



## Öğütülmüş Taneli Yüksek Fırın Cürüflü Kütle Betonlarında Sıcaklık Artışı ve Dayanım Gelişmesi Üzerine Bir Vaka Araştırması

### A Case Study on Temperature Rise and Strength Development in Ground Granulated Blast Furnace Slag Mass Concretes

<sup>1</sup>Kambiz RAMYAR , <sup>2</sup>Nuri HARTA , <sup>3</sup>Berna KOLUKISA 

<sup>1</sup>Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Bornova/İzmir, Türkiye

<sup>2</sup>Kent Beton Kalite Kontrol ve Güvence Müdürü, İzmir, Türkiye

<sup>3</sup>Kentçim Kalite Kontrol Müdürü, İzmir, Türkiye

<sup>1</sup>kambiz.ramyar@ege.edu.tr, <sup>2</sup>nuriharta@kentcim.com,

<sup>3</sup>bernakolukisa@kentcim.com

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 29 December 2021

Accepted : 27 February 2022

##### Keywords:

Mass Concrete, Blast Furnace Slag, Temperature Rise, Strength Development

#### ABSTRACT

In this study, the temperature rise and strength development in 94000 m<sup>3</sup> volume and up to 2-3 m deep reinforced concrete foundations of some high-rise buildings were investigated. In the preliminary study, the temperature rise was recorded in the core and surface of 1.5-2 m cubic mock-up blocks. The rate of strength development in slag concrete within first 7 days was found to be lower than that of the control mix containing a portland composite cement. However, beyond 7 days there was a considerable increase in the rate of strength development so that equivalent strength was obtained at 28 days. The negligible difference between the temperatures recorded in the mock-up and field concrete was attributed to the concrete placement temperature and ambient temperature. The temperature in core concrete reached its maximum value (55 to 64°C) within 42 to 60 hours, prolonging with the increase in placement temperature of concrete.

© 2022 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 29 Aralık 2021

Kabul : 27 Şubat 2022

##### Anahtar Kelimeler:

Kütle Betonu, Yüksek Fırın Cürüflü, Sıcaklık Artışı, Dayanım Gelişimi

#### ÖZET

Bu çalışmada bazı çok katlı yapıların, 94000 m<sup>3</sup> hacme ve 2-3 m'ye varan derinliğe sahip temellerinde kullanılan cürüflü betonlarda adyabatik sıcaklık artışı ve basınç dayanımı gelişmesi incelenmiştir. Ön araştırma kapsamında betondaki hidratasyon ısısının yol açtığı sıcaklık artışı 1.5-2 m ayrıtlı küp bloklarda, bloğun çekirdeği ve yüzeyinde kaydedilmiştir. Portland kompozite çimentosu içeren betona kıyasla cürüflü betonda dayanım gelişmesinin özellikle ilk 7 günde düşük olduğu, ancak bu yaştan sonra kayda değer mertebede arttığı, 28 günde kontrol karışımı dayanımına eşitlendiği tespit edilmiştir. Ön çalışmada ve temel betonlarında kaydedilen sıcaklıkların arasındaki ihmal edilebilecek farkın, betonun yerleştirme sıcaklığı ve ortam sıcaklığından kaynaklandığı kanısına varılmıştır. Dökümden 42-60 saat sonra beton sıcaklığının 55-64°C arasında değişen sıcaklıklarda pik yaptığı, pik sıcaklığın bağlayıcı miktarından ziyade betonun yerleştirme sıcaklığından etkilendiği belirlenmiştir.

© 2022 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

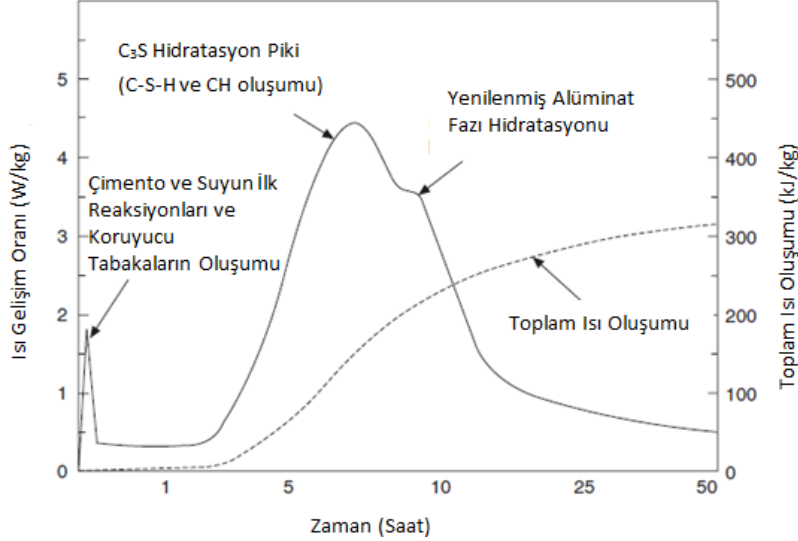
ORCID ID: <sup>1</sup>0000-0003-2200-2691

<sup>2</sup>0000-0003-1410-9245

<sup>3</sup>0000-0002-5974-718X

## 1. GİRİŞ

Portland çimentosunun bileşenleri, döner fırında yüksek sıcaklıkta oluşan reaksiyonların dengede olmayan ürünleri olduğundan yüksek enerjili konumdadır. Hidratasyon esnasında bileşenler, kararlı ve düşük enerji konumuna geçmek için su ile reaksiyona girmektedir. Bu reaksiyonun sonucunda yarısı ilk 1-3 günde olmak üzere 120 cal/g (~500 kJ/kg)'a varan ısı açığa çıkmaktadır (Şekil 1). 1 m<sup>3</sup> betondaki her 100 kg'lık çimento artışının, sertleşmekte olan betonun dökümden 18-72 saat sonraki sıcaklığını 10-15°C arttırdığı bilinmektedir. Bu sıcaklık artışının mertebesi döküm anındaki sıcaklığa, çimento inceliğine ve çimentonun kimyasal bileşimine bağlı olarak değişmektedir [1].



Şekil 1. Çimento hamurunda ortaya çıkan hidratasyon ısının hızı ve miktarı [2].

Katı maddeler genelde ısıtıldığında genişmekte, soğutulduğunda ise büzülmemektedir. Sıcaklıktan kaynaklanan deformasyonlar malzemenin ısıl genişleme katsayısına ve sıcaklık değişimi seviyesine bağlıdır. Aşırı koşullar dışında, geleneksel betonarme elemanlar ilk günlerde hidratasyon ısısından kayda değer oranda etkilenmemektedir. Ancak, hidratasyon ısısının hızlı şekilde sönmelenemediği kütle betonlarında oluşan sıcaklık oldukça yüksek seviyelere ulaşabilmektedir. Isının yayılmasıyla, betonun kolayca ısı kaybeden yüzeyi ile iç bölümleri arasında oluşabilecek büyük sıcaklık farkları, betonda çekme gerilmeleri ve ısıl büzülme çatlaklarının oluşmasına yol açabilmektedir. Bu çatlakların yapısal bütünlük ve monolitik davranışın kaybolmasına, geçirgenliğin artmasına, estetik açıdan olumsuzluğa ve yapının işletme ömrünün kısalmasına neden olmaması için betonun tasarımı ve uygulamasında gereken önlemler alınmalıdır. Isıl büzülme çatlakları, elemandaki en düşük ve en yüksek sıcaklık değerleri arasındaki fark, betonun ısıl genişleme katsayısı, çekme dayanımı ve elastisite modülüne bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Beton elemandaki en düşük ve en yüksek sıcaklık farkının belirli değerler altında olmasını sağlayan önlemlerden biri/birkaçı veya tamamının bir arada etkili bir şekilde kullanılmasıyla kütle betonlarında sıcaklık farkından kaynaklanan çatlak riskinin azaltılması veya ortadan kaldırılması mümkündür [3].

