





Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Yüksek Fırın Cürufu İkameli Çimentoların Yapısal ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması

 Yusuf İslam ŞAHİN^a,  Yılmaz KOÇAK^{b,*}

^a İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

^b İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: yilmazkocak@duzce.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.986896

ÖZ

Gerek doğal gerekse yapay puzolanik malzemeler çimento ve beton teknolojisinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Özellikle yapay puzolanların kullanımının atık değerlendirilmesi, çevre kirliliğinin azaltılması, enerji kaynaklarının korunması, dayanım ve dayanıklılığa katkısı nedeniyle giderek yaygınlaştığı görülmektedir. Bu amaçla yapılan çalışmanın ilk aşamasında Portland çimento ve yüksek fırın cürufunun fiziksel, kimyasal, mineralojik, termal özellikleri ve bağ yapıları gibi yapısal özellikleri belirlenmiştir. İkinci aşamada yüksek fırın cürufu ağırlıkça %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında Portland çimento yerine ikame edilerek 5 tipte çimento elde edilmiştir. Üçüncü aşamada ise bu çimentolarla üretilen çimento hamur ve harç örnekleri üzerinde su ihtiyacı, genleşmesi, priz süresi ve basınç dayanımı değerleri belirlenmiştir. Sonuç olarak yapılan deneyler neticesinde elde edilen veriler, Portland çimento ve yüksek fırın cürufunun fiziksel, kimyasal, mineralojik özellikleri ile bağ yapılarına göre su ihtiyacında, priz sürelerinde ve basınç dayanımlarında farklılıklar olduğunu göstermiştir. Nihayetinde endüstriyel bir atık olan yüksek fırın cürufunun çimento ve beton teknolojisinde kullanılmasıyla ekonomik ve ekolojik yarar sağlanabileceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yüksek fırın cürufu, Portland çimento, Termal analiz, XRD, FT-IR, Basınç dayanımı

Investigation of Structural and Mechanical Properties of Blast Furnace Slag Substituted Cements

ABSTRACT

Both natural and artificial pozzolanic materials extensively in cement and concrete technology are used. It is seen that especially the use of artificial pozzolans are becoming widespread due to their contribution to waste valuation, reduction of environmental pollution, protection of energy resources, strength and durability. For this purpose, in the first stage of the study, the structural properties of Portland cement and blast furnace slag such as physical, chemical, mineralogical, thermal properties and bond structures were determined. In the second stage, 5 types of cement were obtained by replacing Portland cement at 0%, 5%, 10%, 15% and 20% by weight of blast furnace slag. In the third stage, water requirement, volume expansion, setting time and compressive strength values were determined on cement paste and mortar samples produced with these cements. As a result, the data obtained as a

result of the experiments showed that there are differences in water demand, setting times and compressive strengths according to the physical, chemical, mineralogical properties and bond structures of Portland cement and blast furnace slag. It is thought that economic and ecological benefits can be achieved by using blast furnace slag, which is an industrial waste, in cement and concrete technology.

Keywords: Portland cement, Blast furnace slag, Thermal analysis, XRD, FT-IR, Compressive strength

I. GİRİŞ

Çimento ve beton teknolojisinin hızlı gelişimi ile tras, zeolit, diatomit, pirinç kabuğu külü, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı, metakaolin gibi doğal ve yapay puzolanlar her geçen yıl giderek daha yaygın olarak kullanılmaktadır [1]–[9]. Bu puzolanik malzemelerin yaygın olarak kullanılmasının en temel nedenleri, beton ve çimentonun teknik, ekonomik ve ekolojik avantajlar sağlaması, korozyon direncini artırması, hidrasyon ısını düşürmesi, sülfat saldırılarına karşı direnci artırması, enerji maliyetlerini düşürmesi, küresel ısınmayı azaltması ve dayanıklılığı artırması vb. sıralanabilir [10]–[21].

Bu mineral katkıları içerisinde atık olarak ortaya çıkan yüksek fırın cürufu (YFC), çimento ve beton teknolojisine önemli katkılar sağlamakta ve bu nedenle de yoğun olarak kullanılmaktadır. YFC; metalurji tesislerindeki fırınlarda demir filizi gangı, kok, kireç gibi maddelerin 1450-1550 °C arasında demirin üretilmesi esnasında ergimiş durumda atık madde olarak elde edilen ve ana ürün tipine ve üretim yöntemine göre farklı özellikte meydana gelebilen yapay puzolan sınıfında bir üründür [22]–[24]. YFC'nin esas olarak kimyasal bileşiminin CaO, SiO₂ ve Al₂O₃'ten oluştuğu söylenebilir. Ancak YFC'nin en az kimyasal bileşimi kadar mineralojik yapısı da önemli bir faktördür. Cürufular yüksek fırın çıkışında yavaş soğutulduğunda kristal yapıda oluşmakta ve bu tip cürufular beton agregası olarak kullanılabilir. Hızlı soğutulduğunda ise amorf yapıda bir katı eriyik elde edilmekte, yarı-kararlı amorf yapıdaki bu malzeme sodyum hidroksit veya kalsiyum hidroksit gibi aktivatör kullanılmak suretiyle veya ince öğütülerek Portland çimentosunun hidrasyonu ile ortaya çıkan portlandite (CH) reaksiyonu sonucunda ilave kalsiyum silikat hidratları (C-S-H) oluşturmaktadır. Hızlı soğutulan bu cürufuların en az 2/3 oranında camı faz içermesi, CaO, SiO₂ ve MgO miktarları toplamı yine minimum 2/3 oranında olması ve çeşitli hidrolik modüllerden biri olan (CaO+MgO)/SiO₂ oranının ise 1'den büyük olması tercih edilmektedir [24], [25].

