



## KALSİYUM ALÜMİNAT ÇİMENTOLU HAFİF BETONUN FİZİKO-MEKANİK VE TERMAL ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Metin DAVRAZ<sup>1\*</sup>, Murat KORU<sup>2</sup>, Burak YANARDAĞ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Isparta Uygulamalı Bilimler Üni., Senirkent Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Isparta-Türkiye

<sup>2</sup>Isparta Uygulamalı Bilimler Üni., Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

<sup>3</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

*Kalsiyum Alüminat  
Çimentosu,  
Hafif Beton,  
Fiziko-Mekanik Özellikler,  
Isıl İletkenlik*

### Öz

Kalsiyum alüminat çimentosu yol uygulamaları, endüstriyel zemin uygulamaları, yüksek sıcaklık direnci gerektiren refrakter uygulamaları vb. gibi durumlarda üstün performans göstermektedir. Bu çalışmada, hidrojen peroksit, hidrojen peroksit +2mm genişletilmiş perlit ve yalnızca köpük kullanımıyla olmak üzere, 3 farklı yöntemle kalsiyum alüminat çimentolu hafif beton numuneleri üretilmiştir. Hafif beton karışımları 40×40×160 mm prizma ve Ø60×25 mm ölçülerinde silindirik kalıplara dökülmüş ve kalıptan çıkarıldıktan sonra 23 °C ve % 90 bağıl nemde kürlenmiştir. Sertleşmiş hafif beton numuneleri üzerinde kuru birim hacim kütle, eğilme-basınç dayanımı, kapiler su emme ve ısı iletkenlik deneyleri yürütülmüştür. Ayrıca hidrojen peroksit kullanım oranı, genişletilmiş perlit kullanım oranı vd. karışım parametrelerinin numune fiziko-mekanik özelliklerine etkileri analiz edilmiştir. Deney sonuçlarından elde edilen bulgular ışığında hafif beton numunelerinin fiziko-mekanik özellikleri karşılaştırılmış ve optimum özelliğe sahip numune türü belirlenmiştir. Sonuç olarak bu çalışma kapsamında kalsiyum alüminat çimentosuyla kuru yoğunluğu: 269-348 kg/m<sup>3</sup>, basınç dayanımı: 245-464 kPa, eğilme dayanımı: 155-375 kPa ve ısı iletkenliği 0.068-0.092 W/mK özelliklerine sahip hafif beton numuneleri üretimi gerçekleştirilmiştir.

## INVESTIGATION OF PHYSICO-MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES OF LIGHTWEIGHT CONCRETE WITH CALCIUM ALUMINATE CEMENT

### Keywords

*Calcium Aluminate Cement,  
Lightweight Concrete,  
Physico-Mechanical  
Properties,  
Thermal Conductivity.*

### Abstract

Calcium aluminate cement shows superior performance, road applications, industrial floor applications, refractory applications requiring high temperature resistance etc. in areas like. In this study, lightweight concrete samples with calcium aluminate cement were produced by using 3 different methods: hydrogen peroxide, hydrogen peroxide +2mm expanded perlite and only foam. Lightweight concrete mixes were poured into 40×40×160 mm prisma and Ø60×25 mm measure cylindrical molds and cured at 23 °C and 90% relative humidity after being removed from the mold. Dry density, bending-compressive strength, capillary water absorption and thermal conductivity tests were conducted on the hardened lightweight concrete samples. In addition, the effects of mixture parameters such as hydrogen peroxide usage ratio, expanded perlite usage ratio on sample physico-mechanical properties were analyzed. According to the findings obtained from the experimental results, the physico-mechanical properties of lightweight concrete samples were compared and the type of sample with optimum properties was determined. As a result, in this study, light concrete samples were produced using by calcium aluminate cement, which has a dry density of 269-348 kg/m<sup>3</sup>, compressive strength of 245-464 kPa, flexural strength of 155-375 kPa and thermal conductivity of 0.068-0.092 W/mK.

### Alıntı / Cite

Davraz, M., Koru, M., Yanardağ, B., (2021). Kalsiyum Alüminat Çimentolu Hafif Betonun Fiziko-Mekanik ve Termal Özelliklerinin Araştırılması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 9(1), 217-229.

\* İlgili yazar / Corresponding author: metindavraz@isparta.edu.tr, +90-246-511-2739

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
M. Davraz, 0000-0002-6069-7802	<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	30.06.2020
M. Koru, 0000-0002-6949-645X	<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	30.11.2020
B. Yanardağ, 0000-0002-3908-506X	<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	05.12.2020
	<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	30.03.2021

## 1. Giriş (Introduction)

Kalsiyum alüminat çimentosu (KAC) Portland çimentosunun (PÇ) yaklaşık 8 aylık basınç dayanımını 1-2 günde sağlayabilmektedir. Ayrıca PÇ içeren kompozitlerden çok daha yüksek sıcaklıklarda dayanımını koruyabilmekte, asidik ortamlardan etkilenmemekte ve darbeye, aşınmaya karşı yüksek direnç gösterebilmektedir. Ulusal ve uluslararası literatür incelendiğinde KAC kullanılarak üretilmiş köpük betona yönelik bilimsel çalışmalar mevcut olmakla birlikte bu konuda yürütülen çalışma sayısı greceli olarak azdır.

KAC, en yaygın özel çimento çeşidi olmasına karşın dünya çapında yıllık üretimi PÇ'nin % 0.1 oranından daha düşüktür (Scrivener, 2003). Bu kadar az kullanılmasının en büyük nedenlerinden birisi, geçirdiği dönüşüm reaksiyonlarının yarattığı dengesizliktir. Hidratasyon sürecinde ortaya çıkan dönüşüm reaksiyonları sonucunda gözeneklilik artmakta ve dayanım düşmektedir (Bizzozero, 2014). Fakat Mangabhai (1990), tarafından yapılan çalışmada KAC'nun yapı malzemesi olarak kullanılması için hiçbir engel bulunmadığı belirtilmiştir.

KAC'nun hidratasyon süreci PÇ'dan farklıdır. Genel olarak PÇ hidratasyonunun %60-80'i 28 günde gerçekleşmektedir. 28 günden sonra hidratasyon yavaşlayarak devam etmektedir. Bununla birlikte KAC'daki hidratasyonun büyük bir bölümü sadece ilk 24 saat içinde gerçekleşmektedir (Kan vd., 2017). PÇ, kalsiyum ve silisyum oksitleri ile C<sub>2</sub>S ve C<sub>3</sub>S fazlarını oluşturup su ile tepkimeye girdiğinde kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve kalsiyum hidrat (C-H) oluşumlarını sağlamaktadır. KAC, kalsiyum ve alüminyum oksitleri ile mono kalsiyum alüminat (CA) oluşturup su ile tepkimeye girdiğinde sıcaklığa bağlı olarak kararlı ya da yarı kararlı hidratasyon ürünlerini (2C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub> vd.) oluşturmaktadır (Sucu ve Delibaş, 2015).

Ramamurthy vd. (2009), tarafından yapılan çalışmada; köpük hacmindeki artışın karışımın kararlılığını etkilemesi sebebiyle karışım su/katı oranının gereksinimleri karşılayacak şekilde seçilmesi gerektiğini bildirmiştir. Küresel ve uygun aralıklarla bulunan hava boşluğu gözeneklerinin bu düzenli dağılım özelliği sebebiyle köpük betonun iyi mekanik özelliklere sahip olmasını sağladığı belirtilmiştir.

Orcay (2010), tarafından yapılan yüksek lisans tezinde; geliştirilmiş polistren ile üretilmiş yalıtım betonlarının mekanik özellikleri ve ısı iletkenlikleri incelenmiştir. Birim hacim ağırlıkları 400-1800 kg/m<sup>3</sup> arasında olan 5 farklı geliştirilmiş polistrenli hafif beton üretilmiştir. Geliştirilmiş polistrenli hafif betonların tamamından elde edilen bulgular hafif betonun ısı iletkenliğinin birim hacim ağırlığının artmasına bağlı olarak doğrusal bir şekilde artırdığını göstermiştir.

