

PUZOLAN KATKISININ BETONUN KARBONATLAŞMA DERİNLİĞİNE ETKİSİSerkan SUBAŞI¹, Ahmet BEYÇİOĞLU², Bekir ÇOMAK³¹Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 81620, Düzce, serkansubasi@duzce.edu.tr²Düzce Üniversitesi, Kaynaşlı Meslek Yüksekokulu, Yapı Ressamlığı Bölümü, 81900, Düzce, abeycioglu@duzce.edu.tr³Düzce Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümü, 81620, Düzce, bekircomak@duzce.edu.tr

Geliş Tarihi: 13.07.2010

Kabul Tarihi: 28.02.2011

ÖZET

Bu araştırmanın amacı farklı oranlarda uçucu kül ikamesinin betonun karbonatlaşma derinliğine olan etkisinin belirlenmesidir. Bu amaçla, %0, %5, %10, %20 ve %30 oranlarında Orhaneli termik santralinden temin edilen C sınıfı uçucu kül ikame edilmiş beton karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlarda su/ bağlayıcı oranı sabit tutulmuştur. Beton karışımları 75x75x15cm lik prizma kalıplarına dökülmüştür. 28 gün kür edilen prizma numunelerden 70 mm çapında 150 mm boyunda karot örnekler alınmıştır. Karot örnekler hava geçirimsiz bir kabın içerisine konularak her gün kap hacminin %40'ı oranında CO₂ gazı penetrasyonuna maruz bırakılmıştır. Kabın içerisinden 1., 2., 3. ve 4. haftalarda her bir beton türü için 3'er adet örnek çıkarılarak, sulu başkesme makinesinde ikiye kesilmiş ve phenolphthalein (C₂₀H₁₄O₄) indikatörü ile karbonatlaşma derinliği ölçümleri yapılmıştır.

Sonuç olarak, zamana bağlı olarak karbonatlaşma derinliği değerlerinin artış gösterdiği, uçucu kül ikame miktarı arttıkça karbonatlaşma derinliğinin önemli miktarda arttığı, %0 uçucu kül katkılı referans numunelerde en az, %30 uçucu kül katkılı betonlarda ise en çok karbonatlaşmanın meydana geldiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Beton, Karbonatlaşma, Uçucu kül, CO₂, Pozolan.

ABSTRACT

The aim of this study is to determine the effects of substitution of fly ash at different rates on concrete carbonation depth. For this purpose, the concrete mixes having C type fly ash obtained from Orhaneli thermal power plant by the rates of 0%, 5%, 10%, 20% and 30% were prepared. Water/binder ratio was kept constant in the prepared mixes. The concrete samples were poured in the 75x75x15 cm prism molds. 70Ø150 mm core samples were obtained from the prism specimens after the twenty eight days. The core samples were exposed the carbon dioxide gas penetration in the air-permeable container at a rate of 40% of container volume. The measuring of the carbonation dept were obtained 1st, 2nd, 3rd and 4th weeks by using phenolphthalein (C₂₀H₁₄O₄) indicator.

As a result, it is determined that the carbonation depth values were increased depending on the time, while increase the amount of fly ash substitution a significant increase occurred carbonation depth values, the minimum carbonation depth were determined from the reference (0% fly ash) sample and the maximum carbonation depth were determined from the concrete having 30% fly ash substitute.

Keywords: Concrete, Carbonation, Fly ash, CO₂, Pozzolan

1. GİRİŞ

Çimento, kalker ve kil karışımı hammaddelerin pişirilmeleri ile ortaya çıkan ve klinker olarak adlandırılan malzemenin çok az miktarda alçıtaşı ile birlikte öğütülmesi sonucunda elde edilen üründür; su ile birleştiğinde hidrolik bağlayıcılık özelliği kazanmaktadır [1].

Portland çimentosu, üretim aşamaları enerji yoğun bir işlem olması nedeniyle maliyeti yüksek bir üründür. Bu nedenle çimento maliyetini ve tüketimini azaltmak için bağlayıcı özelliğe sahip inorganik malzemeler katkılı çimento üretmek için kullanılmaktadır. Bu malzemeler doğal puzolanlar ve yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis

dumanı gibi endüstriyel tesis atıklarıdır. Katkılı çimento, portland çimentosuna göre çok daha az enerji tüketimi sağlaması ve bazı özelliklerinin getirdiği ilave katkılardan dolayı yapı sektöründe geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Beton uygulamalarında tras katkılı çimentoların kullanılması; betonun işlenebilirliğini arttırmak, geçirgenliği azaltmak, sülfat etkisine karşı dayanımı arttırmak, çatlamalara karşı dayanımı iyileştirmek, uzun dönemde dayanıklılığı arttırmak gibi çeşitli teknolojik avantajlar da sağlamaktadır [2].