YFC inşaat endüstrisinde genel olarak çimento ve beton içerisinde katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Literatürde beton içerisine katılan YFC'nin yapısal özelliklerine bağlı olarak, erken yaş dayanımlarda bir miktar azalmaya sebep olurken ileri yaş dayanımlarında artış sağladığı, betonda priz sürelerini uzattığı, işlenebilirliği artırdığı, hidrasyon ısını, terlemeyi, su geçirimsizliğini klorür geçirimsizliğini azalttığı, yüksek alkali silika direnci sağladığı, donatı korozyonu direncini artırdığı ve betonun durabilitesinde artış sağladığı bildirilmektedir [26]–[37]. Ayrıca YFC, enerjinin korunumu ve açığa çıkan CO₂ miktarının azaltılması bakımından da her geçen gün daha fazla dikkat çekmektedir [38].

Çimento ve beton katkı malzemesi olarak tercih edilmekte olan YFC'nin olumlu özellikleri nedeniyle yapılan bu çalışmanın ilk aşamasında Portland çimento ve yüksek fırın cürufunun fiziksel, kimyasal, mineralojik, termal özellikleri ve bağ yapıları gibi yapısal özellikleri belirlenmiştir. İkinci aşamada yüksek fırın cürufu, Portland çimento yerine ağırlıkça %0-5-10-15-20 oranlarında ikame edilerek biri referans diğerleri YFC ikameli çimentolar olmak üzere toplam 5 tipte çimento elde edilmiştir. Üçüncü aşamada ise bu çimentolarla üretilen çimento hamur ve harç örnekleri üzerinde su ihtiyaçları, genleşme değerleri, priz süreleri ve basınç dayanım değerleri belirlenmiş ve elde edilen veriler değerlendirilmiştir.

II. MALZEME VE YÖNTEM

A. MALZEME

Yapılan bu çalışma için CEM I 42,5 R tipi PÇ bağlayıcı olarak ve endüstriyel bir atık olan YFC ise mineral katkı olarak kullanılmıştır. PÇ Bolu Çimento Fabrikası tarafından üretilmiş, YFC ise yine Bolu Çimento Fabrikasından sağlanmıştır. Harç numune üretimlerinde TS EN 196-1'e [39] uygun standart kum ve içilebilir nitelikte olan Bolu ili Merkez ilçesi şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

B. YÖNTEM

Çimento hamur ve harç numunelerinin hazırlanması için %0 (referans), %5, %10, %15 ve %20 oranlarında YFC ikameli 5 farklı çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentolar ile ilgili kodlamalar ile çimento ve harç için karışım miktarları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. PÇ ve YFC harç numunelerinin miktarları ve kodları.

Kod	Çimento miktarı (g)	Çimento miktarı (%)	YFC miktarı (g)	YFC miktarı (%)	Su miktarı (g)	Standart kum miktarı (g)	Su/Çimento
R	450	100	0	0			
5YFC	427,5	95	22,5	5			
10YFC	405	90	45	10	225	1350	0,5
15YFC	382,5	85	67,5	15			
20YFC	360	80	90	20			

PÇ ve YFC'nin yapısal özelliklerinin belirlenmesi için; kimyasal analizler Thermo marka Arl 9900 model XRF cihaz, Blaine değerleri Astek marka Blaine cihaz, özgül ağırlıklar Quantachrome/MVP-3, mineralojik özellikler Rigaku Ultima-IV, kafes ve moleküler yapıları Shimadzu-IRPestige 21, termal özellikler Shimadzu/DTG 60H-DSC 60 marka cihazlarla tespit edilmiştir.

Çimento hamur ve harç karışımları, TS EN 196-1'de belirtilen esaslara göre yapılmıştır [39]. Çimento hamurlarının su ihtiyacı, genleşme ve priz süreleri sıcaklığın 20 °C, bağıl nemin ise %65 olduğu bir laboratuvar ortamında TS EN 196-3'e göre belirlenmiştir [40]. Çimento harçları ise 4x4x16 cm boyutlarında üç gözlü kalıplara dökülmüş, 24 saat laboratuvar ortamında bekletilmiş, 20 °C'lik sıcaklıktaki bir odadaki su havuzlarına yerleştirilmiş, 2, 7, 28. hidratasyon günlerinde harç numuneleri havuzlardan alınıp kurulanmış ve basınç dayanımları TS EN 196-1'e göre belirlenmiştir [39].

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Hammaddelere fiziksel, kimyasal, mineralojik, moleküler ve termal analizler uygulanmıştır. Çimento hamurlarına su ihtiyacı, genleşme ve priz süreleri için deneyler yapılmış, çimento harçlarının ise basınç dayanımları tespit edilmiştir. Analiz ve deneylerden belirlenen sonuçların yer aldığı çizelge ve şekiller, analiz ve deneylerin ilgili başlıklarda verilmiştir.

A. FİZİKSEL ANALİZLER

PÇ ve YFC'nin elek analizi, özgül ağırlıkları ve özgül yüzey alanları (Blaine) gibi fiziksel özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. PÇ ve YFC'nin fiziksel özellikleri.

Malzemeler	Boyut aralığı (elek üstü)		Özgül ağırlık (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)
	(%)			
	>45 (µm)	>90 (µm)		
PÇ	3,6	0,3	3,17	3882
YFC	0	0,1	2,85	5295

Elek analizi sonuçlarına göre YFC'nin, PÇ'ye göre nispeten daha küçük tane yapısına sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca YFC'nin ASTM C 989 standardında belirtilen 45 µm elek bakiyesi olarak verilen maksimum %20 sınır değerini sağladığı belirlenmiştir [42]. PÇ'nin özgül ağırlığı 3,17 g/cm³, Blaine değeri ise 3882 cm²/g iken, YFC'nin 2,85 g/cm³, Blaine değeri ise 5295 cm²/g dir (Tablo 2). Bu verilere göre daha düşük özgül ağırlıklı ve daha yüksek Blaine değerine sahip YFC ikameli çimentolar elde edilebileceği ifade edilebilir.