Betonun elastisite modülü, kısıtlanma durumu ve gerilme gevşemesi seviyesine bağlı olarak soğuma esnasındaki büzülmeden kaynaklanan çekme gerilmesi, düşük çekme dayanımına sahip genç betonun çatlamasına yetecek seviyede olabilmektedir. Örneğin, betonun genişleme katsayısının ( $\alpha$ )  $8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , sıcaklık artışının ( $\Delta T$ ) ise  $30^{\circ}\text{C}$  olduğu varsayılırsa, betonun ortam sıcaklığına soğumasıyla oluşacak ısıl büzülme  $\epsilon = \alpha \Delta T$  yani  $240 \times 10^{-6}$  mm/mm olacaktır. Betonun erken yaşlardaki elastisite modülünün 15000 MPa olduğu ve elemanın tam olarak kısıtlandığı kabul edilirse, soğumanın yol açacağı çekme gerilmesi  $\epsilon \cdot E = 240 \times 10^{-6} (15000) = 3.6$  MPa hesaplanacaktır. Betonun o andaki çekme dayanımının hesaplanan bu değerden düşük olması durumunda betonun çatlaması kaçınılmazdır. Ancak, betonda oluşan gerilme gevşemesi nedeniyle toplam çekme gerilmesinin hesaplanan değerden bir miktar daha düşük olacağı unutulmamalıdır.

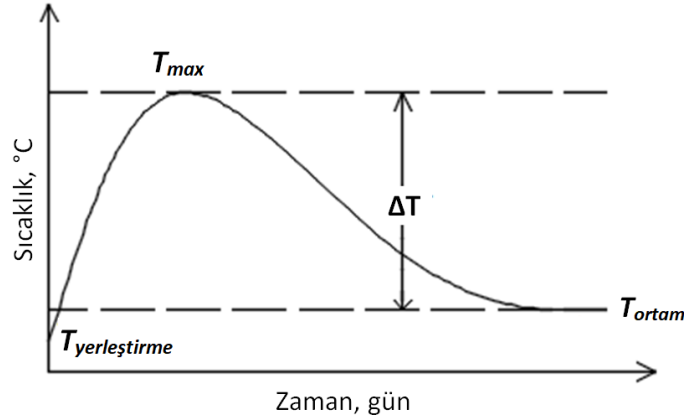
Kütle beton yapıların tasarımı ve yapımında, yapının çatlaksız ve monolitik olması birincil hedef olduğundan betonun sıcaklığını kontrol etmek için malzeme seçimi, karışım oranları, uygulama ve kürleme koşullarına dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, kütle betonlarında betonun yerleştirme sıcaklığının düşük tutulması ve hidratasyon ısısının açığa çıkma hızının yavaş olması sağlanmalıdır.

## 2. BETONDAKİ ISIL GERİLMELERİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

### 2.1. Sıcaklık Farkı

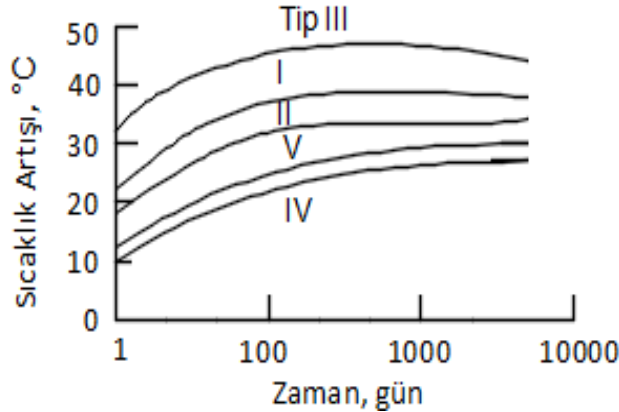
Sıcaklık farkı ( $\Delta T$ ), betonda ölçülecek en yüksek sıcaklık ile ortam sıcaklığı (yapının bulunacağı sıcaklık) arasındaki fark olarak ifade edilmekte olup Şekil 2'de de gösterildiği üzere "betonun yerleştirme sıcaklığı + adyabatik sıcaklık artışı - ortam sıcaklığı" olarak hesaplanabilir. Buna göre yerleştirme sıcaklığının azaltılması betonda oluşacak ısıl

çatlakların önlenmesi için kullanılabilir en etkili yollardan biri olmaktadır. Taze betonun soğutulması, oluşacak sıcaklık farkını azaltmaktadır. Sıcaklığı 10°C veya altına sınırlanan kütle betonlarında, çoğu zaman soğutulmuş agrega ve/veya buz kullanılmaktadır. Karıştırma sırasında buzun erimesi için gereken ısı, betonun diğer bileşenlerinin etkili bir şekilde soğumasını sağlamaktadır.



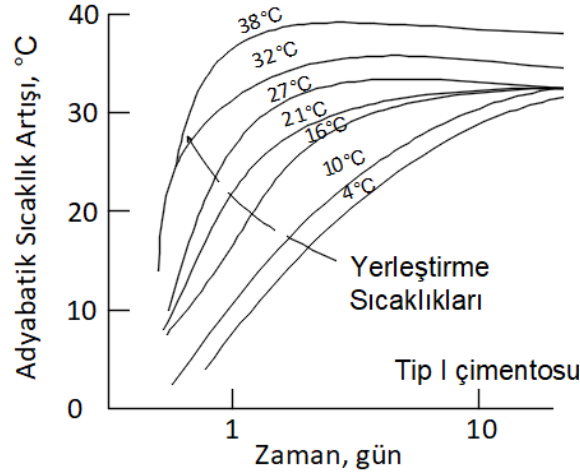
Şekil 2. Sertleşmekte olan betonda zamanla oluşan sıcaklık değişimi [4].

Betondaki adyabatik sıcaklık artışı, çimentonun miktarı, bileşen kompozisyonu ve inceliği ile hidrasyon esnasındaki sıcaklığa bağlıdır. Çimento inceliğinin ve  $C_3A - C_3S$  bileşenlerinin artışının, hidrasyon ısısını arttırdığı bilinmektedir. 220 kg/m<sup>3</sup> çimento içeren betonda, inceliği fazla ve nispeten yüksek oranda  $C_3A - C_3S$  içeren çimentonun yol açacağı sıcaklık artışının, inceliği daha az ve düşük seviyede  $C_3A - C_3S$  içeren çimentoya göre 22°C daha yüksek olduğu açıklanmıştır. 220 kg/m<sup>3</sup> dozajında beş farklı ASTM portland çimentosu içeren kütle betonlarının adyabatik sıcaklık artışı eğrileri Şekil 3'te gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, Tip I portland çimentosu veya %5'in altında  $C_3A$  içeren sülfata dirençli çimento (Tip V) ile üretilen betonun ilk yaşlardaki adyabatik sıcaklık artışları arasında yaklaşık 10-12°C fark bulunmaktadır [4, 5].



Şekil 3. 220 kg/m<sup>3</sup> çeşitli ASTM tipi portland çimentosu içeren betonların adyabatik sıcaklık artışı [4].

Şekil 4'te görüldüğü gibi betonun yerleştirme sıcaklığı oluşan toplam sıcaklık artışından ziyade, esas olarak ısının açığa çıkma hızını etkilemektedir. Buna göre örneğin, yerleştirme sıcaklığı 10 ve 21°C olan betonların 1 günlük adyabatik sıcaklık artışları sırasıyla 10 ve 22°C iken ilerleyen zamanlardaki adyabatik sıcaklık artışları benzerdir. Bu da yerleştirme sıcaklığı 21°C olan betonda ısının ortaya çıkışının, 10°C yerleştirme sıcaklığına sahip betonunkinden çok daha hızlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. 220 kg/m<sup>3</sup> normal çimento içeren kütle betonunun yerleştirme sıcaklığının adyabatik sıcaklık artışına etkisi [4].