Vilches vd., (2012), tarafından yapılan bir çalışmada; ultra hafif köpük beton yoğunluğunun artması ile yüksek sıcaklık direncinin artması, 400 kg/m<sup>3</sup> yoğunluk için 150 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğa göre 3 kat daha fazla olması ve yeterli yüksek sıcaklık direnci için 250 kg/m<sup>3</sup>'ten daha yüksek bir yoğunlukta tasarımların yapılması gerektiğini ifade etmiştir.

Davraz ve Kılınçarslan (2015), tarafından yapılan çalışmada; PÇ, kalker tozu, polipropilen elyaf ve süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılarak 300 kg/m<sup>3</sup> çimento dozajı ve sabit 0.30 su/katı oranında hazırlanan harçlara 80 g/l yoğunlukta köpük ilave edilerek numuneler üretilmiştir. 300 ile 1400 kg/m<sup>3</sup> aralığındaki 12 farklı kuru yoğunlukta üretilen numunelerin 28 günlük basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve ısı iletkenlik katsayıları belirlenmiştir.

Çetin vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada; 300, 400 ve 500 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı içeren köpük beton numunelerinin hızlı ve yüksek erken dayanım kazanımı incelenmiştir. PÇ ile birlikte kullanıldığında hem yüksek dayanım hem de çok kısa priz süresi elde edilen KAC'nun köpük beton blokları şeklinde kullanımı değerlendirilmiştir. Yapılan deneylerde farklı Portland çimentosu/kalsiyum alüminat çimentosu oranlarında dayanım değerleri ve kuru haldeki numunelerin ısı iletkenlik katsayıları belirlenmiştir. KAC içeren karışımların dayanımlarında ise PÇ ile önemli bir fark görülmemiştir.

Engin (2018), tarafından yapılmış olan yüksek lisans tez çalışmasında; geliştirilmiş perlit agregası ve katkı maddeleri kullanılarak ısı yalıtım özelliği kazandırılmış ultra hafif betonlar üretilmesi amaçlanmıştır. Kuru birim hacim ağırlığı 150 kg/m<sup>3</sup>'e kadar düşürülen ultra hafif beton numunelerinin ısı iletkenlik katsayısı 0.039 W/mK, basınç dayanımı 0.13 MPa ve su emmesi % 242.3 olarak belirlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında “kuru yoğunluğu ( $D_{kuru}$ )  $\leq 500 \text{ kg/m}^3$  ve basınç dayanımı  $\geq 250 \text{ kPa}$  ve ısı iletkenlik katsayısı ( $\lambda \leq 0.065 \text{ W/mK}$ ” değerlerini sağlayan KAC çimentolu hafif beton numunelerinin üretilmesi amaçlanmıştır.

## 2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Bu çalışma Süleyman Demirel Üniversitesi Doğal ve Endüstriyel Yapı Malzemeleri Uygulama ve Araştırma Merkezi (SDÜ DEYMAM)’nde yürütülmüştür. Beton üretimlerinde bağlayıcı olarak ÇİMSA AŞ. üretimi ISIDAÇ 40 çimentosu kullanılmıştır. Söz konusu çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** KAC özellikleri (KAC Properties) (ÇİMSA A. Ş., 2020)

Kimyasal Özellikleri (%)		Fiziksel Özellikleri	
SiO <sub>2</sub>	3.60	Hacim Sabitliği (mm)	1.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	39.80	0.045 mm Elekte Kalıntı (%)	23.0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.05	0.090 mm Elekte Kalıntı (%)	6.5
CaO	36.20	Özgül Yüzey Alanı (cm <sup>2</sup> /g)	3000
MgO	0.65	Priz Başlangıcı (dak)	280
		Priz Sonu (dak)	295
		Özkütle (g/cm <sup>3</sup> )	3.25
Mekanik Özellikleri (MPa)			
6 Saatlik Basınç Dayanımı			47.0
24 Saatlik Basınç Dayanımı			70.0

Köpük üretiminde sentetik köpük ajanı (CONTOPP® Foambuilder SFS3) kullanılmıştır. Üretici firma tavsiyesi doğrultusunda 50 L suya 1 L köpük ajanı ilavesiyle hazırlanan karışım, basıncı 4 atm’e ayarlı köpük jeneratörüne beslenerek köpük üretilmiştir. KAC bağlayıcılı hafif beton numuneleri;

- I. Yalnızca genişletme/yapıcı madde kullanılarak,
- II. Genişletme maddesi +2mm genişletilmiş perlit kullanılarak ve
- III. Köpük ilavesiyle, olmak üzere 3 farklı yöntemle üretilmiştir.

Harç üretiminde kıvam artırıcı olarak karboksi metil selüloz (CMC), priz hızlandırıcı olarak lityum karbonat (LK) kullanılmıştır. I ve II nolu yöntemde harç bileşimine gaz yapıcı madde olarak % 30 seyreltik hidrojen peroksit (HP) ve katalizör olarak potasyum iyodür (KI) ilave edilmiştir. II. yöntemde göre üretilen harçlarda hafif agrega olarak kullanılan genişletilmiş perlit İzmir’den Bergama Madencilik İnşaat Makine Perlit San. Tic. A. Ş.’den temin edilmiştir. Perlitin kimyasal yapısı, fiziksel özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2.** Genleştirilmiş perlit fiziksel ve kimyasal özellikleri (Physical and chemical properties of expanded perlite)

Kimyasal Özellikleri (%)		Fiziksel Özellikleri	
SiO <sub>2</sub>	72.92	Renk	Gri, beyaz
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.82	Özkütle (g/cm <sup>3</sup> ) <sup>a</sup>	2.276
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.04	Gevşek yığın yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> ) <sup>b</sup>	86
CaO	1.04	Görünür tane yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> ) <sup>b</sup>	0.199
Na <sub>2</sub> O	2.69	Etüv kurusu tane yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> ) <sup>b</sup>	0.158
K <sub>2</sub> O	7.00	Doygun yüzeyi kuru tane yoğ. (g/cm <sup>3</sup> ) <sup>b</sup>	0.365
MgO	0.19	24 saatte kütlece su emme (%) <sup>b</sup>	132
LOI	2.16	Tane boyutu	+2 mm
<sup>a</sup> Gaz piknometresi ile belirlenmiştir. <sup>b</sup> TS EN 1097-6 standardına göre belirlenmiştir.			

Yöntem I’de belirli oranlarda HP ve CMC’un etkilerini belirleyebilmek için 10 farklı karışım yapılmıştır (Tablo 3). Karışım tasarımında KI (HP kütleinin %10’u) ve LK (KAC kütleinin % 0.1’i) oranları sabit tutulmuştur.

Yöntem II’de belirli oranlarda +2 mm genişletilmiş perlit ilavesinin etkilerini görebilmek için 4 farklı karışım tasarımı yapılmıştır (Tablo 4). HP oranı KAC kütleinin %2’si oranında sabit tutulmuştur. Ek olarak, tasarımda KI, LK, CMC ve ilave su oranları sabit tutulmuştur.

**Tablo 3.** Yöntem I'e göre hazırlanan harç tasarımları (~250 cm<sup>3</sup> için) (Mortar designs prepared according to Method I) (for ~250 cm<sup>3</sup>)

HP oranı sabit, CMC oranı %0.01-%0.05 arasında değişken										
Bileşenler	HP1		HP2		HP3		HP4		HP5	
	W (g)	%	W (g)	%	W (g)	%	W (g)	%	W (g)	%
KAC	65		65		65		65		65	
HP	1.95	3	1.95	3	1.95	3	1.95	3	1.95	3
LK	0.065	0.1	0.065	0.1	0.065	0.1	0.065	0.1	0.065	0.1
Su	32.5		32.5		32.5		32.5		32.5	
KI	0.195	10	0.195	10	0.195	10	0.195	10	0.195	10
CMC	0.007	0.01	0.013	0.02	0.020	0.03	0.026	0.04	0.033	0.05
s/c	0.50		0.50		0.50		0.50		0.50	
CMC oranı sabit, HP Oranı %1-%5 arasında değişken										
Bileşenler	HP6		HP7		HP8		HP9		HP10	
	W (g)	%	W (g)	%	W (g)	%	W (g)	%	W (g)	%
KAC	65		65		65		65		65	
HP	0.65	1	1.30	2	1.95	3	2.60	4	3.25	5
LK	0.065	0.1	0.065	0.1	0.065	0.1	0.065	0.1	0.065	0.1
Su	32.5		32.5		32.5		32.5		32.5	
KI	0.065	10	0.130	10	0.195	10	0.260	10	0.325	10
CMC	0.007	0.01	0.007	0.01	0.007	0.01	0.007	0.01	0.007	0.01
s/c	0.50		0.50		0.50		0.50		0.50	
$\% HP = W_{HP} * 100 / W_{KAC}$					$\% KI = W_{KI} * 100 / W_{HP}$					
$\% LK = W_{LK} * 100 / W_{KAC}$					$\% CMC = W_{CMC} * 100 / W_{KAC}$					
$W_{HP}$ : HP kütlesi, $W_{KAC}$ : KAC kütlesi, $W_{LK}$ : LK kütlesi, $W_{KI}$ : KI kütlesi, $W_{CMC}$ : CMC kütlesi										