B. KİMYASAL ANALİZLER

PÇ ve YFC'nin kimyasal yapısı Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. PÇ ve YFC'nin kimyasal özellikleri.

Kimyasal sembolü	Kimyasal kompozisyon	PÇ	TS EN 197-1	YFC	BS 6699
S	SiO ₂	19,8	-	41,08	-
A	Al ₂ O ₃	5,38	-	10,08	-
F	Fe ₂ O ₃	3,35	-	0,97	-
C	CaO	63,39	-	34,64	-
M	MgO	1,35	< %5,0	6,16	< %13,0
S	SO ₃	2,79	< %3,5	0,83	< %2,5
N	Na ₂ O	0,18	-	0,52	-
K	KO	0,64	-	0,97	-
	Cl ⁻	2,79	< %0,1	0,83	< %0,1
	Kızdırma kaybı	2,67	< %5,0	1,16	< %3,0
	(C+ M)/ S	-	-	0,993	> 1
	Çözünmeyen Kalıntı	1,08	-	-	-
	Serbest CaO	0,86	-	-	-

Tablo 3'te görüldüğü üzere PÇ'nin kimyasal yapısı (MgO, SO₃, Cl⁻ ve kızdırma kaybı) TS EN 197-1'de belirtilen sınırlar içerisinde [41]. YFC SiO₂, CaO ve Al₂O₃ ana bileşenlerinden oluşmaktadır. Ağırlıkça SiO₂/Al₂O₃ (S/A) oranı 2,54'tür. YFC'nin hidrolik özelliklerinin belirlenmesindeki önemli parametrelerden birisi olan kimyasal kompozisyonundaki (C+M)/S oranının 0,993 oranı ile minimum 1 olan sınır değerine çok yakın olduğu, (C+M+A)/S oranının 1,239, yani 1'den büyük olması, YFC'nin tercih edilen hidrolik modül sınırları içerisinde olduğunu göstermektedir [42]. Ayrıca YFC'nin kimyasal yapısı (MgO, SO₃, Cl⁻ ve kızdırma kaybı değerleri) BS 6699 standardındaki sınır değerleri içinde olduğu ve dolayısı ile dayanım ve dayanıklılığa olumsuz bir etkisinin olmayacağı düşünülmektedir (Tablo 3) [42].

C. MİNEROLOJİK ANALİZLER

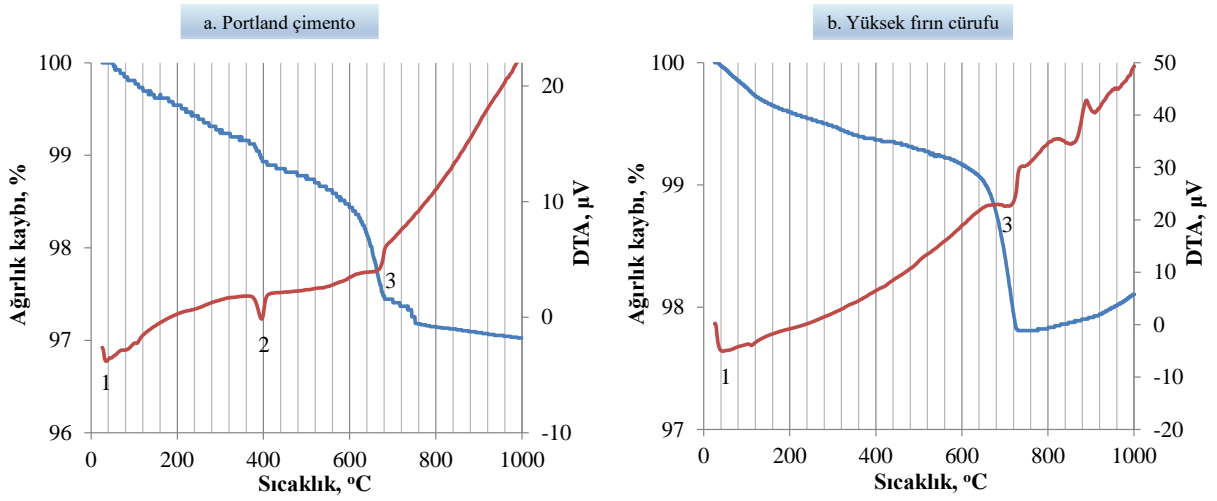
PÇ ve YFC'nin minerolojik yapısı Şekil 1'de verilmiştir.

sayılarında titreşim piklerine sahip olduğu izlenmektedir (Şekil 2-a). Buna göre, Si-O ile birlikte bulunan Al-O bağları 538 cm^{-1} , Si-O bağları 875 cm^{-1} dalga sayısında titreşim piki şeklinde görülmektedir. Portland çimentoda alçıyı belirten S-O (Kükürt-Oksijen) bağları 711 ve 1113 cm^{-1} , C-O bağları ise 1417 cm^{-1} dalga sayılarında izlenmektedir. Su moleküllerinin yer aldığı $3400-3600\text{ cm}^{-1}$ dalga sayıları aralığındaki belirgin bir pik vermediği, yapısındaki su iyonları ve moleküllerine ait titreşim pikleri ise 3400 ve 1645 cm^{-1} dalga sayılarında izlenmektedir (Şekil 2-a) [48],[49].

