



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



**Çimento hamur ve harç özelliklerine öğütülmüş yüksek fırın cürufu ile sönmüş kirecin birlikte etkisinin araştırılması**

*The investigation of combined effect of GBFS and slaked lime on cement paste and mortar properties*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Hüseyin Yılmaz ARUNTAŞ<sup>1</sup>, Melih ŞAHİNÖZ<sup>2</sup>, Mustafa DAYI<sup>3</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-6417-629X

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-4159-1535

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0002-9823-4563

**To cite to this article:** Aruntaş H. Y., Şahinöz M. ve Dayı M., “Çimento hamur ve harç özelliklerine öğütülmüş yüksek fırın cürufu ile sönmüş kirecin birlikte etkisinin araştırılması”, *Journal of Polytechnic*, 27(4): 1257-1268, (2024).

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz:** Aruntaş H. Y., Şahinöz M. ve Dayı M., “Çimento hamur ve harç özelliklerine öğütülmüş yüksek fırın cürufu ile sönmüş kirecin birlikte etkisinin araştırılması”, *Politeknik Dergisi*, 27(4): 1257-1268, (2024).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.1268344

# Çimento Hamur ve Harç Özelliklerine Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu ile Sönmüş Kirecin Birlikte Etkisinin Araştırılması

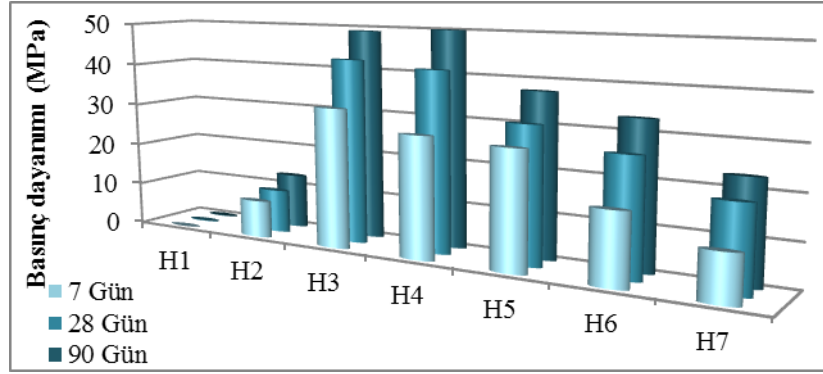
## The Investigation of Combined Effect of GBFS and Slaked Lime on Cement Paste and Mortar Properties

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ YFC ve sönmüş kireç çimentolu harçların karışım suyu miktarını artırmıştır. / GBFS and slaked lime increased the mixing water amount of cement mortars.
- ❖ YFC ve sönmüş kireç çimentolu harçların priz sonu sürelerini uzatmıştır. / GBFS and slaked lime increased the final setting time of cement mortars.
- ❖ Harçlarda yüksek miktarda YFC ve sönmüş kirecin birlikte kullanımı mekanik özellikleri azaltmıştır. / The use combined of high amount of GBFS and slaked lime in the mortars decreased mechanical properties.

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

YFC ve sönmüş kireç çimentolu harçların mekanik özelliklerini oldukça değiştirmektedir. / GBFS and slaked lime fairly change the mechanical properties of cement mortars.



Şekil. Harç numunelerin basınç dayanımı değerleri / **Figure.** Compressive strength values of mortar specimens

### Amaç (Aim)

Yüksek miktarda YFC ve sönmüş kireç kullanımının çimentolu harçların özelliklerine etkisini belirlemektir. / The aim of this study is to determine the effect of using high amount of GBFS and slaked lime on the properties of cementitious mortars.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Çimento hamur ve harç numunelerine farklı oranlarda sönmüş kireç ve YFC birlikte katılmıştır. / Slaked lime and GBFS were added together in different ratios to the cement paste and mortar specimens.

### Özgünlük (Originality)

Literatürden farklı olarak YFC ve sönmüş kireç yüksek miktarda ve aynı oranda hamur ve harçlara katılmıştır. / Differently from the literature, GBFS and slaked lime were added to the paste and mortar in high amounts and at the same ratio.

### Bulgular (Findings)

YFC ve sönmüş kireç çimentolu hamur ve harçların özelliklerini oldukça değiştirmektedir. / GBFS and slaked lime pretty change the properties of cement pastes and mortars.