**Tablo 4.** Yöntem II'ye göre hazırlanan harç tasarımları (~250 cm<sup>3</sup> için) (Mortar designs prepared according to Method II) (for ~250 cm<sup>3</sup>)

CMC ve HP oranı sabit; Perlit oranı %5-%20 arasında									
Bileşenler	P1		P2		P3		P4		
	W (g)	%	W (g)	%	W (g)	%	W (g)	%	
KAC	73.32		68.6		63.9		59.2		
PLT	3.90	5	7.80	10	11.7	15	15.6	20	
HP	1.47	2	1.37	2	1.28	2	1.19	2	
LK	0.073	0.1	0.06	0.1	0.06	0.1	0.05	0.1	
Su	36.66		34.3		31.9		29.6		
KI	0.15	10	0.14	10	0.13	10	0.12	10	
CMC	0.007	0.01	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	
İlave Su	9.75	2.5	19.5	5.0	29.2	7.5	39.0	10.	
s/c	0.50		0.50		0.50		0.50		
$\% Perlit = W_{perlit} * 100 / M_{KAC}$					$\% KI = W_{KI} * 100 / W_{HP}$				
$\% HP = W_{HP} * 100 / M_{KAC}$					$\% CMC = W_{CMC} * 100 / W_{KAC}$				
$\% LK = W_{LK} * 100 / M_{KAC}$					$\% İlavesu = W_{su} * 100 / W_{perlit}$				
$W_{perlit}$ : Perlit kütlesi					$W_{su}$ : İlave su kütlesi				

Yöntem III'de farklı köpük dozajlarının etkilerini görebilmek için 3 farklı harç tasarımı yapılmıştır (Tablo 5). Karışım tasarımında LK oranları sabit tutulmuştur.

**Tablo 5.** Yöntem III'e göre hazırlanan harç tasarımları (~1000 cm<sup>3</sup> taze harç için) (Mortar designs prepared according to Method III) (~1000 cm<sup>3</sup> for fresh mortar)

Köpük dozajı değişken						
Bileşenler	K1		K2		K3	
	W (g)	%	W (g)	%	W (g)	%
KAC	130		190		250	
K	70		60		50	
LK	0.13	0.1	0.19	0.1	0.25	0.1
Su	52		76		100	
İlave Su	308		284		260	
s/c	0.40		0.40		0.40	
k/c	0.54		0.32		0.20	
<i>k/c: Köpük/çimento oranı</i>						

Harçların karışımında el mikseri tipi karıştırıcı kullanılmıştır. Bileşenler 1 mg hassasiyetli elektronik terazi ile tartılmıştır. Her bir karışım tasarımı için 2 adet 40×40×160 mm prizma takımı ve ısıl iletkenlik testi için 1 adet Ø50 mm çaplı 100 mm yüksekliğinde çelik silindir kalıp kullanılmıştır. Karışıma önce karışım suyu, katı bileşenler ilave edilmiş ve 1 dak süreyle 75-80 d/dak hızla karıştırılmıştır. Sonrasında karışıma hidrojen peroksit ilave edilmiş ve 15 s süreyle yeniden karıştırılmıştır. Daha sonra karışım derhal kalıplara dökülmüştür (Şekil 1).

**Şekil 1.** Prizma kalıplara dökülmüş ve genişmiş hafif beton (Lightweight concrete poured into prism molds and expanded)

Numuneler 3 gün kalıpta bekletildikten ve yeterli dayanım kazandıktan sonra iklim kabininde 20 °C ve %95 bağıl nem ortamında kürlenmiştir (Şekil 2).

**Şekil 2.** İklim kabininde koşullandırılan prizma (a) ve silindirik (b) numuneler (Prism (a) and cylindrical (b) samples conditioned in climate cabin)

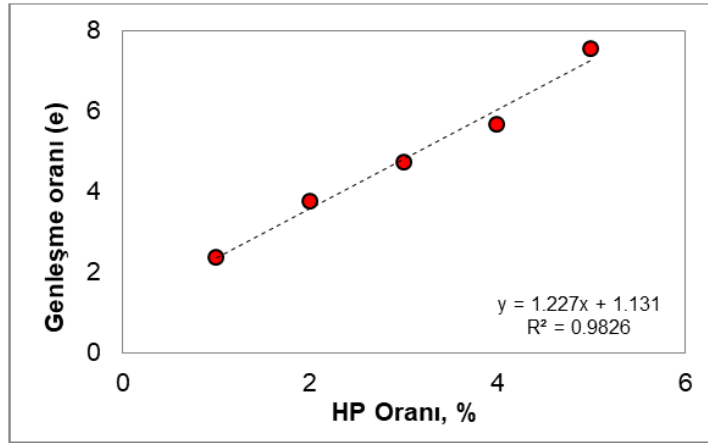
Kür süresini tamamlayan numuneler hava dolaşımli etüvde değişmez kütleye kadar kurutulmuştur (Şekil 3).

**Şekil 3.** Hava dolaşımli etüvde değişmez kütleye kadar kurutulan prizma numuneleri (Prism samples dried to a constant mass in an air circulation oven)

Değişmez kütleyle kadar kurutulan silindirik numuneler elmas testere ile 25 mm kalınlıkta, yüzeyleri paralel biçimde kesilerek 3'er adet ısı iletkenlik deney numunesi elde edilmiştir. Prizma numuneler kalıptan çıkarılmadan yüzeyleri düzeltilmiştir. Elde edilen numunelerin kuru yoğunlukları ( $D_{Kuru}$ ) TS EN 678, TS EN 1015-10 standartlarına göre, eğilme ve basınç dayanımları TS EN 1015-11 standardına göre ve ısı iletkenlik katsayıları TS EN 12664 standardına göre belirlenmiştir. Isıl iletkenlik katsayısı ölçümleri ısı akış ölçer yöntemine göre Lasercomp Fox 50 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca numunelerin morfolojik özellikleri SEM görüntü çekimi yapılarak incelenmiştir.

### 3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

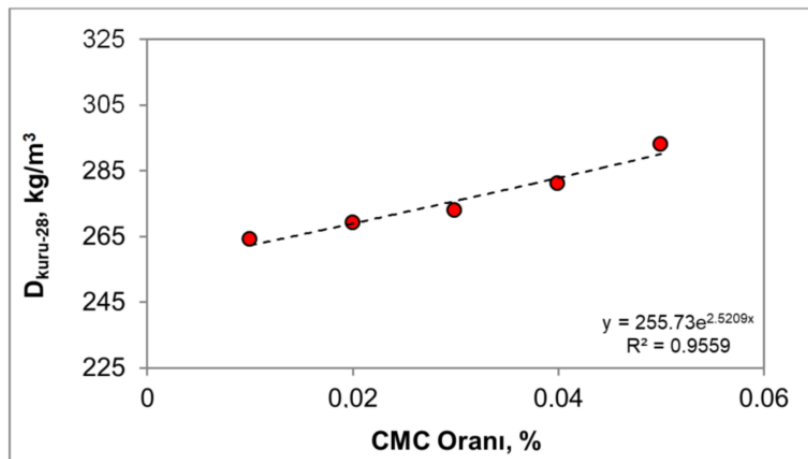
Yöntem I'e göre üretilen numunelerin hacimce genişleme oranları incelenmiş ve bulgular Şekil 4'de verilmiştir. Yöntem I kapsamında CMC oranlarından başka, diğer bileşen oranları sabit tutularak HP oranlarındaki artışın genişlemeye etkisi araştırılmıştır. HP oranı ve genişleme oranı arasında lineer bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. HP6, HP7, HP8, HP9 ve HP10 numunelerinde genişleme oranı sırasıyla 2.36, 3.77, 4.72, 5.66 ve 7.55 olarak hesaplanmıştır. Buradan çimento kütlelerinin %5'i oranında HP kullanımının hacmi 7.5 kat kadar artırdığı sonucuna varılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. HP oranı-genişleme oranı ilişkisi (Relationship between HP ratio-expansion ratio)

