



## PC uçucu külün köpük betonda hafif agregada olarak kullanılabilirliği

### Usability of PC-ash as lightweight aggregate in foam concrete

Metin DAVRAZ<sup>\*a</sup> ve Şemsettin KILINÇARSLAN<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Doğal ve Endüstriyel Yapı Malzemeleri Uygulama ve Araştırma Merkezi, Isparta, Türkiye

<sup>b</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Araştırma Makalesi

Anahtar Kelimeler:  
Köpük beton, Hafif agregada, PC kül, Basınç dayanımı, Isıl iletkenlik.

### ÖZ

Köpük beton agregalı ya da agregasız olarak üretilebilir. Bu çalışmada hafif agregada olarak PC kullanılarak köpük beton üretim olanağı araştırılmıştır. Afyon ili Dinar ilçesinde yer alan bir tekstil fabrikasında pulverize kömür fırınından yaklaşık 10 ton/gün civarında PC kül atığı ortaya çıkmaktadır. Bu atık Acıgöl civarında vahşi olarak depolanmakta ve çevre kirliliğine neden olmaktadır. Bu çalışmada, köpük beton üretiminde hafif agregada olarak PC kül kullanım olanağı araştırılmıştır. İlk olarak PC külün kimyasal bileşenleri, tane boyut dağılımı ve tane yoğunlukları belirlenmiştir. Agregada analizleri tamamlandıktan sonra 250 kg/m<sup>3</sup> çimento dozajında ve s/c: 0,65 oranında, 450 kg/m<sup>3</sup> kuru yoğunlukta köpük beton üretilmiştir. Köpük beton karışımında kullanılan PC kül miktarı 0-200 kg/m<sup>3</sup> arasındadır. Sonrasında üretilen köpük betondan 100 mm küp ve 300x300x50 mm prizma örnekleri dökülmüştür. 28 günlük kür periyodunu tamamlayan 452 kg/m<sup>3</sup> yoğunluklu köpük beton küp örneklerinin ortalama basınç dayanımları 1,07 MPa ve prizma örneklerinin ısıl iletkenlik katsayıları 0,097 W/mK olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, PC külün köpük betondan prekast eleman ve döşeme şapı üretiminde hafif agregada olarak başarıyla kullanılabileceği belirlenmiştir.

Geliş Tarihi: 24.10.2018

Kabul Tarihi: 30.01.2019

Keywords:  
Foam concrete,  
Lightweight aggregate,  
PC ash, Compressive strength, Thermal conductivity.

### ABSTRACT

Foam concretes can be produced with aggregate or without aggregate. In this study, the possibility of using PC ash as lightweight aggregate in the production of foam concrete was investigated. Waste-PC ash is emerging from the pulverized coal furnace about 10 tons/day in a textile factory located in the vicinity of Dinar (Afyonkarahisar). The chemical properties, particle size distribution and grain densities of PC-ash were determined. Foam concrete with a dry density of 450 kg/m<sup>3</sup> at a cement dosage of 250 kg/m<sup>3</sup> and w/c: 0,65 was produced after the aggregate analysis. The PC-ash which is used in foam concrete mix is between 0 and 200 kg/m<sup>3</sup>. 100 mm cube and 300x300x50 mm prism samples were prepared with this foam concrete. The compressive strengths of the cube samples and the thermal conductivity coefficient of the prism samples were tested at the 28<sup>th</sup> day. The average compressive strength of foam concrete samples with a density of 452 kg/m<sup>3</sup> was determined as 1,07 MPa and the thermal conductivity coefficient was determined as 0,097 W/mK. As a result, it has been determined that PC-ash as lightweight aggregate can be successfully used in production of precast element and light floor-screed.

## 1. Giriş

Köpük beton hafif betonun bir çeşididir. Çimento, su ve agreganın karışımından oluşan harca köpük ajanı ile oluşturulan köpüğün karıştırılması ile elde edilir. Bünyesinde hacminin %50 - %80'i oranında birbirinden bağımsız kapalı gözenekler içerir. Köpük beton, tüm binaların iç ve dış duvarları ile zeminlerinde kullanılan yapı elemanlarının yerine kullanılabilen hafif, ısı ve darbe sesi yalıtımı sağlayan, çevreci bir yapı ve yalıtım malzemesidir. Köpük beton, taze halde yüksek akış yeteneğine, düşük yoğunluğa, sertleştikten sonra yeterli dayanıma ve düşük ısıl iletkenlik özelliklerine sahiptir. Genel olarak kuru yoğunluğu 400-1600 kg/m<sup>3</sup>, basınç dayanımı 1-15 MPa aralığındadır. Köpük beton kolayca pompalanabilir ve yerleştirilebilir. Sıkıştırma ve vibrasyon gerektirmez. Suya ve dona karşı mükemmel bir dirence sahiptir. Köpük beton harcı, işletmelerde kalıplanıp blok haline getirilebileceği gibi, gerektiğinde mobil olarak uygulama sahasında-inşaat hazırlanarak bir pompa yardımı ile kolayca taşınabilir. Köpük beton, yoğunluğuna bağlı olarak duvar blokları, asmolon, panel, yalıtım tesviye betonu, prefabrik yapı elemanları üretiminde kullanılabilir.