YFC'nin FT-IR analizine göre 542 , 711 , 873 , 914 ve 1435 cm^{-1} dalga sayılarında titreşim pikleri görülmektedir (Şekil 2-b). Buna göre Si-O-Si bağları 524 cm^{-1} , Si-O ile birlikte bulunan Al-O bağları 711 cm^{-1} ve Si-O bağları 914 cm^{-1} dalga sayılarında titreşim piki şeklinde izlenmektedir. 2920 cm^{-1} ve 2850 cm^{-1} 'de görülen zayıf 2 pik, yüksek fırın cürufunun kalsitindeki karbon harmoniklerine bağlanır. 1435 cm^{-1} dalga sayısında titreşim pikleri CO_3^{2-} molekülünün C-O asimetric gerilme titreşimine atfedilen bu pikin, atmosfere maruz kalan cürufun karbonatlaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. 1037 cm^{-1} 'deki absorpsiyon zirveleri, Si-O gerilme titreşim bantlarının varlığını gösterirken, Si-O-Si bükülme titreşim bantları 693 cm^{-1} 'de gözlemlenmiştir. 873 cm^{-1} 'deki absorpsiyon bantları, cürufta bulunan AlO_4 gruplarının asimetric gerilme titreşimine karşılık gelmektedir (Şekil 2-b) [50], [51]. Su moleküllerinin yer aldığı $3400-3600\text{ cm}^{-1}$ dalga sayıları aralığında YFC'nin yine PÇ gibi belirgin bir pik vermediği izlenmektedir.

E. TERMAL ANALİZLER

Fark esaslı termal analiz (DTA) ile termal gravimetri analizleri eş zamanlı olarak tek bir numune üzerine uygulanmış ve elde edilen veriler Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. PÇ ve YFC'nin DTA-TGA Analizleri.

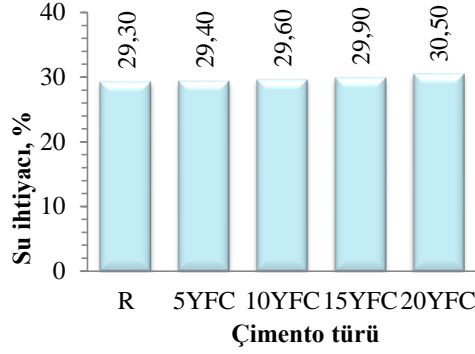
[1: Alçıtaşı ve bünyesindeki nem, 2: Portlandit, 3: Karbonat fazları]

Fark esaslı termal analiz (DTA), zeolitler, karbonatlar, kil mineralleri, sülfatlar gibi minerallerin tanımlanmasında kullanılmakta olup, bu yöntemle çimentoyu oluşturan ana bileşiklerin hidratasyon esnasında ısının etkisiyle gerçekleşen dönüşümleri de belirlenebilmektedir. DTA'da reaktif olmayan referans madde ve reaktif numuneyle arasındaki ısı farkı ($^{\circ}\text{C}$) zamanın fonksiyonu olarak belirlenmekte ve tepkimenin sıcaklığı, kinetiği ve termodinamiğiyle ilgili önemli bilgiler sağlanabilmektedir. Termal gravimetri (TG) ise, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak gaz adsorpsiyonu veya ayrılmasıyla yoğun faz oluşumu veya ağırlık kaybını belirlemede kullanılmaktadır [52]. Portland çimentonun DTA-TGA analizlerine göre çimento üretiminde priz düzenleyici olarak kullanılan alçıtaşından ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ve bünyesindeki nemden kaynaklanan ağırlık kaybı %0,3, küçük miktarda bulunan portlanditin ağırlık kaybı %0,2 ve depolama sırasında çimentonun atmosferik hava ile reaksiyonu sonucunda oluşan amorf yapıda kalsit kaynaklı (CaCO_3) karbonat fazlarının ağırlık kaybı ise %1 olarak belirlenmiştir (Şekil 3-a). Yüksek fırın cürufunun analizine göre ise bünyesindeki nemden kaynaklı ağırlık kaybı %0,2 ve

depolama sırasında atmosferik hava ile reaksiyonu sonucunda oluşan karbonat fazlarının ağırlık kaybı ise %1,2 olarak belirlenmiştir [53]. Toplam ağırlık kayıpları ise PÇ'de %2,9, YFC de ise %1,9 olarak belirlenmiştir (Şekil 3-b).

F. SU İHTİYACI

TS EN 196-3'e göre tespit edilen çimento hamurlarının su ihtiyacı değerleri Şekil 4'te verilmiştir [40].

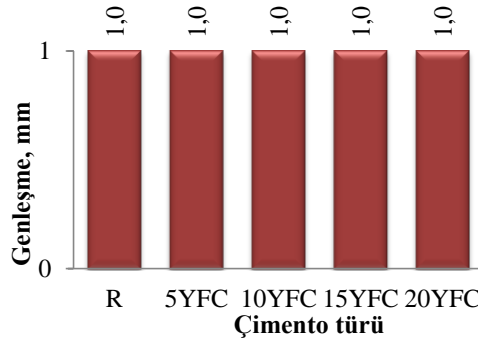


Şekil 4. Çimen hamurlarının su ihtiyaçları.

Su ihtiyacını belirlemek için yapılan deney verilerine 5YFC, 10YFC, 15YFC, 20YFC kodlu çimento hamurlarında referans çimento hamuruna göre su ihtiyaçları sırasıyla %0,3, %1,0, %2,0 ve %4,1 oranında artmıştır (Şekil 4). Deneylerden elde edilen verilere göre YFC ikamesi ile üretilen çimento hamurlarının su ihtiyaçları, YFC ikamesine bağlı olarak nispeten bir artış gösterse de bu durumun önemli bir etki yaratmadığı düşünülmektedir.

