



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



**Mineral katkı içeren kalsiyum alüminat çimento esaslı harçların mekanik, dayanıklılık, termal ve içyapı özelliklerinin araştırılması**

*Investigation of mechanical, durability, thermal and microstructural properties of calcium aluminate cement based mortars containing mineral admixtures*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Murat TUYAN<sup>1</sup>, Kübra Sevcan SOYKAN<sup>2</sup>, İrem NAMAL<sup>3</sup>, Özge ANDIÇ ÇAKIR<sup>4</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0003-2149-8437

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0003-3490-5425

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0001-7962-5780

ORCID<sup>4</sup>: 0000-0001-5662-3555

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Tuyan M., Soykan K. S., Namal İ. ve Andiç Çakır Ö., “Mineral katkı içeren kalsiyum alüminat çimento esaslı harçların mekanik, dayanıklılık, termal ve içyapı özelliklerinin araştırılması”, *Politeknik Dergisi*, 23(2): 311-320, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.483543

# Mineral Katkı İçeren Kalsiyum Alüminat Çimento Esaslı Harçların Mekanik, Dayanıklılık, Termal ve İy Yapı Özelliklerinin Araştırılması

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Murat TUYAN<sup>1\*</sup>, Kübra Sevcan SOYKAN<sup>2</sup>, İrem NAMAL<sup>2</sup>, Özge ANDIÇ ÇAKIR<sup>2,3</sup>**

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

<sup>2</sup> Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ege Üniversitesi, Türkiye

<sup>3</sup>Merkezi Araştırma Test ve Analiz Laboratuvarı U.A.M. (Ege-Matal), Ege Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 15.11.2018 ; Kabul/Accepted : 10.04.2019)

## ÖZ

Bu çalışmada, kalsiyum alüminat çimentosunun ağırlıkça %10'u ile %40'ı oranında yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ile kısmi ikame edilmesi sonucu elde edilen kalsiyum alüminat çimento esaslı harç karışımlarının mekanik, dayanıklılık, termal ve iy yapı özellikleri incelenmiştir. Karışımların basınç ve eğilme dayanımları 3, 7, 28 ve 90. günlerde belirlenmiştir. Harç karışımları üzerinde sülfat ve asit direnci, yüksek sıcaklık direnci, termogravimetrik analiz (TGA), bilgisayarlı mikro tomografi (MicroCT) ve x-ışını foto elektron spektroskopisi (XPS) analizleri gerçekleştirilmiştir. Kalsiyum alüminat çimentosunun %10 yüksek fırın cürufu ve %20 uçucu kül ile ikame edilmesi sonucu üretilen harçlar üzerinde basınç dayanımı, yüksek sıcaklık direnci ve dayanıklılık deney sonuçları kontrol karışımı ile karşılaştırılmıştır. Mineral katkı ilavesi nedeniyle karışımların gözenek yapısında değişiklikler olmasına rağmen, karışımların kimyasal özelliklerinde önemli bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Deney sonuçları, yüksek fırın cürufunun ve uçucu külün kalsiyum alüminat çimentosu yerine kısmen kullanılması ile ekolojik verimli ve uygun maliyetli bir bağlayıcı yapı malzemesi üretebileceğini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Kalsiyum alüminat çimentosu, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, mekanik, dayanıklılık, termal, iy yapı.

## Investigation of Mechanical, Durability, Thermal and Microstructural Properties of Calcium Aluminate Cement Based Mortars Containing Mineral Admixtures

### ABSTRACT

In this study, mechanical, durability, thermal and microstructural properties of calcium aluminate cement-based mortar mixtures incorporating 10% to 40% partial replacement by weight of blast furnace slag and fly ash were investigated. Compressive and flexural strength tests were performed at 3, 7, 28 and 90 days. Sulfate and acid resistance, high temperature resistance, thermogravimetric analysis (TGA), micro-tomography (MicroCT) and x-ray photo electron spectroscopy (XPS) analyses were also performed on the mortar mixtures. The compressive strength, high temperature resistance and durability test results on mortars incorporating 10% blast furnace slag and 20% fly ash partial replacement for calcium aluminate cement were comparable to that of the control mixture. Although there were changes in pore structure due to mineral admixture addition, no significant change was observed in the chemical properties of the mixtures. Results indicate that blast furnace slag and fly ash partial replacement for calcium aluminate cement can produce an eco-efficient and cost-effective binder.

**Keywords:** Calcium aluminate cement, ground granulated blast furnace slag, fly ash, mechanical, durability, thermal, microstructure.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kalsiyum alüminat çimentosu, kullanım amacına ve gösterdiği performansa bağlı olarak Portland çimentosundan daha farklı saha uygulamalarında tercih edilmektedir. Kalsiyum alüminat çimentosu ile Portland çimentosunu birbirinden ayıran başlıca özellik, hidrasyon sonucunda ortaya çıkan reaksiyon

ürünlerinin birbirinden farklı olmasıdır. Bu fark, çimentonun priz alma ve dayanım kazanma davranışını oldukça etkilemektedir. Kalsiyum alüminat çimentosu Portland çimentosuna göre çok daha hızlı priz alma ve dayanım kazanma özelliğine sahiptir. Ancak, kalsiyum alüminat çimentosu erken yaşta hızlı dayanım kazanmasına rağmen bu çimentonun ileri yaştaki dayanımında azalmalar olmaktadır. Buna rağmen, bu çimentonun sülfat direnci, yüksek sıcaklık direnci, aşınmaya karşı dayanıklılığı ve asit etkisine dayanıklılığı Portland çimentosuna göre daha üstün olmaktadır [1-3].

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : murat.tuyan@idu.edu.tr

Kalsiyum alüminat çimentosunun ortam sıcaklığında (20-25°C) hidratasyonu sonucu oluşan ana ürünler,  $CAH_{10}$  ve  $C_2AH_8$  gibi altıgen kalsiyum alüminat hidratlar ve bununla beraber  $AH_3$  gibi alüminyum hidroksittir (çimento kimyasında ve dolayısıyla bu çalışmada kullanılan kısaltmalar: C-CaO, A- $Al_2O_3$ , H- $H_2O$ , S- $SiO_2$ , c- $CO_2$ ). Altıgen hidratlar,  $CAH_{10}$  ve  $C_2AH_8$ , yarı kararlı ürünlerdir. Bunlar zamanla veya daha yüksek sıcaklıkta ve nem varlığında kaçınılmaz olarak kübik  $C_3AH_6$  ve  $AH_3$ 'e dönüşür. Bu dönüşümün etkisiyle sertleşmiş bağlayıcı malzemenin dayanımında azalma meydana gelmektedir [1, 4].

Kalsiyum alüminat çimentosu, özellikle Portland çimentosu ile karşılaştırıldığında daha pahalı bir yapı malzemesidir. Bu nedenle, beton içindeki kalsiyum alüminat çimentosu miktarının azaltılması veya diğer ucuz malzemelerle kısmi ikame edilmesi amaçlanmaktadır. Kalsiyum alüminat çimentosunun hidratasyonu sonucu oluşan alüminatın dönüşümünün bir sonucu olarak betondaki dayanım azalmasının ortadan kaldırmasının başarılması durumunda, kalsiyum alüminat çimentosunun uygulamadaki başarısı potansiyel olarak daha fazla olabilecektir [4].

Kalsiyum alüminat çimentosunun ileri yaşlarda dayanım kaybetmesine bir çözüm bulabilmek amacıyla silis dumanı [5, 6], uçucu kül [7, 8], cüruf [8, 9], diğer alüminosilikat esaslı malzemeler [10] gibi atık ürünlerin ve Portland çimentosunun kalsiyum alüminat çimentosu ile birlikte kullanılması ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların sonucunda ayrıca daha gelişmiş ve/veya değişik özelliklere sahip bağlayıcı ürünlerin geliştirilmesi ve kullanılması muhtemel olabilecektir.

