedir. Ancak, tamamen hükme dayalı tasarımlar, her zaman ihtiyaç duyulan esnekliği sağlamadığı gibi belirlenmiş fonksiyonel ihtiyaçların karşılanamadığı durumları da doğurmaktadır. Günümüzde, dünya çapında fonksiyona ve performansa dayalı düzenlemelerin, yönetmeliklerin oluşturulması yönünde bir eğilim oluşmuştur. Bazı ülkeler bu yaklaşımı yıllar önce kabul etmiş olup, bazı ülkelerde ise yeni oluşum aşamasındadır. Üye Ülkeler arasındaki bu farklı yaklaşımları ortadan kaldırmak amacıyla Avrupa Birliği, Yapı Malzemeleri Direktifini (Construction Product Directive-CPD) yayımlamıştır[2].

Yapı malzemeleri direktifinin altı temel gereği bulunmaktadır[2]. Bunlar;

- 1) Mekanik dayanım ve kararlılık (stabilite),
- 2) Yangın durumunda emniyet,
- 3) Hijyen, sağlık ve çevre,
- 4) Kullanım emniyeti,
- 5) Gürültüye karşı korunma,
- 6) Enerjiden tasarruf ve ısı korunumudur.

Yüksek sıcaklığın beton üzerindeki etkisi bir çok çalışmada incelenmiştir. Normal ve yüksek dayanımlı betonların 800°C maruz bırakılması neticesinde dayanımının % 60'ını kaybettiği görülmüştür. Yüksek sıcaklık dayanımının yanında elastisite modülüne de benzer etkiler yapmıştır. Başka bir çalışmada ise betonlar 300, 600 ve 900°C sıcaklığa maruz bırakılmış ve 600°C de mekanik, 900°C de ise tüm özelliklerinin yitirdiği tespit edilmiştir[3].

Endüstriyel atıkların inşaat sektöründe değerlendirilmesi ile ilgili çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir. Bu atıklar, puzolan olmaları nedeniyle hem çimento hem de beton üretiminde katkı ve ikame malzemesi olarak kullanılmaktadır[4].

UK'lerin değerlendirildiği sektörlerin başında ağırlıklı olarak inşaat sektörü gelmektedir. Bundan başka UK, kimya, seramik, cam, cam-seramik, döküm-metal sanayii, tarım sektöründe zemin ıslahı, çevre, sondaj çalışmaları, buzlanmanın önlenmesi ve maden ocaklarında filler olmak üzere çeşitli alanlarda kullanılmaktadır[5].

Uçucu kül, silis dumanı gibi puzolanik bir malzemedir. Alüminli ve silisli yapıya sahip, ince taneli durumdaki bütün puzolanik malzemeler gibi, kalsiyum hidroksit ile karıştırılarak su ile birleştirildiğinde, oluşan hidrasyon sonucu Portland çimentosunda olduğu gibi C-S-H jellerinin oluşmasını sağlarlar ve bağlayıcı özellik kazanırlar. Yapılan başka bir çalışmada uçucu külün miktarından çok ince partiküllü oluşundan kaynaklanan etkinin basınç dayanımlarının artışında daha önemli olduğu belirtilmektedir[6]. Uçucu Kül tanecikleri, çoğunlukla küresel yapıda olup, büyüklükleri 1-200µm arasında değişmektedir. Genellikle, uçucu küllerin %85 'ini, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO ve MgO oluşturur [7].

Uçucu küller kimyasal kompozisyonlarına göre değişik şekillerde sınıflandırılmaktadır. Son yıllarda geniş kabul gören sınıflandırma yöntemi uçucu külün içerdiği analitik CaO miktarına dayanmaktadır. Buna göre, CaO miktarı %10'un altında olan uçucu küller düşük kireçli ya da düşük kalsiyumlu, %10'un üstünde olanlar ise yüksek kireçli ya da yüksek kalsiyumlu uçucu küller olarak adlandırılırlar. ASTM C618'e göre uçucu küller iki geniş kategoriye ayrılmaktadır[8].

a) F sınıfı uçucu küller bitümlü kömürlerden elde edilip SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > %70 şartını sağlayan küllerdir,

b) C sınıfı küller ise genelde linyitler ve yarı bitümlü kömürlerden elde edilip SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > %50 şartını sağlayan küllerdir.