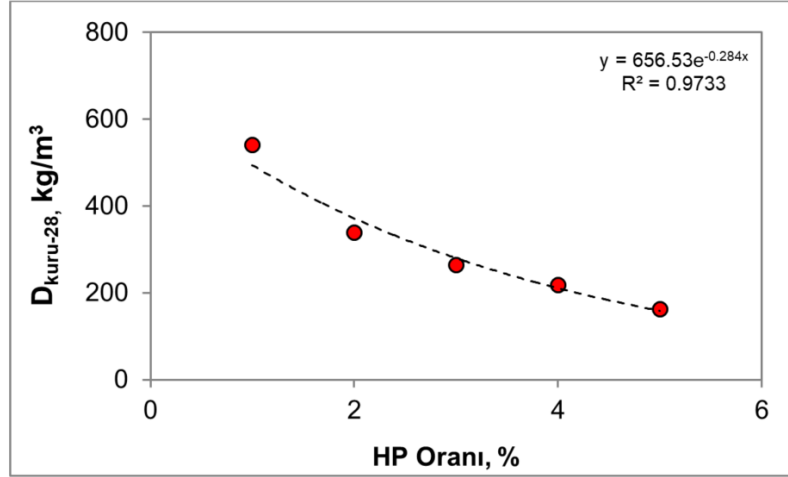
Yöntem II kapsamında HP oranı sabit tutularak farklı oranlarda perlit, çimentoya ikame edilerek kullanılmıştır. P1, P2, P3 ve P4'te oranlar sırasıyla çimento kütlelerinin % 5, 10, 15 ve 20'si iken karışımlardan aynı oranda çimento eksiltiştir. Karışımların genişleme öncesi ilk hacimlerinde lineer bir artış söz konusu iken nihai hacimlerinde ve bu duruma bağlı olarak genişleme oranı değerlerinde lineer bir azalma olmuştur (sırasıyla 4.15, 3.59, 3.08 ve 2.69). Bulgular sadece genişleme ve buna bağlı taze yoğunluk açısından değerlendirildiğinde, HP ile birlikte perlit kullanımının olumsuz bir etki yarattığını ortaya koymuştur.

Sabit HP oranında, farklı CMC oranlarına göre hazırlanan numunelerde CMC oranı artışına bağlı olarak kuru yoğunluk değerlerinin de arttığı belirlenmiştir. HP1, HP2, HP3, HP4 ve HP5 için 28 günlük kuru yoğunlukları sırasıyla 264, 269, 273, 281 ve 293  $kg/m^3$ 'tür (Şekil 5).



Şekil 5. Sabit HP oranında CMC oranı- $D_{kuru-28}$  ilişkisi (Relationship between CMC ratio- $D_{Dry-28}$  at fixed HP ratio)

Sabit CMC oranında farklı HP oranlarının (HP6, HP7, HP8, HP9 ve HP10) kuru yoğunluk değerlerine etkisi hafif beton numuneleri üzerinde incelenmiştir. Bulgular değerlendirildiğinde, karışıma dâhil edilen HP miktarı arttıkça kuru yoğunluk değerlerinin üstel olarak azaldığı belirlenmiştir (Şekil 6). Bu numunelerde kuru yoğunluk değerleri sırasıyla 541, 339, 264, 218, 163 kg/m<sup>3</sup>tür.

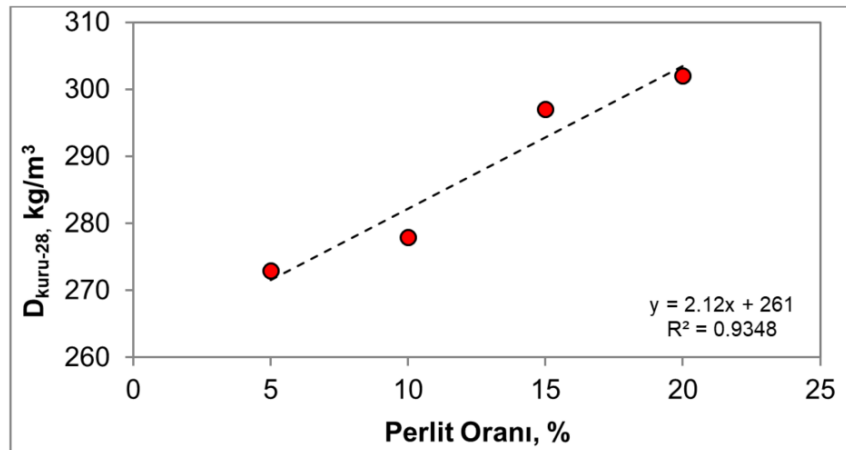


Şekil 6. Sabit CMC oranında HP oranı-D<sub>kuru-28</sub> ilişkisi (Relationship between HP ratio-D<sub>Dry-28</sub> at fixed CMC ratio)

CMC oranının %0.01'den %0.05'e artması, 28 günde numunelerin kuru yoğunluk değerlerinde %10 civarında bir artışa neden olmuştur. Bu durum, CMC oranındaki artışa bağlı olarak karışım kıvamı ve aderansındaki artışa, bu artışın HP - KI reaksiyonuyla açığa çıkan O<sub>2</sub>'nin çimento hamurunu kabartma etkisini baskılamasına dayandırılmıştır. HP oranındaki artış ise numunelerin kuru yoğunluk değerlerinin düşmesini sağlamıştır. HP'in her %1 oranındaki artışı kuru yoğunluk değerinde ortalama %25 oranında azalmaya neden olmuştur.

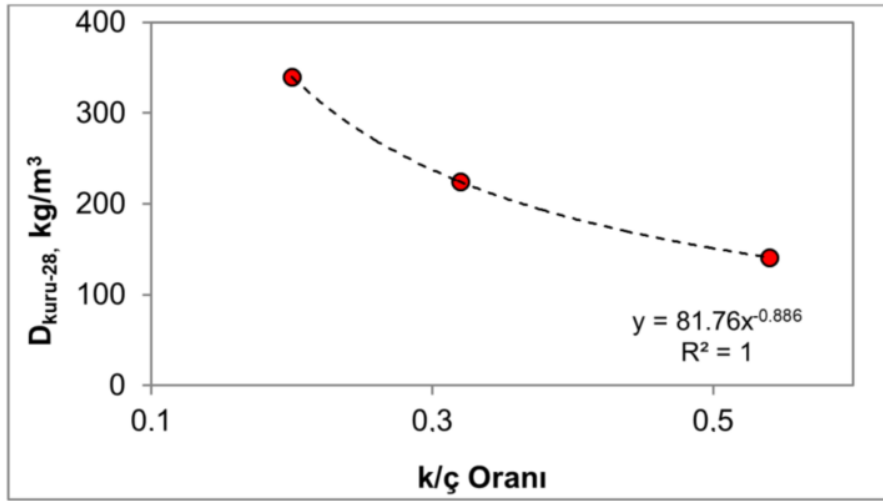
Sabit HP ve farklı perlit oranlarında hazırlanan hafif beton numunelerinin kuru yoğunluk bulguları incelenmiştir. Kuru yoğunluk değerleri perlit oranı artışına bağlı olarak bir miktar artmıştır. P1, P2, P3 ve P4 için kuru yoğunluk değerleri sırasıyla 273, 278, 297, 302 kg/m<sup>3</sup> tür (Şekil 7).

Perlit (+2 mm) çimentoya ikame edilerek kullanılmıştır. İkame edilen perlit miktarına eşdeğer çimento, karışımdan eksiltiştir. Perlit miktarı arttıkça numunelerin kuru yoğunluk değerlerinde %10'a varan oranda artış olmuştur. Bu durum, azalan çimento miktarına bağlı olarak genişleyen matris hacmindeki azalmayla (%10 civarında) ilişkilendirilmiştir.