G. GENLEŞME

PÇ ve YFC ikameli çimento hamurlarının Le Chatelier deneyi ile TS EN 196-3'e göre belirlenen genleşme değerleri Şekil 5'te verilmiştir [40].

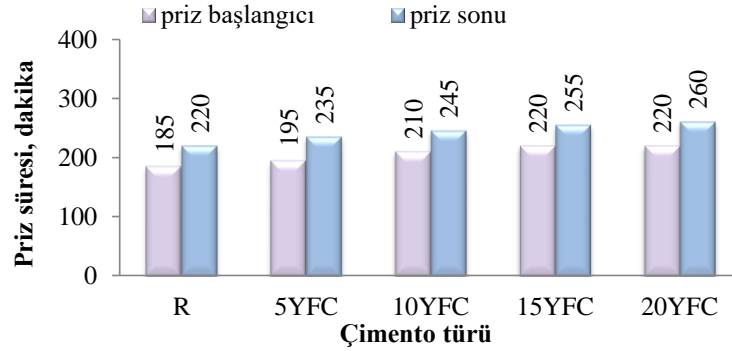


Şekil 5. Çimen hamurlarının genleşme değerleri.

Çimentonun kimyasal yapısındaki MgO ve CaO fazla miktarda bulunduğu zaman genleşmeye yol açmakta ve bu genleşmeler de betonda çeşitli düzeylerde hasarlar oluşturabilmektedir. Elde edilen verilere göre tüm çimento hamurlarında genleşme değerleri 1 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 5). Bu değerlerin, TS EN 197-1'deki 10 mm olarak belirtilen sınır değerinden düşük olduğu için genleşme açısından herhangi bir soruna neden olmayacağı ifade edilebilir [41].

H. PRİZ SÜRELERİ

TS EN 196-3'e göre belirlenen çimento hamurlarının priz başlama ve priz sonu süreleri Şekil 6'da verilmiştir [40].

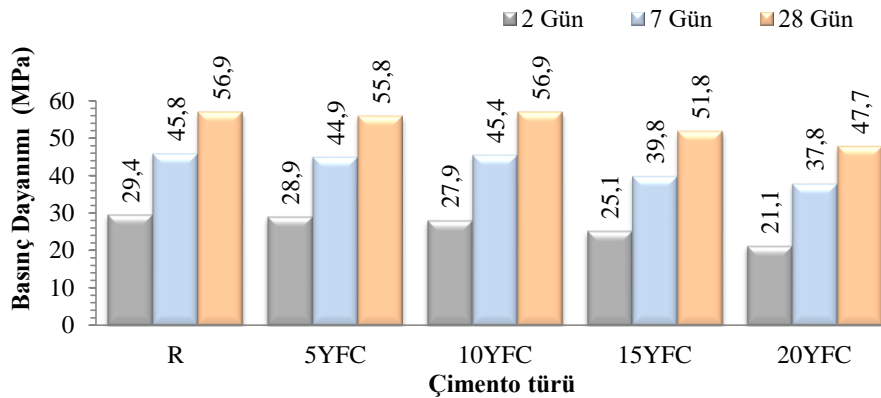


Şekil 6. Çimen hamurlarının priz süreleri.

Şekil 6'da görülen priz başlama süreleri dikkate alındığında en düşük sürenin 185 dakika ile referans, en yüksek sürenin ise 260 dakika ile 20YFC kodlu çimento hamurunda olduğu tespit edilmiştir. PÇ ile hazırlanan çimento hamurlarına göre, priz başlama sürelerinin 5YFC, 10YFC, 15YFC ve 20YFC kodlu çimento hamurlarında sırasıyla %5,4, %13,5, %18,9 ve %18,9 oranında arttığı belirlenmiştir. Priz sonu sürelerinde de yine en düşük sürenin 220 dakikayla referans çimento hamurunda, en yüksek sürenin ise 260 dakika ile 20YFC kodlu çimento hamurunda olduğu izlenmektedir. PÇ ile hazırlanan çimento hamurlarına göre, 5YFC, 10YFC, 15YFC ve 20YFC kodlu çimento hamurlarında sırasıyla %6,8, %11,4, %15,9 ve %18,2 oranında gerçekleşmiştir (Şekil 3). Bu süreler incelendiğinde tüm çimento hamurlarında priz başlama sürelerinin 42,5 MPa dayanım sınıfında olan 60 dakikanın ve 32,5 MPa dayanım sınıfında olan 75 dakikanın üzerinde sağlandığı görülmektedir [41]. Bu durumda tespit edilen Priz sürelerinin standartta belirtilen değerler içerisinde olması, işlenebilirlik açısından herhangi bir sorunla karşılaşmayacağı, dayanımın istenen zaman aralığında sağlanacağı, kalıp sökme sürelerinin ve işlemlerinin sorunsuz olarak gerçekleşebileceği ve betonun dış iklim şartlarından olumsuz etkilenmeyeceği ifade edilebilir.

I. BASINÇ DAYANIMLARI

PÇ ve YFC ikameli çimento harçlarının 2, 7 ve 28. hidrasyon günlerindeki basınç dayanımları Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Çimento harçlarının basınç dayanımları.