İnşaat sektöründe çevre ve sürdürülebilirlik, son yıllarda bu konularla ilgili bilincin ve yaptırımların artmasıyla önemli bir konu haline gelmiştir. Bu açıdan, çimento üretiminin azaltılması ve katkılı çimentoların kullanımının yaygınlaşması konusunda oldukça fazla çalışma gerçekleştirilmektedir. Katkılı çimentolar Portland çimentosunun belirli oranında mineral katkı kullanımı ile üretilmektedir. Bu mineral katkılar da genel olarak endüstri atığı olarak ortaya çıkan yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi malzemelerdir [11]. Mineral katkılarının çimentoda kullanımı sonucunda, ilave bir enerjiye ihtiyaç duyulmaması ile birlikte, katkılı çimentoların karbondioksit salımında önemli bir azalmanın meydana geldiği görülmektedir [12]. Malhotra [13] yaptığı çalışmada, uluslararası platformda karbondioksit salımı ve sera gazı emisyonlarının dünyaya verdiği zararların 1990'lı yıllarda ele alındığını ve bunun sonucunda birçok ülkede çimento sektöründe bu gazların salımını azaltacak yönetmeliklerin ve uygulamaların hayata geçtiğini belirtmiştir. Sürdürülebilir bir beton elde etmek amacıyla Wu vd. [14], yüksek oranda uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanarak ultra ince çimento üretmiş ve bu çimentonun Portland çimentosuna göre enerji tüketimi ve karbon emisyonları sırasıyla %47 ve %41 oranında azaldığını rapor etmiştir. İshak ve Hashim [15] yaptığı çalışmada, karbon ayak izi ve enerji tüketimini azaltmak amacıyla bazı teknik ve stratejileri

ele almış ve enerji verimliliğini artırma, yenilenebilir enerji kullanma veya alternatif bir Portland çimentosu üretme gibi konular üzerine yoğunlaşmıştır. Maddalena vd. [16] gerçekleştirdiği çalışmada ise, jeopolimer betonun, karbon emisyonlarını %20-%50 oranında azaltan sürdürülebilir bir alternatif bağlayıcı malzemesi olduğu bildirilmiştir.

Collepari vd. [7], %20 ve %40 oranında F tipi uçucu kül ikamesi ile kalsiyum alüminat çimentolu betonlar oluşturmuş ve 5°C, 20°C ve 40°C kür sıcaklığına maruz bırakmıştır. Deneysel sonuçlarına göre, bütün kür sıcaklıklarında uçucu kül ikame edilen beton karışımlarında önemli ölçüde dayanım kaybı yaşandığı gözlemlenmiştir. F tipi uçucu külün, kalsiyum alüminat çimentosunda meydana gelen altıgen hidratın kübik hidrata dönüşümünü engelleyememesinden dolayı, kalsiyum alüminat çimentosu ile birlikte kullanılmasının uygun olmadığı belirtilmiştir. Kotwica ve Łapka [8], kalsiyum alüminat çimentolu betonlarda yüksek fırın cürufu ve F tipi uçucu külü ikame malzemesi ve filler malzemesi olarak kullanımının basınç dayanımına etkisini araştırmıştır. Deneysel sonuçları, mineral katkılarının %20 ikame edilerek oluşturulan beton karışımlarının %20 ilave filler malzemesi olarak kullanılan beton karışımlarına göre daha düşük dayanıma sahip olduğunu göstermiştir. Kırca vd. [9], kür sıcaklığının yüksek fırın cürufu içeren kalsiyum alüminat çimentolu beton üzerindeki etkisini araştırmıştır. Kalsiyum alüminat çimentosu yerine ağırlıkça %80'e kadar yüksek fırın cürufu kullanılarak oluşturulan betonlar 20°C ile 50°C arasında kür sıcaklığına maruz bırakılmıştır. Bütün kür sıcaklıklarında, yüksek fırın cürufunun %40 seviyesine kadar ikame edilmesi sonucunda, betonların ileri yaştaki basınç dayanımları kademeli olarak artmıştır. %60 ve %80 oranlarında ikame edilen beton karışımlarında ise basınç dayanımlarında düşüş meydana gelmiştir. Bu etki düşük kütleme sıcaklıklarında daha belirgin ortaya çıkarken, yüksek kütleme sıcaklıklarında ise dayanım düşüşleri daha az seviyede kalmıştır.

Mevcut literatürdeki çalışmalar göz önüne alındığında, kalsiyum alüminat çimentosu yerine yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi mineral katkılarının kullanımı sonucunda oluşan bağlayıcı malzemelerin hidratasyon mekanizmaları ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu tür bağlayıcıların durabilite, termal ve içyapı özellikleri hakkında literatürde bilgi eksikliği olduğu tespit edilmiştir. Bu amaçla, bu çalışmada, yüksek fırın cürufu ve uçucu külün kalsiyum alüminat çimentosu yerine kullanılması sonucu elde edilen harç karışımlarının mekanik, dayanıklılık, termal ve içyapı özellikleri araştırılmıştır. Bu amaçla, kalsiyum alüminat çimentosu yerine ağırlıkça %10, %20, %30 ve %40 oranında yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanılarak harç karışımları elde edilmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışmada, bağlayıcı malzeme olarak ÇİMSA A.Ş. firmasından temin edilen kalsiyum alüminat çimentosu (KAÇ), yüksek fırın cürufu (YFC) ve uçucu kül (UK) kullanılmıştır. Kullanılan bağlayıcı malzemelerin kimyasal özellikleri Çizelge 1’de, fiziksel özellikleri ise Çizelge 2’de verilmiştir.

**Çizelge 1.** Bağlayıcı malzemelerin kimyasal özellikleri (Chemical composition of binders)

Bileşen (%)	KAÇ	YFC	UK
CaO	40.60	36.58	26.33
SiO <sub>2</sub>	4.17	38.18	40.52
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30.50	11.76	19.77
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.50	1.20	4.55
MgO	0.22	6.58	1.86
K <sub>2</sub> O	0.14	1.15	1.25
Na <sub>2</sub> O	0.09	0.40	0.48
SO <sub>3</sub>	0.03	1.23	3.76
Kızdırma kaybı	0.90	0.84	1.03

**Çizelge 2.** Bağlayıcı malzemelerin fiziksel özellikleri (Physical properties of binders)

Özellik	KAÇ	YFC	UK
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	3.29	2.88	2.53
Blaine inceliği (cm <sup>2</sup> /g)	3540	3380	3450
Priz başlangıcı (dakika)	245	-	-
Priz sonu (dakika)	265	-	-

Çalışmada harç karışımlarının elde edilmesi amacıyla agrega olarak TS EN 196-1 [17] standardına uygun, maksimum tane çapı 2 mm olan silis esaslı standart kum kullanılmıştır.

Harç karışımları üzerinde gerçekleştirilen tüm deneyler için Çizelge 3’te verilen karışım oranlarına göre 9 farklı seri numune hazırlanmıştır.

Harç karışımlarının hazırlanması için öncelikli olarak, kalsiyum alüminat çimentosu ve mineral katkı homojen hale gelene kadar karıştırılmıştır. Daha sonra kalsiyum alüminat çimentosu ve mineral katkı karışımına su ilave edilerek harç mikserinde 70 dev/dk hızda 30 saniye karıştırılmıştır. Hamur karışımının üzerine silis kumu ilave edilerek 90 saniye daha karıştırıldıktan sonra oluşan harç karışımları üzerinde yayılma tablası deneyi gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan harç karışımları 24 saat oda koşullarında bırakıldıktan sonra kalıptan alınmış ve 20±2°C sıcaklık ve % 95 nem ortamında 3, 7, 28 ve 90 gün boyunca suda kürlenmiştir.