Şekil 7. Perlit oranı-D<sub>kuru-28</sub> ilişkisi (Relationship between perlite ratio-D<sub>Dry-28</sub>)

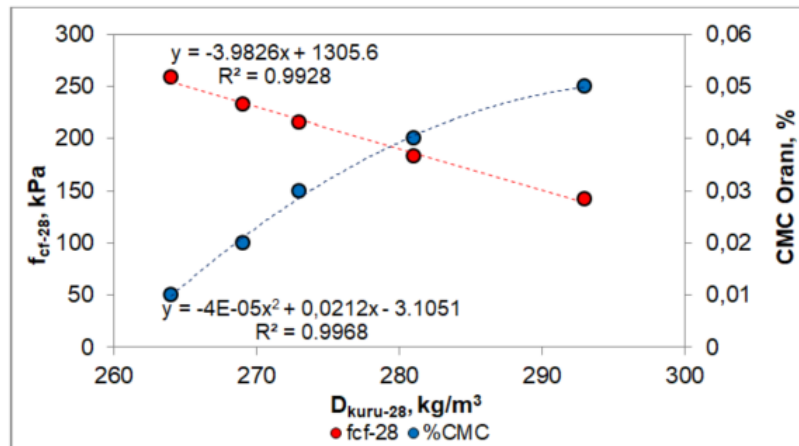
Yöntem III kapsamında, Yöntem I ve II'ye göre üretilen hafif beton numuneleriyle benzer kuru yoğunluk değerlerine sahip numuneler üretilmiştir. Bu amaçla köpük beton numunelerinde köpük dozajlarına göre farklı k/c oranlarında 3 grup numune dökülmüştür. Numunelerin kuru yoğunluk bulguları incelendiğinde, k/c oranındaki azalmaya bağlı olarak K1, K2 ve K3 hafif beton numunelerinin kuru yoğunluk değerleri sırasıyla 141, 225 ve 340 kg/m<sup>3</sup> olarak gerçekleşmiştir (Şekil 8).



Şekil 8. k/c oranı-D<sub>kuru-28</sub> ilişkisi (Relationship between k/c ratio-D<sub>Dry-28</sub>)

Normal şartlarda çimento dozajı ve s/c oranı değişmediğinde kuru yoğunluk ile eğilme ve basınç dayanım değerleri arasında doğru orantılı bir artış olması beklenir. Ancak Yöntem I'e göre üretilen hafif beton numunelerinde CMC oranı artışı sonucu kuru yoğunluk değerlerinin artmasıyla birlikte eğilme ve basınç dayanım değerleri azalmıştır. Bu sonuç, KAC içeren hafif betonlarda CMC'nin eğilme ve basınç dayanım değerlerini olumsuz yönde etkilediğini açık biçimde göstermiştir. Eğilme dayanımının basınç dayanımına göre daha yüksek oluşu CMC oranındaki artışla ilişkilidir. CMC oranı arttıkça eğilme ve basınç dayanımları azalmıştır. Ancak basınç dayanımındaki azalma eğilme dayanımına göre daha yüksektir. CMC selüloz türevli bir madde olması nedeniyle her ne kadar çimento hidratasyonunu olumsuz yönde etkilese de eğilme dayanımında kısmi bir katkısı olduğu ileri sürülebilir.

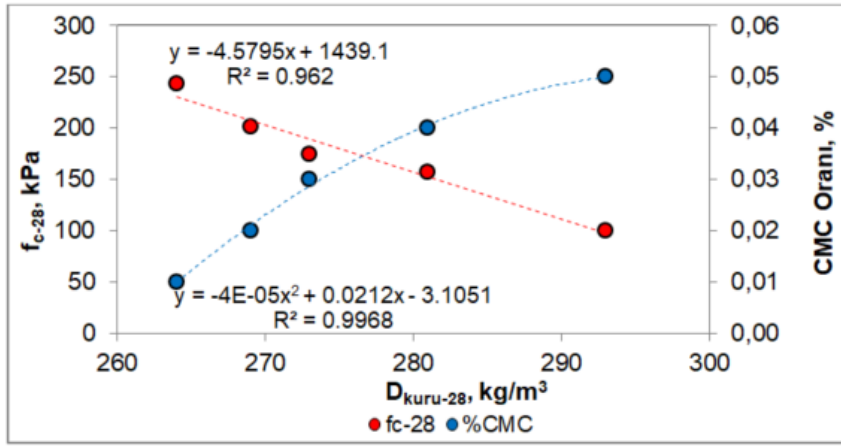
%0.01 CMC içeren HP1'in kuru yoğunluğu 264 kg/m<sup>3</sup> ve eğilme dayanımı 259 kPa iken, %0.05 CMC içeren HP5'te kuru yoğunluğu 293 kg/m<sup>3</sup>'e yükselmesine karşılık basınç dayanım 142 kPa'a kadar azalmıştır. Bir başka deyişle %0.01 oranındaki CMC artışı eğilmede yaklaşık %10 oranında dayanım kaybına neden olmuştur (Şekil 9).



Şekil 9. f<sub>cf-28</sub>-D<sub>kuru-28</sub>-CMC oranı ilişkisi (Relationship between f<sub>cf-28</sub>-D<sub>Dry-28</sub> CMC ratio)

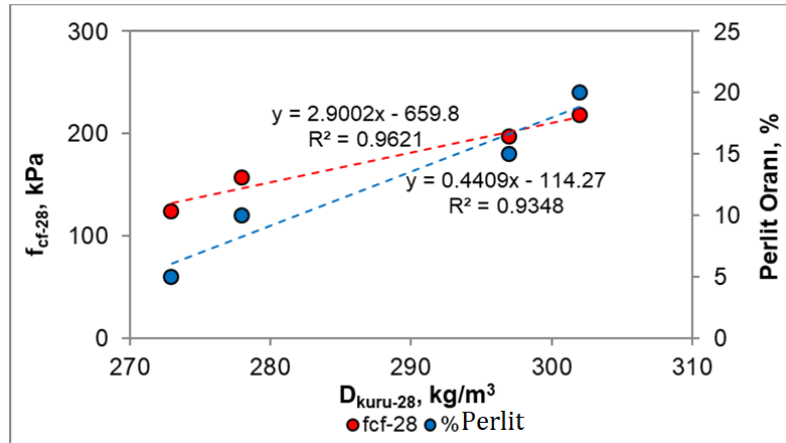
Benzer durum, basınç dayanımı değerleri içinde için de söz konusudur. % 0.01 CMC içeren HP1'in kuru yoğunluğu 264 kg/m<sup>3</sup> ve basınç dayanımı 243 kPa iken % 0.05 CMC içeren HP5'te kuru yoğunluğu 293 kg/m<sup>3</sup>'e yükselmesine karşılık basınç dayanımı 100 kPa'a gerilemiştir. CMC oranındaki her % 0.01 oranındaki artış, basınç dayanımında %15-20 azalmaya neden olmuştur (Şekil 10). Dikkat çekici bir diğer nokta da eşdeğer kuru yoğunluklar için eğilme dayanımının, basınç dayanımından daha yüksek olmasıdır. Ayrıca CMC oranları %0.01, 0.02, 0.03, 0.04 ve 0.05 için eğilme dayanımı/basınç dayanımı oranları sırasıyla 1.07, 1.17, 1.23, 1.17 ve 1.42 olmuştur.