Köpük betonun ilk patenti 1923'de alınmış olmasına rağmen, ancak son yıllarda yarı taşıyıcı ya da taşıyıcı olmayan inşaat uygulamalarında yaygınlaşmaya başlamıştır (Ramamurthy vd., 2009). Hücreli betonun ilk kapsamlı incelemesi 1954 yılında Valore tarafından yapılmış, 1963 yılında Rudnai, Short ve Kinniburgh tarafından bileşimi, özellikleri, kullanımı ve yapısı hakkında detaylı çalışmalar yapılmıştır (Rudnai, 1963 ve Short ve Kinniburgh, 1963). Son yıllarda Jones ve McCarthy (2005), köpük betonun tarihçesi, kullanılan malzemeler, özellikleri ve dünya çapında yürütülen bazı projelerdeki inşaat uygulamaları konularını değerlendirmişlerdir (Jones ve McCarthy, 2005). Bu değerlendirmeler yangın dayanımı, ısıl iletkenlik ve akustik özellikler gibi fonksiyonel özellikleri kapsarken, köpük betonun taze beton özellikleri, durabilitesi ve hava boşluğu sistemi gibi konulardaki veriler hayli sınırlıdır.

Kararlı köpük beton üretimi, köpük ajanı seçimi, köpük hazırlama yöntemleri, malzeme seçimi, uniform hava boşluğu dağılımı için katkı seçimi, karışım tasarımı stratejileri, performans gibi pek çok faktöre bağlıdır. Ramamurthy vd. (2009), köpük betonun bileşenleri, karışım tasarımı, üretimi, taze ve

sertleşmiş beton özellikleri üzerine yapılan bilimsel çalışmaları sınıflandırmıştır (Ramamurthy vd., 2009). Bu çalışmaya dayanarak, köpük betonun karışım tasarımı, yoğunluğu ve basınç dayanımı konularını kapsayan araştırmaların sonuçları çizelge 1'de sunulmuştur.

Köpük betonda dolgu maddesi, puzolan ya da hafif agrega kullanımı üzerine pek çok araştırma yapılmıştır. Bu çalışmaların önemli bir bölümü köpük betonda uçucu kül kullanımı üzerine odaklanmıştır. Kunhanandan ve Ramamurthy (2006), kum ve uçucu külün sertleşmiş köpük beton özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar kum parçacık boyutundaki azalmanın, köpük betonunun mukavemetinde iyileşmeye neden olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca araştırmada, belirli bir yoğunluk için, kumun uçucu kül ile değiştirilmesinin daha yüksek mukavemete yol açtığı belirlenmiştir (Kunhanandan ve Ramamurthy, 2006). Jitchaiyaphuma vd. (2011) köpük beton karışımında çimento ağırlığına göre %30 oranında UK kullanmışlardır. 800 kg/m<sup>3</sup> yoğunluktaki köpük betonun s/c oranı sabit tutulmuştur. FC numunelerinin 3, 7, 14, 28 ve 60 günde basınç dayanımları belirlenmiştir. Araştırmacılar çalışma sonucunda çimento ile yer değiştiren uçucu külün erken dönemde basınç dayanımını arttırdığı sonucuna varmışlardır (Jitchaiyaphum vd., 2011). Slabaugh vd. (2007) köpüklü sentetik hafif agregaları (FSLA) Köpük betonda kaba agrega olarak kullanmışlardır. Araştırma sonucunda %20-25 daha düşük yoğunlukta ve daha sünek köpük beton elde etmişlerdir. Buna karşılık köpük beton basınç dayanımlarında %65-75 oranında bir azalma olduğu ifade edilmiştir (Slabaugh vd., 2007). Kearsly ve Wainwright (2001a,b), çimento ile (ağırlıkça %75'e kadar) hem sınıflandırılmış hem de sınıflandırılmamış uçucu kül ile yer değiştirdiği köpük betonun özellikleri üzerinde bir çalışma yapmıştır. Bu araştırmada kullanılan sınıflanmış ve sınıflanmamış uçucu küllerin performansında çok az farklılık olduğu belirlenmiştir (Kearsly ve Wainwright, 2001a, b).