## 2.2. Mineral Katkı Kullanımı

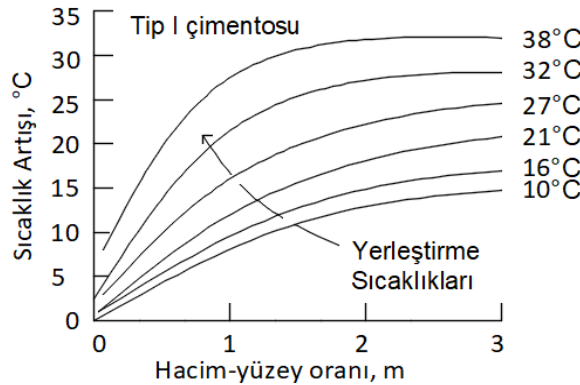
Adyabatik sıcaklık artışının kontrol altına alınması için etkili diğer bir yöntem portland çimentosunun bir bölümünün yerine uygun bir mineral katkı kullanılmasıdır. Bu amaçla doğal puzolanlar kullanılabileceği gibi, taş kömürü yakılan termik santral atığı uçucu kül veya ham demir üretimi yan ürünü olarak ortaya çıkan yüksek fırın cürufu (YFC) gibi mineral katkılar da tercih edilmektedir. 220 kg/m<sup>3</sup> ASTM Tip II (C<sub>3</sub>A oranı < %8) çimentosu içeren betonda, çimentonun ağırlıkça %25'i yerine doğal puzolan kullanılması durumunda 3 günlük sıcaklık artışının 23°C'den 18°C'ye düştüğü bildirilmiştir [3]. Benzer şekilde cürufu çimento kullanımı ile hidrasyon ısısının azaltılmasıyla hem betonda oluşacak maksimum sıcaklığın düşürülmesi, hem de maksimum sıcaklığa erişme süresinin uzatılması mümkündür [6, 7]. Ayrıca mineral katkıların, betonun sülfat ve klorür gibi zararlı kimyasallara veya betonda oluşabilecek alkali-silis reaksiyonuna karşı direncini artırdığı da bilinmektedir [8, 9].

Yukarıda sıralanan teknik avantajlara ek olarak mineral katkıların çimentoya ikame edilmesinin katkı fiyatına da bağlı olarak, betonun maliyetini azaltma potansiyeli bulunmaktadır. Ayrıca 1 ton çimentonun üretimi esnasında yaklaşık 1400 kg hammadde (kireçtaşı, kil ve alçıtaşı) kullanılmakta ve daha önemlisi atmosfere yaklaşık 850 kg CO<sub>2</sub> salınmaktadır. Bu bakımdan daha çevreci bir beton elde edilebilmesi için sanayi atığı mineral katkıların mümkün olduğu kadar yüksek oranlarda çimento yerine değerlendirilmesi önem arz etmektedir.

Son yıllarda yüksek fırın cürufunun aktivitesini artırmak amacıyla katkıya kalsiyum sülfat gibi çeşitli malzemeler katılabilmektedir. Bu tip cürufular, kütle betonunda kullanılmaya elverişli değildir. Çimentonun kısmi olarak bu tip cürufu ile ikame edilmesinin betonun adyabatik sıcaklığını azaltmak yerine arttırabileceğini gösteren araştırmalar bulunmaktadır. Bu nedenle kütle betonunda kullanılacak cürufun incelenerek seçilmesi önem arz etmektedir [10].

## 2.3. Elemanın Hacim/Yüzey Alanı (V/A) Oranı

Betonarme temelerde temel yüksekliğini ifade eden bu oranın artışıyla adyabatik sıcaklık yükselmektedir. Örneğin, 220 kg/m<sup>3</sup> normal portland çimentosu içeren betonarme bir yapıda V/A oranının 0.5 m'den 2 m'ye çıkması sıcaklık artışını, yerleştirme sıcaklığına da bağlı olarak, 8-15°C aralığında arttırmaktadır. Betonun V/A oranı ve yerleştirme sıcaklığının adyabatik sıcaklık artışına etkisi Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. 220 kg/m<sup>3</sup> normal portland çimentosu içeren kütle betonunun yerleştirme sıcaklığı ile V/A oranının sıcaklık artışına etkisi [4].

## 2.4. Isı Kaybı

Betonun ısı kaybı ısııl özelliklerine ve yapım teknolojisine bağlıdır. Yüzeyinden soğumaya başlayan bir yapıda ısı kaybı, beton yüzeyinin temas ettiği ortamdaki büyük ölçüde etkilenmektedir. Tablo 1’de görüldüğü gibi beton yüzeyinin hava yerine kür suyu ile temasta olması, yüzey iletim katsayısını yaklaşık 30 kat artırmaktadır.

**Tablo 1.** Farklı ortamların yüzey iletim katsayıları [4].

Yalıtımın türü	Yüzey iletim katsayısı (kcal/m <sup>2</sup> .h.°C)
Beton-hava	11.6
Beton-kür suyu	300.0
Beton-ahşap-hava	2.6
Beton-metal-hava	11.6
Beton-izolasyon malzemesi-hava	2.0

Kütle betonunda ısııl deformasyondan kaynaklı çatlakları önlemek için betonun çekirdeği ile yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının 20-25°C’yi aşmaması tavsiye edilmektedir [3, 11]. Bu amaçla çekirdekteki maksimum sıcaklığı azaltmak için hidratasyon ısıısı düşük bağlayıcının tercih edilmesi, bağlayıcı içeriğinin ve yerleştirme sıcaklığının mümkün oldukça azaltılması gibi önlemler alınmalı, beton ısııl çatlaklara karşı yeterli dirence ulaşmıca kadar yüzeyi uygun bir kaplama malzemesi ile kapatılmalıdır. Kaplama malzemesinin türü ve kalınlığı, betonda oluşacak sıcaklık ile ortam sıcaklığı dikkate alınarak mock-up numunelerinde yapılan deneme çalışması ile belirlenmelidir.

Sertleşmekte olan betonda oluşan maksimum sıcaklık betonun kalıcılığı bakımından da hayati öneme sahiptir. Bu durum zaman zaman dış etkenlerden kaynaklanan zaman zaman da betonun kendi bünyesindeki malzemelerin neden olduğu durabilite sorunlarını beraberinde getirmektedir. Betonu yıpratıcı sülfatlar, genelde dış kaynaklıdır. Betona dışarıdan sızan sülfatlar nedeniyle oluşan etrenjit, “ikincil etrenjit” olarak adlandırılmaktadır. Ancak, bazı durumlarda sülfat kaynağı dışsal olmayıp betonun kendi bünyesinde bulunmaktadır. Bu durumda oluşan ve betona zarar veren etrenjit “gecikmiş etrenjit” olarak tanımlanır. Uzun süredir bilinen bu olaya, genelde alçıya bulaşmış agrega veya yüksek sülfat içerikli çimento yol açmaktadır. Yakın geçmişte buhar küre uygulanan beton ürünlerde de gecikmiş etrenjit oluşumu görülmüştür. 65°C’nin üzerinde kararlı olmayan etrenjit (C<sub>3</sub>A.3C $\bar{S}$ H<sub>2</sub>.26H), ortama sülfat iyonu salarak monosülfata (C<sub>3</sub>A.C $\bar{S}$ H<sub>2</sub>.16H) dönüşür. Söz konusu sülfat iyonları C-S-H tarafından emilir ve zaman içinde C-S-H bünyesinden boşluk çözeltilisine bu sülfat iyonları sızarak betonda yeniden etrenjit oluşmasına, genleşmeye ve çatlama neden olur [1, 4]. Benzer durum, hidratasyon ısıısı nedeniyle sıcaklığı 65°C’nin üzerine çıkan ve yüksek sülfat içerikli çimento içeren kütle betonlarında da görülebilir.

Son yıllarda yüksek kıvam ve yüksek dayanıma sahip betona olan talebin artmasıyla, betonda kullanılması gereken bağlayıcı malzeme oranının kayda değer mertebede arttığı ayrıca vurgulanmalıdır. Buna ek olarak hidratasyon ısıısı gelişimine büyük etkisi olan, çimento inceliği ile C<sub>3</sub>S ve alkali içeriği, klinker üretimi ve öğütme teknolojisindeki gelişmelerle artmıştır. Buna göre kütle betonunda hidratasyon ısıısının kontrol altına alınabilmesi için geçmişte başarıyla uygulanan bazı yöntemler günümüzde üretilen betonlar için yetersiz kalabilmektedir.

Bu araştırmada İzmir’de devam etmekte olan Allsancak, Evora ve Güçsan gibi projelerde yer alan çok katlı yapıların 2-3 m’ye varan kalınlıktaki temellerinde kullanılan cürüflü betonlar adyabatik sıcaklık artışı ve dayanım gelişmesi açısından incelenmiştir. Söz konusu projelerdeki yapıların temellerinde dayanım sınıfı C30/37 ile C45/55 arasında değişen ve S4/S5 çökme sınıfına sahip toplam 94000 m<sup>3</sup> beton kullanılacaktır.