Yapılan deney sonuçlarına göre 2. günde en düşük basınç dayanımının 21,1 MPa ile 20YFC kodlu harç örneğinde, en yüksek basınç dayanımının ise 29,4 MPa ile referans harç örneğinde olduğu görülmektedir. Referans harç örneğine göre, basınç dayanımlarının 2. gününde 5YFC, 10YFC, 15YFC ve 20YFC kodlu harç örneklerinde sırasıyla %1,9, %5,3, %14,8 ve %28,3 oranlarında bir dayanım düşüklüğü göstermektedir. 7. günde en düşük basınç dayanımının 37,8 MPa ile 20YFC kodlu harç örneğinde, en yüksek basınç dayanımının ise 45,8 MPa ile referans harç örneğinde olduğu görülmektedir. Referans harç örneklerine göre, basınç dayanımlarının 7. gününde 5YFC, 10YFC, 15YFC ve 20YFC kodlu harç örneklerinde sırasıyla %2,0, %0,9, %13,2 ve %17,6 oranlarında bir dayanım düşüklüğü meydana gelmiştir. 28. günde en düşük basınç dayanımının 47,7 MPa ile 20YFC kodlu harç örneğinde, en yüksek basınç dayanımının ise 56,9 MPa ile referans harç örneğinde olduğu görülmektedir. Referans harç örneklerine göre, basınç dayanımlarının 28. gününde 5YFC, 10YFC, 15YFC ve 20YFC kodlu harç örneklerinde sırasıyla %1,9, %0,0, %9,0 ve %16,1 oranlarında bir dayanım düşüklüğü meydana gelmiştir (Şekil 4).

Genel olarak sonuçlar ele alındığında 28. günde YFC ikameli harç örneklerinin basınç dayanım değerlerindeki gelişim hızlarının, 2. ve 7. gündeki harç örneklerine kıyasla nispeten tüm ikame edilen oranlarda arttığı izlenmektedir. Erken yaşlardaki basınç dayanımının azalması, puzolanik reaksiyonun bir sonucu olarak hidrasyon reaksiyon hızının azalması ve daha az C-S-H açığa çıkması olarak düşünülmektedir. Bunun yanı sıra YFC ikameli harçlarının tümünde TS EN 197-1 de belirtilen 2 günlük norm basınç değeri olan 20 MPa'nın üzerinde ve 28 günlük norm basınç değeri olan 42,5 MPa'nın üzerinde elde edilerek 42,5 R dayanım sınıfını sağladığı görülmektedir [41].

IV. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan analiz ve deneyler sonucundaki bulgular aşağıdaki gibi sıralanabilir. Buna göre;

- YFC'nin fiziksel ve kimyasal açıdan olumlu özellik gösterdiği,
- YFC'nin XRD analiz verilerine göre SiO₂, CaO ve Al₂O₃ oluşan yoğun bir amorf yapıya sahip olduğu ve bu durumun dayanım açısından olumlu olduğu,
- YFC'nin FT-IR sonuçlarının literatürle uyumlu olarak elde edildiğini,
- Termal analiz verilerine göre toplam ağırlık kayıplarının PC'de %2,9, YFC de ise %1,9 olarak elde edildiği,
- YFC ikamesine bağlı olarak su ihtiyaçlarında nispeten bir artış görülse de bunun önemli bir etki yaratmadığı,
- Genleşme değerlerinin tüm çimento hamurlarında TS EN 197-1'de belirtilen 10 mm olan maksimum değerden küçük olduğu ve genleşme açısından herhangi bir sorun oluşturmayacağı,
- Tüm çimento hamurlarının TS EN 196-1'de belirtilen priz başlama sürelerinin 42,5 MPa dayanım sınıfında olan çimentolar için 60 dakikanın ve 32,5 MPa dayanım sınıfında olanlar için belirtilen 75 dakikanın üzerinde sağlandığı,
- YFC ikameli harçlarının tümünde TS EN 197-1 de belirtilen 2 günlük basınç değeri olan 20 MPa'nın üzerinde ve 28 günlük basınç değeri olan 42,5 MPa'nın üzerinde elde edilerek 42,5 R dayanım sınıfını sağladığı görülmektedir. Ayrıca YFC ikameli harç örneklerindeki dayanımların, referans harca göre daha yavaş ancak artarak geliştiği tespit edilmiştir.

Bu bağlamda, Türkiye'de endüstriyel bir atık olarak dikkat çeken YFC'nin çimentoya ikame edilmesiyle hem atıkların değerlendirilmesi söz konusu olacak hem de daha az klinker üretimi gerçekleşeceği için ekonomik ve ekolojik fayda sağlanabileceği söylenebilir. Bunun yanı sıra yapılan bu çalışmada YFC ikameli çimentolar, kimyasal ve fiziksel özellikleri ile standart çimento deneyleri açısından değerlendirmiştir. Daha kapsamlı verilerin elde edilmesi ve hidrasyon reaksiyonlarının daha iyi anlaşılmasının sağlanması için YFC ikameli çimento hamurlarının, DTA-TG, FT-IR, XRD, SEM gibi modern tekniklerle ayrıntılı olarak incelenmesinin faydalı olabileceği düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR: Yazarlar, standart çimento deneylerinin yapılmasında destek sağlayan Bolu Çimento Fabrikasının yöneticileri ve laboratuvar çalışanlarına teşekkür ederler.