Betonda meydana gelen karbonatlaşma derinliği aşağıda belirtilen formül ile hesaplanabilmektedir.

$$C = K\sqrt{T} \quad (1)$$

Bu formülde,

C: Karbonatlaşma derinliğini (mm)

T: Süreyi (yıl)

K: Fiziksel değişkenleri içeren parametreyi (düşük dayanımlı betonlar için genellikle 3-4 mm/yıl^{0.5}'dan büyük bir değerdir) ifade etmektedir [3,4].

Betonun maruz kalacağı dış ortam koşullarının değişken olmasından dolayı pratikte bu bağıntıyı kullanmak pek güvenli olmamaktadır. Karbonatlaşma derinliğinin yerinde örnekler alınarak belirlenmesi daha güvenli sonuçlar vermektedir. Betonarme yapılarda meydana gelen karbonatlaşma donatıda korozyon oluşmasına neden olabilmektedir [5].

Atmosferde asit oluşturan gazlardan olan CO₂ ve SO₂ üç aşamada reaksiyon göstererek karbonatlaşma gelişimini aşağıdaki gibi gerçekleştirirler.

1. Aşama: Gazların betonun gözenek sistemine işlemesi
2. Aşama: Gazların gözenek suyu ile oluşturduğu reaksiyon



3. Aşama: Oluşan asitlerin gözenek suyu içinde çözülmüş olan çimentonun alkali bileşenleri ile reaksiyon yaparak bunları nötr hale getirmesi,



Aslında daha karmaşık olan en önemli reaksiyon ise basitleştirilmiş olarak aşağıda verilmiştir.



Oluşan kalsiyum karbonatın pH değeri 8,3 tür. pH değerinin 9,5 in altına düşmesi halinde beton, betonarme çeliğini koruma etkinliğini kaybeder. Pasif tabaka kararsız duruma geçer. Bazı araştırmacılar ise bu durumun betonun pH değerinin 11,5 değerinin altına düşmesiyle görülebileceğini belirtmektedir [6].

Karbonatlaşma deneyi normal ortamda ve laboratuvarlarda hızlandırılmak suretiyle iki şekilde yapılmaktadır. Genel olarak herhangi bir katkının veya beton içeriğindeki bir değişikliğin karbonatlaşma hızına veya derinliğine ne şekilde etki yaptığı yönündeki araştırmalar hızlandırılmış karbonatlaşma test tekniği kullanılarak yapılmaktadır. Normal ortamdaki karbonatlaşma ise genelde o bölgenin çevre koşullarının yıllara bağlı olarak karbonatlaşmaya etkisinin incelenmesinde kullanılmaktadır. [6]. Karbonatlaşma, beton yüzeyinden başlayarak, içeriye doğru ilerlemektedir. O nedenle, yüzeye yakın bölgeler (yüzeyden 2,5-3,0 cm kadar içerdeki beton) karbonatlaşmanın etkisi altındadır. Karbonatlaşmanın gerçekleşebilme hızı, havadaki karbondioksit miktarının ve nem miktarının

yanı sıra, betonun geçirirliğine bağlıdır. Karbondioksit miktarının yüksek olması, doğal olarak, karbonatlaşmayı artırmaktadır. Relatif nemin %50 civarında olması da, karbonatlaşmayı artırmaktadır. Relatif nemin % 25'den az, veya %100 olması durumunda, karbonatlaşma yer almamaktadır. Karbonatlaşmanın yer alıp almadığını anlayabilmek için, taze betonun yüzeyinden bir parça kopartılarak, bu beton parçasının yüzeyine phenolphthalein uygulanmaktadır. Serbest $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pembe renk gösterir iken, karbonatlaşmış kısım göstermemektedir [1].

Karbonatlaşma derinliğini belirlemek için betonu mümkün olduğunca yüzeye dik kesip, kesilen temiz yüzeye indikatör sıvı püskürtülür. Karbonatlaşmış kısım renksiz kalırken, karbonatlaşmamış kısım sıvı ile reaksiyona girip renk verir. Bu amaçla genellikle %0,1 phenolphthalein alkol eriyiği kullanılır. Bu eriyik karbonatlaşmamış tabakayı kırmızı-mor renge boyarken pH değeri $\leq 8,3$ olan bölgeyi boyamaz [7].

Betonun geçirirliliği arttıkça ve beton yüzeyinde mikro çatlaklar çoğaldıkça, karbonatlaşmanın etki ettiği derinlik artmaktadır [8].