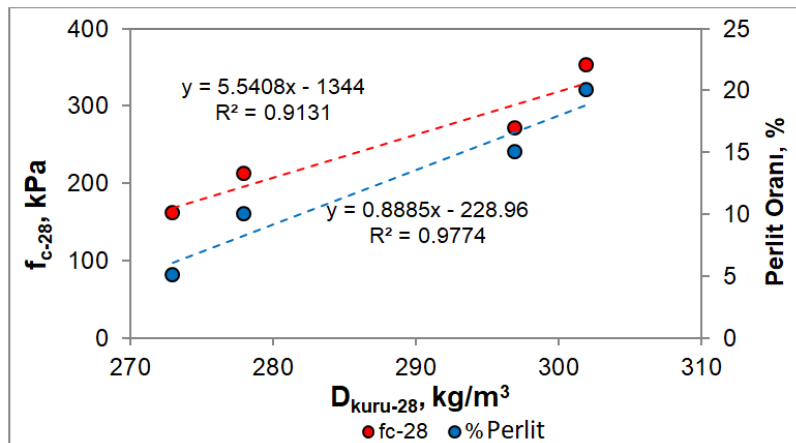
Şekil 10.  $f_{c-28}$ - $D_{kuru-28}$ -CMC oranı ilişkisi (Relationship between  $f_{c-28}$ - $D_{Dry-28}$  CMC ratio)

Yöntem II'ye göre üretilen hafif beton numunelerinde P1 (perlit oranı %5) kuru yoğunluğu 273 kg/m<sup>3</sup> iken P4'te (perlit oranı %20) 302 kg/m<sup>3</sup> olarak gerçekleşmiştir. Buna karşılık eğilme dayanımı P1'de 124 kPa iken P4'te 218 kPa'a ulaşmıştır. Bir başka deyişle %15 oranından daha fazla perlit kullanımı kuru yoğunluğunu %10 artırırken eğilme dayanımını %75 oranında iyileştirmiştir (Şekil 11).



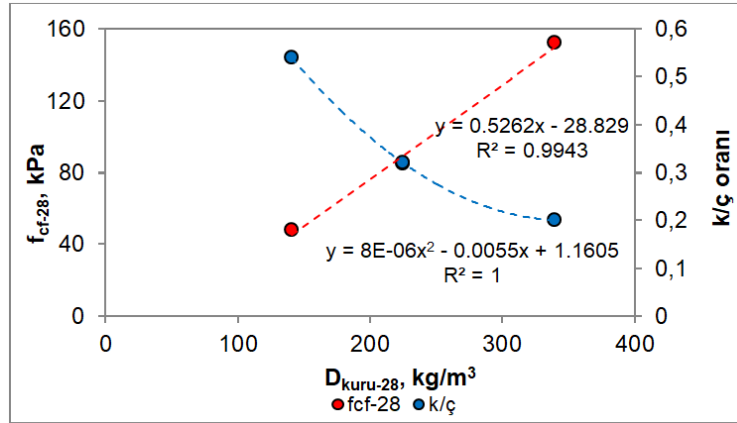
Şekil 11.  $f_{cf-28}$ - $D_{kuru-28}$ -perlit oranı ilişkisi (Relationship between  $f_{cf-28}$ - $D_{Dry-28}$ -perlite ratio)

Eğilme dayanımına göre basınç dayanımında iyileşme daha fazladır. Basınç dayanım P1'de 161 kPa iken P4'te 352 kPa değerine ulaşmıştır. Perlit kullanımında %15 artış kuru yoğunluğunu %10 artırırken basınç dayanımını %118 oranında iyileştirmiştir (Şekil 12). P1, P2, P3 ve P4 numunelerinin  $f_{cf-28}/f_{c-28}$  oranları sırasıyla 0.77, 0.74, 0.73 ve 0.62 olarak hesaplanmıştır.

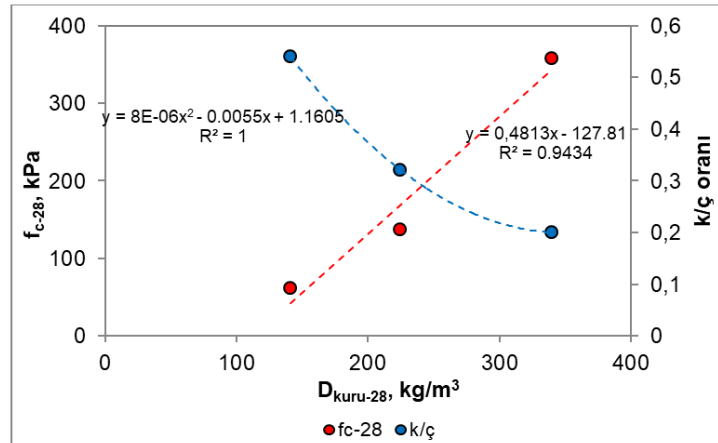


Şekil 12.  $f_{c-28}$ - $D_{kuru-28}$ -perlit oranı ilişkisi (Relationship between  $f_{c-28}$ - $D_{Dry-28}$ -perlite ratio)

Yöntem III'e göre üretilen hafif numunelerinde k/c oranı ve kuru yoğunluk arasındaki korelasyon oldukça yüksektir ( $r^2 = 1$ ). K1 ve K3 numuneleri karşılaştırıldığında, k/c oranının azalmasına bağlı olarak kuru yoğunluğu %141 oranında artarken eğilme dayanımı da %217 oranında iyileşmiştir. Aynı ilişki açısından basınç dayanımı incelendiğinde bu artış %587 oranındadır. Yani kuru yoğunluktaki artışa bağlı olarak eğilme dayanımı yaklaşık 2, basınç dayanımı ise 6 kat artmıştır (Şekil 13 ve 14). K1, K2 ve K3 numunelerinin  $f_{cf-28}/f_{c-28}$  oranları sırasıyla 0.79, 0.63 ve 0.42 tür.

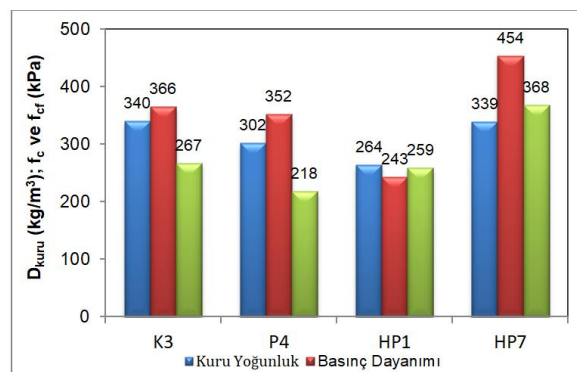


Şekil 13.  $f_{cf-28}$ - $D_{kuru-28}$ - $k/c$  oranı ilişkisi (Relationship between  $f_{cf-28}$ - $D_{Dry-28}$ - $k/c$  ratio)



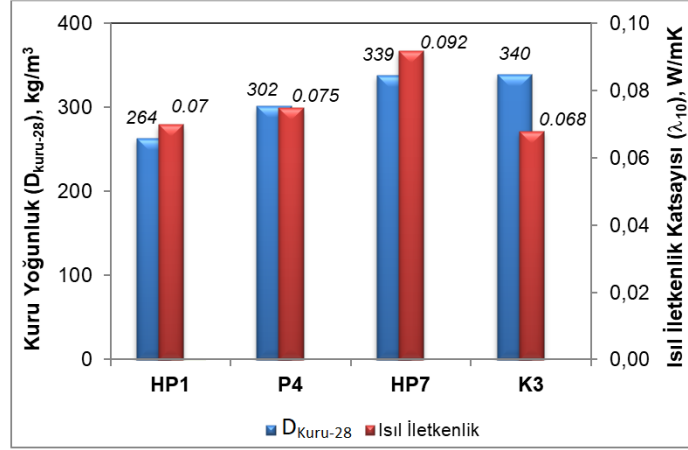
Şekil 14.  $f_{c-28}$ - $D_{kuru-28}$ - $k/c$  oranı ilişkisi (Relationship between  $f_{c-28}$ - $D_{Dry-28}$ - $k/c$  ratio)

Bulgular ışığında Yöntem I, II ve III'e göre üretilen hafif beton numuneleri içerisinde optimum fiziko-mekanik özellikleri sağlayan numuneler belirlenmiştir. Buna göre HP1, HP7, P4 ve K3 numuneleri hedef kriterlerin çoğuna uygunluk göstermiştir. HP1, HP7 ve P4 numunelerinde kuru yoğunluk ile basınç dayanımı arasında doğrusal bir ilişki vardır (sırasıyla 264  $kg/m^3$ -243 kPa, 339  $kg/m^3$ -454 kPa ve 302  $kg/m^3$ -352 kPa). Ancak K3'te basınç dayanımı, yüksek kuru yoğunluğuna rağmen beklenen seviyede artış göstermemiştir (340  $kg/m^3$ -366 kPa). Bu durumun köpük ajanının KAC hidratasyonuna olumsuz bir etkisinden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır (Şekil 15).