## 3. DENEYSEL ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEMELER

### 3.1. Çimento ve Yüksek Fırın Cürufu

Araştırmada TS EN 197-1 standardına uygun [12] CEM II/B-M(W-L) 42.5R tipi çimento kullanılmıştır. Üretici firma verilerine göre kullanılan portland kompoze çimentosunda yaklaşık %15-17 kalkerli uçucu kül ve %8-10 kalker tozu bulunmaktadır. Çalışmanın devam ettiği 6 ay boyunca çimentonun üretiminde kullanılan klinker, uçucu kül ve kalkerin özelliklerinin Tablo 2’de gösterilen biçimde değiştiği tespit edilmiştir. Bu analizlerin yapılmasında farklı tarihlerde rastgele alınan en az 12 numunenin sonuçları kullanılmıştır.

Tablo 2’de görüldüğü gibi çimento üretiminde kullanılan hammaddelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri aynı kaynaklardan temin edilmelerine rağmen 6 ay zarfında kayda değer değişiklikler göstermiştir. Bu bağlamda çimento özellikleri üzerinde önemli etkisi olan bileşen kompozisyonu ve inceliği ile uçucu kül davranışına etkisi olan incelik, SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği ve serbest kireç miktarındaki değişkenlik dikkate değerdir. Bu gibi değişikliklerin, üretilecek çimentonun özelliklerine olan kaçınılmaz etkisi beton karışım oranlarının belirlenmesinde dikkate alınmalıdır. Hammaddedeki bu değişiklikler çimentonun kimyasal bileşimi, fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde Tablo 3’te gösterilen değişikliklere neden olmuştur.

**Tablo 2.** Çimento üretiminde kullanılan hammaddelerin özellikleri ve bu özelliklerdeki değişkenlik.

Malzeme	CaO	SiO <sub>2</sub> (S)	Reaktif SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (A)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (F)	S+A+F	MgO < %5	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Serbest CaO	Reaktif CaO	Kızdırma kaybı	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	Laboratuvar çimentosu (Klinker+%5 alçı)																																	
																		> 32 µm	Özgül ağırlık	Hacim Gen. (mm)	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	B. dayanımı (MPa)																													
																						1 Gün	2 Gün	7 Gün	28 Gün																										
<b>Değer</b>																																																			
<b>Klinker</b>	Ort.	66.1	21.1	-	5.4	3.6	-	1.6	0.5	0.1	1.0	2.0	-	0.4	59.9	15.2	8.2	10.8	28.8	3.1	2.2	3021	11.9	20.9	34.9	44.8																									
	St. sapma	0.3	0.3	-	0.1	0.1	-	0.3	0.1	0.0	0.1	0.2	-	0.2	3.1	3.1	0.4	0.2	1.8	0.0	0.9	109.9	1.9	1.4	2.1	2.4																									
	Min.	65.4	2.6	-	5.2	3.5	-	1.4	0.4	0.1	0.9	1.8	-	0.1	52.8	10.3	7.5	10.6	26.1	3.1	1.0	2786	9.4	17.8	30.9	40.0																									
	Maks.	66.5	21.7	-	5.6	3.7	-	2.7	0.7	0.1	1.1	2.2	-	0.7	64.7	22.4	8.8	11.2	32.4	3.2	3.5	3233	17.1	22.8	37.8	48.2																									
<b>Uyucu</b>	Ort.	24.6	41.2	36.1	18.2	4.8	64.2	2.4	6.4	0.2	1.2	5.5	16.8	1.3	-	-	-	-	47.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	St. sapma	6.6	5.2	4.8	2.8	0.48	8.2	0.4	1.9	0.0	0.2	1.3	3.9	0.4	-	-	-	-	2.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	Min.	11.5	34.0	32.2	15.0	4.0	53.2	2.0	2.9	0.2	0.9	3.1	12.3	0.8	-	-	-	-	42.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	Maks.	32.8	51.6	42.1	24.3	5.4	80.2	3.6	9.0	0.2	1.5	7.5	20.2	2.1	-	-	-	-	51.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
<b>Kalker</b>	Ort.	55.3	1.2	-	0.4	0.1	-	0.6	0.2	1.2	0.1	-	-	42.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	St. sapma	0.9	0.5	-	0.1	0.0	-	0.5	0.2	0.9	0.0	-	-	0.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Min.	52.6	0.7	-	0.3	0.0	-	0.3	0.0	0.1	-	-	41.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Maks.	56.0	2.2	-	0.6	0.1	-	1.9	0.6	1.9	0.2	-	42.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Aynı fabrikanın üretimi olan CEM II/B-M (W-L) 42.5R çimentosuna ait kimyasal bileşim ile bazı fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 3'te gösterilmiştir. Görüldüğü üzere çimentonun kimyasal bileşimi ve inceliğinin değişmesi mekanik özelliklere de yansımış olup çimentonun 1, 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarında sırasıyla %56, %25, %15 ve %12 mertebesinde değişkenlikler görülmüştür.

**Tablo 3.** Kullanılan çimentonun özelliklerindeki değişkenlik.

Değer	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Cl	Kızdırma kaybı	> 45 µm	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Özgül ağırlık	Priz (dak.)		Su gerek. (%)	Hacim gen. (mm)	Basınç dayanımı (MPa)			
														Başlangıcı	Sonu			1 Gün	2 Gün	7 Gün	28 Gün
Ortalama	57.0	20.6	6.7	3.2	1.9	3.2	0.4	0.8	0.0	5.9	2.7	3993	3.0	203	266	30.8	1.5	12.8	23.5	37.9	50.7
Std. sapma	0.8	0.7	0.4	0.2	0.2	0.1	0.0	0.1	0.0	0.5	0.4	188	0.0	19	25	0.5	1.2	1.7	1.4	1.7	1.9
Minimum	56.0	19.1	5.9	2.8	1.6	3.0	0.4	0.6	0.0	5.4	1.9	3743	2.9	183	230	30.0	0.0	10.3	21.7	35.2	48.0
Maximum	58.8	21.8	7.2	3.6	2.2	3.4	0.4	0.9	0.0	7.2	3.2	4445	3.0	245	315	31.6	4.0	16.1	27.2	40.3	53.8

Proje kapsamında mineral katkı olarak Balıkesir Beyçimento firmasından temin edilen TS EN 15167-1 standardına [13] uygun, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Söz konusu cüruf, İzmir'de ilk defa bu denli büyük hacimdeki kütle temel betonunda yüksek oranda kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan YF cürufunun, bir yan ürün olmasına rağmen oldukça homojen olduğu tespit edilmiştir. Farklı tarihlerde alınan 5 cüruf numunesindeki oksit kompozisyonu değişkenliğinin %1'in altında olduğu saptanmıştır. Rastgele seçilen ve özellikleri Tablo 4'te gösterilen cüruf örneğinin x-ışını difraktogramı Şekil 6'da verilmiştir. Cürufun hidrolik reaktivitesinin göstergesi olarak kullanılan ve farklı araştırmacılar tarafından önerilen bazik indisleri veya hidrolik modülleri Tablo 5'te sunulmuştur. Tablodan görüldüğü gibi cürufun bazı indis/modülleri malzemenin betonda iyi performans göstermesi için önerilen sınırların altındadır. Buna rağmen, makalenin ilerleyen bölümlerinde görüleceği üzere bu değerlerin düşüklüğü, cürufun betondaki performansını olumsuz etkilememiştir. Buradan kimyasal kompozisyonuna göre önerilen bu indislerin, cürufun betondaki davranışını tam olarak yansıtamadığı sonucuna ulaşılabilir. Aslında cürufun çimentolu sistemdeki davranışına, camsı faz içeriği ve inceliğinin, kimyasal kompozisyonuna eşit veya ondan daha fazla etkisi olduğu bilinmektedir [7, 9].

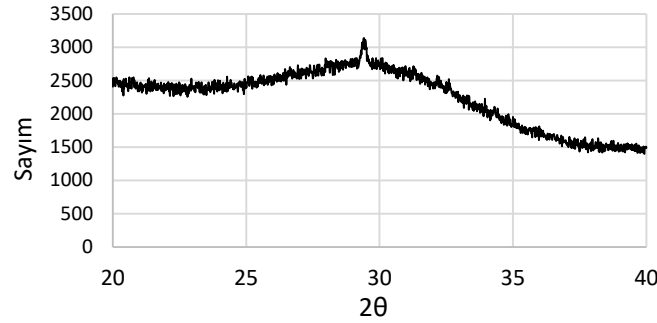
**Tablo 4.** Yüksek fırın cürufunun özellikleri.