Köpük betonda genleşmiş perlit, mikronize pomza, vermikülit vd. hafif agregalar kullanılabilir. Bununla birlikte, bu tip hafif agregaların yüksek birim maliyetleri kullanım alanlarını ve miktarlarını sınırlar. Mikronize kalsit, taşunu, çok ince doğal kum, uçucu kül gibi malzemeler köpük betonun ısıl iletkenliğini olumsuz olarak değiştirir. Afyon ili Dinar ilçesinde yer alan bir tekstil fabrikasında pulverize kömür fırınından yaklaşık 10 ton/gün PC külü ortaya

Çizelge 1- Köpük betonun karışımı, basınç dayanımı ve yoğunluk aralığının değerlendirilmesi (Ramamurthy vd., 2009).

Yazar(lar) ve Yıl	Çimento Dozajı Bileşenler	k/c	s/c	UK/c	Yoğunluk Aralığı (kg/m <sup>3</sup> )	Basınç Dayanımı (MPa, 28g)
McCormick (1967)	335-446	0,79-2,8	0,35-0,57		800-1800	1,8-17,6
Tam vd. (1987)	390	1,58-1,73	0,6-0,8		1300-1900	1,81-16,72
Regan ve Arasteh (1990)	LWA	0,6	0,45-0,6		800-1200	4-16
Van Deijk (1991)	Çimento, kum/UK				280-1200	0,6-10 (91 gün)
ACI 523.1R-1992	Çimento hamuru				240-640 (KY)	0,48-3,1
	Çimento-kum				400-560 (KY)	0,9-1,72
Hunaiti (1997)		3			1667	12,11
Kearsly ve Booyens (1998)	Çimento - UK (yerdeğiştirme)				1000-1500	2,8-19,9
Durack ve Weiqing (1998)	270-398	1,23-2,5	0,61-0,82		982-1185 (KY)	1-6
	137-380		0,48-0,7	1,48-2,5	541-1003 (KY)	3-15 (77gün)
Aldridge (2000)	Çimento-kum				400-1600	0,5-10
Kearsly ve Wainwright (2001a, b)	Çimento ve UK				1000-1500	2-18
Tikalsky vd. (2004)	Çimento, 149-420		0,4-0,45		490-660	0,71-2,07
	Çimento, kum/UK 57-149		0,5-0,57		1320-1500	0,23-1,1
Jones ve McCarty (2005)	300	1,83-3,17	0,5		1000-1400	1-2
			1,11-1,56	1,22-2,11	1000-1400	3,9-7,3
Jones ve McCarty (2005)	500	1,5-2,3	0,3		1400-1800	10-26
			0,65-0,83	1,15-1,77	1400-1800	20-43
Nambiar ve Ramamurthy (2006)	Çimento-kum karışımı (kaba)	1'den 3'e değişen filler /c oranlı ve %0 - %100 UK yer değişimli			800-1350 (DD)	1-7
	Çimento-kum karışımı (ince)				800-1350 (KY)	2-11
	Çimento-kum-UK karışımı (kaba)				650-1200 (KY)	4-19

k/c : kum/çimento oranı    s/c : su/çimento oranı    UK/c : UK/çimento oranı    KY : Kuru Yoğunluk (kg/m<sup>3</sup>)



Şekil 1- Tekstil fabrikasının (üst sol) ve kül depo alanının (alt sağ) uydu görüntüsü.

çıkılmaktadır (Şekil 1). Bu atık Acıgöl ve civarına vahşi olarak depolanmakta ve çevre kirliliğine yol açmaktadır. Bu çalışmada PC külünün köpük betonda hafif agrega olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır.

## 2. Malzeme ve Yöntem

Afyon ili Dinar ilçesinde yer alan bir tekstil fabrikasında pulverize kömür fırınından yaklaşık 10 ton/gün PC külü ortaya çıkmaktadır. Bu atık Acıgöl ve civarına vahşi olarak depolanmakta ve çevre kirliliğine yol açmaktadır. Bu çalışmada PC külünün köpük betonda hafif agrega olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışmada ilk olarak PC külünün kimyasal özellikleri, tane boyut dağılımı ve tane yoğunlukları belirlenmiştir. Köpük beton üretiminde bağlayıcı olarak Portland çimentosu (CEM I 42.5 R) kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal özellikleri çizelge 2’de verilmiştir.