Harçların eğilme ve basınç deneyleri 10 ton kapasiteli test cihazı ile TS EN 196-1 [17] standardına göre

belirlenmiştir. Eğilme deneyi tek noktadan (merkezi) yükleme metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Harçların sülfat etkisi sonucu boy değişimlerini incelemek amacıyla ASTM C1012 [18] standardına göre Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve MgSO<sub>4</sub> çözeltileri hazırlanmış ve 25x25x285 mm ayrıtlı prizma numuneler altı ay boyunca bu çözeltilerin içerisinde bekletilmiştir. Harç numunelerindeki boy değişimi periyodik olarak ölçülmüştür. Harçların asit etkisi sonucu boy değişimlerini incelemek amacıyla ASTM C279 [19] standardına göre H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisi hazırlanmış ve 25x25x285 mm ayrıtlı prizma numuneler üç ay boyunca bu çözeltilerin içerisinde bekletilmiştir. Harç numunelerindeki boy değişimi periyodik olarak ölçülmüştür. Harç numunelerinin yüksek sıcaklıktaki davranışını belirlemek amacıyla numuneler 150°C, 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklıklarda üç saat yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Hedeflenen sıcaklığa ulaşmaya kadar sıcaklık artışı 5°C/dakika olarak belirlenmiştir. Khaliq ve Kodur [20] yaptığı çalışmada, beton içerisindeki sıcaklıktaki artışın betonun düşük ısı iletkenliği nedeniyle beton yüzeyi ve fırın sıcaklığından daha yavaş olduğunu ve bundan dolayı betonda sabit durum koşullarına (termal denge) ulaşmak için en az 2 saatlik bir maruz bırakma süresi olması gerektiğini belirtmiştir.

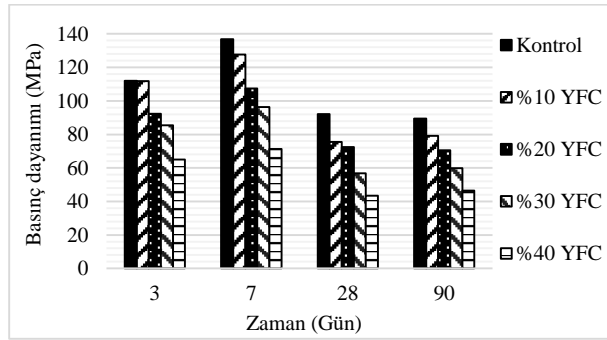
Hamur karışımlarının termal özelliklerini belirlemek için yapılan termogravimetri analizi (TGA), TA Instruments SDT Q600 marka cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Deneyde, toz haline getirilen bağlayıcı hamur numuneleri kullanılmıştır. Deneyler, 25°C ile 1000°C sıcaklık arasında ve dakikada 10°C sıcaklık artış hızı ile uygulanmıştır. Bağlayıcı hamur karışımlarının boşluk yapısının incelenmesi amacıyla karışımlar hazırlanmış ve Scanco Medical µCT 50 marka Micro CT cihazı ile katı numuneler üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Micro CT taraması 90 kV enerji ve 155 µA yoğunlukta, 20 µm voksel boyutlarında gerçekleştirilmiştir ve x-ışınının malzemeye uygulama süresi 600 ms olarak ayarlanmıştır. Tarama sonucunda elde edilen iki boyutlu görüntüler “µCT Evaluation Program v6.5” yazılımı ile analiz edilerek ortalama gözenek çapı ve yüzde porozite değerleri tespit edilmiştir. Bağlayıcı hamurların yüzeyinin kimyasal yapısı hakkında bilgi sağlamak amacıyla karışımlar hazırlanmış ve Thermo Scientific K-Alpha marka XPS cihazı ile toz numuneler üzerinde analizler yapılmıştır. Analizde X-ışını kaynağı olarak Monokromatik, Al K<sub>α</sub> kullanılmış ve 60x60 mm’lik örnekleme alanında çalışılmıştır.

**Çizelge 3.** Harç karışım oranları (Mix proportions of mortar mixtures)

	Kontrol	%10 YFC	%20 YFC	%30 YFC	%40 YFC	%10 UK	%20 UK	%30 UK	%40 UK
KAÇ (g)	450	405	360	315	270	405	360	315	270
YFC (g)	0	45	90	135	180	0	0	0	0
UK (g)	0	0	0	0	0	45	90	135	180
Kum (g)	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Su (ml)	225	225	225	225	225	225	225	225	225

### 3. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA (TEST RESULTS and DISCUSSION)

Katkısız ve YFC katkılı harç numunelerinin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri Şekil 1'de verilmiştir. Deneysel sonuçlarına göre, harçların 3 günlük basınç dayanımları kontrol ve %10 YFC ikameli harç karışımlarında 100 MPa'nın üzerine çıkmıştır. %20, %30 ve %40 YFC ikameli harç karışımlarının dayanımları ise kontrol ve %10 YFC karışımına göre oldukça düşük değerler almıştır. Harçların 7 günlük basınç dayanımlarına bakıldığında, en yüksek dayanım değerleri 7 gün kürlenmiş harç numunelerinden elde edildiği gözlemlenmiştir. Kalsiyum alüminat çimentosunun doğası gereği tüm harç karışımları erken yaşta çok hızlı dayanım kazanmış ve ileri yaşlarda dayanımlar belirli miktarda azalmıştır. Kalsiyum alüminat çimentosu içinde serbest  $C_3A$  ve  $Ca(OH)_2$  bulunmamaktadır. Kalsiyum alüminat çimentosunda serbest halde bulunan  $CaO$ ,  $Al_2O_3$  ile tepkimeye girerek erken yaş dayanımlarının nedeni olan monokalsiyum alüminatı (CA) oluşturmakta ve buna bağlı olarak erken yaş dayanımları daha yüksek olmaktadır.

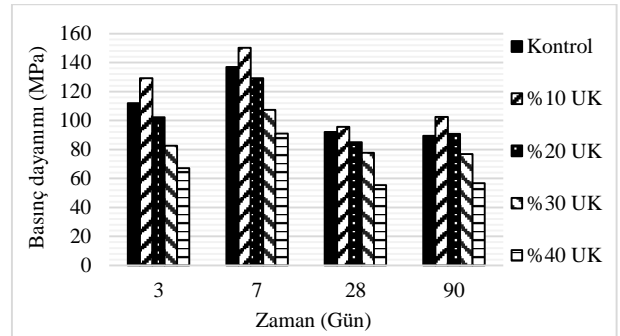


Şekil 1. Kontrol ve YFC katkılı harç numunelerinin basınç dayanımı (Compressive strength of control and GGBFS blended mortar specimens)

YFC içeren harç numunelerinde, YFC ikame miktarına bağlı olarak numunelerin basınç dayanımı değerlerinde sistematik bir azalma meydana gelmiştir. 90 gün kürlenmiş karışımlarda kontrol numunesine kıyasla %10, %20, %30 ve %40 YFC ikameli numunelerde ikame miktarı arttıkça basınç dayanımı sırasıyla %11, %19, %33 ve %48 oranında azalmıştır. YFC'nin, kalsiyum alüminat çimentosunda bulunan ürünlerle reaksiyona giremediği ve ilave bağlayıcılık özelliği gösteren ürünlerin oluşmadığı söylenebilir. Ancak YFC, yüksek  $CaO$  içeriği ve camı yapısından dolayı kendi başına az da olsa bağlayıcılık özelliği gösterebilmektedir [21]. YFC ikameli harçların basınç dayanımında meydana gelen düşüşün nedeninin, YFC'nin inceliğinin yeterli miktarda olmamasından (Çizelge 2) ve camı fazlarının az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kotwica ve Łapka [8] tarafından yapılan çalışmada ise %10 YFC kullanılan karışım ile kontrol karışımının dayanımları birbirine çok yakın değerler alırken, %20 ve %30 YFC kullanımında ise kontrol karışımına göre yaklaşık %25 ve %38 oranında azalma meydana geldiği tespit

edilmiştir. Çalışmada, karışımlardaki bu dayanım düşüşünün kalsiyum alüminat çimentosunun hidrat dönüşümünden kaynaklandığı ve YFC'nin bu dönüşümü engelleyemediği rapor edilmiştir.