Beton üretiminde uçucu kül kullanımının taze ve sertleşmiş beton özellikleri üzerindeki olumlu etkilerini şu şekilde sıralamak mümkündür[7];

- Küresel yapısı nedeniyle uçucu kül taze betonun işlenebilirliğini artırır. Böylece uçucu kül içermeyen bir betona kıyasla betonun su ihtiyacında azalma sağlanabilir.
- Taze betonun su kusmasını (terleme) azaltır.
- Betonun hidrasyon ısısında azalmaya yol açarak özellikle sıcak havalarda büyük kütleli beton dökümüne imkân tanır.
- Puzolanik reaksiyon sayesinde beton mukavemetinin yavaş fakat uzun süreli artışını sağlar.
- Betonun su ve klorür geçirimsizliğini azaltır.
- Betonun kimyasal etkilere dayanıklılığını artırır.
- Betonda bağlayıcı matris (çimento hamuru) ile agregalar arasındaki bağı (aderans) güçlendirir.
- Betonda kuruma büzülmesini ve termik büzülmeyi (rötre) azaltarak çatlak oluşumunun azalmasını sağlar. Böylece, betonun çevresel etkilere dayanıklılığını olumlu yönde etkiler.
- Buna karşılık, betonda fazla miktarda uçucu kül kullanımının betonun mekanik özelliklerini düşürmesi, karbonatlaşma olayını hızlandırması gibi olumsuz yönleri de vardır.

Bu çalışmada, çevresel faktörlere direnç gösterebilen bir beton elde etmek için beton dayanımı, dayanıklılığı ve yüksek sıcaklık etkisi birlikte değerlendirile-

rek uçucu kül katkılı bir beton tasarımı yapılması amaçlanmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

### 2.1. Materyal (Material)

#### 2.1.1. Çimento (Cement)

Çalışmada CEM I 42,5 R çimentosu kullanılmış olup, kullanılan çimentoya ait kimyasal analiz sonuçları Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Çimento fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikler		Fiziksel Özellikler	
SiO <sub>2</sub> (%)	20,32	Priz Başlangıcı (sa/dk)	01:58
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	5,59	Priz Sonu (sa/dk)	02:57
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3,09	Hacim sabitliliği (mm Toplam)	2
CaO (%)	62,50	Özgül Yüze (cm <sup>2</sup> /g)	3172
MgO (%)	1,74	<b>Mekanik Özellikler</b>	
SO <sub>3</sub> (%)	3,29	Basınç Dayanımı(MPa)	
Na <sub>2</sub> O (%)	0,34	2.Gün	30,8
K <sub>2</sub> O (%)	0,91	7.Gün	39,5
Kızdırma Kaybı(%)	1,18	28.Gün	56,0
Çözünmeyen Kalıntı	0,31		
S.CaO (%)	0,93		

#### 2.1.2. Uçucu Kül (Fly Ash)

Çalışmada, F tipi uçucu kül kullanılmış olup uçucu küle ait kimyasal analiz sonuçları Çizelge 2’ de verilmiştir.

Çizelge 2. Uçucu kül kimyasal analiz sonuçları

Kimyasal Kompozisyon	
SiO <sub>2</sub> (%)	50,77
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	21,13
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	6,17
S+A+F	78,07
CaO (%)	12,44
MgO (%)	4,53
SO <sub>3</sub> (%)	1,33
Na <sub>2</sub> O (%)	0,24
K <sub>2</sub> O (%)	2,54

### 2.2. Metot (Method)

#### 2.2.1. Deney Örneklerinin Hazırlanması

(Preparing of Experimental Samples)

Çimento %0-5-10-20 oranlarında uçucu kül ile ikame edilmiş ve TS EN 196-1 standardında belirtilen

referans kum kullanılarak 40x40x160 mm boyutlarında deney numuneleri hazırlanmıştır[9]. Her bir grup karışımında gerekli olan su miktarı ASTM C230, C109 ve C1437 standartlarında belirtilen akma çapına göre akma tablası deneyi ile belirlenmiştir[10]. Numuneler kür havuzuna yerleştirildikten 28 gün sonra havuzdan çıkarılarak etüvde 100±5°C ’de 24 saat bekletilmiştir. Numunelerin hazırlanmasında kullanılan malzeme miktarları Çizelge 3’ de verilmiştir.