PC külün kimyasal analizi XRF yöntemiyle Göлтаş AŞ Kalite ve Kontrol Laboratuvarı’nda belirlenmiştir. PC külün tane boyut dağılımı, gevşek yığın yoğunluğu, tane yoğunlukları ve su emme özellikleri belirlenmiştir (TS 3530 EN 933-1, 2012; TS EN 1097-3, 1999 ve TS EN 1097-6, 2013). Elde edilen bulgular TS EN 13055 standardına göre yorumlanmıştır (TS EN 13055, 2013).

Köpük beton üretiminde sentetik köpük ajanı kullanılmıştır. Köpük ajanı 1/50 oranında suyla karıştırılmış ve köpük jeneratöründen 85 g/L yoğunlukta köpük elde edilmiştir. Çimento, PC külü ve sudan oluşan karışıma köpük ilave edilerek karıştırılmıştır. Karışımda s/c oranı 0,65 olarak seçilmiştir. Elde edilen köpük beton karışımı 100 mm küp kalıplarına dökülmüş ve %95 bağıl nemde iklim kabininde 28 gün kürlenmiştir. Ayrıca 300x300x50 mm

prizma kalıplarına ısı iletkenlik numuneleri dökülmüş ve kür süresi sonunda değişmez kütleyle ulaşıncaya kadar etüvde kurutulmuştur. 28 günlük kür süresini tamamlayan numunelerin basınç dayanımı testleri TS 13565 standardına göre basınç test presiyle, ısı iletkenlik testleri TS EN 12664 standardına göre HFM cihazıyla yürütülmüştür (TS 13565, 2013 ve TS EN 12664, 2009).

## 3. Tartışma

### 3.1. PC Külün Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

TS EN 450-1 standardında tanımlanan betonda kullanılacak uçucu küllere ait özellikler çizelge 3’de,

Çizelge 3- TS EN 450-1 standardına göre uçucu kül özellikleri (TS EN 450-1, 2013).

Özellik	TS EN 450-1
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	≥ 70
MgO (%)	≤ 4
SO <sub>3</sub> (%)	≤ 3
Eşdeğer Alkali miktarı (%)	≤ 5
Toplam Klorür	≤ 0,1
Kızdırma Kaybı	≤ 10

Çizelge 4- PC külün kimyasal özellikleri

Bileşenler	%
SiO <sub>2</sub>	44,85
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,02
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,11
CaO	9,05
Na <sub>2</sub> O	0,33
K <sub>2</sub> O	1,36
MgO	3,11
TiO <sub>2</sub>	1,04
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,09
SO <sub>3</sub>	2,23
LOI	2,06

Çizelge 2- Çimento özellikleri.

Klinkerin Kimyasal Özellikleri(%)		Çimentonun Fiziksel Özellikleri		
SiO <sub>2</sub>	20,52	Hacimsel Genleşme (mm)	≤ 1	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,00	İncelik (90m, %)	0,10	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,45	İncelik(200m, %)	1,10	
CaO	64,28	Özgül yüzey alanı (cm <sup>2</sup> /g)	3340	
MgO	1,63	Priz başlama süresi (min)	185	
SO <sub>3</sub>	2,53	Priz sonu süresi (min)	240	
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	1,35	Öz kütle (g/cm <sup>3</sup> )	3,12	
Çimentonun Mekanik Özellikleri (MPa)				
7 günde	Eğilme dayanımı (MPa)	5.8	Basınç dayanımı (MPa)	39,3
28 günde	Eğilme dayanımı (MPa)	7.2	Basınç dayanımı (MPa)	51,0

PC kül kimyasal bileşenleri çizelge 4’de verilmiştir. PC kül puzolanik bileşenleri ( $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ ) toplamı %81’dir. Külde çimento ile zararlı reaksiyon verebilecek MgO ve  $\text{SO}_3$  içeriği sırasıyla %4 ve %3’den daha azdır. Ayrıca eşdeğer alkali miktarı ( $\text{Na}_2\text{O} + 0,658 \cdot \text{K}_2\text{O}$ ) %5 den, kızdırma kaybı değeri %10’dan düşüktür.

PC külün fiziksel analiz bulguları çizelge 5 ve çizelge 6’da verilmiştir. Agreganın 24 saatlik ağırlıkça su emme değeri ~%35’dir.

Çizelge 5- PC külün fiziksel özellikleri.

PC külün fiziksel özellikleri	
Özkütle ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2,590
Yığın yoğunluğu (%100 - kuru) ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	570
Görünür tane yoğunluğu ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2,19
Etüv kuru tane yoğunluğu ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,28
Doygun-yüzeyi kuru tane yoğunluğu ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,70
Su emme (ağırlıkça, %) (24 saatlik)	34

Çizelge 6- PC külün tane boyut dağılımı.