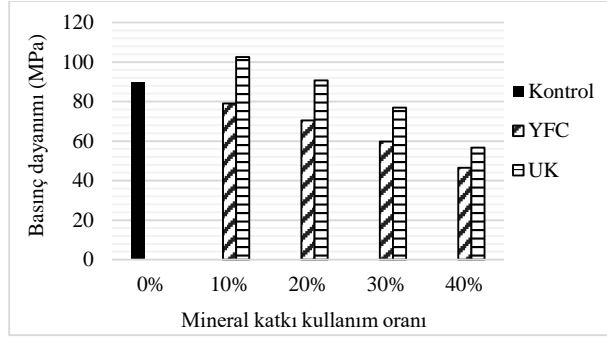
Kontrol ve UK katkılı harç numunelerinin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, katkısız ve UK ikameli karışımların erken yaştaki dayanımları ileri yaştaki dayanımlarına göre daha yüksek çıkmıştır. En yüksek dayanım değerleri 7 gün kürlenmiş karışımlarda meydana gelmiştir. Her yaşta %10 ikameli UK karışımının dayanımı kontrol karışımına göre daha yüksek ölçülmüştür. İkame oranı %20, %30 ve %40 olan numunelerde ise dayanım değerleri kademeli olarak düşmüştür. 90 gün kürlenmiş karışımlar incelendiğinde, UK içeren numunelerde, UK ikame miktarı %10 iken basınç dayanımının kontrol numunesine göre %11 oranında yüksek çıktığı, ancak ikame miktarı %20, %30, %40'a arttırıldığında bu dayanımların sırasıyla %5, %19 ve %37 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Kotwica ve Łapka [8] yaptığı çalışmada ise, kalsiyum alüminat çimentosu yerine %20 oranında F tipi UK kullanılması sonucunda basınç dayanımının UK içermeyen harç karışımına göre yaklaşık %20 oranında azaldığı belirlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan UK'nin kimyasal kompozisyonuna bakıldığında (Çizelge 1)  $CaO$  miktarının yüksek yani C tipi bir UK olduğu belirlenmiştir. C tipi UK'nin kalsiyum alüminat çimentosu yerine az miktarda kullanımı ile UK'nin kendi başına bağlayıcılık özelliği ortaya çıktığı ve harç dayanımının kontrol karışımına kıyasla bir miktar arttığı düşünülmektedir.



Şekil 2. Kontrol ve UK katkılı harç numunelerinin basınç dayanımı (Compressive strength of control and FA blended mortar specimens)

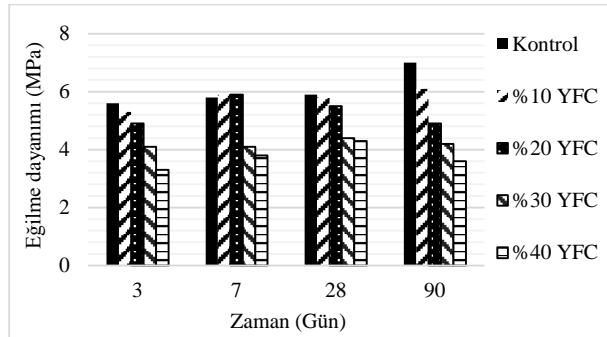
90 günlük kontrol, YFC katkılı ve UK katkılı harç numunelerinin basınç dayanımları Şekil 3'te gösterilmiştir. Kontrol karışımının uzun dönemli basınç dayanımı 89.5 MPa olarak ölçülmüştür. Kalsiyum alüminat çimentosu yerine ağırlıkça %10 YFC ve UK kullanımı ile basınç dayanımları sırasıyla 102.5 MPa ve 79.1 MPa olarak belirlenmiştir. %20 YFC ve UK kullanımında ise, YFC katkılı harçın dayanımı 70.5 MPa olarak ölçülürken, UK katkılı harçta ise basınç dayanımı kontrol karışımının dayanım değeri seviyesine gelmiştir. UK katkılı harçların genel olarak dayanım

performansının YFC katkılı harçlara göre daha yüksek olduğu deney sonuçlarından açıkça anlaşılmaktadır.



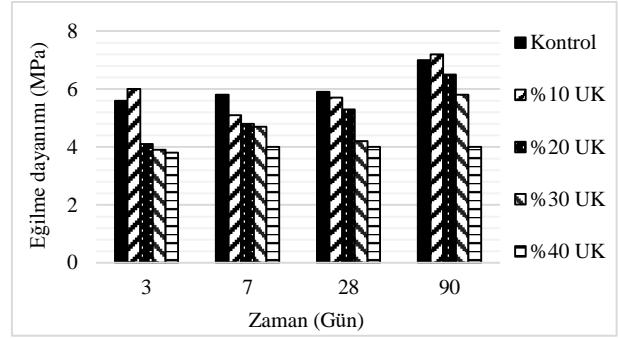
**Şekil 3.** 90 günlük kontrol, YFC katkılı ve UK katkılı harç numunelerinin basınç dayanımları (Compressive strength of 90-day control, GGBFS blended and FA blended mortar specimens)

Kontrol ve YFC katkılı harç karışımlarının 3, 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları Şekil 4'te verilmiştir. Kontrol ve YFC katkılı harç karışımlarının eğilme dayanımları genel olarak zaman içerisinde artış göstermiştir. 90 günlük eğilme dayanımı sonuçlarına göre kontrol karışımının eğilme dayanımı 7 MPa, %10 YFC katkılı karışımın eğilme dayanımı ise 6.1 MPa ölçülmüştür. Harç karışımlarına YFC ilave edilmesi ile eğilme dayanımlarının her yaş için kademeli olarak azaldığı gözlemlenmiştir. Bu eğilimin, karışımların basınç dayanımında gözlemlenen eğilime benzer olduğu tespit edilmiştir.



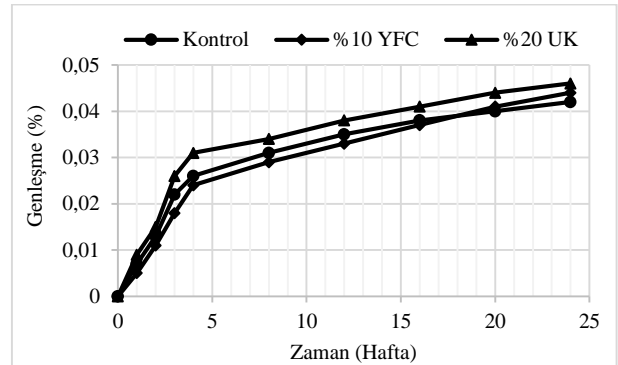
**Şekil 4.** Kontrol ve YFC katkılı harç numunelerinin eğilme dayanımları (Flexural strength of control and GGBFS blended mortar specimens)

Kontrol ve UK katkılı harç karışımlarının 3, 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları Şekil 5'te gösterilmiştir. YFC katkılı harç karışımlarında olduğu gibi UK katkılı harç karışımlarında da zaman içerisinde eğilme dayanımı değerlerinde artış olduğu gözlemlenmiştir. 90 günlük eğilme dayanımı sonuçlarına göre, %10 UK katkılı karışımın eğilme dayanımı (7.2 MPa) kontrol karışımına (7 MPa) göre bir miktar daha fazla ölçülmüştür. UK ikamesi %10'un üzerine çıktığı zaman eğilme dayanımlarında kademeli azalma tespit edilmiştir. Bu davranışın yine karışımların basınç dayanımındaki davranışa benzer çıktığı gözlemlenmiştir.