Bu çalışmada farklı oranlarda uçucu kül ikamesinin beton karbonatlaşma derinliğine olan etkisi deneysel olarak belirlenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Materyal

Çimento: Bu çalışmada Bolu Aslan Çimento Fabrikası üretimi olan CEM I 42,5 R Portland çimentosu (PÇ) kullanılmıştır. Bu çimentonun bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Çalışmada Kullanılan Çimentonun Bazı Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Kimyasal kompozisyon	
Çözünmeyen kalıntı (%)	0,38
MgO (%)	2,41
SO ₃ (%)	2,30
K ₂ O (%)	0,55
Serbest CaO (%)	0,74
C ₃ A (%)	-
2C ₃ A + C+AF (%)	-
Fiziksel özellikler	
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	3,10
Özgül yüzey (cm ² /g)	4280
Su / çimento oranı (%)	28,0
Priz başlangıcı (dakika)	200
Priz sonu (dakika)	240
Hacim genleşmesi (mm)	0,5
Mekanik özellikler	
Basınç dayanımı (N/mm ²)	
2. Gün	30,3
7. Gün	45,4
28.Gün	55,8

Uçucu kül: Deneylede Orhaneli termik santralinden temin edilen C sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu küle ait kimyasal analiz sonuçları Çizelge 2'de verilmiştir. (Çizelge 2).

Çizelge 2. Uçucu külün kimyasal analiz sonuçları

Bileşenler	(%)
SiO ₂ (S)	41,77
Al ₂ O ₃ (A)	13,95
Fe ₂ O ₃ (F)	4,84
CaO	17,95
MgO	7,04
SO ₃	2,59
Na ₂ O	2,94
K ₂ O	2,14
S+A+F	64,56

Agrega: Beton üretiminde Düzce iline ait Küçük Melen deresinden temin edilen üç farklı boyutta kırılmış agrega kullanılmıştır.

Karışım suyu: Yapılan bu deneysel çalışmada Düzce iline ait şehir içme suyu kullanılmıştır. Denede kullanılan karışım suyu için herhangi bir analiz yapılmamıştır.

2.2. Metot

2.2.1. Deney numunelerinin hazırlanması

Numuneler hazırlanırken karışım içerisinde %0, %5, %10, %20 ve %30 oranlarında Orhaneli termik santralinden temin edilen C sınıfı uçucu kül ikame edilmiş beton karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlarda su/bağlayıcı oranı sabit tutulmuştur. Beton karışımları 75x75x15 cm lik prizma kalıplarına dökülmüştür. 28 gün kür edilen prizma numunelerden 70 mm çapında 150 mm boyunda karot örnekler alınmıştır. TS 802'ye göre beton karışım hesabı yapılmıştır [9]. Su/bağlayıcı madde oranı sabit tutulmuş 1 m³ beton için karışım miktarları Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. 1 m³ beton için karışım miktarları

Uçucu Kül İkame Oranı (%)	Çimento (kg)	Uçucu Kül (kg)	Su (kg)	Kum(kg) (0-5 mm)	Agrega 1 (kg) (5-15 mm)	Agrega 2 (kg) (15-25 mm)	S/ B
0	300	0	180	1028	421	421	0,6
5	285	15	180	1028	421	421	0,6
10	270	30	180	1028	421	421	0,6
20	240	60	180	1028	421	421	0,6
30	210	90	180	1028	421	421	0,6

2.2.2 Phenolphthalein indikatörü ile karbonatlaşma derinliğinin belirlenmesi

Karbonatlaşma derinliği ölçümü, uçucu kül ikame oranına göre her beton türünden 3 adet olmak üzere 4 hafta için toplamda 60 adet 70 mm çapında karot örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Alınan karot örnekleri iç hacmi 60x60x80 cm boyutlarındaki kabın içerisine yerleştirilmiş ve iç hacmin % 40'ı kadar CO₂ gazı penetrasyonuna maruz bırakılmıştır. Kabın içerisinden 1., 2., 3. ve 4. haftalarda her bir beton türü için 3'er adet örnek çıkarılarak, sulu baş kesme makinesinde ikiye kesilmiş ve phenolphthalein (C₂₀H₁₄O₄) indikatörü ile karbonatlaşma derinliği ölçümleri yapılmıştır. Bilindiği gibi, beton yüzeyine püskürtülen baz indikatörü, pH değeri 11-12,5 olan karbonatlaşmamış betonu koyu pembe renge dönüştürür. Karbonatlaşma sonucu pH değeri 8-9'a düşmüş beton, renk değişimi göstermez. Baz indikatörü olarak kullanılan çözelti phenolphthalein çözeltisidir [1,10,11]. Karbonatlaşma derinliğinin belirlenmesi deneyi, Baradan vd. [11] ve Hearn et al. [12]'da belirtilen metoda göre yapılmıştır. pH'ı 8,2-9,8 olan phenolphthalein'in % 1 olarak kullanıldığı, etil alkol ile

hazırlanan çözeltinin püskürtülmesinden hemen sonra beton karot örneklerde yüzeyinde kırmızı-mor renge dönüşen karbonatlaşmamış ve yüzeyden itibaren rengi değişmeyen iki bölge oluşmuştur. Karbonatlaşma derinliği beton yüzeyinden itibaren 0,1 mm hassasiyetle her karot örnek için en az 10 farklı noktadan ölçülmüştür.