Oksit kompozisyonu (%)		Fiziksel ve mekanik özellikler	
CaO	32.28	Blaine özgül yüzeyi (cm <sup>2</sup> /g)	4650
Si <sub>2</sub> O	38.93	Özgül ağırlığı	2.80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.32	45 mikron elek bakiyesi (%)	0.1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.23	Priz başlangıcı (dakika)	Referans
MgO	6.94		Karışım*
SO <sub>3</sub>	1.00	Hacim sabitliği (mm)	0
Na <sub>2</sub> O	0.68	Dayanım aktivitesi (%)	7 - günlük
K <sub>2</sub> O	0.80		28 - günlük
Kızdırma kaybı	0.15	* %50 CEM I 42.5 R + %50 öğütülmüş cüruf karışımı	

**Tablo 5.** Cürufun bazik indisleri/hidrolik modülleri [9].

İndis veya modül	%	Önerilen sınırlar
CaO / SiO <sub>2</sub>	0.83	0.3 - 1.4
(CaO+MgO) / SiO <sub>2</sub>	1.52	> 1.4
(CaO+MgO+0.67 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) / (SiO <sub>2</sub> +0.33 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1.10	>1.0
(CaO+MgO+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) / SiO <sub>2</sub>	1.32	>1.0
(CaO+MgO) / (SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.77	1.0 - 1.3
(CaO+1.40 MgO+0.56 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) / SiO <sub>2</sub>	1.27	>1.65

Şekil 6'da sunulan cürufun X-ışını difraktogramı, yaklaşık 29-2θ (Cu Kα) derecesinde pik noktası olan geniş bir kambur göstermektedir. Buradan malzemenin tamamına yakınının camsı yapıda olduğu anlaşılmaktadır. Görülen bariz pikin, cürufu az miktarda bulunan kalsit kristalinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

**Şekil 6.** Cürufun X-ışını difraktogramı.

### 3.2. Kimyasal Katkı

Beton karışımlarında polikarboksilat kopolimer tipi yüksek oranda su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Kullanılan katkının pH'nın 5.34, yoğunluğunun 1.05, eşdeğer Na<sub>2</sub>O içeriğinin %0.8 ve katı madde içeriğinin %55 olduğu üreticisi tarafından bildirilmiştir.

### 3.3. Agrega

Üretilen betonlarda 0/4, 4/11.2 ve 11.2/22.4 mm aralıklarında kırma kireçtaşı agrega kullanılmıştır. Karışık agreganın gradasyon eğrisinin TS 802 standardında [14] sınırları içinde yer alması için bu agregalar çeşitli beton karışımlarında sırasıyla %45-53, %16-22 ve %31-33 ağırlık oranlarında kullanılmıştır. Agreganın bazı fiziksel özellikleri Tablo 6'da verilmiştir. 6 aya yayılan çalışma esnasında kullanılan ince agreganın metilen mavisi değerinin 0.50 veya 0.75 olduğu, 0.125 mm elekten geçen yüzdesinin ise %11-14 aralığında olduğu belirlenmiştir.

**Tablo 6.** Agreganın bazı özellikleri.

Özellik	0/4 mm	4/11.2 mm	11.2/22.4 mm
KYD* Özgül ağırlık	2.68	2.70	2.70
Su emme kapasitesi (%)	1.1	0.64	0.35
Nem içeriği (%)	0.9	0.4	0.4

\* Kuru yüzey doygun

## 4. BETON KARIŞIMLARI VE ÖZELİKLERİ

### 4.1. Taze Beton Özellikleri

Çalışma kapsamında 28 günlük silindirik karakteristik basınç dayanımı 30 ile 50 MPa arasında değişen 5 farklı sınıftaki yüksek fırın cürüflü beton tasarlanmıştır. Bu karışımlar C30, C35, C40, C45 ve C50 olarak adlandırılmış olup betonların karışım oranları Tablo 7’de verilmiştir. Tabloda KC40 olarak gösterilen kontrol karışımı, C40 karışımına yakın oranlar kullanılarak, cüruf içermeyecek şekilde (sadece CEM II/B-M 42.5R çimentosu ile) üretilmiştir. Betonlar karıldıktan 45-60 dakika sonrasında bile küçük (2/4 cm) çökme/çökme yayılma kaybıyla işlenebilirliğini korumuştur. Karışımların su/bağlayıcı oranının hesaplanmasında cürufa herhangi bir “k” katsayısı uygulanmamış, kullanılan su azaltıcı katkı miktarının %50’si ise karışım suyuna ilave edilmiştir.

**Tablo 7.** Betonların karışım oranları (kg/m<sup>3</sup>) ve bazı özellikleri.

Malzeme	C50	C45	C40	C35	C30	KC40
Çimento	200	190	180	160	160	360
Yüksek fırın cürufu	200	190	180	160	140	-
Su	168	165	160	155	155	163
Su azaltıcı katkı	5.0	5.8	6.3	6.2	6.0	5.8
DYK 0/4 mm	814	835	869	970	1020	868
DYK 4/11 mm	399	390	391	306	310	390
DYK 11/22 mm	587	580	596	615	600	592
BHA (teorik)	2373	2356	2382	2382	2391	2379
BHA (ölçülen)	2355	2360	2385	2368	2388	2385
Çökme (cm)	22	22	21*	21	22*	23
Çökme yayılma (cm)	48	44	40*	42	42*	40
Su /bağlayıcı oranı	0.43	0.44	0.45	0.49	0.52	0.46

\*Değerler şantiyede model numune dökümü esnasında betonun üretiminden yaklaşık 1 saat sonra ölçülmüştür.

### 4.2. Basınç Dayanımı

Tablo 7’de verilen karışımlardan hazırlanan 100x200 mm silindirik numunelerin basınç dayanımı TS EN 12390-3 standardına [15] uygun olarak belirlenmiştir. Numunelerin alt ve üst yüzeyleri deneyden hemen önce, 1-2 mm aşındırmak suretiyle deneye hazır hale getirilmiştir. Sonuçların sunulduğu Tablo 8’de görüldüğü gibi farklı dayanım seviyesinde olan cürüflü betonların su/bağlayıcı oranları 0.43 ile 0.52 arasında değişmektedir. TS 802 standardında [14] 28 günlük, 30, 35, 40 ve 45 MPa silindirik (150x300 mm) basınç dayanımları için, hava sürüklenmemiş betonun su/çimento oranının sırasıyla 0.54, 0.47, 0.42 ve 0.37 olması ön görülmüştür. Bu değerler C30 karışımı dışında, araştırmada üretilen (aynı dayanım sınıfındaki) betonların su/bağlayıcı oranlarından 0.02 ile 0.07 arasında daha düşüktür. Bu fark C45 karışımında daha çarpıcıdır. Benzer şekilde cüruf içermeyen ve yaklaşık 47 MPa 28 günlük basınç dayanıma sahip olan KC40 karışımının da su bağlayıcı oranı (0.46), standartta 40 MPa dayanıma sahip beton için belirtilen değer (0.42) üstündedir. Bu sonuçlardan standartta, beton sınıfları için verilen su/bağlayıcı oranlarının genelde konservatif olduğu görülmüştür. Beklendiği gibi araştırılan C40 ve C45 betonlarında, su/bağlayıcı oranında 0.01 gibi küçük bir değişiklik, dayanımda 5 MPa gibi nispeten büyük değişikliğe yol açmış fakat dayanım sınıfı azaldıkça bu etki azalmıştır. C40 karışımı mock-up (model) numunesinden 31. günde altı adet 100x200 mm karot numunesi alınmıştır. Betonun bu yaştaki ortalama karot basınç dayanımının 42 MPa olduğu tespit edilmiştir. Tablodaki cüruf içermeyen KC40 karışımının sonuçları ilgi çekicidir. Bu karışım 28 günlük dayanımının %70 ve %83’ünü ilk 3 ve 7 günde kazanmıştır. Benzer oranlar cürüflü betonlarda ilk 3 günde %24-34 arasında iken ilk 7 günde %45-50 arasındadır. Ancak cürüflü betonların 7. günden sonra dayanım kazanma hızları büyük oranda artarak 28 günde kontrol karışımı dayanımına (hemen hemen) eşit olmuştur. Dahası bu karışımlarda dayanım kazanımı ikinci 28 günde de (%18’e varan oranlarda) devam etmiştir. Portland kompoze çimentosu ile üretilen betonun 56 günlük basınç dayanımının 28 günlük basınç dayanımından sadece %3.8 oranında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu betonun üretiminde kullanılan çimento uçucu kül içermesine rağmen betonda 28. günden sonra kayda değer bir dayanım artışı görülmüştür. Bu nedenle standartta belirtilen aşırı miktarda mineral katkı içeren kütle betonlarında (gerekirse) dayanım değerlendirilmesinin 56 veya 90 günlük numunelerde yapılmasının mümkün olduğu bilgisi kullanılarak dayanım değerlendirmesi 56 günde yapılmıştır [3].