Çizelge 3. Çimento örneklerine ait karışım oranları

Seri No	UK İkame Miktarı	Çimento Miktarı (gr)	UK Miktarı (gr)	Su Miktarı (ml)	W/C
A	% 0	500	0	200	0,40
B	% 5	475	25	215	0,43
C	%10	450	50	229	0,46
D	%20	400	100	235	0,47

#### 2.2.2. Birim Ağırlık Deneyi (Density Test)

Hazırlanan çimento harcı numunelerinin sıcaklıklara maruz bırakılmadan önce kütle ve hacim ölçümleri yapılarak birim ağırlıkları hesaplanmıştır.

#### 2.2.3. Yüksek Sıcaklık Uygulaması

(Application of High Temperature)

28. günün sonunda istenilen sıcaklığa (100, 200, 300, 400, 500, 600°C) tabi tutulacak olan numuneler fırına yerleştirilerek fırın sıcaklığı bütün sıcaklıklarda dakikada 5°C artış olacak şekilde ayarlanmıştır. Fırın çalıştırdıktan sonra istenilen sıcaklığa ulaşıldığında kapatılmış ve oda sıcaklığına ulaşıldığında (20°C) numuneler fırından alınarak desikatörde soğumaya bırakılmıştır. Numuneler sıcaklıklara maruz bırakılmadan hemen önce ve sıcaklığa maruz kaldıktan sonra terazide tartılmıştır. İlk ve son ağırlıklar arasındaki farklar hesaplanarak numunelerin kütle kayıpları belirlenmiştir.

#### 2.2.4. Basınç ve Eğilme Dayanımı Deneyi

(Tests of Compressive and Flexural Strength)

Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan ve her bir grubu temsil eden 3 er adet numune desikatörde soğumaya bırakıldıktan 1 gün sonra alınarak basınç ve eğilme dayanımı değerleri tespit edilmiştir. Basınç ve eğilme dayanımı deneyleri TS-EN 196-1 standardına uygun olarak yapılmıştır[8-9].

## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

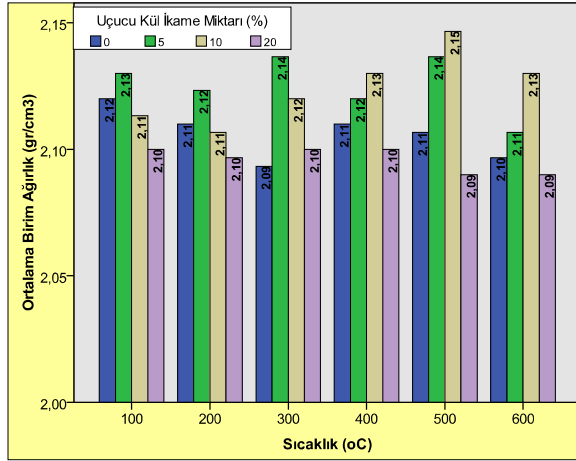
### 3.1. Birim Ağırlık (Density)

Farklı UK ikame oranlarına sahip olarak üretilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen birim ağırlık deneyi sonucunda elde edilen verilere ait açıklayıcı istatistikler Çizelge 4’te verilmiştir. Ayrıca ortalama birim ağırlık değerlerine ait grafik Şekil 1’de görülmektedir.

Çizelge 4. Birim ağırlık (g/cm<sup>3</sup>) değerlerine ait açıklayıcı istatistikler

U.Kül İkame Oranı (%)	Ortalama Birim Ağırlık				
	N	(g/cm <sup>3</sup> )	Std. Hata	Minimum	Maksimum
0	18	2,1061	0,00244	2,09	2,12
5	18	2,1256	0,00294	2,10	2,15
10	18	2,1244	0,00372	2,10	2,15
20	18	2,0961	0,00164	2,08	2,10

Birim ağırlık değerlerinin %5 ve %10 oranında UK ikameli numunelerde referans numunelere göre daha büyük olduğu görülmektedir.