Tane Boyut Dağılımı		
Elek (mm)	Kalan (%)	Yığılmış geçen (%)
2,000	0,05	99,95
1,000	8,33	91,62
0,500	21,21	70,41
0,250	23,97	46,44
0,090	34,30	12,14
Pan	12,14	0,00

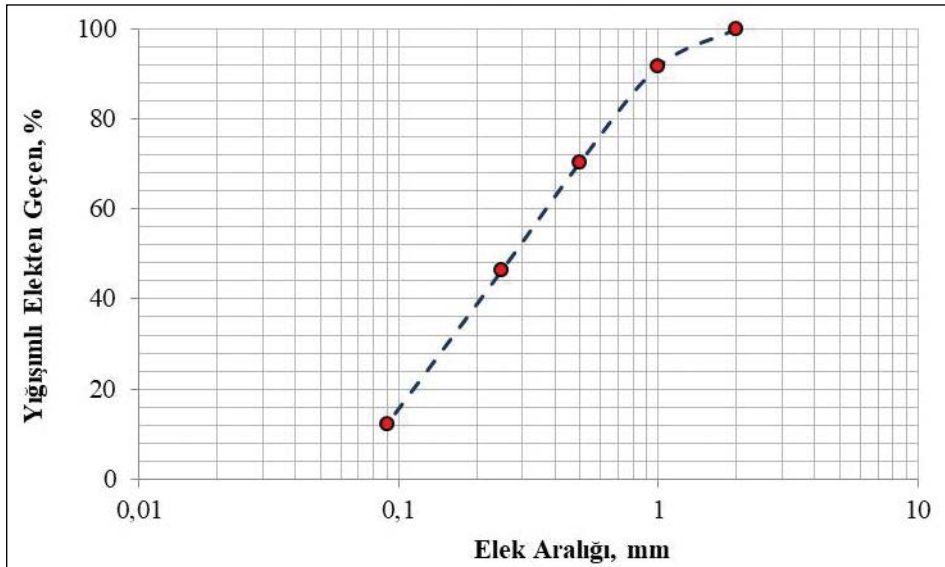
PC külün etüv kuru tane yoğunluğu  $1280 \text{ kg}/\text{m}^3$ ’tür ve TS EN 13055 standardında hafif agregalar için belirtilen normlara uygundur ( $<2000 \text{ kg}/\text{m}^3$ ). Ayrıca TS EN 206 standardına göre etüv kuru tane yoğunluğu  $<2000 \text{ kg}/\text{m}^3$ , kuru yığın yoğunluğu  $<1200 \text{ kg}/\text{m}^3$  olan mineral esaslı agregalar “hafif agrega” olarak tanımlanmaktadır (TS EN 206, 2017).

PC kül oldukça düzgün bir tane boyut dağılımına sahiptir (Çizelge 6). Külün maksimum tane boyutu 2 mm den küçük, incelik modülü değeri 0,54’tür (Şekil 2). Bu değer külün ortalama tane boyutunun 0,5 mm civarında olduğunu göstermektedir. Ayrıca 90 mikron altı taneciklerin miktarı ~%12’dir. Bu tanecikler çimento hidratasyonu sonrasında oluşan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ile reaksiyona girerek ilave C-S-H bağları oluşturabilir.

### 3.2. Köpük Betonun Mekanik ve Termal Özellikleri

Köpük betonda PC kül çimento ile %0, %11, %22, %33 ve %44 oranlarında yer değiştirerek kullanılmıştır. Hazırlanan köpük beton karışımlarına ait bileşenler çizelge 7’de verilmiştir.

P0, P50, P100 P150 ve P200 köpük beton karışımlarının (taze halde) yoğunlukları sırasıyla 676, 674, 672, 670 ve 667  $\text{kg}/\text{m}^3$  olarak ölçülmüştür. Köpük beton küp numuneleri 28 gün %95 bağıl nemde kürlendikten sonra etüvde değişmez kütleye ulaşmaya



Şekil 2- PC külün tane boyut dağılımı eğrisi.

Çizelge 7- Köpük beton örneklerinin karışım tasarımları.

Bileşenler	Köpük Beton Grupları				
	P0	P50	P100	P150	P200
Çimento (kg/m <sup>3</sup> )	450	400	350	300	250
PC kül (kg/m <sup>3</sup> )	0	50	100	50	200
Su (kg/m <sup>3</sup> )	162	162	162	162	162,5
Köpük (kg/m <sup>3</sup> )	58,6	56,7	54,7	52,8	50,9
s/k*	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36

\*Su /katı

kadar kurutulmuştur. Sonrasında kütleleri tartılmış ve boyutları ölçülmüştür. Her bir gruptan 6'şar adet küp numunenin basınç dayanımları test edilmiştir. Numunelerin yoğunluk ve basınç dayanımları çizelge 8'de verilmiştir.