V. KAYNAKLAR

- [1] A. R. Kushnir, M. J. Heap, L. Griffiths, F. B. Wadsworth, A. Langella, P. Baud and J. E. Utley, "The fire resistance of high-strength concrete containing natural zeolites," *Cement and Concrete Composites*, vol. 116, no. 103897, 2021.
- [2] Y. Koçak ve M. Savaş, "Zeolit İkameli Betonlara Sodyum Klorürün Etkisi," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 7, s. 3, ss. 2094-2106, 2019.
- [3] H. Gerengi, Y. Koçak, M. Kurtay ve H. Durgun, "Diatomit ve Zeolit İkameli Beton İçerisindeki Donatı Korozyonunun Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) Yöntemi ile İncelenmesi," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 4, s. 2, ss. 661-671, 2016.
- [4] A. Joshaghani, "The effect of trass and fly ash in minimizing alkali-carbonate reaction in concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 150, pp. 583-590, 2017.
- [5] A. G. N. D. Darsanasiri, F. Matalkah, S. Ramli, K. Al-Jalode, A. Balachandra and P. Soroushian, "Ternary alkali aluminosilicate cement based on rice husk ash, slag and coal fly ash," *Journal of Building Engineering*, vol. 19, pp. 36-41, 2018.
- [6] K. Fang, D. Wang, J. Zhao and M. Zhang, "Utilization of ladle furnace slag as cement partial replacement: Influences on the hydration and hardening properties of cement," *Construction and Building Materials*, vol. 299, no. 124265, 2021.
- [7] D. Zhang, Y. Ge, S. Dai Pang and P. Liu, "The effect of fly ash content on flexural performance and fiber failure mechanism of lightweight deflection-hardening cementitious composites," *Construction and Building Materials*, vol. 302, no. 124349, 2021.
- [8] M. Khan, M. Cao, A. Hussain and S.H. Chu, "Effect of silica-fume content on performance of CaCO₃ whisker and basalt fiber at matrix interface in cement-based composites," *Construction and Building Materials*, vol. 300, no. 124046, 2021.
- [9] A. Subaşı and M. Emiroğlu, "Effect of metakaolin substitution on physical, mechanical and hydration process of White Portland cement," *Construction and Building Materials*, vol. 95, pp. 257-268, 2015.
- [10] Z. Zhang, S. Liu, F. Yang, Y. Weng and S. Qian, "Sustainable high strength, high ductility engineered cementitious composites (ECC) with substitution of cement by rice husk ash," *Journal of Cleaner Production*, vol. 317, no. 128379, 2021.
- [11] A. Erfanimanesh and M.K. Sharbatdar, "Mechanical and microstructural characteristics of geopolymer paste, mortar, and concrete containing local zeolite and slag activated by sodium carbonate," *Journal of Building Engineering*, vol. 32, no. 101781, 2020.
- [12] Y. Li, "Effect of post-fire curing and silica fume on permeability of ultra-high performance concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 290, no. 123175, 2021.
- [13] L. Hu, Z. He and S. Zhang, "Sustainable use of rice husk ash in cement-based materials: Environmental evaluation and performance improvement," *Journal of Cleaner Production*, vol. 264, no. 121744, 2020.

- [14] O. Keleştemur and B. Demirel, "Effect of metakaolin on the corrosion resistance of structural lightweight concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 81, pp. 172-178, 2015.
- [15] P.R. de Matos, R. Junckes, E. Graeff and L.R. Prudencio Jr, "Effectiveness of fly ash in reducing the hydration heat release of mass concrete," *Journal of Building Engineering*, vol. 28, no. 101063, 2020.
- [16] C. Karakurt and İ.B. Topçu, "Effect of blended cements produced with natural zeolite and industrial by-products on alkali-silica reaction and sulfate resistance of concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 4, pp. 1789-1795, 2011.
- [17] A. Hasanbeigi, L. Price and E. Lin, "Emerging energy-efficiency and CO2 emission-reduction technologies for cement and concrete production: A technical review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 8, pp. 6220-6238, 2012.
- [18] E. Worrell, N. Martin and L. Price, "Potentials for energy efficiency improvement in the US cement industry," *Energy*, vol. 25, no. 12, pp.1189-1214, 2000.
- [19] K. Fang, D. Wang, J. Zhao and M. Zhang "Utilization of ladle furnace slag as cement partial replacement: Influences on the hydration and hardening properties of cement," *Construction and Building Materials*, vol. 299, no. 124265, 2021.
- [20] P. Mohsen Zadeh, S.F. Saghravani and G. Asadollahfardi, "Mechanical and durability properties of concrete containing zeolite mixed with meta kaolin and micro-nano bubbles of water," *Structural Concrete*, vol. 20, no. 2, pp.786-797 2019.
- [21] M. Najimi, J. Sobhani, B. Ahmadi and M. Shekarchi, "An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan," *Construction and building materials*, vol. 35, pp.1023-1033 2012.
- [22] Ş. Erdoğan ve Ş. Kurbetci, "Betonun Performansına Sağladıkları Etkinlik Açısından Kimyasal ve Mineral Katkı Maddeleri," *Türkiye Mühendislik Haberleri*, c. 426, s. 4, ss. 115-120, 2003.
- [23] F. F. Uysal ve S. Bahar, "Cüruf Çeşitleri ve Kullanım Alanları," *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 19, s. 1, ss.37-52, 2018.
- [24] M. Tokyay ve K. Erdoğan, "Cüruflar ve cürüflü çimentolar," TÇMB/AR-GE/Y97.2, Ankara, 1997.
- [25] H. Yalçın ve M. Gürü, "Çimento ve Beton," Ankara, Türkiye: Palme Yayıncılık, 2006.
- [26] K. Abdelli, M. Tahlaoui, R. Belarbi and M. N. Oudjit, "Influence of the pozzolanic reactivity of the Blast Furnace Slag (BFS) and metakaolin on mortars," *Energy Procedia*, vol. 139, pp. 224-229, 2017.
- [27] M. S. Amin, S. M. A. El-Gamal, S. A. Abo-El-Enein, F. I. El-Hosiny and M. Ramadan, "Physico-chemical characteristics of blended cement pastes containing electric arc furnace slag with and without silica fume," *HBRC journal*, vol. 11, no. 3, pp. 321-327, 2015.
- [28] M. M. López, Y. Pineda and O. Gutiérrez, "Evaluation of durability and mechanical properties of the cement mortar added with slag blast furnace," *Procedia Materials Science*, vol. 9, pp. 367-376, 2015.
- [29] J. Zhu, Q. Zhong, G. Chen and D. Li, "Effect of particlesize of blast furnace slag on properties of portland cement," *Procedia Engineering*, vol. 27, pp. 231-236, 2012.