**Tablo 8.** Beton karışımlarının 100x200 mm silindir basınç dayanımları (MPa) ve dayanım oranları.

Karışım	C50	C45	C40	C35	C30	KC40
3-Gün	15.5	12.5	15.0	13.5	11.8	33.1
7-Gün	26.3	25.7	22.1	20.5	19.4	38.8
14-Gün	47.4	42.5	34.1	31.2	25.6	44.3
21-Gün	54.4	49.5	38.7	35.1	27.3	45.5
28-Gün	58.8	53.4	44.0	42.1	32.6	46.9
56-Gün	64.7	62.9	50.6	48.7	38.1	48.7
3/28*	0.26	0.24	0.34	0.32	0.36	0.70
7/28	0.45	0.48	0.50	0.49	0.59	0.83
14/28	0.81	0.80	0.78	0.74	0.78	0.94
21/28	0.93	0.93	0.88	0.83	0.84	0.97
56/28	1.10	1.18	1.15	1.16	1.17	1.04

\*3 günlük/28 günlük dayanım oranı

### 4.3. Sıcaklık Gelişmesi

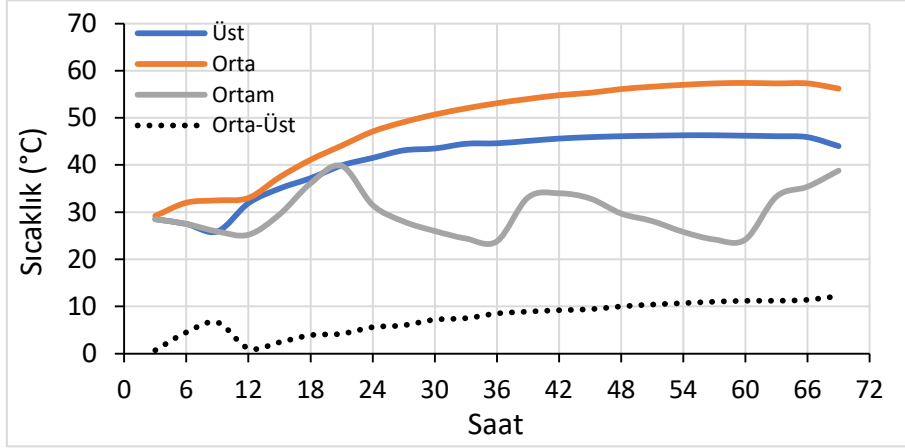
Basınç dayanımı gelişmesine ek olarak model numunelerde ve temellerde, temel uygulaması olmayan C50 dışındaki betonların hidrasyon ısısından kaynaklanan sıcaklık artışı ölçülmüştür. Bu amaçla çevresi 5 cm kalınlıkta XPS malzeme ile izole edilen 1.5-2 m ayrıtlı küp model numunelerin ve temel betonlarının çekirdeği (ortası) ile yüzeyinin 3 cm altına sıcaklık sensörü (termokupl) yerleştirilerek sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Numunenin yüzeyi ölçüm süresince bir kat naylon örtü ile kapatılmıştır. Kontrol amacıyla bazı mock-up örneklerinde naylon örtü kullanılmamıştır. Temel betonları, betonun priz almasından hemen sonra Şekil 7’de görüldüğü gibi naylon örtü ile kaplanmıştır. Seçilen bazı model numuneler ve/veya temellerin çekirdeği ile yüzeyinde ölçülen sıcaklıklar Şekil 8-14’te ortam sıcaklığı ve çekirdek-yüzey sıcaklık farkı ile birlikte gösterilmiştir. Grafiklerdeki üst ifadesi yüzeyden 3 cm derinlikteki sıcaklığı, orta ifadesi çekirdek sıcaklığını, ortam ifadesi ise ölçüm alınan andaki hava sıcaklığını, orta-üst ifadesi ise yüzey ve çekirdek arasındaki sıcaklık farkını belirtmektedir.



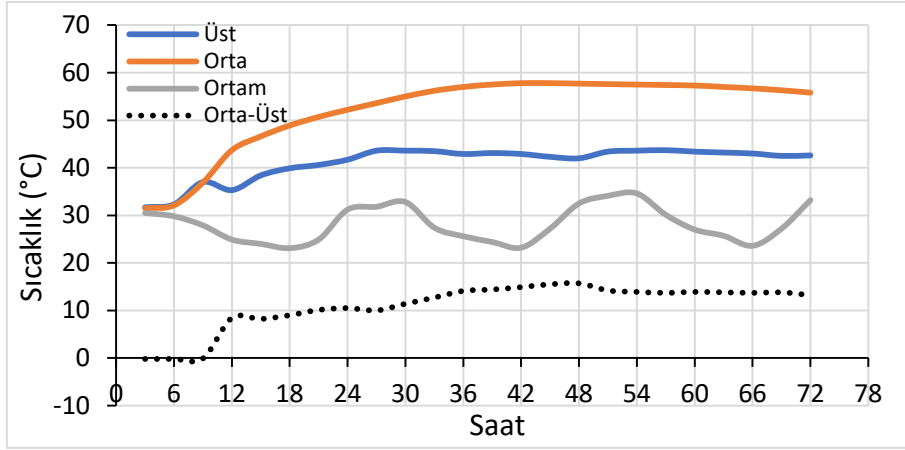
Şekil 7. Sertleşmekte olan temel betonuna örtülen naylon.

Şekil 8-14 ve Tablo 9 incelendiğinde araştırma kapsamında kullanılan cürüflü betonların  $300 \text{ kg/m}^3$  (C30)- $380 \text{ kg/m}^3$  (C45) arasında değişen bağlayıcı içeriği ile betonun adyabatik sıcaklığı arasında herhangi bir ilişki bulunamamıştır. Bu durumun 6 aya yayılan sürede dökülen betonlarda kullanılan çimento ve/veya cürufun özelliklerinden ve betonun yerleştirme sıcaklığındaki farktan kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Ancak cürüflü betonlarda görülen adyabatik sıcaklık artışının  $26.8$  ile  $31.4^\circ\text{C}$  arasında değiştiği, bu değer cürufsuz KC40 betonunda  $48.5^\circ\text{C}$ ’ye yükseldiği görülmüştür. Betondaki adyabatik sıcaklık artışına ve daha önemlisi, yerleştirme sıcaklığına bağlı olarak çekirdekteki pik sıcaklığın cürüflü betonlarda  $57-64^\circ\text{C}$  arasında olduğu, bu sıcaklığa dökümden sonra 48-60 saatte varıldığı, cürufsuz kontrol betonunda da pik sıcaklığa yaklaşık aynı sürede varıldığı, ancak bu sıcaklığın  $84^\circ\text{C}$ ’ye ulaştığı tespit edilmiştir. Daha önce vurgulandığı gibi,  $65^\circ\text{C}$ ’nin üzerindeki sıcaklığa maruz kalan bazı betonlarda gecikmiş etrenjit oluşma riski bulunduğu, bu durumun da ilerideki yaşlarda genleşme ve çatlamaya yol açabileceği belirtilmiştir. Naylon örtünün betonun yüzey sıcaklığını korumada oldukça etkili olduğu, bu etkinin ortam sıcaklığının artmasıyla arttığı belirlenmiştir (Şekil 10 ve 11). Böylece, betonun yüzey bölgesindeki ara yüzlerde agrega ile matrisin ısıl genleşme katsayısının farkından kaynaklanan mikroçatlak oluşma riski ortadan kalkmıştır.