Çimento ile PC kül yerdeğişimi miktarı arttıkça, köpük beton numunelerinin basınç dayanımı azalmıştır (Şekil 3). 200 kg/m<sup>3</sup> kül içeren P200 numunesinin basınç dayanımı kontrol örneğine göre %44 azalmıştır.

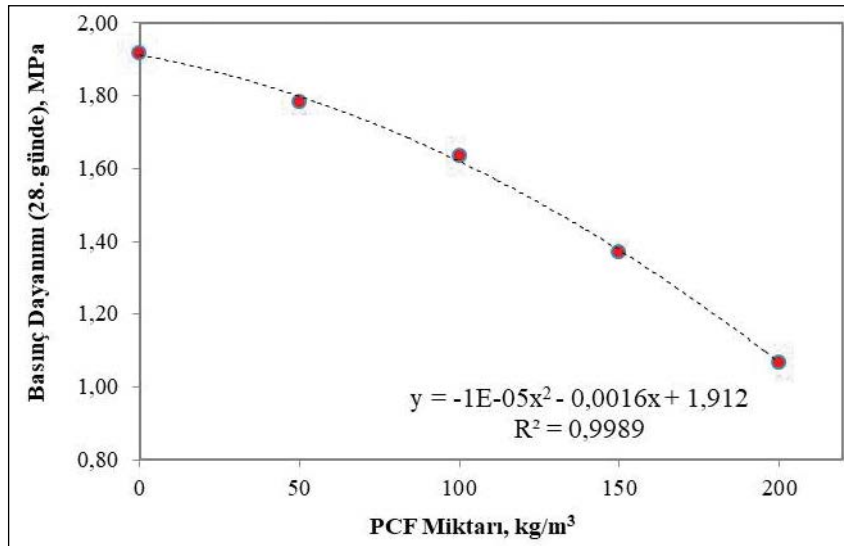
400-500 kg/m<sup>3</sup> yoğunluk aralığında yeralan köpük betonların basınç dayanımları Tikalsky vd. (2004), Aldridge vd. (2000) ve ACI 523 tarafından sırasıyla, 0,7 MPa, 0,5 MPa, 0,9 MPa olarak raporlanmıştır. Bu çalışmada ağırlıkça %44 oranında PC kullanılan 450 kg/m<sup>3</sup> yoğunluktaki köpük betonların basınç dayanımları 1,07 MPa bulunmuştur. Bulunan sonuçlar literatürle uyumludur.

Köpük beton numunelerinin ısı iletkenlikleri

Çizelge 8- Sertleşmiş köpük beton numunelerinin kuru yoğunlukları ve basınç dayanımları.

No	P0		P50		P100		P150		P200	
	D	f <sub>c-28d</sub>	D	f <sub>c-28d</sub>	D	f <sub>c-28d</sub>	D	f <sub>c-28d</sub>	D	f <sub>c-28d</sub>
1	452	1,95	465	1,80	454	1,59	451	1,45	452	1,12
2	450	1,89	452	1,73	455	1,59	464	1,30	448	1,13
3	452	1,94	458	1,81	451	1,73	455	1,37	457	1,03
4	453	1,93	448	1,82	453	1,69	463	1,48	443	1,10
5	457	1,87	454	1,77	448	1,62	457	1,28	453	1,06
6	458	1,93	458	1,77	455	1,60	460	1,35	457	0,98
Av.	454	1,92	456	1,78	453	1,64	458	1,37	452	1,07

D: Kuru yoğunluk, kg/m<sup>3</sup> f<sub>c-28d</sub>: 28 günde basınç dayanımı, MPa



Şekil 3- Eşdeğer yoğunluktaki köpük beton numunelerinde PC kül miktarı- basınç dayanımı ilişkisi.