**Şekil 5.** Kontrol ve UK katkılı harç numunelerinin eğilme dayanımları (Flexural strength of control and FA blended mortar specimens)

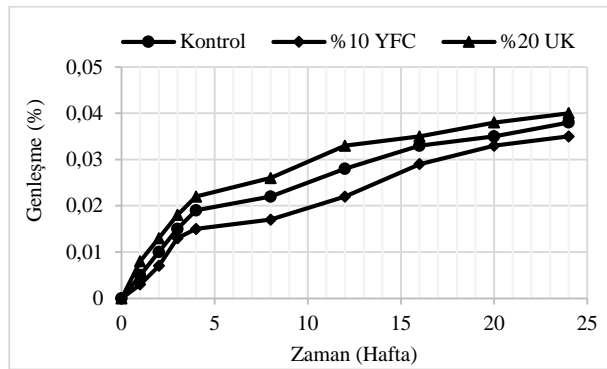
Yirmi dört hafta boyunca sodyum sülfata maruz kalan harç karışımlarının genleşmeleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Sülfat etkisi deneyi kontrol karışımı ve kontrol karışımına dayanım olarak en yakın YFC ve UK katkılı karışımlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, tüm karışımlarda zaman içerisinde bir miktar genleşme gözlemlenmiştir. Ancak bu genleşme değerleri çok düşük mertebelerde kalmıştır. Kalsiyum alüminat çimentosunun yapısından dolayı genleşmeler, Portland çimentosu esaslı harç karışımları kadar yüksek çıkmamıştır. Kalsiyum alüminat çimentosunun içerisinde kalsiyum hidroksit bulunmadığı için sülfat etkisi ile oluşabilecek genleşmeler meydana gelmemektedir. YFC ve UK katkılı harç karışımlarının sodyum sülfat etkisi ile genleşmeleri kontrol karışımına hemen hemen yakın çıkmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi UK katkılı harç karışımının genleşmeleri kontrol karışımına göre bir miktar yüksek çıkmıştır. Bu artışın UK'nın bünyesinde oluşan kalsiyum hidroksitten kaynaklandığı düşünülmektedir. YFC katkılı harç karışımlarında ise genleşme kontrol karışımına göre çok az miktarda fazla çıkmıştır. Yine bu artışın sebebinin YFC'nin bünyesinde oluşan kalsiyum hidroksitten kaynaklandığı düşünülmektedir.



**Şekil 6.** Seçilen serilerin sodyum sülfat etkisi deney sonuçları (Sodium sulfate test results on selected mortar series)

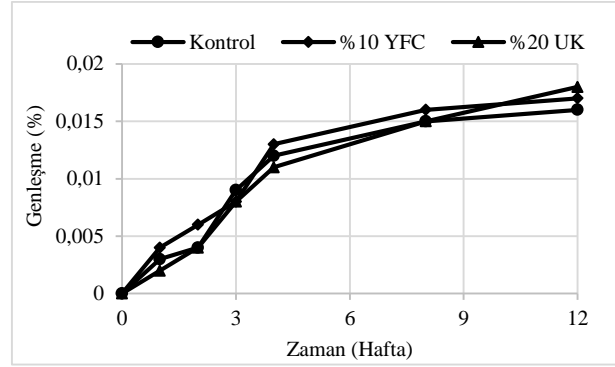
Yirmi dört hafta boyunca magnezyum sülfat etkisine maruz kalan harç numunelerinin genleşmeleri Şekil 7'de verilmiştir. Magnezyum sülfat etkisine maruz kalan numunelerin genleşmelerinin sodyum sülfat etkisine

maruz kalan numunelerin genleşme değerlerine benzer olduğu tespit edilmiştir. Magnezyum sülfatın Portland çimentosuna etkisinin sodyum sülfata göre daha fazla olduğu bilinmektedir. Magnezyum iyonları Portland çimentosunun ana hidratasyon ürünü olan kalsiyum silikat hidratın yapısını bozarak çimentonun bağlayıcılığını önemli ölçüde etkilemektedir [22]. Ancak, kalsiyum alüminat çimentosunda kalsiyum silikat hidrat ürünü oluşmadığı için bu olumsuz etki gözlemlenmemektedir. Bu açıdan karışımların genleşmelerinin yüksek mertebelerde olmadığı tespit edilmiştir. YFC ve UK katkılı harç karışımlarının magnezyum sülfat etkisi sonucundaki genleşmelerine bakılacak olursa, genleşmelerin kontrol karışımına göre UK katkılı karışımda bir miktar yüksek, YFC katkılı karışımda ise bir miktar düşük olduğu gözlemlenmiştir.



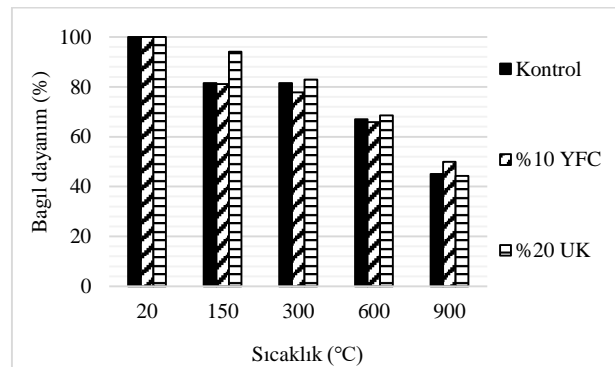
Şekil 7. Seçilen serilerin magnezyum sülfat etkisi deney sonuçları (Magnesium sulfate test results on selected mortar series)

On iki hafta boyunca  $H_2SO_4$  çözeltisinde bırakılan harç numunelerinin genleşmeleri Şekil 8'de gösterilmiştir. Deney sonucunda harç karışımlarında meydana gelen genleşmelerin tüm karışımlar için çok düşük mertebede olduğu gözlemlenmiştir. Portland çimentosu esaslı harçlar pH 6 değerinin altında bir ortamla karşılaştığında çözünmeye başlamaktadır. Bunun temel sebebi, bu çimentonun bağlayıcı ürünü olan kalsiyum silikat hidratın asidik ortamda parçalanmasıdır [23]. Kalsiyum alüminat çimentosunda ise bu ürün oluşmamaktadır. Ayrıca, kalsiyum bileşeni asidik ortamda çözüldükten sonra  $AH_3$  ürününü oluşturarak harç içerisindeki boşluklu yapının bu faz ile dolmasını sağlamakta ve dışarıdan gelecek etkilere karşı koruyucu olmaktadır. Kalsiyum alüminat çimentosunun asit etkilerine karşı dayanıklı olmasının bu nedenden kaynaklandığı düşünülmektedir. YFC ve UK katkılı harç karışımlarının asit etkisi sonucundaki genleşmelerine bakılırsa, kontrol karışımına çok yakın değerler aldığı sonucuna varılabilir.