Şekil 1. Ortalama birim ağırlık değerleri

Elde edilen deney verileri üzerinde UK ikame oranları arasında gerçekleştirilen varyans analizi sonucunda gruplar arasında istatistiksel anlamda önemli fark olduğu görülmüştür. Bu durum çimento numunelerinde UK ikame edilmesinden dolayı birim ağırlık değerlerinin önemli derecede değiştiği anlamına gelmektedir. Farklılığın hangi gruplardan kaynaklandığını tespit edebilmek için gruplar arasında Duncan çoklu karşılaştırma testi uygulanmıştır. Elde edilen Duncan testi sonuçları Çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelge 5. Birim ağırlık (g/cm<sup>3</sup>) değerlerine ait Duncan testi sonuçları

Uçucu Kül İkame Miktarı (%)	N	Farklı Olan Gruplar		
		1	2	3
20	18	2,0961		
0	18		2,1061	
10	18			2,1244
5	18			2,1256

Çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre; %5 UK ikameli numunelerin 2,12 g/cm<sup>3</sup> ile en büyük, %20 UK ikameli grubun ise 2,09 ile en küçük birim ağırlık değerine sahip olduğu, %5 ve %10 oranında UK ikameli numunelerin referans numuneye göre daha büyük birim ağırlığa sahip olduğu, %5 UK ikameli numunelerin

referans numuneye göre %2 oranında daha büyük değerlere sahip olduğu görülmüştür.

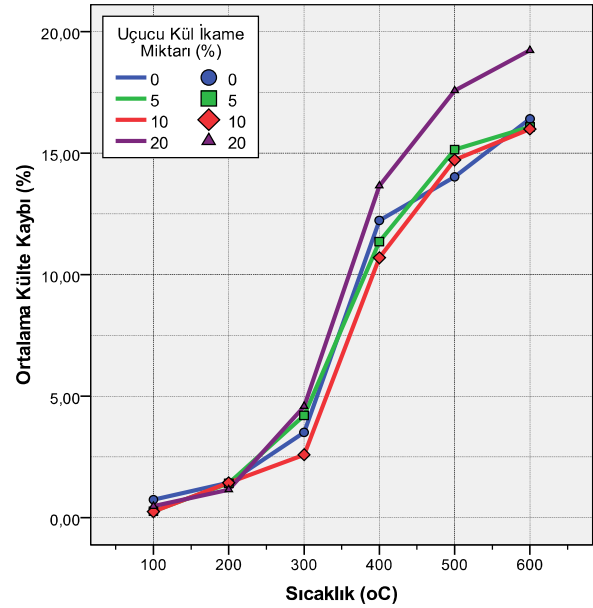
### 3.2. Kütle Kaybı (Mass Loss)

Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan UK ikameli numunelerin ölçülen kütle kaybı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler Çizelge 6'da verilmiştir. Ayrıca ortalama kütle kaybı değerlerine ait grafik Şekil 2'de görülmektedir.

Ortalama kütle kaybı değerleri incelendiğinde bütün UK ikame değerlerinde uygulanan sıcaklık artışına paralel olarak kütle kaybı değerlerinin de arttığı görülmektedir.

Çizelge 6. Kütle kaybı (%) değerlerine ait açıklayıcı istatistikler

Sıcaklık (°C)	N	Uçucu kül ikame oranı (%)			
		%0	%5	%10	%20
100	3	0,7467	0,2633	0,2533	0,4733
200	3	1,4367	1,4100	1,4400	1,1567
300	3	3,5133	4,2067	2,5933	4,5867
400	3	12,2333	11,3633	10,6967	13,6567
500	3	14,0233	15,1467	14,7167	17,5733
600	3	16,4067	16,0767	15,9933	19,2267



Şekil 2. Ortalama kütle kaybı değerleri

Deney verileri üzerinde her bir UK ikame oranında sıcaklıklar arasında gerçekleştirilen varyans analizi sonucunda gruplar arasında istatistiksel anlamda önemli fark olduğu görülmüştür. Diğer bir ifadeyle bütün UK ikame oranlarında çimento numunelerinin kütle kaybı değerlerinin sıcaklığa bağlı olarak önemli derecede değiştiği görülmüştür. Farklılığın hangi gruplardan kaynaklandığını tespit edebilmek için gruplar arasında Duncan çoklu karşılaştırma testi uygulanmıştır. Elde edilen Duncan testi sonuçları Çizelge 7'de verilmiştir.

Duncan testi sonuçlarına göre; %0 ve %20 UK ikameli gruplarda 100 ve 200 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin kütle kayıplarının birbirinden farklı olmadığı, ancak diğer bütün grupların birbirinden farklı olduğu görülmektedir.