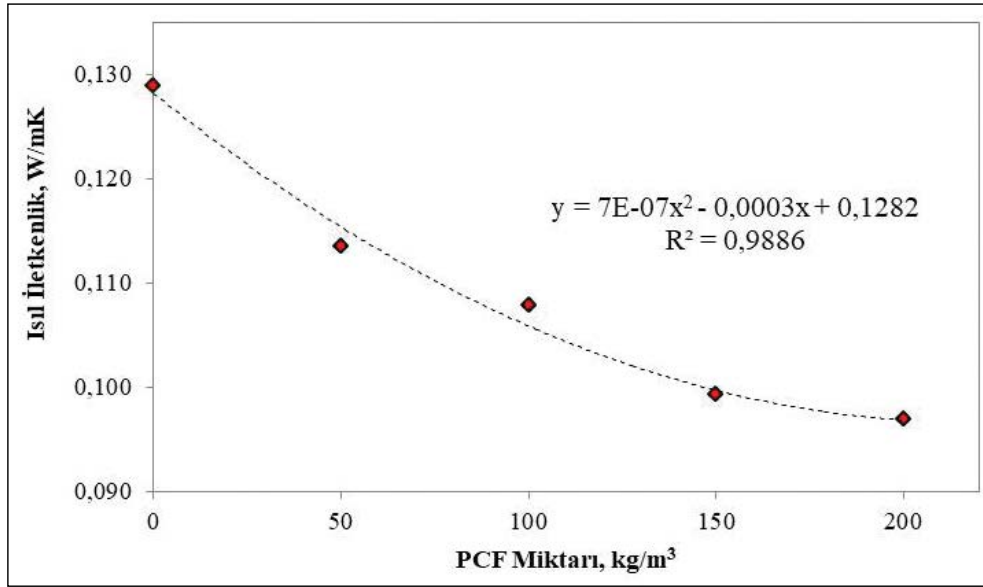
Lasercomp Fox 314 cihazı ile ölçülmüştür. Her bir gruptan 3 adet numuneye ait yoğunluk ve ısı iletkenlik katsayısı ( $\lambda_{10\text{-kuru}}$ ) deney sonuçları çizelge 9'da verilmiştir.

Çimento ile yer değiştiren PC kül miktarı arttıkça, köpük beton numunelerinin ısı iletkenlik değerleri azalmıştır. P200 örneğinin ısı iletkenliği, kontrol numunesinden %25 oranında daha iyidir (Şekil 4).

Çizelge 9- Köpük beton numunelerinin  $\lambda_{10\text{-kuru}}$  değerleri.

No	P0		P50		P100		P150		P200	
	D	$\lambda_{10\text{-kuru}}$	D	$\lambda_{10\text{-kuru}}$	D	$\lambda_{10\text{-kuru}}$	D	$\lambda_{10\text{-kuru}}$	D	$\lambda_{10\text{-kuru}}$
1	452	12,88	458	11,39	448	10,73	455	9,95	445	0,0948
2	452	12,85	454	11,31	448	10,73	457	9,91	455	0,0967
3	454	12,93	452	11,36	454	10,79	452	9,89	462	0,0979
Av.	<b>453</b>	<b>12,89</b>	455	<b>11,35</b>	450	<b>10,75</b>	455	<b>9,92</b>	<b>454</b>	<b>0,0965</b>

$\lambda_{10\text{-kuru}}$  : %100 kuru durumda ve  $dT = 10^\circ\text{C}$ 'de ısı iletkenlik katsayısı



Şekil 4- Aynı yoğunluktaki köpük beton numunelerinde PC kül miktarı-ısı iletkenlik katsayısı ilişkisi.

#### 4. Sonuçlar

PC kül fiziksel özellikleri (yığın yoğunluğu ve etüv kuru tane yoğunluğu) açısından değerlendirildiğinde hafif agrega sınıfına girmektedir. PC külün puzolanik madde içeriği oldukça yüksek (%81) ve diğer kimyasal özellikleri betonda kullanıma uygundur. Hatta bu anlamda F sınıfı uçucu küllerde aranılan kriterleri sağlamaktadır. Köpük betonda agrega olarak kullanılacak agreganın en büyük tane boyutu 2 mm den küçük ve ortalama tane boyutu  $< 0,6$  mm olması segregasyon olmaması açısından arzu edilen bir durumdur. PC külün en büyük tane boyutu 2 mm den küçük ve incelik modülü 0,5 mm dir.

Bu araştırmada  $\sim 450$  kg/m<sup>3</sup> yoğunluklu köpük betonda PC kül, çimento 4 farklı oranda yer değiştirilerek kullanılmıştır. Kontrol karışımı ile karşılaştırıldığında, en fazla PC kül kullanılan karışımda (P200) 28 günlük basınç dayanımı  $\sim$ %45 oranında azalmıştır. Bununla beraber 2018 yılı Mart ayı birim üretim maliyetleri açısından P200 numunesi kontrol karışımından %40 daha ucuzdur. Ayrıca eşdeğer yoğunluk değerleri gözetildiğinde, P200 numunesinin ısı iletkenliği (0,097 W/mK) P0 numunesine (0,13 W/mK) göre %25 daha düşüktür. Bu farklılık prekast duvar ve dolgu elemanları üretiminde P200 numunesini daha avantajlı yapmaktadır.