Şekil 8. Seçilen serilerin asit etkisi deney sonuçları (Acid test results on selected mortar series)

Kontrol, %10 YFC katkılı ve %20 UK katkılı harç karışımlarının  $150^\circ C$ ,  $300^\circ C$ ,  $600^\circ C$  ve  $900^\circ C$  sıcaklığa maruz kalması sonucu meydana gelen dayanım kayıpları Şekil 9'da verilmiştir.  $150^\circ C$  sıcaklığa maruz kalan kontrol ve YFC katkılı karışımda dayanım kaybı %20 mertebesinde olurken, UK katkılı karışımda kayıp %6 mertebesinde kalmıştır.  $300^\circ C$  sıcaklığa maruz kalan kontrol ve YFC katkılı karışımda dayanım kaybı  $150^\circ C$  sıcaklığa maruz kalan numunelerden çok farklı olmazken, UK katkılı karışımda kayıp yaklaşık %17'ye çıkmıştır.  $600^\circ C$  sıcaklığa maruz kalan numunelerde dayanım kaybının %32-35 mertebesinde olduğu gözlemlenmiştir.  $900^\circ C$  sıcaklığa maruz kalan numunelerde ise dayanım kaybının %50-56 mertebesinde olduğu sonucuna varılmıştır.  $900^\circ C$  sıcaklıkta kontrol ve %20 UK katkılı numunelerin dayanım kaybı birbirine çok yakın değerler alırken (~%55), %10 YFC katkılı numunenin dayanım kaybı bir miktar daha az (%50) çıkmıştır. Tüm karışımlarda özellikle  $600^\circ C$  sıcaklığın üzerinde meydana gelen dayanım kayıplarının bir nedeni de karışımda kullanılan kireçtaşı agregasının o sıcaklıklarda fiziksel olarak bozulmaya başlamasından kaynaklandığı düşünülmektedir [21]. Deney sonuçlarına göre, kalsiyum alüminat çimentosu yerine %10 YFC ve %20 UK kullanımının harç karışımlarının yüksek sıcaklık davranışına olumsuz bir etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır.

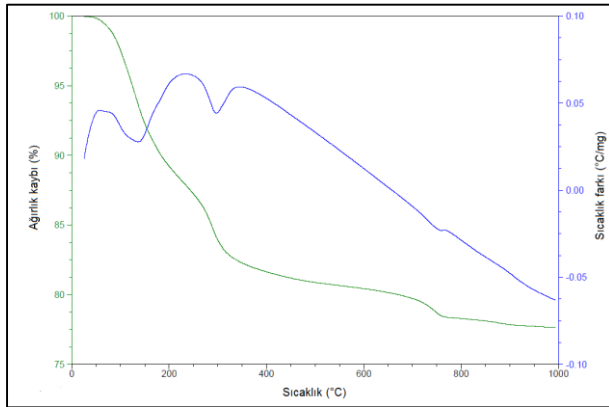


Şekil 9. Seçilen serilerin yüksek sıcaklık etkisi deney sonuçları (High temperature resistance test results on selected mortar series)

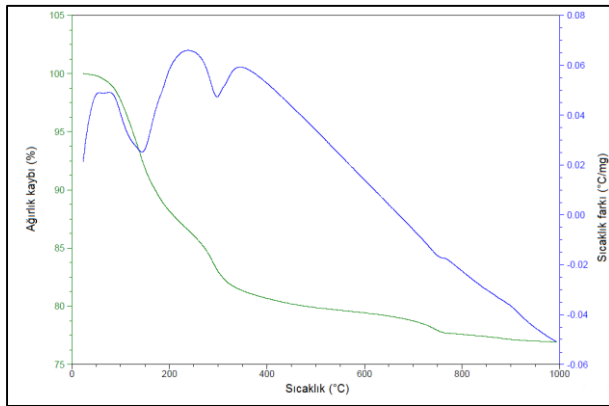
TGA analizi sonuçları Şekil 10 - Şekil 14'te gösterilmiştir. Analiz sonuçlarına göre yaklaşık 400°C'ye kadar numunelerin ağırlıklarında %15 - %20 arasında ağırlık kaybı görülmüştür. Yaklaşık 160°C'de meydana gelen sıcaklık farkı kalsiyum alüminat çimentosunda bulunan dikalsiyum alüminatın ( $C_2AH_8$ ) dehidratasyonundan kaynaklanmaktadır [23]. 300°C civarında meydana gelen sıcaklık farkı ise  $C_3AH_6$  kararlı kübik fazının dehidratasyonundan kaynaklanmaktadır [23].

Mineral katkı içeren karışımların TGA analizi sonuçları kontrol numunesi ile karşılaştırıldığında ise, mineral katkı ilavesinin TGA analizleri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını göstermektedir.

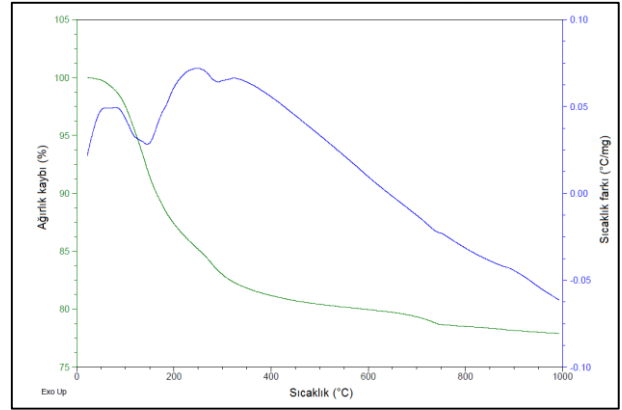
TGA analizi sonucunda numunelerin 400°C'den sonra daha kararlı bir yapıda olduğu söylenebilir. Yüksek sıcaklık deneyinde ise sıcaklığın artması ile karışımların dayanımlarında kademeli olarak düşüşler gözlemlenmiştir. Bu iki deney arasındaki farkın sebebi, yüksek sıcaklık deneyinde harç numunesi, TGA analizinde ise hamur numunesi kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Harç numunelerinde sıcaklık arttıkça agrega ile hamurun farklı termal genişlemelere sahip olmasından dolayı numuneler zayıflamakta ve dayanım kayıpları meydana gelmektedir [22].



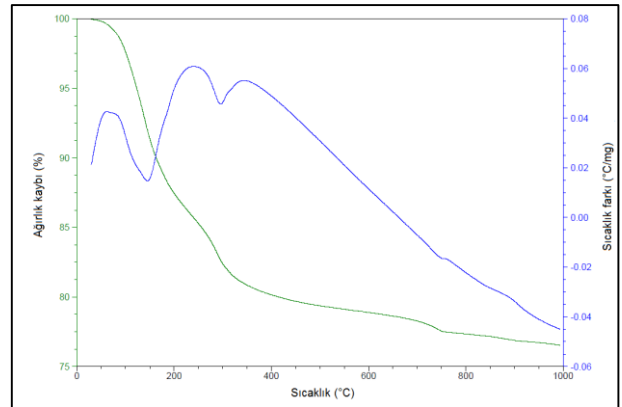
Şekil 10. Kontrol numunesinin TGA analizi (TGA analysis of control specimen)



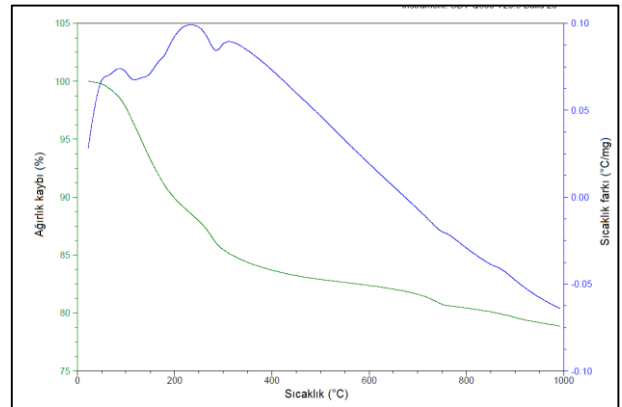
Şekil 11. %10 YFC numunesinin TGA analizi (TGA analysis of 10% GGBFS blended specimen)



Şekil 12. %40 YFC numunesinin TGA analizi (TGA analysis of 40% GGBFS blended specimen)



Şekil 13. %10 UK numunesinin TGA analizi (TGA analysis of 10% FA blended specimen)