%10 UK ikameli numunelerin 600 °C sonunda bütün gruplarda en küçük kütle kaybına sahip olduğu, %20 UK ikameli numunelerin ise %19,22 ile en büyük kütle kaybına sahip olduğu tespit edilmiştir. Bütün UK ikameli gruplarda kütle kayıplarının 400 °C'ye maruz kaldıktan sonra yaklaşık 3-4 kat arttığı, 400 °C altındaki sıcaklıklarda numunelerdeki kütle kayıplarının %5'in altında olduğu görülmektedir.

Çizelge 7. Kütle kaybı (%) değerlerine ait Duncan testi sonuçları

U.Kül İkame Miktarı (%)	Sıcaklık (oC)	N	Farklı Olan Gruplar					
			1	2	3	4	5	6
0	100	3	0,74					
	200	3	1,43					
	300	3		3,51				
	400	3			12,23			
	500	3				14,02		
	600	3					16,40	
5	100	3	0,26					
	200	3		1,41				
	300	3			4,20			
	400	3				11,36		
	500	3					15,14	
	600	3						16,07
10	100	3	0,25					
	200	3		1,44				
	300	3			2,59			
	400	3				10,69		
	500	3					14,71	
	600	3						15,99
20	100	3	0,47					
	200	3		1,15				
	300	3			4,58			
	400	3				13,65		
	500	3					17,57	
	600	3						19,22

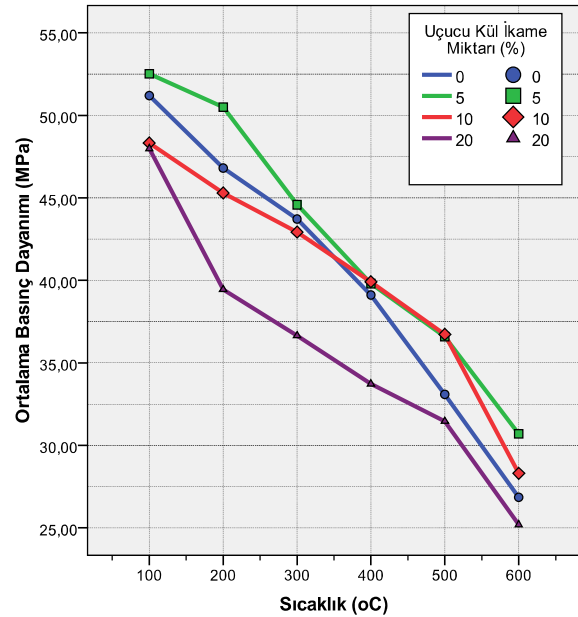
### 3.3. Basınç Dayanımı (Compressive Strength)

Basınç dayanımı deneyi sonucunda elde edilen verilere ait açıklayıcı istatistikler Çizelge 8'de verilmiştir. Ayrıca ortalama basınç dayanımı değerlerine ait grafik Şekil 3'te görülmektedir.

Çizelge 8 incelendiğinde %5 oranında UK ikameli numunelerin basınç dayanımı değerlerinin referans numuneye göre daha büyük değerler aldığı, numunelerin maruz kaldığı sıcaklık arttıkça dayanım değerlerinde de azalmaların meydana geldiği görülmektedir.

Çizelge 8. Basınç dayanımı (MPa) değerlerine ait açıklayıcı istatistikler

Sıcaklık (°C)	N	Uçucu kül ikame oranı (%)			
		%0	%5	%10	%20
100	3	51,2000	52,5200	48,3267	47,9933
200	3	46,8000	50,4967	45,2967	39,4467
300	3	43,7100	44,5833	42,9267	36,6467
400	3	39,1133	39,8033	39,9133	33,7267
500	3	33,0833	36,5800	36,7233	31,4600
600	3	26,8467	30,6933	28,3000	25,1933



Şekil 3. Ortalama basınç dayanımı değerleri

Deney verileri üzerinde her bir UK ikame oranında sıcaklıklar arasında gerçekleştirilen varyans analizi sonucunda gruplar arasında istatistiksel anlamda önemli fark olduğu görülmüştür. Diğer bir ifadeyle bütün UK ikame oranlarında çimento numunelerinin basınç dayanımı değerlerinin sıcaklığa bağlı olarak önemli derecede değiştiği görülmüştür. Farklılığın hangi gruplardan kaynaklandığını tespit edebilmek için gruplar arasında Duncan çoklu karşılaştırma testi uygulanmıştır. Elde edilen Duncan testi sonuçları Çizelge 9'da verilmiştir.