2.2.3. Boşluk oranı deneyi

Boşluk oranı tayini deneyi, beton bloklardan alınan karot numuneler üzerinde TS 3624 standardında belirtilen esaslara uygun olarak gerçekleştirilmiştir [13]. Boşluk oranının hesaplanmasında aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$B_0 = \frac{(C-A)}{(C-D)} 100 \quad (6)$$

Formülde;

B_0 = Boşluk oranı(%)

C = Doygun kuru yüzey ağırlığı(gr)

A = Etüv kurusu ağırlığı(gr)

D = Su içindeki ağırlık(gr)

fade etmektedir.

2.2.4. Basınç dayanımı deneyi

Karbonatlaşma deneyine tabi tutulmuş numuneler karbonatlaşma derinliği ölçümü yapıldıktan sonra TS EN 12390-3 standardında belirtilen esaslara uygun olarak basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuşlardır [14]. Deneyde, 2000 kN yükleme kapasiteli, dijital kumanda üniteli ve yükleme hızı ayarlanabilen tek eksenli beton basınç test cihazı kullanılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Karbonatlaşma Derinliği

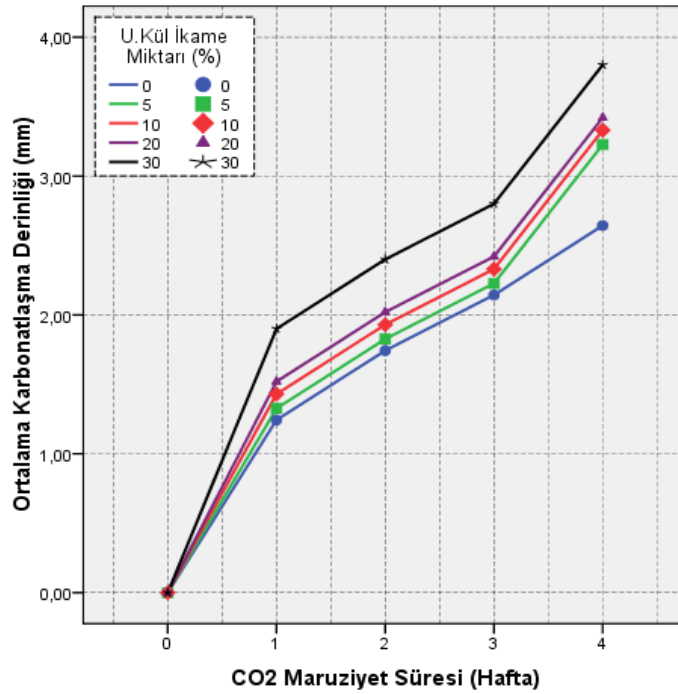
Farklı uçucu kül oranlarında hazırlanan ve 4 hafta süre ile hızlandırılmış karbonatlaşma testine tabi tutulan numuneler üzerinde phenolphthalein indikatörü ile gerçekleştirilen karbonatlaşma derinliği değerlerine ait açıklayıcı istatistikler Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Karbonatlaşma derinliği değerlerine ait açıklayıcı istatistikler

U.Kül İkame Oranı (%)	N	Ortalama Karbonatlaşma Derinliği (mm)				
		0.Hafta	1.Hafta	2.Hafta	3.Hafta	4.Hafta
0	3	0,0000	1,2433	1,7433	2,1433	2,6433
5	3	0,0000	1,3267	1,8267	2,2267	3,2267
10	3	0,0000	1,4300	1,9300	2,3300	3,3300
20	3	0,0000	1,5200	2,0200	2,4200	3,4200
30	3	0,0000	1,9000	2,4000	2,8000	3,8000

Çizelge 4 incelendiğinde UK ikame oranına ve zamana bağlı olarak karbonatlaşma derinliği değerlerinin değiştiği görülmektedir. UK ikame oranı ve CO₂ gazına maruz kalma süresi arttıkça karbonatlaşma derinliği değerleri de artmaktadır. En fazla karbonatlaşma %30 UK ikameli 4 hafta süresince CO₂ gazına maruz kalan betonlarda görülmüştür. Ortalama karbonatlaşma derinliği değerlerine ait grafik Şekil 1'de görülmektedir.