### Sonuç (Conclusion)

Deney sonuçlarına göre YFC ve sönmüş kireç çimentolu hamur ve harçlarda birlikte kullanılmalıdır. / According to the experimental results, GBFS and slaked lime can be used together in cement pastes and mortars.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Çimento Hamur ve Harç Özelliklerine Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu ile Sönmüş Kirecin Birlikte Etkisinin Araştırılması

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Hüseyin Yılmaz ARUNTAŞ<sup>1</sup>, Melih ŞAHİNÖZ<sup>2\*</sup>, Mustafa DAYI<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Teknoloji Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi, Türkiye

<sup>3</sup>Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Düzce Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 20.03.2023 ; Kabul/Accepted : 19.04.2023 ; Erken Görünüm/Early View : 04.06.2023)

## ÖZ

Bu deneysel çalışmada, çimento bazlı hamur ve harç karışımlarına yüksek oranda sönmüş hava kireci (SK) ve öğütülmüş yüksek fırın cürufunun (YFC) birlikte kullanımı ile üretilen numunelerin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. SK ve YFC ağırlıkça %10SK+%10YFC, %20SK+%20YFC ve %30SK+%30YFC oranlarında Portland çimentosu ile yer değiştirilerek hamur ve harç karışımları hazırlanmıştır. Üretilen harç karışımlarında işlenebilirlik sabit alınmıştır. Üretilen harç karışımlarından elde edilen fiziksel ve mekanik deney sonuçları kendi aralarında ve kontrol numuneleri ile karşılaştırılmıştır. Hamur numunelerde kıvam suyu, priz süreleri ve hacim genleşmesi deneyleri, harç numunelerde ise birim hacim ağırlık, basınç dayanımı ve eğilmede çekme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları, SK ve YFC'nin çimentoya ikame edilmesinin hamur kıvam suyu miktarını artırdığı, priz başı sürelerini azalttığı ancak priz sonu sürelerini artırdığı, birim hacim ağırlığı ve hacim genleşmesini ise azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca %30'a kadar SK ve YFC'nin birlikte ikame edilmesi, numunelerin 7, 28 ve 90 yaş gün eğilme ve basınç dayanımlarını azaltmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Yüksek fırın cürufu, kireç, çimento hamuru, çimento harcı, harç özellikleri.

## The Investigation of Combined Effect of GBFS and Slaked Lime on Cement Paste and Mortar Properties

### ABSTRACT

In this experimental study, some physical and mechanical properties of the specimens produced by using a high ratio of slaked lime (SL) and ground blast-furnace slag (GBFS) in cement-based paste and mortar mixtures were investigated. Mixtures of pastes and mortars were prepared by replacing SK and GBFS with Portland cement at 10% SL+10% GBFS, 20% SL+20% GBFS, and 30% SL+30% GBFS ratios by weight. The workability of the produced mortar mixtures was kept fixed. The physical and mechanical experimental results obtained from the produced mortar mixtures were compared among themselves and with the control specimens. Consistency water, setting times, and volume expansion experiments were performed on paste specimens, and unit volume weight, compressive strength, and flexural strength experiments were performed on mortar specimens. Obtained experiment results showed that substituting SL and GBFS together with cement increased the amount of paste consistency water, decreased initial setting times, but increased final setting times, and decreased the unit volume weight and volume expansion. In addition, up to 30% replacement of SL and GBFS together reduced the 7, 28, and 90 days flexural and compressive strengths of the specimens.

**Keywords:** Blast furnace slag, slaked lime, cement paste, cement mortar, mortar properties.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bilindiği gibi harç; ince agrega, çimento, kireç ve alçı gibi bağlayıcı maddeler ile suyun karıştırılması ile elde edilen bir yapı malzemesidir [1]. Yapılarda harcın görevi; genel olarak duvarda kullanılan tuğla veya blokları bağlamak, yükü dağıtmak, deformasyon etkisini azaltmak ve sızdırmazlık sağlamaktır. Bunun yanı sıra harç bir binada nem ve hava geçişini de engellemektedir. Ayrıca harçlar; sıva ve derz dolgu

uygulamalarında da kullanılmaktadır [2, 3]. Harç, duvar hacminin %7'sinden daha azını oluştursa da yapının performansında çok önemli bir rol oynar. Harç malzemesinin karakteristik özellikleri, esas olarak harcı oluşturan bağlayıcı maddelerin niteliğine bağlıdır [3].