Duncan testi sonuçlarına göre; 600 °C'nin sonunda en fazla dayanım kaybına %20 UK ikameli grupta daha sonra ise %0 UK ikameli grupta olduğu, bütün UK ikameli gruplarda 600 °C'ye maruz kalan numunelerde en fazla dayanım kayıplarının görüldüğü, 400 °C'den itibaren ise dayanımlarda belirgin bir azalmanın olduğu görülmektedir.

%0 ve %10 UK ikameli numunelerde 200 ve 300 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin basınç dayanımı değerlerinin birbirinden farklı olmadığı, %5 UK ikameli numunelerde ise 100 ve 200 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin basınç dayanımı değerlerinin birbirinden farklı olmadığı, ancak diğer bütün grupların birbirinden farklı olduğu görülmektedir.

%5 UK ikameli numunelerin 600 °C sonunda bütün gruplarda en az dayanım kaybına uğradığı yani en büyük basınç dayanımına sahip olduğu, %20 UK ikameli numunelerin ise 25,19 MPa ile en küçük basınç dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir. Bütün UK ikameli gruplarda en büyük dayanım kaybının 600 °C'ye maruz kalan numunelerde meydana geldiği görülmektedir.

Çizelge 9. Basınç dayanımı (MPa) değerlerine ait Duncan testi sonuçları

U.Kül İkame Miktarı (%)	Sıcaklık (°C)	N	Farklı Olan Gruplar				
			1	2	3	4	5
0	600	3	26,84				
	500	3		33,08			
	400	3			39,11		
	300	3				43,71	
	200	3					46,80
	100	3					51,20
5	600	3	30,69				
	500	3		36,58			
	400	3			39,80		
	300	3				44,58	
	200	3					50,49
	100	3					52,52
10	600	3	28,30				
	500	3		36,72			
	400	3			39,91		
	300	3				42,92	
	200	3					45,29
	100	3					48,32
20	600	3	25,19				
	500	3		31,46			
	400	3			33,72		
	300	3				36,64	
	200	3					39,44
	100	3					47,99

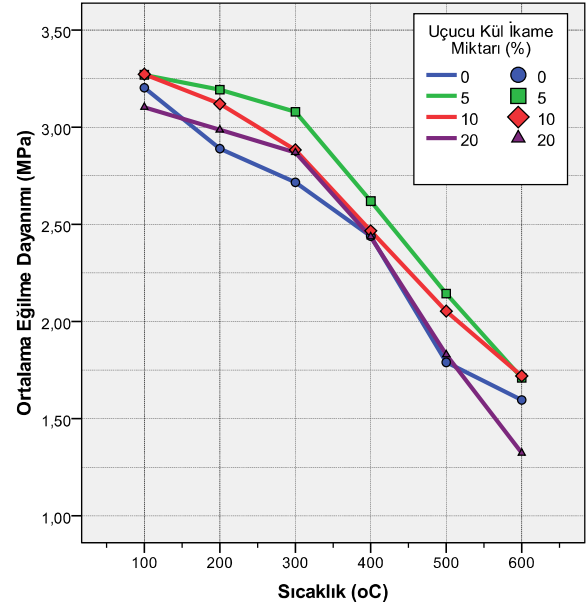
### 3.4. Eğilme Dayanımı (Flextural Strength)

Eğilme dayanımı deneyi sonucunda elde edilen verilere ait açıklayıcı istatistikler Çizelge 10'da verilmiştir. Ayrıca ortalama basınç dayanımı değerlerine ait grafik Şekil 4'te görülmektedir.