4. hafta sonunda elde edilen karbonatlaşma derinliği verileri üzerinde gruplar arasında varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Varyans analizi sonucunda gruplar arasında istatistiksel anlamda önemli fark olduğu görülmüştür ($p \leq 0.05$). Diğer bir ifadeyle UK ikame miktarına bağlı olarak karbonatlaşma derinliği değerlerinin önemli miktarda değiştiği tespit edilmiştir.



Şekil 1. Ortalama karbonatlaşma derinliği değerleri

Beton karbonatlaşma derinliği değerleri bakımından hangi grupların birbirinden farklı olduğunu tespit edebilmek amacıyla LSD (Least Significant Difference) en küçük anlamlı farklılık testi uygulanmıştır. Gerçekleştirilen LSD testi sonuçları Çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelge 5. Karbonatlaşma derinliği değerlerine ait LSD testi sonuçları

U.Kül İkame Miktarı (%)	Uçucu Kül İkame Miktarı (%)					Ortalama Karbonatlaşma Derinliği (mm)
	0	5	10	20	30	
0		f*	f*	f*	f*	2,6433
5	f*				f*	3,2267
10	f*				f*	3,3300
20	f*				f*	3,4200
30	f*	f*	f*	f*		3,8000

f* =Gruplar arasında fark vardır (p≤0,05).

LSD testi sonuçlarına göre; referans numunenin bütün UK ikameli betonlardan istatistiksel anlamda farklı olduğu, 2,6 mm ile referans betonun en küçük karbonatlaşma derinliğine sahip olduğu, 3,8 mm ile %30 oranında UK ikameli betonların en büyük karbonatlaşma derinliğine sahip olduğu, referans betonda %30 UK'li betonlara göre %31 oranında daha az karbonatlaşma meydana geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca UK ikameli betonların karbonatlaşma değeri bakımından istatistiksel anlamda birbirinden farklı olmadığı görülmüştür. Beton karışımlarında S/Ç oranlarının sabit tutulmasından ve UK'ün çimentoya nazaran daha ince olduğundan dolayı UK ikameli betonlarda referans numuneye göre karışımların kuru olduğu gözlenmiştir. Bu durum beton

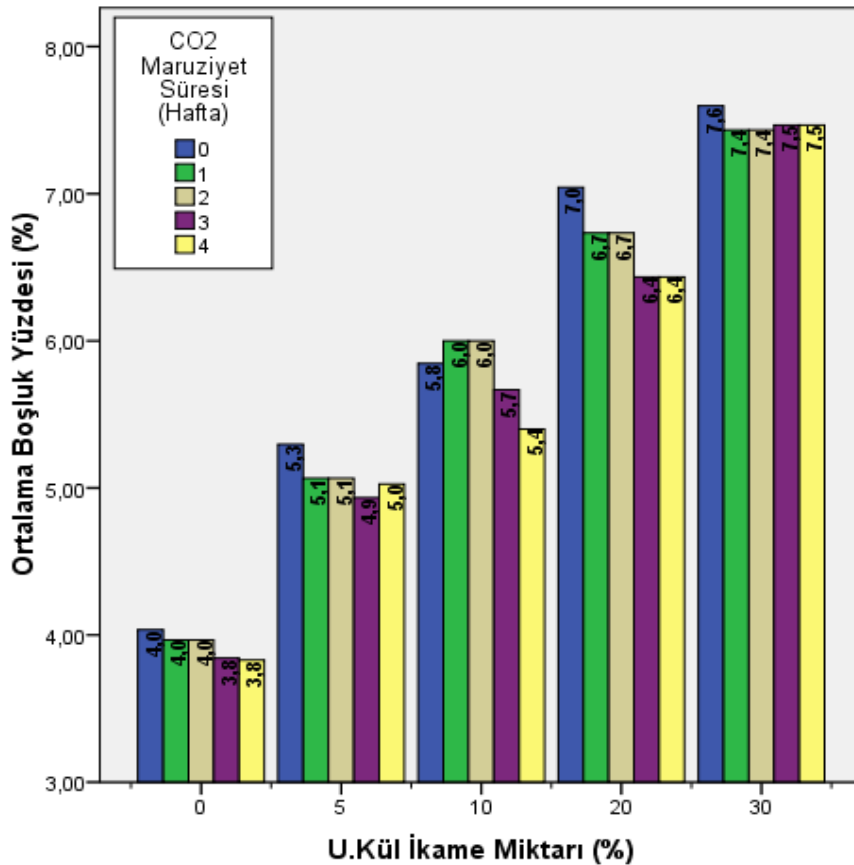
yerleştirmesinde bir takım zorluklara neden olmuş ve boşluk miktarları yüksek numunelerin üretilmesine sebep olmuştur. Bundan dolayı UK ikameli betonların karbonatlaşmasının daha hızlı meydana geldiği düşünülmektedir.