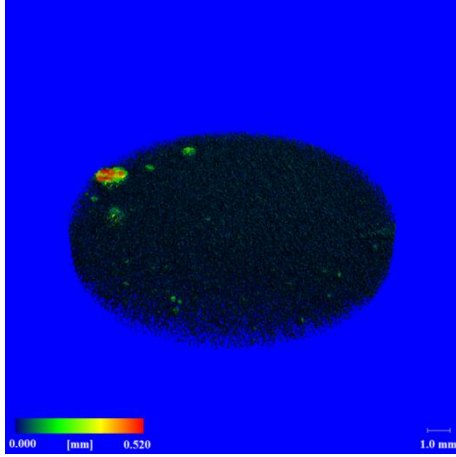


Şekil 14. %40 UK numunesinin TGA analizi (TGA analysis of 40% FA blended specimen)

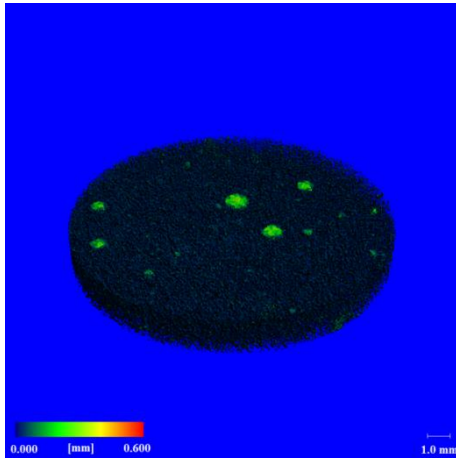
Bilgisayarlı mikro tomografi analizi sonucunda elde edilen numunelerin ortalama gözenek çapı ve porozite değerleri Çizelge 4'te, boşluk dağılım modelleri ise Şekil 15'de verilmiştir. UK ilavesi ile karışımların ortalama gözenek çapının arttığı ancak, porozite değerlerinin ise düştüğü gözlemlenmiştir. YFC ilavesi ile de karışımların ortalama gözenek çapının bir miktar azaldığı, bunun aksine porozite değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Mineral katkı ilavesi ile ortaya çıkan bu değişimin YFC ve UK'nın morfolojisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, mineral katkı içeren bağlayıcı



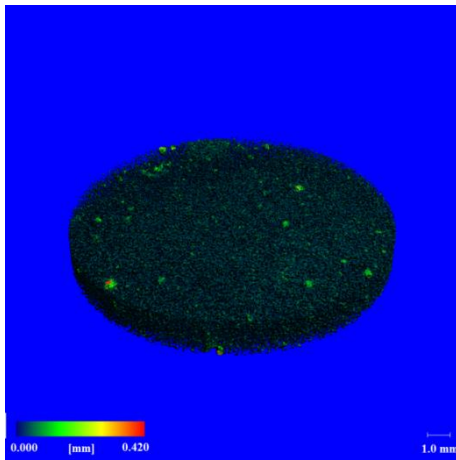
hamur karışımlarının porozitelerindeki bu farkın, mineral katkıların puzolanik reaksiyonları sonucu ortaya çıkan ürünlerden de kaynaklandığı düşünülmektedir. Diğer taraftan, karışımların porozite değerleri ile harç karışımlarının basınç dayanımları karşılaştırıldığında ise aralarında anlamlı bir ilişkinin bulunmadığı sonucuna varılmıştır.



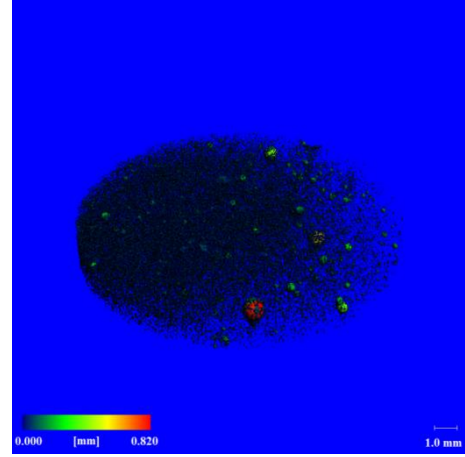
(a)



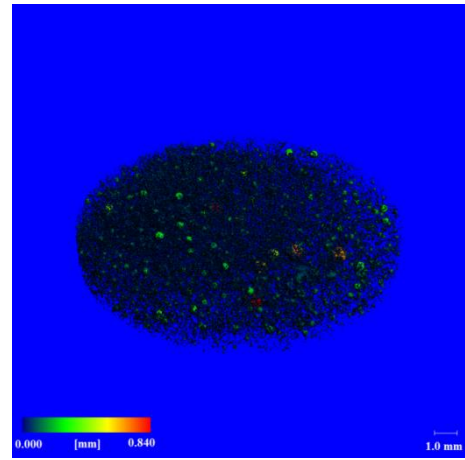
(b)



(c)



(d)



(e)

**Şekil 15.** Hamur karışımlarının MicroCT analizi ile elde edilen boşluk dağılımları (a) kontrol; (b) %10 YFC; (c) %40 YFC; (d) %10 UK; (e) %40 UK (Pore distributions obtained by MicroCT analysis of paste mixtures (a) control; (b) 10% GGBFS; (c) 40% GGBFS; (d) 10% FA; (e) 40% FA)

X-ışını fotoelektron spektroskopisi analizi sonucunda hamur karışımlarının yüzeyinde bulunan kimyasal bileşikler tespit edilmiş ve Çizelge 5'te gösterilmiştir. Analiz sonucunda tüm karışımlarda en fazla bulunan bileşiğin metal karbonat olduğu belirlenmiştir. Bunun dışında, karbonat, kalsiyum karbonat, alüminosilikat,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  bileşiklerinin de numunelerin bünyesinde bulunduğu tespit edilmiştir. Kalsiyum alüminat çimentosuna mineral katkı ikamesi ile karışımların kimyasal bileşiklerinde önemli bir değişimin olmadığı sonucuna varılmıştır.

**Çizelge 4.** Hamur karışımlarının ortalama gözenek çapı ve porozite değerleri ile harç karışımlarının basınç dayanımı değerleri (Average void diameter and porosity of paste mixtures as well as compressive Strength of mortar mixtures)

	Kontrol	%10 YFC	%40 YFC	%10 UK	%40 UK
Ortalama gözenek çapı ( $\mu\text{m}$ )	74	66	56	102	148
Porozite (%)	8.1	9.1	11.6	2.8	4.5
Harç karışımı basınç dayanımı (MPa)	89.5	79.1	46.5	102.5	56.7

**Çizelge 5.** Hamur karışımlarının yüzeyinde bulunan kimyasal bileşikler (Chemical compounds on the surface of paste mixtures)

Atomik %	Kontrol	%10 YFC	%40 YFC	%10 UK	%40 UK
Metal karbonat	44.8	42.7	40.8	43.7	40.9
Karbonat	27.3	33.8	32.5	28.1	30.9
Kalsiyum karbonat	6.3	5.8	5.5	5.9	5.4
Alüminosilikat	10.6	9.7	9.5	10.1	10.7
SiO <sub>2</sub>	2.8	2.6	3.2	2.8	2.1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.2	0.9	1.2	1.1	0.8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	1.1	1.3