Çizelge 10. Eğilme dayanımı (MPa) değerlerine ait açıklayıcı istatistikler

Sıcaklık (°C)	N	Uçucu kül ikame oranı (%)			
		%0	%5	%10	%20
100	3	3,2033	3,2700	3,2733	3,1033
200	3	2,8900	3,1933	3,1200	2,9867
300	3	2,7167	3,0800	2,8833	2,8700
400	3	2,4400	2,6200	2,4667	2,4367
500	3	1,7900	2,1433	2,0533	1,8300
600	3	1,5967	1,7100	1,7200	1,3233

Çizelge 10 incelendiğinde %5 oranında UK ikameli numunelerin eğilme dayanımı değerlerinin referans numuneye göre 100 °C sıcaklıktakiler hariç daha büyük olduğu, numunelerin maruz kaldığı sıcaklık artışı ile ters orantılı olarak eğilme dayanımı değerlerinin de azalmaların meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 4. Ortalama eğilme dayanımı değerleri

Eğilme dayanımı deneyinden elde edilen veriler üzerinde UK ikame oranları arasında gerçekleştirilen varyans analizi sonucunda gruplar arasında istatistiksel anlamda önemli fark olduğu görülmüştür. Bu durum çimento numunelerinde UK ikame edilmesinden dolayı eğilme dayanımı değerlerinin önemli derecede değiştiği anlamına gelmektedir. Farklılığın hangi gruplardan kaynaklandığını tespit edebilmek için gruplar arasında Duncan çoklu karşılaştırma testi uygulanmıştır. Elde edilen Duncan testi sonuçları Çizelge 11'de verilmiştir.

Duncan testi sonuçlarına göre; 600 °C'nin sonunda en fazla dayanım kaybının %57 ile %20 UK ikameli numunelerde olduğu, en az dayanım kaybının ise yaklaşık %47 ile %5 UK ikameli numunelerde olduğu tespit edilmiştir.

Eğilme dayanımı değerlerinin basınç dayanımı değerlerinde olduğu gibi bütün UK ikame oranlarında sıcaklık artışı ile ters orantılı olarak azaldığı görülmüştür.

600 °C'nin sonunda referans numunelerde %50, %10 UK'lı numunelerde %48 oranında eğilme dayanımı değerleri azalmıştır.

%5 ve %10 oranında UK ikamesi ile hazırlanan numunelerde eğilme dayanımı değerleri bakımından referans numuneye göre daha iyi sonuçlar alındığı, UK ikamesi ile yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerin dayanım kayıplarının daha az olduğu görülmektedir.

Ayrıca %0 UK ikameli gruplarda 200 ve 300 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin, %5 UK ikameli grupta 1000, 200 ve 300 °C sıcaklığa maruz kalan nu-

munelerin, %10 UK ikameli grupta 100 ve 200 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin, %20 UK ikameli grupta ise 100, 200 ve 300 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin eğilme dayanımı değerlerinin birbirinden farklı olmadığı ancak diğer bütün grupların birbirinden farklı olduğu görülmektedir.

Çizelge 11. Eğilme dayanımı (MPa) değerlerine ait Duncan testi sonuçları

U.Kül İkame Miktarı (%)	Sıcaklık (°C)	N	Farklı Olan Gruplar				
			1	2	3	4	5
0	600	3	1,5967				
	500	3	1,7900				
	400	3		2,4400			
	300	3		2,7167	2,7167		
	200	3			2,8900		
	100	3				3,2033	
5	600	3	1,7100				
	500	3		2,1433			
	400	3			2,6200		
	300	3				3,0800	
	200	3				3,1933	
	100	3				3,2700	
10	600	3	1,7200				
	500	3		2,0533			
	400	3			2,4667		
	300	3				2,8833	
	200	3					3,1200
	100	3					3,2733
20	600	3	1,3233				
	500	3		1,8300			
	400	3			2,4367		
	300	3				2,8700	
	200	3				2,9867	
	100	3				3,1033	

#### 4.SONUÇ (CONCLUSION)

%0-5-10-20 oranlarında uçucu kül ile ikame edilerek hazırlanan 40X40X160 mm boyutlarındaki çimento numunelerinin her bir serisi 100-200-300-400-500-600°C sıcaklıklara tabi tutulmuş daha sonra numuneler üzerinde basınç ve eğilme dayanımı ve kütle kaybı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca hazırlanan çimento numunelerinin birim ağırlıkları da hesaplanmıştır. Sıcaklık ve uçucu kül miktarına bağlı olarak basınç ve eğilme dayanımı ile kütle kaybı değerleri istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve şu sonuçlar elde edilmiştir.

%5 ve %10 oranında uçucu kül ikamesi ile referans numuneye göre çimento mekanik ve fiziksel özelliklerinde iyileşmeler sağlanmıştır. Ancak %20 UK ikameli numunelerin referans numuneye göre daha düşük dayanım özelliklerine sahip olduğu görülmüştür.