3.2. Boşluk Oranı

Farklı uçucu kül oranlarında hazırlanan beton numuneler karbonatlaşma testine tabi tutulmadan önce boşluk yüzdeleri belirlenmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına ait açıklayıcı istatistikler Çizelge 6'da verilmiştir. Ayrıca ortalama boşluk oranı değerlerine ait grafik Şekil 2'de görülmektedir.

Çizelge 6. Boşluk oranı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler

U.Kül İkame Oranı (%)	N	Ortalama Boşluk Oranı (%)				
		0.Hafta	1.Hafta	2.Hafta	3.Hafta	4.Hafta
0	3	4,0367	3,9667	3,9667	3,8433	3,8300
5	3	5,2967	5,0667	5,0667	4,9333	5,0267
10	3	5,8467	6,0000	6,0000	5,6667	5,0667
20	3	7,0433	6,7333	6,7333	6,4333	6,4333
30	3	7,5967	7,4333	7,4333	7,4667	7,4667



Şekil 2. Ortalama boşluk oranı değerleri

Ortalama boşluk oranı değerleri incelendiğinde UK ikame oranına bağlı olarak beton boşluk oranlarının değiştiği görülmektedir. Zamana bağlı olarak ise boşluk oranlarında çok küçük değişiklikler meydana gelmektedir. UK ikame oranı arttıkça boşluk oranı değerleri de artmaktadır. En fazla boşluk oranının %30 UK ikameli betonlarda olduğu, hatta ilerleyen haftalarda çimento hidrasyonundan dolayı boşluk oranlarının çok az bir miktarda olsa azaldığı görülmektedir. 4. hafta sonunda elde edilen boşluk oranı verileri üzerinde gruplar arasında gerçekleştirilen varyans analizi sonucunda gruplar arasında istatistiksel anlamda önemli fark olduğu görülmüştür ($p \leq 0.05$). Diğer bir ifadeyle UK ikame miktarına bağlı olarak boşluk oranı değerlerinin önemli miktarda değiştiği tespit edilmiştir.

Beton boşluk oranı değerleri bakımından hangi grupların birbirinden farklı olduğunu tespit edebilmek amacıyla LSD testi uygulanmıştır. Gerçekleştirilen LSD testi sonuçları Çizelge 7’de verilmiştir.

LSD testi sonuçlarına göre; referans numunenin bütün UK ikameli betonlardan istatistiksel anlamda farklı olduğu, %3,83 ile referans betonun en küçük boşluk oranına sahip olduğu, %7,46 ile %30 oranında UK ikameli betonların en büyük boşluk oranına sahip olduğu, referans betonun %30 UK’li betona göre %48 oranında daha az boşluk oranına sahip olduğu tespit edilmiştir. %5 ve %10 UK ikameli betonların hariç diğer tüm istatistiksel anlamda birbirinden farklı olduğu görülmüştür.

Çizelge 7. Boşluk oranı değerlerine ait LSD testi sonuçları

U.Kül İkame Miktarı (%)	U.Kül İkame Miktarı (%)					Ortalama Boşluk Oranı (%)
	0	5	10	20	30	
0		f*	f*	f*	f*	3,8300
5	f*			f*	f*	5,0267
10	f*			f*	f*	5,0667
20	f*	f*	f*		f*	6,4333
30	f*	f*	f*	f*		7,4667

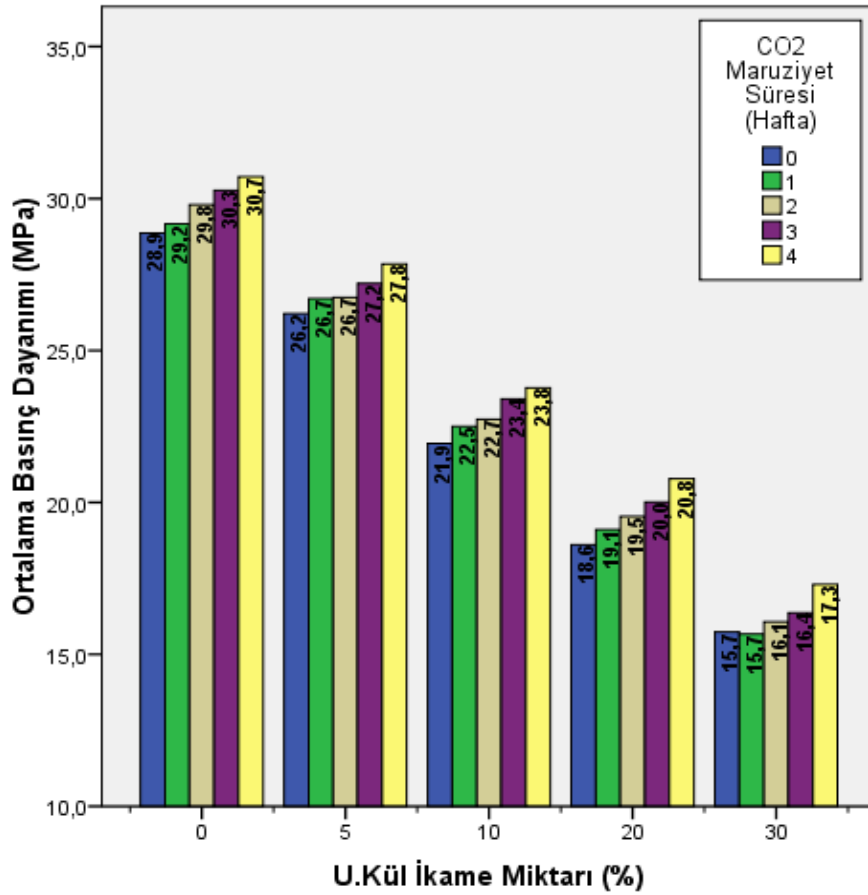
f* =Gruplar arasında fark vardır ($p \leq 0,05$).