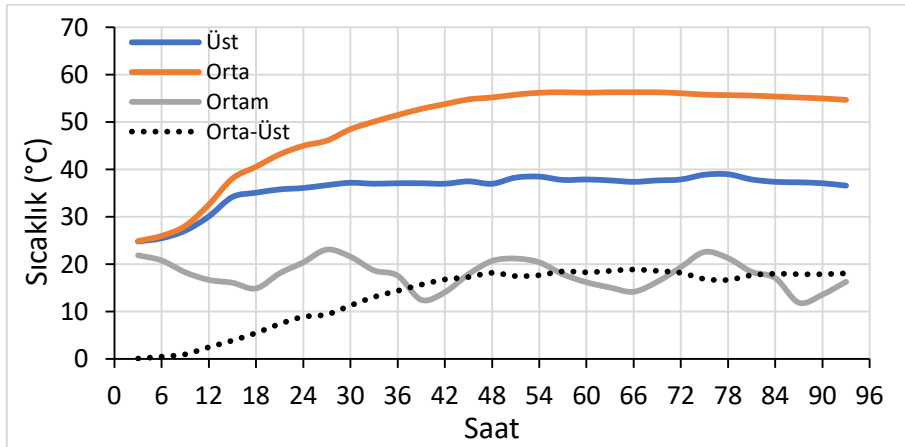
Kıyaslama amacıyla, betonların yerleştirme sıcaklığı, yerleştirme zamanındaki ortam sıcaklığı, çekirdekte oluşan pik sıcaklık ( $T_{orta}$ ), bu sıcaklığa ulaşma süresi, betonun adyabatik sıcaklığı ve en yüksek çekirdek sıcaklığı-yüzey sıcaklığı farkı ( $T_{orta} - T_{üst}$ ) Tablo 9'da verilmiştir.



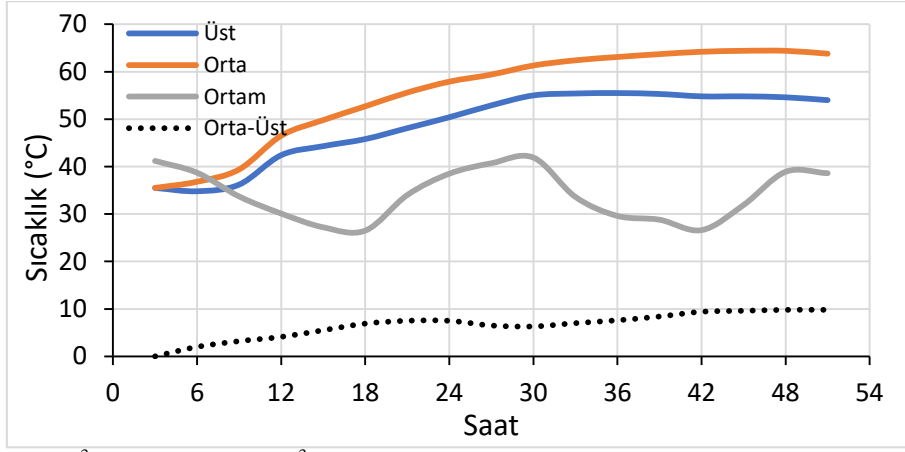
Şekil 8. 160 kg/m<sup>3</sup> çimento+140 kg/m<sup>3</sup> cüruf içeren C30 betonunun naylon örtü altındaki sıcaklık gelişmesi.



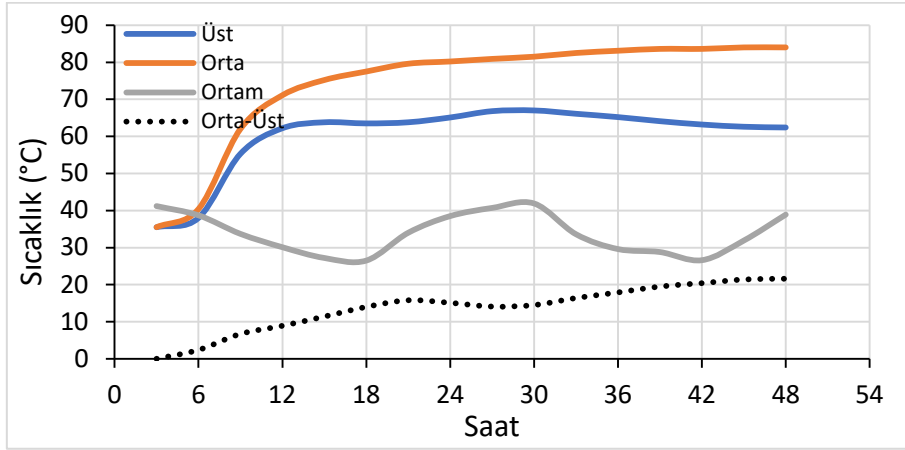
Şekil 9. 160 kg/m<sup>3</sup> çimento+160 kg/m<sup>3</sup> cüruf içeren C35 betonunun naylon örtü altındaki sıcaklık gelişmesi.



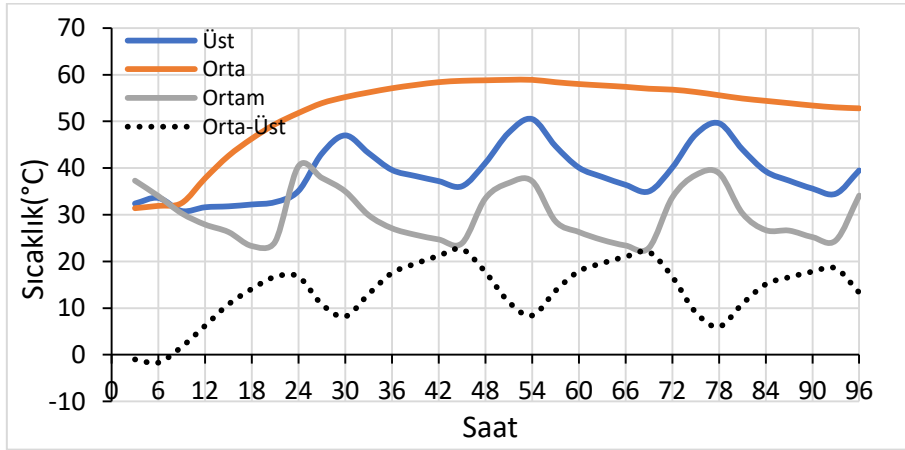
Şekil 10. Yerleştirme sıcaklığı (Şekil 9'dakine göre) daha düşük olan C35 betonunun sıcaklık gelişimi.



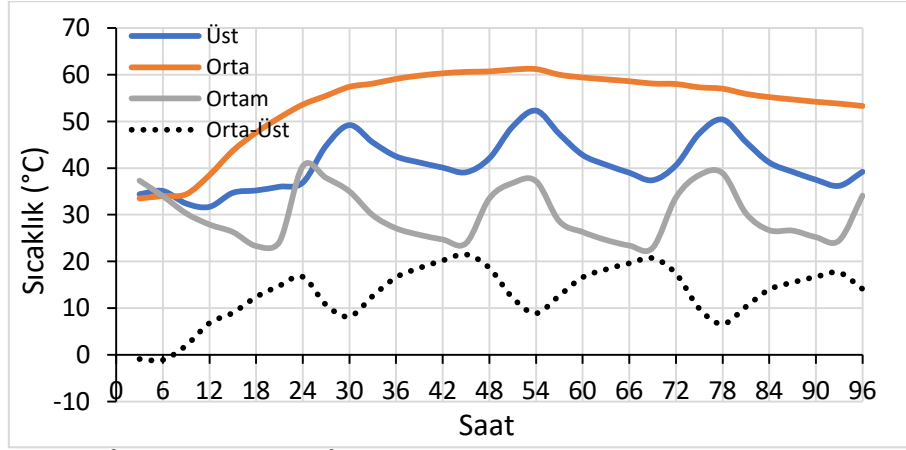
Şekil 11. 180 kg/m<sup>3</sup> çimento+180 kg/m<sup>3</sup> cüruf içeren C40 betonunun naylon örtü altındaki sıcaklık gelişmesi.



Şekil 12. 360 m<sup>3</sup>/kg CEM II/B-M çimentosu içeren KC40 betonunun naylon örtü altındaki sıcaklık gelişmesi.



Şekil 13. Naylon örtüsüz cürufllu C40 betonundaki sıcaklık gelişimi.



Şekil 14. 190 kg/m<sup>3</sup> çimento+190 kg/m<sup>3</sup> cüruf içeren, naylon örtüsüz C45 betonundaki sıcaklık gelişimi.