Harç karışımlarında genellikle bağlayıcı olarak sönmüş kireç (SK) ve Portland çimentosu (PÇ) kullanılmaktadır. Tarihte ilk harç malzemesi olarak kilin kullanıldığı görülmektedir [4]. Kireç harçları, 20. yüzyılın başlarına kadar harç üretiminde bağlayıcı olarak kullanılan en yaygın inşaat malzemelerinden biri olmuştur. Ancak bu durumun PÇ'nin keşfedilmesi ile birlikte tamamen değiştiği görülmektedir. PÇ'nin kirece göre; mukavemetinin, elastisite modülünün, suya karşı

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : melih.sahinoz@gazi.edu.tr

dayanıklılığının, sertleşme hızı ve hacim sabitliğinin çok daha iyi olması sebebiyle kireç esaslı harçlara kıyasla kullanımı her geçen gün artmıştır [5, 6]. Çimento, beton üretiminde geleneksel bir bağlayıcı olarak kullanılan enerji yoğun bir malzemedir. Beton ise en yaygın kullanılan yapı malzemelerinden biridir. Dünya genelinde 2000 yılında 1.57 milyar ton çimento üretilmiş olup kg başına 0.87 kg CO<sub>2</sub> salınımı gerçekleştiği rapor edilmiştir. Hem sanayileşmiş hem de gelişmekte olan ülkelerde çimento üretimi her geçen gün arttığı görülmektedir. Dünyada 2019 yılında ~4.1 milyar ton çimento üretimi gerçekleşirken, Türkiye’de 2019 yılında ise çimento üretimi ~57.0 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Küresel ölçekte CO<sub>2</sub> salınımının yaklaşık %7’sinin çimento üretiminden kaynaklandığı tahmin edilmektedir [7-9]. Bu nedenle araştırmacılar, özellikle harç ve beton üretiminde sera gazı salınımı azaltmak için çimento yerine farklı hammaddelerin kullanılmasına odaklanmışlardır [7, 8, 10]. Bu nedenle çimento yerine hammadde olarak uçucu kül (UK), yüksek fırın cürufu (YFC), silis dumanı (SD), metakaolin (MK), volkanik toprak, tuğla tozu gibi doğal ve yapay puzolanik katkıları ön plana çıkmaktadır. Puzolan kısaca reaktif silis ve alümin içeren ve serbest kireç ile reaksiyona girerek yeni bağlayıcı bileşikler oluşturan malzemelerdir [7, 11, 12].

YFC, çelik üretiminde yüksek fırınlarda demir cevherinin işlenmesi sırasında oluşan atık bir üründür. 2020 yılı verilerine göre Dünya çapında yaklaşık olarak 400 milyon ton cüruf üretildiği rapor edilmiştir [13]. Ayrıca Türkiye’de yıllık 50 milyon ton çelik işlenmekte olup bu işlenen toplam çelik miktarının %15~20’si kadar cüruf ortaya çıkmaktadır [14]. Çimento ve betonda YFC katkısının kullanımı ile işlenebilirlik ve pompalanabilirliğin geliştiği, mukavemetin arttığı, hidrotasyon ısı ve geçirgenliğin azaldığı belirlenmiştir [15]. Hem dünyada hem de Türkiye’de çimentolu hamur ve harç karışımlarında kireç ve farklı puzolanik katkıların kullanıldığı çeşitli çalışmalar bulunmaktadır.

Prošek vd. yaptıkları çalışmada, PÇ yerine %50 öğütülmüş beton ve %5, %10 ve %15 oranlarında kireç, UK ve YFC kullanılarak hamur numuneleri hazırlamışlardır. Sonuç olarak, kontrol hamuruna göre %50 öğütülmüş beton ve %5 UK içeren hamurlarda; %44 büzülmenin, %53 basınç dayanımının ve %26 çekme dayanımının azaldığı tespit edilmiştir. Benzer sonuçların YFC içeren hamurlardan da elde edildiğini açıklanmışlardır. Ayrıca çalışmada, çimentolu kompozit üretiminde yüksek bir oranda öğütülerek geri dönüştürülmüş betonun, YFC ve UK ile birlikte kullanılması önerilmektedir [16]. Dave vd. çalışmalarında, farklı oranlarda PÇ, UK ve SD kullanılarak hazırlanan harç karışımlarına sırasıyla %5, %7.5, %10 ve %15’e kadar artan oranlarda YFC ve kireç ikame ederek harç numuneleri üretmişlerdir. Çalışmada, kireç içeren harçların YFC içeren harçlara göre priz başının daha kısa, priz sonunun daha uzun, genleşme miktarı ve yoğunluğun ise daha az olduğu ifade edilmiştir. Bunun yanı sıra tüm kireçli harç