Diğer taraftan yüksek sıcaklığa maruz bırakılan çimento numunelerinde 100, 200 ve 300 °C dereceye kadar çimento basınç, eğilme dayanımı ve kütle kaybı değerlerinde büyük değişimlerin olmadığı, 400 °C'den

itibaren çimento dayanım ve kütle kaybı değerlerinde önemli kayıpların meydana geldiği, bütün UK ikame oranlarında 600 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin en fazla dayanım ve kütle kaybına uğradıkları tespit edilmiştir.

600 °C'nin sonunda;

Kütle kaybı değerleri bakımından en fazla kaybın %19,22 ile %20 UK ikameli numunelerde, en az kaybın ise yaklaşık %15,99 ile %10 UK ikameli numunelerde olduğu,

Basınç dayanımı değerleri bakımından en fazla dayanım kaybının %48 ile referans ve %20 UK ikameli numunelerde, en az dayanım kaybının ise yaklaşık %41 ile %5 ve %10 UK ikameli numunelerde olduğu,

Eğilme dayanımı değerleri bakımından en fazla dayanım kaybının %57 ile %20 UK ikameli numunelerde, en az dayanım kaybının ise yaklaşık %47 ile %5 UK ikameli numunelerde olduğu görülmüştür.

Çevresel faktörler göz önünde bulundurularak tasarlanan bir beton sürdürülebilir betondur. Betonarme yapılarda yangın durumu göz önüne alındığında yüksek sıcaklık sürdürülebilir beton tasarımında etkili bir çevresel faktör olduğu betonun mekanik özelliklerinde önemli kayıplara sebep olduğu görülmüştür. %5 oranında uçucu kül ikamesi ile çimento mekanik ve fiziksel özelliklerinde iyileşmelerin sağlanabileceği, %10'a kadar uçucu kül ikamesi ile çimento harçlarının yüksek sıcaklık etkisinden daha az zarar göreceği tespit edilmiştir.

#### 5. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- 1) Kızılkıranat, A., Yüzer, N., "Yüksek Sıcaklık Etkisindeki Harcın Basınç Dayanımı-Renk Değişimi İlişkisi", İMO Teknik Dergi, Yazı 289, 4381-4392 (2008).
- 2) Demirel, F., Altıntaş,S., "Yapı Malzemelerinin Avrupa Yangına Tepki Sınıfları, Konunun Türkiye - Avrupa Genelinde İrdelenmesi ve Ulusal Sınıfların Yeni Avrupa Sınıflarına Uyarlanması", Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi, Cilt 21 No 1, 39-54 (2006).
- 3) Özkan, Ö., "Yüksek Fırın ve Çelikhane Cürufu Katkılı Harçların Basınç Dayanımına Yüksek Sıcaklığın Etkisi", 6. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, 16-18 Kasım 2005.
- 4) Yaprak, H., Şimşek O., Aruntaş,Y., "Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufunun Süper Akışkanlaştırıcı Katkılı Beton Özelliklerine Etkisi", Beton 2004 Kongresi, İstanbul, Türkiye, 707-715 (10-13 Haziran 2004).
- 5) Aruntaş, Y., "Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli", Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 21 No 1, 193-203 (2006).
- 6) Çelik, Ö., Yurter, G., Kan, S., Yeprem, A., "Farklı Puzolanik Katkıların Çimento Harçlarının Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi", Doğu Üniversitesi Dergisi, 5(2),147-154 (2004).
- 7) Baradan, B., "Portland Çimentosu-Uçucu Kül-Yüksek Fırın Cürufu Esaslı Bağlayıcıların Yüksek Sıcaklık Davranışının İncelenmesi", Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, TÜBİTAK Proje no. 1031003/2004-373, (2004).
- 8) Ünal, O., Uygunoğlu, T., "Soma Termik Santral Atığı Uçucu Külün İnşaat Sektöründe Değerlendirilmesi",

- Türkiye 14. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, Zonguldak, Türkiye, (02-04 Haziran 2004).
- 9) TS EN 196-1 Çimento Deney Metotları- Bölüm 1: Dayanım Tayini, *TSE*, (2002).
- 10) C109/C109M-02 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), *American Society For Testing And Materials*, (2002).