PC külün puzolanik madde içeriği göz önünde bulundurulduğunda, uygun kür koşullarında kontrol karışımına göre 28 gün sonrası dayanım artışının hızlanacağını söylemek mümkündür. Özellikle buhar kürü uygulanması durumunda erken yaşlarda dayanım farklılığının belirgin olarak azalması beklenebilir.

Sonuç olarak, bu araştırmanın bulguları çevresel kirliliğe yol açan bir atık olan PC külünün, endüstriyel bir hammadde olarak kullanılabilirliğini ortaya koymuştur.

### Değinen Belgeler

- ACI 523. 1R. 1992. Guide for cast-in-place low density concrete. American Concrete Institute 1992.
- Aldridge, D. 2000. Foamed concrete. *Concrete* 34 (4):20–2.
- Durack J.M., Weiqing L. 1998. The properties of foamed air cured fly ash based concrete for masonry production. In: Page A., Dhanasekar M., Lawrence S., editors. In: Proceedings of 5th Australian masonry conference. Australia: Gladstone, Queensland 129-38.
- Hunaiti Y.M. 1996. Composite action of foamed and lightweight aggregate concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering* 3-111.
- Jitchaiyaphum, K., Sinsiri, T., Chindaprasirt, P. 2011. Cellular Lightweight Concrete Containing Pozzolan Materials. *Procedia Engineering* Vol. 14, pp. 1157–1164.
- Jones, M.R., McCarthy, A. 2005. Preliminary views on the potential of foamed concrete as a structural material. *Magazine of Concrete Research* 57: 21-31
- Kearsly, E.P., Booyens, P.J. 1998. Reinforced foamed concrete, can it be durable. *Concrete/Beton* 91; 5-9.
- Kearsly, E.P., Wainwright, P.J. 2001a. The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete. *Cement and Concrete Research* 31 : 12-105.
- Kearsly, E.P., Wainwright, P.J. 2001b. Porosity and permeability of foam Concrete. *Cement and Concrete Research* 35: 805-812
- Kunhanandan, E.K., Ramamurthy, K. 2006. Influence of filler type on the properties of foam concrete. *Cement and Concrete Composites* 28: 475–480.
- Mc Cormick, F.C. 1967. Rational proportioning of preformed foam cellular concrete. *ACI Material Journal* 64:9-104.
- Ramamurthy, K., Nambiar, E.K., Ranjani, G. 2009. A classification of studies on properties of foam concrete. *Cement and Concrete composite* 31: 388-396.
- Regan, P.E. Arasteh, AR., 1990. Lightweight aggregate foamed concrete. *The Structural Engineer* 68 (9): 73-167.
- Rudnai, G. 1963. *Lightweight concretes*. Budapest, Akademiado.
- Short, A., Kinniburgh, W. 1963. *Lightweight concrete*. Asia Publishing House.
- Slabaugh, S., Swan, C., Malloy, R. 2007. Development and Properties of Foam Concrete Synthetic Lightweight Aggregates. *World of Coal Ash (WOCA) May 7-10, Covington Kentucky, USA*.
- Tikalsky, P.J. Pospisil, J., Mac Donald, W. 2004. A method assessment of the freeze – thaw resistance of performed foam cellular concrete, *Cement and Concrete Research* 34 (5), 889- 893.
- Tam, C.T., Lim, TY., Lee, SI. 1987. Relationship between strength and volumetric composition of mosit-cured cellular concrete. *Magazine of Concrete Research* 39:12-8.
- TS 13565, 2013. Lightweight sandwich masonry units with insulation layer. Turkish Standard Institute.
- TS 3530 EN 933-1, 2012. Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method. Turkish Standard Institute.
- TS EN 1097-3, 1999. Tests for mechanical and physical properties of aggregates- Part 3: Determination of loose bulk density and voids. Turkish Standard Institute.
- TS EN 1097-6, 2013. Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption. Turkish Standard Institute.
- TS EN 12664, 2009. Thermal performance of building materials and products - Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods - Dry and moist products of medium and low thermal resistance. Turkish Standard Institute.
- TS EN 13055, 2013. Lightweight aggregates. Turkish Standard Institute.
- TS EN 206, 2017. Concrete - Specification, performance, production and conformity. Turkish Standard Institute.
- TS EN 450-1, 2013. Fly ash for concrete - Part 1: Definition, specifications and conformity criteria. Turkish Standard Institute.
- Van Dijk, S. 1991. Foamed concrete: A Dutch View. *British Cement Association* 49-53.