3.3. Basınç Dayanımı

Beton numuneler karbonatlaşma testine tabi tutulduktan sonra basınç dayanımları belirlenmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına ait açıklayıcı istatistikler Çizelge 8’de verilmiştir. Ayrıca ortalama basınç dayanımı değerlerine ait grafik Şekil 3’te görülmektedir.

Çizelge 8. Basınç dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler

U.Kül İkame Oranı (%)	N	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)				
		0.Hafta	1.Hafta	2.Hafta	3.Hafta	4.Hafta
0	3	28,8667	29,1667	29,8000	30,2667	30,7133
5	3	26,2100	26,7100	26,7433	27,2100	27,8433
10	3	21,9367	22,5033	22,7367	23,4033	23,7700
20	3	18,6100	19,1100	19,5433	20,0100	20,7767
30	3	15,7367	15,6700	16,0700	16,3700	17,3033



Şekil 3. Ortalama basınç dayanımı değerleri

Ortalama basınç dayanımı değerleri incelendiğinde UK ikame oranına ve zamana bağlı olarak beton basınç dayanımlarının değiştiği görülmektedir. UK ikame oranı arttıkça basınç dayanımı değerleri azalmakta, beton yaşı arttıkça dayanım değerleri artmaktadır. 1 ay süren hızlandırılmış karbonatlaşma deneyi başındaki dayanım değerleri ile sonundaki değerler arasında yaklaşık 2-3 MPa gibi bir artış olduğu görülmektedir. Bu durum betonun dayanım kazanma sürecinin devam ettiğini göstermektedir. En büyük basınç dayanımı değeri 30,71 MPa ile 4. Hafta sonunda referans numunede, en küçük basınç dayanımının ise 15,73 MPa ile karbonatlaşma deneyi öncesinde 28 günlük %30 ikameli betonlarda meydana geldiği görülmektedir.

Grupların karşılaştırılması amacıyla yapılan varyans analizi 4. hafta sonunda elde edilen basınç dayanımı verileri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Varyans analizi sonucunda gruplar arasında istatistiksel anlamda önemli fark olduğu görülmüştür ($p \leq 0.05$). Diğer bir ifadeyle UK ikame miktarına bağlı olarak basınç dayanımı değerlerinin önemli miktarda değiştiği söylenebilir.

Beton basınç dayanımı değerleri bakımından hangi grupların birbirinden farklı olduğunu tespit edebilmek amacıyla LSD testi uygulanmıştır. Gerçekleştirilen LSD testi sonuçları Çizelge 9'da verilmiştir.

Çizelge 9. Basınç dayanımı değerlerine ait LSD testi sonuçları

Uçucu Kül İkame Miktarı (%)	U.Kül İkame Miktarı (%)					Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
	0	5	10	20	30	
0		f*	f*	f*	f*	30,7133
5	f*		f*	f*	f*	27,8433
10	f*	f*		f*	f*	23,7700
20	f*	f*	f*		f*	20,7767
30	f*	f*	f*	f*		17,3033

f* =Gruplar arasında fark vardır (p≤0,05).

LSD testi sonuçlarına göre; zamana ve UK ikame oranına bağlı olarak beton basınç dayanımı değerlerinin istatistiksel anlamda önemli miktarda değiştiği, bütün beton gruplarının birbirinden farklı olduğu görülmüştür. En büyük basınç dayanımına sahip olan referans numunenin, en küçük dayanıma sahip %30 ikameli betona göre %44 oranında daha büyük değere sahip olduğu görülmektedir.