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Çalışma kapsamında kullanılan malzeme ve uygulanan deneylere göre aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Yüksek fırın cürufu katkılı karışımda %10, uçucu kül katkılı karışımda ise %20 mineral katkı ikamesi ile elde edilen karışımların ileri yaştaki basınç dayanımları sırasıyla 79.1 MPa ve 90.7 MPa olarak belirlenmiştir. Bu ikame oranlarının, kontrol karışımının basınç dayanımına (89.5 MPa) en yakın değerler olduğu tespit edilmiştir. elde edilmiştir.
- Uçucu kül katkılı karışımların mekanik özelliklerinin yüksek fırın cürufu katkılı karışımlara göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir.
- Kontrol, %10 yüksek fırın cürufu ve %20 uçucu kül ikameli harç karışımlarında sodyum sülfat, magnezyum sülfat ve asit etkisi sonucundaki genleşmeler düşük mertebede kalmıştır. Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katkılı karışımlardaki genleşmeler, kontrol karışımına göre bir miktar yüksek çıkmasına rağmen, ihmal edilebilecek düzeyde kalmıştır.
- Yüksek sıcaklık etkisi sonucunda kontrol, %10 yüksek fırın cürufu katkılı ve %20 uçucu kül katkılı harç karışımlarında sıcaklığa bağlı olarak kademeli olarak bir dayanım kaybı meydana gelmiştir. 900°C sıcaklık etkisinde oluşan dayanım kayıpları, kontrol ve uçucu kül katkılı karışımlarda yüksek fırın cürufu katkılı karışımlarına göre bir miktar daha fazla meydana gelmiştir.
- Termal analiz sonucunda yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ilavesinin kalsiyum alüminat esaslı

bağlayıcı karışımlar üzerinde önemli bir olumsuz etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır.

- Porozite analizi sonucunda uçucu kül katkılı karışımların porozitesi kontrol karışımına göre daha düşük, yüksek fırın cürufu katkılı karışımların porozitesi ise daha yüksek çıkmıştır. Ancak bu durumun, harçların mekanik özelliklerine olumlu ya da olumsuz bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir.
- Kontrol karışımına en yakın mekanik özelliğe sahip %10 yüksek fırın cürufu katkılı ve %20 uçucu kül katkılı harç karışımlarının dayanıklılık ve yüksek sıcaklık etkisi özelliklerinin kontrol karışımına benzer olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, kalsiyum alüminat çimentosu esaslı harçlar için yüksek fırın cürufunun optimum ikame oranı %10, uçucu külün ise %20 olarak belirlenmiştir.

Çalışma sonucunda bu çalışmaya benzer çalışmalara yön verecek bazı öneriler şu şekildedir:

- Kalsiyum alüminat esaslı harç karışımlarının özellikle refrakter malzeme olarak kullanılması durumunda 900°C'den daha yüksek sıcaklıklardaki davranışının da bilinmesi gerekmektedir. Bu açıdan, 900°C'den daha yüksek sıcaklıklar (1050°C gibi) için de deneyler gerçekleştirilebilir.
- Kalsiyum alüminat çimentosunun farklı sıcaklıklarda kürlenmesinin mineral katkılı harçların dayanıklılık ve termal özelliklerine etkisi incelenebilir.
- Farklı kimyasal, fiziksel ve mineralojik özelliğe sahip yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katkılı kalsiyum alüminat esaslı harçların özellikleri

incelenip, mineral katkıların bu özelliklerinin harçların performansına etkisi incelenebilir.

- Farklı mineral katkıların bir arada kullanılması ile elde edilen harç karışımlarının mekanik ve dayanıklılık özellikleri belirlenip, uygun oranlarda üçlü sistemlerin kullanılması önerilebilir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar, çalışma kapsamında gerekli malzemelerin temininde katkı sağlayan Çimsa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ye, laboratuvar çalışmalarına yardımcı olan Ege Üniversitesi Merkezi Araştırma Test ve Analiz Laboratuvarı UAM çalışanları Arş. Gör. Dr. Çisem Altun Ayar, Arş. Gör. Dr. Ece Bayır ve Arş. Gör. Dr. Gökhan Özdamar'a, 2016-EGEMATAL-002 nolu Bilimsel Araştırma Projesi ile finansal destek sağlayan Ege Üniversitesi'ne ve 2209-B Sanayiye Yönelik Lisans Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında proje desteği sağlayan TÜBİTAK'a teşekkür ederler.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Scrivener K.L., Capmas A., "Calcium Aluminate Cements, Chapter 13, in: P.C. Hewlett (Ed.), *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*", John Wiley & Sons, New York, (1998).
- [2] Barnes P., Bensted J., "Structure and Performance of Cements", CRC Press, Boca Raton, (2002).
- [3] Scrivener K.L., Cabiron J.L., Letourneux R., "High-performance concretes from calcium aluminate cements", *Cement and Concrete Research*, 29: 1215-1223, (1999).
- [4] Pacewska B., Wilinska I., Nowacka M., "Studies on the influence of different fly ashes and Portland cement on early hydration of calcium aluminate cement", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 106: 859-868, (2011).
- [5] Hidalgo Lopez A., Garcia Calvo J.L., Cruz Alonso M., Fernandez L., Andrade C., "Microstructure development in mixes of calcium aluminate cement with silica fume or fly ash", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 96: 335-345, (2009).
- [6] Hidalgo Lopez A., Garcia Calvo J.L., Garcia Olmo J., Petit S., Cruz Alonso M., "Microstructural evolution of calcium aluminate cements hydration with silica fume and fly ash additions by scanning electron microscopy, and mid and near-infrared spectroscopy", *Journal of American Ceramic Society*, 91: 1258-1265, (2008).
- [7] Collepardi M., Monosi P., Piccioli P., "The influence of pozzolanic materials on the mechanical stability of aluminous cement", *Cement and Concrete Research*, 25: 961-968, (1995).
- [8] Kotwica L., Łapka P., "The influence of mineral additives on properties of calcium aluminate cement mortars", *Cement Wapno Beton*, 2016(3): 191-198, (2016).
- [9] Kırca Ö., Yaman İ.Ö., Tokyay M., "Compressive strength development of calcium aluminate cement-GGBFS blends", *Cement and Concrete Composites*, 35: 163-170, (2013).
- [10] Pacewska B., Wilinska I., Bukowska M., "Calorimetric investigations of the influence of waste aluminosilicate on the hydration of different cements", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 97: 61-66, (2009).
- [11] Lothenbach B., Scrivener K.L., Hooton R.D., "Supplementary cementitious materials", *Cement and Concrete Research*, 41, 1244-1256, (2011).
- [12] Juenger M.C.G., Siddique R., "Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete", *Cement and Concrete Research*, 78, 71-80, (2015).
- [13] Malhotra V.M., "Making concrete 'greener' with fly ash", *Indian Concrete Journal*, 73(10): 609-614, (1999).
- [14] Wu M., Zhang Y., Ji Y., Liu G., Liu C., She W., Sun W., "Reducing environmental impacts and carbon emissions: study of effects of superfine cement particles on blended cement containing high volume mineral admixtures", *Journal of Cleaner Production*, 196: 358-369, (2018).
- [15] Ishak S.A., Hashim H., "Low carbon measures for cement plant e a review", *Journal of Cleaner Production*, 103: 260-274, (2015).
- [16] Maddalena R., Roberts J.J., Hamilton A., "Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements", *Journal of Cleaner Production*, 186: 933-942, (2018).
- [17] TS EN 196-1, "Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2016).
- [18] ASTM C1012, "Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution", *Annual Book of ASTM Standard*, USA, (2015).
- [19] ASTM C 279, "Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes" *Annual Book of ASTM Standard*, USA, (2012).
- [20] Khaliq W., Kodur V., "High temperature properties of fiber reinforced high strength concrete", *American Concrete Institute, ACI Special Publication (279 SP)*, 77-118, (2011).
- [21] Mehta P.K., Monteiro P.J.M., "Concrete Microstructure, Properties and Materials", McGraw-Hill, 659p, (2006).
- [22] Neville A.M., "Properties of Concrete", Longman Group Limited, London, (2011).
- [23] Cohen M.D., Bentur A., "Durability of Portland cement-silica fume pastes in magnesium sulfate and sodium sulfate solutions" *ACI Materials Journal*, 85(3): 148-157, (1988).