Şekil 15. Optimum hafif beton numunelerinde  $D_{kuru}$ - $f_c$ - $f_{cf}$  ilişkisi ( $D_{dry-28}$ - $f_c$ - $f_{cf}$  relationship in optimum lightweight concrete samples)

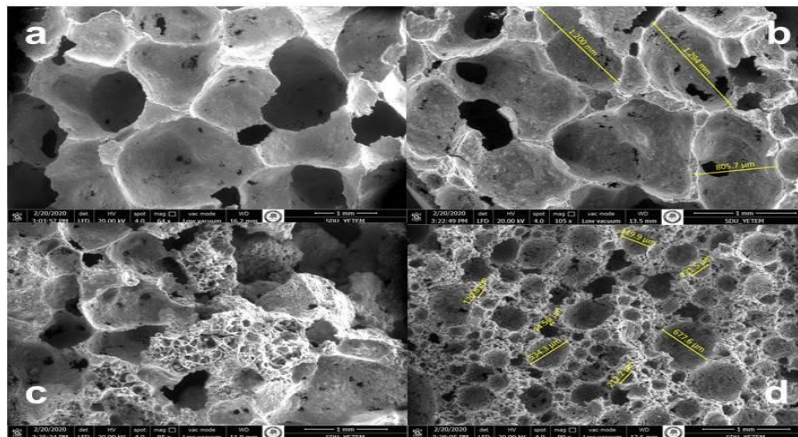
Hafif beton üretim yöntemlerinden optimum kuru yoğunluk ve basınç dayanımını sağlayan numunelerin (HP1, HP7, P4 ve K3) TS EN 12664 standardına uygun olarak, Isı akış ölçer yöntemine göre ısı iletkenlik katsayıları ( $\lambda_{10}$ ) ölçülmüştür. Ölçümler, SDÜ DEYMAM'da LaserComp Fox 50 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Sıcak ve soğuk plakalar arasındaki  $\Delta T$ , 10 K olarak seçilmiş ve bulgular Şekil 16'da verilmiştir.



Şekil 16. Optimum özelliklerdeki hafif beton numunelerinde  $D_{kuru-28}$ - $\lambda_{10}$  ilişkisi ( $D_{dry-28}$ - $\lambda_{10}$  Relationship in optimum lightweight concrete samples)

Ulusal standartlarda (TS ve TS EN) ısı yalıtım malzemeleri için  $\lambda_{10}$  sınır değerleri mevcut değildir. Bununla birlikte uluslararası genel kabule göre  $\lambda_{10} \leq 0.065$  W/mK olan malzemeler ısı yalıtım malzemesi,  $\lambda_{10} > 0.065$  W/mK olan malzemeler yapı malzemesi olarak tanımlanmaktadır (Karaağaç vd., 2016). Sınır değerleri gözetildiğinde HP1, HP7, P4 ve K3 numuneleri yapı malzemesi sınıfına girmektedir. Ancak K3 ve HP1 numunelerinin ısı iletkenlik katsayıları (sırasıyla 0.068 ve 0.070 W/mK) ısı yalıtım malzemesi üst sınırına oldukça yakındır. Hâlbuki kuru yoğunlukları K3'e çok yakın olan HP7'nin ısı iletkenliği çok daha yüksektir (0.092 W/mK). Genleştirme maddesi olarak HP kullanılan HP1, HP7 ve P4 numunelerinde ısı iletkenlik katsayısı kuru yoğunluğu ile ilişkiliyken K3'te bu ilişki bozulmuştur (Şekil 16).

Optimum hafif beton numunelerinin boşluk yapısı ve özellikleri hakkında bilgi edinebilmek için SDÜ YETEM'de SEM görüntüleri alınmıştır (Şekil 17). HP1 numunesinin SEM görüntüsü incelendiğinde gözenek dağılımının homojen ve yaklaşık olarak küresel formda hücrelerden oluştuğu görülmektedir. Bununla birlikte boşluk boyutları 1 mm'den büyük ve gözeneklerin bir kısmı birbirleriyle bağlantılıdır. HP7 numunesinde de boşluk boyutları ağırlıklı olarak 1 mm'den büyüktür. Bununla birlikte HP1'e göre yarı küresel hücre yapısı bozulmuş olup gözenekler arası bağlantıyı oluşturan kanalların daha yaygın olduğu görülmektedir. P4 numunesinde genel olarak yarı küresel gözenek formu bozulmuştur. Bu durumun, karışıma dâhil olan perlit agregasından kaynaklandığı görüntüden anlaşılmaktadır. Ayrıca perlit agregaları görüntüde net bir biçimde ayırt edilebilmektedir. Perlit agregaları haricinde hacmi dolduran hücrelerin neredeyse tamamı birbirleriyle bağlantılıdır. K3 numunesinde hücre boşluklarının farklı büyüklükte küresel formda olduğu görülmektedir. Boşluk boyutlarının önemli bir bölümü 500  $\mu$ m'den daha küçüktür. Hatta boyutları 100  $\mu$ m'den daha küçük hücreler, yapı içerisinde önemli oranlarda mevcuttur.



Şekil 17. Hafif beton numuneleri SEM görüntüleri (SEM images of lightweight concrete samples) (HP1: a; HP7: b; P1: c ve K3: d)

SEM görüntüleri incelendiğinde, hafif beton numuneleri içerisinde en küçük gözenek boyutunu ve en homojen hücre dağılımını K3 numunesi sergilemiştir. Ayrıca bu numunede bağlantılı boşluklar, diğer numunelere göre daha azdır. Isıl yalıtım malzemelerinde ısı iletkenlik katsayısı, kuru yoğunluk ile yakından ilişkilidir. Bununla birlikte gözenek boyutlarının ısı iletkenliğe etkisi de göz ardı edilmemelidir. Kuru yoğunluk değerine olan etki daha çok katılarda görülen ısı iletimi ile ilişkilendirilebilirken, gözenek boyutu gazlarda görülen ısı taşınımı (konveksiyonla iletim) ile ilişkilendirilebilir. Bu durum, K3 numunesinin ısı iletkenlik katsayısının neredeyse aynı yoğunluk değerine sahip olan HP7 numunesinden yaklaşık %30 oranında düşük olma nedenini açıklamaktadır.

#### 4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışma kapsamında, KAC bağlayıcı hafif betondan kuru yoğunluğu  $500 \text{ kg/m}^3$ ,  $\lambda_{10} \leq 0.065 \text{ W/mK}$ ,  $f_c \geq 250 \text{ kPa}$ , yanma direnci A1 sınıfı ve konvansiyonel yalıtım malzemeleri ile rekabet edebilir ürünlerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Numuneler 3 farklı yöntemle üretilmiştir. Yöntem I'de genleştirme maddesi olarak hidrojen peroksit kullanılmış, Yöntem II'de hidrojen peroksit oranı azaltılarak, karışıma genleştirilmiş perlit ilave edilmiş ve Yöntem III'de ise hafif beton, karışıma köpük ilavesiyle elde edilmiştir.

Yöntem I'e göre üretilen numunelerde artan CMC oranı genleşme katsayısına etkilememiştir (tüm numunelerde  $e=4.72$ ). Ancak aynı yöntemde HP oranındaki artışa bağlı olarak genleşme katsayısı da lineer olarak artmıştır. Çimento kütlesinin %5 oranında HP kullanımı hacmi 7.5 kat kadar artırmıştır. Yöntem II'de sabit HP oranında ve çimento ile yer değiştirme yöntemine göre ilave edilen perlit miktarında %5, %10, %15 ve %20 artışta genleşme oranları sırasıyla 4.15, 3.59, 3.08 ve 2.69 olarak gerçekleşmiştir. ~~PLT~~ Perlit oranı-genleşme oranı arasında ters orantı söz konusudur. Bu sonuç karışımda artan perlit miktarının HP'nin genleşme etkisini bastırıldığını açık bir biçimde ortaya koymuştur.