4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Çalışma kapsamında farklı oranlarda uçucu kül ikamesinin beton karbonatlaşma derinliğine olan etkisinin belirlenmek amacıyla %0, %5, %10, %20 ve %30 oranlarında Orhaneli termik santralinden temin edilen C sınıfı uçucu kül ikameli beton numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan karot numuneler üzerinde hızlandırılmış karbonatlaşma, boşluk oranı ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deney sonuçları üzerinde gerçekleştirilen değerlendirmeler sonucunda;

UK ikame oranına ve zamana bağlı olarak karbonatlaşma derinliği değerlerinin değiştiği, en fazla karbonatlaşmanın %30 UK ikameli betonlarda, en az karbonatlaşmanın ise referans betonlarda meydana geldiği, referans betonda %30 UK ikameli betonlara göre %31 oranında daha az karbonatlaşmanın oluştuğu görülmüştür.

UK ikame oranına bağlı olarak beton boşluk oranlarının değiştiği, zamana bağlı olarak ise boşluk oranlarında çok küçük değişiklikler meydana geldiği, UK ikame oranı arttıkça boşluk oranı değerleri de arttığı, en fazla boşluk oranının %30 UK ikameli betonlarda olduğu, hatta ilerleyen haftalarda çimento hidrasyonundan dolayı boşluk oranlarının çok az bir miktarda olsa azaldığı, referans betonun %30 UK ikameli betona göre %48 oranında daha az boşluk oranına sahip olduğu gözlenmiştir.

UK ikame oranına ve zamana bağlı olarak beton basınç dayanımlarının değiştiği, UK ikame oranı arttıkça basınç dayanımı değerlerinin azaldığı, beton yaşı arttıkça dayanım değerleri arttığı, ancak dayanım değerlerindeki artışın 2-3 MPa'ı geçmediği, en büyük basınç dayanımına sahip olan referans numunenin, en küçük dayanıma sahip %30 ikameli betona göre %44 oranında daha büyük değere sahip olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1]. T. Y. Erdoğan, "Beton", METU Press, I. Baskı, Ankara, (2003).
- [2]. S. Taban, O. Şimşek, "Zeolitik Tüf Katkı Oranı Ve Deniz Suyunun Çimentonun Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerine Etkisi", J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ. Vol 24, No 1, 145-153, (2009).
- [3]. J. Kropp, H. K. Hilsdorf, "Performans Criteria for Concrete Durability", Rilem Report 12, Chapman&Hall, London, (1995).
- [4]. A. A. Sha'at, A.E. Long, "The Influence of Controlled Permeability Formwork Liner on the Quality of the Cover Concrete", Durable Concrete in Hot Climates, ACI, Sp:139-6, Pp: 91-105,(1993).

-
- [5]. S. Subaşı, M. Arslan, “Kalıp Yüzey Özelliklerinin Betonun Karbonatlaşması Üzerine Etkileri”, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 23, No 4, 913-921, (2008).
- [6]. T. Gönen, S. Yazıcıoğlu, “Farklı Nem Ortamlarındaki Betonlarda Karbonatlaşma Gelişimi”, F. Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16(2), 367-373, (2004).
- [7]. İ. B. Topçu, “Yapı Malzemeleri ve Beton Deneyleri El Kitabı”, Eskişehir, (2006).
- [8]. S. Subaşı, “Farklı Yüzey Astarları ile Kaplanmış Drenaj Özelliği Bulunan Kalıpların Betonun Bazı Fiziksel Özelliklerine Etkileri”, Doktora Tezi, Gazi Üniv., Fen Bilimleri Enst., Ankara, (2005).
- [9]. TSE, “Beton Karışımı Hesap Esasları”, TS 802, TSE Yayınları, Ankara, (2009).
- [10]. E. Sancak, ve O. Şimşek, “The effect of the use of silica fume in concrete on steel reinforcement corrosion”, IV. ICCP 2004 International Corrosion and Concrete Protection Symposium, Ankara, Türkiye, 441-452, (2004).
- [11]. B. Baradan, ve Ark., “Betonarme Yapılarda Kalıcılık”, Dokuz Eylül Üniversitesi Müh.Fak.Yayınları, İzmir, (2002).
- [12]. N. Hearn, R. D. Hooton, and R. H. Mills, “Pore Structure and Permeability”, Concrete and Concrete-Making Materials, Edited by: Klieger, P. and Lamond, J., ASTM STP 169C, 240-262, (1994).
- [13]. TSE, “Sertleşmiş Betonda Özgül Ağırlık, Su Emme ve Boşluk Oranı Tayin Metodu”, TS 3624, TSE Yayınları, Ankara, (1981).
- [14]. TSE, “Beton – Sertleşmiş Beton Deneyleri, Bölüm 5: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini”, TS EN 12390-3, TSE Yayınları, Ankara (2003).