Tablo 9’da görüldüğü gibi farklı tarihlerde dökülen C40 karışımında, döküm sıcaklığındaki 3.6°C artış betonun maksimum adyabatik sıcaklığı ve çekirdekdeki pik sıcaklığında sırasıyla 1.9°C ve 5.5°C artışa yol açmıştır. Ayrıca aynı karışıma ait mock-up örneği yüzeyinin naylon ile kaplanması betonun çekirdeği ile yüzeyi arasındaki sıcaklık farkını 22°C’den 9.8°C’ye düşürmüştür. Kütle betonun soğumaya başladığı ilk günlerde betonun yüzey bölgesinde kayda değer oranda çekme gerilmesi ve çatlak oluşmasına neden olan bu sıcaklık farkı, TS 13815 [3] standardında donatılı betonlarda 25°C, donatısız betonlarda ise 20°C’yle sınırlandırmıştır. Başka bir araştırmada da çimentonun büyük bir bölümünün yerine yüksek fırın cürufu kullanımının nihai dayanımdan ödün vermeden, hidrasyon sonucu kütle betonunda oluşacak maksimum sıcaklığı 11.3°C, betonun çekirdeği ve yüzeyi arasındaki sıcaklık farkını ise 5.3°C azaltabileceği rapor edilmiştir [16].

Tablo 9. Betonlardaki sıcaklık gelişmesi ile ilgili bazı veriler.

Karışım	Yerleştirme sıcaklığı (°C)		Mak. çekirdek sıcaklığı T <sub>Orta</sub> (°C)	T <sub>Orta</sub> oluşma süresi (Saat)	Maksimum T <sub>Orta</sub> -T <sub>Üst</sub>	Adyabatik sıcaklık (°C)
	Beton	Ortam				
C30	28.5	27.5	57.4	54	21.6	28.9
C35	31.2	30.5	58.0	42	15.7	26.8
C35	24.9	21.9	56.3	60	15.7	31.4
C40	35.0	41.2	64.4	48	9.8	29.4
C40*	31.4	37.3	58.9	54	22.0	27.5
KC40♦	35.0	41.2	84.0	42	21.0	48.5
C45*	33.5	37.0	61.2	48	21.5	30.7

\*Naylon örtüsüz. ♦Cürufsuz kontrol KC40 karışımı

## 5. SONUÇLAR

Çalışmada kullanılan malzeme ve uygulanan deneyler ile aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Su/bağlayıcı malzeme oranının 0.43’ten 0.52’ye yükseltilmesiyle 28 günlük ortalama silindir basınç dayanımı 32.6 ile 58.8 MPa arasında olan yüksek fırın cürufu (YFC) betonlar üretilmiştir. Söz konusu dayanım değerleri (genelde) TS EN 206 standardında benzer su/çimento oranına sahip betonlar için önerilen değerlerin üstündedir.
- Yüksek fırın cürufu betonlarda dayanım kazanma hızı, ilk bir-iki hafta, CEM II/(B-M) 42.5R tipi çimento içeren betondan oldukça düşüktür. Ancak iki beton türü arasındaki dayanım farkı 28. günde kapanmıştır. İkinci 28 günde cürufu betonların basınç dayanımında ilk 28 güne kıyasla %18’lere varan oranlarda artış gözlemlenmiştir. Ancak çimentoda bulunan %25 uçucu küle rağmen CEM II tipi çimentosu ile üretilen ve cüruf içermeyen betonlarda ikinci 28 günde dayanım artışının %3.8 ile sınırlı kaldığı tespit edilmiştir. Bunlar göz önüne alınarak TS 13815’de de değinildiği şekilde, yüksek oranda mineral katkı içeren kütle betonlarındaki dayanım değerlendirmesinin 56 veya 90 günlük numunelerde yapılmasının mantıklı bir uygulama olacağı belirlenmiştir.
- Betondaki bağlayıcı malzemenin %50 oranında YF cürufundan oluşması, kütle betonun adyabatik sıcaklık artışı ve çekirdeğindeki pik sıcaklığı önemli ölçüde (ve istenilen seviyeye <65°C) azaltmıştır. Bu bağlamda betonun bağlayıcı (cüruf+çimento) içeriğinden ziyade, yerleştirme sıcaklığının daha etkili olduğu saptanmıştır.
- Cürufu betonların yerleştirme sıcaklığından önemli ölçüde etkilenen adyabatik sıcaklık artışı 26.8 ile 31.4 °C arasında değişmiştir. Bu sıcaklık ile betonun bağlayıcı içeriği arasında herhangi bir ilişki kurulamamıştır.
- Hava sıcaklığının 14 ile 43°C arasında değiştiği ortamlarda betonun çekirdeği ile yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı, bir kat naylon örtü ile 20°C’nin altında tutulabilmiştir. Örtünün etkisi hava sıcaklığının artışı ile artmıştır. Örtü aynı zamanda hava sıcaklığına bağlı olarak beton yüzeyinin ısınma-soğuma döngülerine maruz kalmasını engellemiştir.

- Çimentonun dayanım kazanma hızının ve 28 günlük basınç dayanımının, betonun dayanım kazanma hızına, betondaki sıcaklık artışına ve nihai dayanıma etkisinin incelemeye değer bir konu olduğu düşünülmektedir.

### Yazar Katkıları

Kambiz Ramyar: Deneysel çalışmanın planlanması-koordinasyonu, makale yazımı ve düzenleme; Nuri Harta: Deneysel çalışmanın planlanması-gerçekleştirilmesi; Berna Kolukısa: Deneysel çalışmanın planlanması-gerçekleştirilmesi.

### Çıkar çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

### Teşekkür

Ege Üniversitesi Ar-Ge projeleri kapsamında yapılan çalışmaya katkılarından dolayı, Pekintaş Yapı-Burakcan İnşaat Ortaklığı (İzmir Allsancak Projesi), Teknik Yapı-Halk GYO Ortaklığı (İzmir Evora Projesi) ve Güçsan Yapı (İzmir Güçsan Projesi) yetkililerine teşekkür edilmektedir.

### KAYNAKÇA

- [1] T. Erdoğan, "Beton", ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim (1. Baskı), 2003.
- [2] G. Moir, "Cements-Advanced Concrete Technology", Elsevier Butterworth Heinemann, 2003.
- [3] Kütle Betonunu Tasarımı, TS 13815, 2018.
- [4] P. K. Mehta, P. J. M Monteiro, "Concrete: microstructure, properties, and materials", McGraw Hill (3<sup>rd</sup> edition), 2006.
- [5] W. H. Price, "Temperature-rise in mass concrete", Concrete International, vol. 4, no. 10, 1982.
- [6] P. B. Bamforth, "In situ measurement of the effect of partial portland cement replacement using either fly ash or ground granulated blast furnace slag on the performance of mass concrete", Proceedings of Institute of Civil Engineers, vol. 69, pp. 777-800, 1980.
- [7] M. Tokyay, K. Erdoğan, "Cürufklar ve cürufllu çimentolar", TÇMB AR-GE, Y 97.2 raporu, p. 48, 2011
- [8] K. Ramyar, "Effects of Turkish fly ashes on portland cement-fly ash systems", Ph.D. Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 1993.
- [9] M. Tokyay, "Cement and concrete mineral admixtures", CRC Press, 2016.
- [10] H. Moon, S. Ramanathan, P. Suraneni, C.S. Shon, C.J. Lee, C.W. Chung, "Revisiting the effect of slag in reducing heat of hydration in concrete in comparison to other supplementary cementitious materials", Materials (Basel), vol. 11, no. 10, p. 1847, 2018.
- [11] K. Ramyar, A.A. Üte, "Controlling temperature rise in mass concrete foundation of folkart towers", Cement and Concrete World, vol. 17, no. 100, pp. 83-97, 2012.
- [12] Çimento - Bölüm 1: Genel Çimentolar - Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, TS EN 197-1, 2012.
- [13] Ögütülmüş Yüksek Fırın Cürufu - Beton, Harç ve Şerbette Kullanım İçin - Bölüm 1: Tarifler, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, TS EN 15167-1, 2006.
- [14] Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları, TS 802, 2016.
- [15] Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 3: Deney Numunelerinin Basınç Dayanımının Tayini, TS EN 12390-3, 2019.
- [16] H.M. Woo, C.Y. Kim, H.H. Yean, "Heat of hydration and mechanical properties of mass concrete with high-volume GGBFS replacements", Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, vol. 132, no. 3, pp. 599-609, 2017.