- [30] M. Emiroğlu, Y. Koçak ve S. Subaşı, “Yüksek Fırın Cürufunun Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi,” In *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, vol. 1, pp. 113-117, 2011.
- [31] S. Samad and A. Shah, “Role of binary cement including Supplementary Cementitious Material (SCM), in production of environmentally sustainable concrete: A critical review,” *International journal of Sustainable built environment*, vol. 6, no. 2, pp. 663-674, 2017.
- [32] D. N. Richardson, “Strength and Durability Characteristics of a 70% Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) Concrete Mix,” Organizational Results Research Report, Missouri Department of Transportation (MoDOT), 2006,
- [33] M. Á. Sanjuán, E. Estévez, C. Argiz and D. del Barrio, “Effect of curing time on granulated blast-furnace slag cement mortars carbonation,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 90, pp. 257-265, 2018.
- [34] C. E. Ekinci, “Elazığ Ferrokrom Fabrikası Cürufunun Çimentoda Puzolanik Katkı Maddesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması,” *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*, Ankara İMO, pp. 243-253, 1993.
- [35] A. C. de Oliveira Dieguez, S.L.N. Oliveira, G.S. Araújo and A. G. de Sousa Galdino, “Comparison of Kambara reactor slag with blast furnace slag for Portland cement industry applications,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 3, pp. 2786-2795, 2019.
- [36] M.M. Sadawy and M.T. Nooman, “Influence of nano-blast furnace slag on microstructure, mechanical and corrosion characteristics of concrete,” *Materials Chemistry and Physics*, vol. 251, no. 123092, 2020.
- [37] A. Hosan and F.U.A. Shaikh, “Compressive strength development and durability properties of high volume slag and slag-fly ash blended concretes containing nano-CaCO₃,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 10, pp. 1310-1322, 2021.
- [38] X.Y. Wang and H.S. Lee, “Effect of global warming on the proportional design of low CO₂ slag-blended concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 225, pp. 1140-1151, 2019.
- [39] *Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini*, Türk Standartlar Enstitüsü, TS EN 196-1, 2016.
- [40] *Çimento deney yöntemleri - Bölüm 3: Priz süreleri ve genleşme tayini*, Türk Standartlar Enstitüsü, TS EN 196-3, 2017.
- [41] *Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri*, Türk Standartlar Enstitüsü, TS EN 197-1, 2012.
- [42] M., Tokyay ve K. Erdoğan, “Cüruflar ve cürüflü çimentolar, Araştırmaların Gözden Geçirilmesi ve Durum Değerlendirmesi Raporu,” TÇMB/AR-GE/Y 97.2, ANKARA, 2011.
- [43] Y. C. Choi and B. Park, “Enhanced autogenous healing of ground granulated blast furnace slag blended cements and mortars,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 4, pp. 3443-3452, 2019.
- [44] X. Huang, M. Jiang, X. Zhao and C. Tang, “Mechanical properties and hydration mechanisms of high-strength fluorogypsum-blast furnace slag-based hydraulic cementitious binder,” *Construction and Building Materials*, vol. 127, pp. 137-143, 2016.

- [45] H. N. Yoon, J. Seo, S. Kim, H. K. Lee and S. Park, "Hydration of calcium sulfoaluminate cement blended with blast-furnace slag," *Construction and Building Materials*, vol. 268, no. 121214, 2021.
- [46] M. Yanık, "Farklı incelikte öğütülmüş obsidyen katkılı çimentoların puzolanik özelliklerinin tayini," Yüksek lisans tezi, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Rize, Türkiye, 2019.
- [47] F. Puertas, A. Fernandez-Jimenez and M.T. Blanco-Varela, "Pore solution in alkali-activated slag cement pastes. relation to the composition and structure of calcium silicate hydrate," *Cement And Concrete Research*, vol. 34, no.1, pp. 139-148, 2004.
- [48] C. E. M. Gomes and O. P. Ferreira, "Analyses of microstructural properties of va/veova copolymer modified cement pastes," *Polimeros*, vol. 15, no. 3, pp. 193–198, 2005.
- [49] M. J. Varas, M. A. De Buergo and R. Fort, "Natural cement as the precursor of portland cement: Methodology for its identification," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 11, pp. 2055–2065, 2005.
- [50] F. I. Adeniyi and M.B. Ogundiran, "Synthesis of geopolymer binders and mortars from Ijero-Ekiti calcined clay, blast furnace slag and river sand," *Earthline Journal of Chemical Sciences*, vol. 4, no. 1, pp. 15-34, 2020.
- [51] A. R. Sakulich, S. Miller and M.W. Barsoum, "Chemical and microstructural characterization of 20-month-old alkali-activated slag cements," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 93, pp. 1741–1748, 2010.
- [52] M.Ç. Karakaya, *Kil minerallerinin özellikleri ve tanımlama yöntemleri*, Ankara, Türkiye: Bizim Büro Basımevi, 2006.
- [53] R. Gabrovšek, T. Vuk and V. Kaučič, "Evaluation of the hydration of Portland cement containing various carbonates by means of thermal analysis," *Acta Chimica Slovenica*, vol. 53, pp. 159-165, 2006.