Sertleşmiş beton numunelerinde CMC oranındaki artış, kuru yoğunluk değerlerinde de artışa neden olmuştur. Bu artış, priz süresindeki artan gecikmeye bağlı gelişen hacim kaybıyla ilişkilendirilmiştir. Bulgular optimum CMC oranının %0.01 olarak seçilmesini desteklemiştir. Yöntem I kapsamında üretilen HP6 numunesi haricindeki numunelerde kuru yoğunluğun  $\leq 500 \text{ kg/m}^3$  hedefini sağlamıştır. Bulgular, KAC çimentolu hafif beton eldesinde kuru yoğunluğun  $\leq 500 \text{ kg/m}^3$  hedefi için HP oranının en az %2 olarak seçilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Yöntem I'e göre üretilen hafif beton numunelerinde HP oranı artışı sonucu kuru yoğunluk değerlerinin azalmasıyla, eğilme ve basınç dayanımları da önemli oranda azalmıştır. Eğilme dayanımı değerleri için kuru yoğunluklardaki her  $100 \text{ kg/m}^3$ 'lük azalma,  $\approx 180 \text{ kPa}$ 'lık dayanım kaybına neden olmuştur. Kuru yoğunluklardaki azalma numunelerinin basınç dayanım değerlerini olumsuz etkilemiştir. Kuru yoğunluklarda her  $100 \text{ kg/m}^3$ 'lük azalma basınç dayanımında ortalama  $380 \text{ kPa}$ 'lık azalışla sonuçlanmıştır. Yöntem II'ye göre üretilen hafif beton numunelerinde %15 oranında perlit kullanımı kuru yoğunluğu %10 artırırken, eğilme dayanım değerlerini %75 oranında iyileştirmiştir. %15 oranında perlit kullanımı basınç dayanım değerlerini de %118 oranında iyileştirmiştir. Yöntem III'e göre üretilen hafif beton numunelerinden K1 ve K3 numuneleri karşılaştırıldığında, köpük/çimento oranının azalmasına bağlı olarak kuru yoğunluğu %141 oranında artarken, eğilme dayanımını da %217 oranında artırmıştır. Aynı ilişki açısından basınç dayanımı değerleri incelendiğinde bu artış %587 değerindedir.

Hafif beton numuneleri içerisinde optimum fiziko-mekanik özellikleri sağlayan numuneler, Yöntem I'den HP1 ve HP7, Yöntem II'den P4 ve Yöntem III'den ise K3 numunesi olarak belirlenmiştir. Numunelerde  $0.065 \text{ W/mK}$  hedefi sağlanamamıştır. Bununla birlikte K3 ve HP1 numunelerinin ısı iletkenliği (sırasıyla  $0.068$  ve  $0.070 \text{ W/mK}$ ) ısı yalıtım malzemesi üst sınırına oldukça yakındır. HP1, HP7 ve P4 numunelerinde genleştirme maddesi olarak HP kullanılmış olup bu numuneler için ısı iletkenlik katsayısı değerleri kuru yoğunluk ile ilişkiliyken, K3'te bu ilişki bozulmuştur. Numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde numunelerin ısı iletkenlik değerlerinin yalnızca kuru yoğunluk ile değil aynı zamanda gözenek boyutlarıyla da ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. K3 numunesinin ısı iletkenlik katsayısı değerinin neredeyse aynı kuru yoğunluğa sahip olan HP7 numunesinden yaklaşık % 30 oranında düşük olma nedenini açıklamaktadır.

Sonuç olarak bu çalışma kapsamında KAC ile 3 farklı yöntemle  $\lambda_{10} \leq 0.065 \text{ W/mK}$  hedefi tam olarak sağlanamamıştır. Bununla birlikte kuru yoğunluğu  $350 \text{ kg/m}^3$  altında ve basınç dayanımı  $\geq 250 \text{ kPa}$  olan hafif beton numunelerin üretimi gerçekleştirilmiştir. KAC çimentolu hafif beton eldesinde HP ve köpük kullanımı karşılaştırıldığında; HP kullanımında daha hafif ve daha yüksek dayanımda hafif beton yapılabilmekte iken gözenek boyutları daha büyük ve dolayısıyla ısı iletkenlik değerleri daha yüksektir. Buna karşılık köpük kullanımında kuru yoğunluklar artmakta ancak gözenek boyutu daha küçük ve homojen dağılıma sahip olması nedeniyle ısı iletkenlik azalmaktadır.

## Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma TÜBİTAK 118M091 nolu TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmiştir. Yazarlar TÜBİTAK'a desteklerinden dolayı teşekkür ederler.

## Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

## Kaynaklar (References)

- Bizzozero, J., 2014. Hydration and Dimensional Stability of Calcium Aluminate Cement Based Systems. Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne (EPFL), Ph.D. Thesis, 189p, Lausanne.
- Çetin, C., Delibaş, T., Kırca, Ö., Yaman, İ., Ö., 2015. Köpük Beton İmalatlarında Kalsiyum Alüminat Çimentosu Kullanımı, 9. Ulusal Beton Kongresi, 16-18 Nisan, Antalya, 163-170.
- ÇİMSA A. Ş., 2020. ISIDAÇ 40 Calcium Aluminate Cement Building Chemicals Applications. Erişim Tarihi: 15.01.2020. <https://www.cimsa.com.tr/ca/docs/4FE58AA58E3A4B7B85FA9E4EE011A8/5D52AAA7A978476984B32DCB0B058D42.pdf>.
- Davraz, M., Kılınçarslan, Ş., Koru, M. Koru, 2015. Farklı Yoğunluktaki Köpük Betonların Dayanım ve Isıl İletkenlik Özellikleri, 9. Ulusal Beton Kongresi, 16-18 Nisan, Antalya, 93-102.
- Engin, C., 2018. Farklı Tane Boyutlu Genleştirilmiş Perlit Agregası ile Üretilen Ultra Hafif Betonların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 65s, Van.
- Kan, Y., Pei, K., Cheng, M., 2017. A Study of Fracture Properties of High Alumina Shielding Concrete (HASC). 24th Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, August 20-25, Busan, Division I: 10p.
- Karaağaç İ., Durmuş G., Uluer O., Aktaş M., Tülü F. A., 2016. Kompozit ısı yalıtım levhalarında ısı iletim katsayısı tespit yaklaşımları. El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt 3, No 1, s. 133-142.
- KNOPP Group, 2020. CONTOPP® Foambuilder SFS3. Erişim Tarihi: 15.01.2020. [http://www.knopp-hemie.com/main/getfile.php?download\\_id=349&language=english](http://www.knopp-hemie.com/main/getfile.php?download_id=349&language=english).
- Mangabhai, R. J. (Ed.) (1990). Calcium Aluminate Cements. Chapman and Hall, 396p, New York.
- Ramamurthy, K., Nambiar, E. K., Ranjani, G. I. S., 2009. A Classification of Studies on Properties of Foam Concrete. Cement and Concrete Composites, 31 (6), 388-396.
- Scrivener, K. L. (2003). Calcium Aluminate Cements. In Newman, J., Choo, B. S. (Eds.), Advanced Concrete Technology Constituent (2/1-2/30), Elsevier Ltd, Oxford.
- Sucu, M., Delibaş, T., 2015. Kalsiyum Alüminat Çimentosu Bazlı Tamir Betonları. Hazır Beton Dergisi, 131, 88-94.
- TS EN 1015-10, 2001. Kâgir Harcı-Deney Metotları-Bölüm 10: Sertleşmiş Harcın Boşluklu Kuru Birim Hacim Kütlesinin Tayini. TSE, Ankara.
- TS EN 1015-11, 2000. Kâgir Harcı-Deney Metotları-Bölüm 11: Sertleşmiş Harcın Basınç ve Eğilme Dayanımının Tayini. TSE, Ankara.
- TS EN 12664, 2009. Yapı malzemeleri ve mamulleri - Isıl direncin, korumalı tablalı ısıtıcı ve ısı akı ölçerinin kullanıldığı metotlarla tayini - Isıl direnci orta ve düşük seviyede olan kuru ve rutubetli mamuller, TSE, Ankara.
- TS EN 206, 2014. Beton - Özellik, performans, imalat ve uygunluk, TSE, Ankara.
- TS EN 678, 1995. Gaz ve köpük beton-Kuru yoğunluk tayini, TSE, Ankara.
- Orcay, E. A., 2010. Hafif Betonların Mekanik Özellikleri ve Isı İletkenlik Katsayıları. İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ), Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 67s, İstanbul.
- Vilches, J., Ramezani, M., Neitzert, T., 2012. Experimental Investigation of the Fire Resistance of Ultra Lightweight Foam Concrete. International Journal of Advanced Engineering Applications, 1 (4), 15-22.