numunelerine ait 3, 7, 28 ve 90 gün yaş basınç dayanımlarının, YFC’li numunelerin basınç dayanımlarından daha düşük olduğu belirlenmiştir. Tüm harç karışımlarının 7 günlük numunelerinin basınç dayanımı değerleri 20~30 MPa arasında olduğu için üretilen harçların farklı uygulamalarda kullanılabilmesi ifade edilmiştir [17]. Gleize vd. yaptıkları çalışmada, çimento:kireç:kum (1:1:6) oranlarında kontrol harcı ile çimento yerine %10 SD katılmış olan 2 farklı harç karışımı hazırlamışlardır. Çalışmada, harç numunelerinde ileri yaşlarda yüksek oranda s/ç oranında SD ile sönmüş kirecin birlikte daha fazla puzolanik reaksiyon gösterdiği belirtilmiştir. Buna ek olarak, kontrol harcına göre çimento+SD+kireç kullanılan harçların 7 günlük basınç dayanımlarının daha düşük, 28 günlük basınç dayanımlarının ise daha yüksek olduğu tespit edilmiştir [2]. Carrajola vd. araştırmalarında, taze haldeki çimento esaslı termal sıva numunelerini, çimento yerine %20, %35, %40 ve %50 oranlarında UK ve sabit oranda %10 hava kireci kullanarak hazırlamışlardır. Ayrıca çalışmada, sıva numuneleri üretiminde genleşen kil agregası yerine %40, %60 ve %100 genleşen mantar agregası da kullanılmıştır. Sonuç olarak, benzer agregaya ile hazırlanan harçlarda hava kireci ve UK katkısının, harçların yoğunluk ve s/b oranını artırırken işlenebilirliğini azalttığı bildirilmiştir [18]. Doven vd. yaptıkları çalışmada, yüksek hacimde UK katkısının kullanıldığı çimentolu hamurlarda, farklı tipte UK ve farklı oranlarda çimento, SD ve kireç kullanımının hamurların fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, %75, %80 ve %100 UK ve %15, %20 çimento ile %5 SD ve %5 kireç katılarak hamur numuneleri üretilmiştir. Hamur karışımlarında Seyitömer ve Soma termik santrallerinden temin edilen iki farklı UK kullanılmıştır. Sonuçta, Soma UK ve kireç kullanılan hamurların erken yaştaki basınç dayanımları artarken, düşük slump değerlerinde üretilen kireçli hamur karışımlarında en düşük eğilme dayanımı değerlerinin elde edildiği belirtilmiştir [19].

Sepulcre-Aguilar vd. çalışmalarında, tarihi yapılarda kullanmak için üretilen MK, PÇ ve sepiyolit katkılı harçların faz oluşumlarını incelemişlerdir. Çalışmada, farklı oranlarda SK, MK, beyaz Portland çimentosu (BPC) ve doğal hidrolik kireç içeren harç karışımları üretilmiştir. Deney sonuçları, sepiyolit katkısının MK-kireç esaslı harçların dayanımını yaklaşık %66 oranında düşürdüğü tespit edilmiştir. Ayrıca, kireç:BPC (1:1) harç karışımları ile doğal hidrolik kireç içeren harç karışımlarının benzer dayanım gelişimi gösterdiği belirtilmiştir. Sonuç olarak bu harcın tarihi yapılarda alternatif onarım harcı olarak kullanılabilmesi önerilmiştir [20]. Manita ve Triantafillou yaptıkları araştırmada, tasarım malzemelerinin tarihi yapılarda kullanılan onarım harçlarının fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, harçlarda bağlayıcı malzeme olarak farklı oranlarda SK, puzolan ve çimento ile ince agregaya olarak farklı oranlarda kum ve tuğla kırığı kullanılmıştır. Harç

numuneleri arasında en yüksek basınç dayanımı çimentolu harç karışımlarında elde edilmiştir. Yüksek miktarda puzolan içeren harçlarda basınç dayanımı artışının fazla olduğu görülürken, tuğla kırığı ile hazırlanan harç karışımlarında ise en fazla su emme miktarının tespit edildiği belirtilmiştir [21]. Cerulli vd. yaptıkları çalışmada; PÇ, SK ve YFC ile üretilen sıvaların bazı fiziksel ve mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Çalışmada; YFC-kireç esaslı harç, çimento-kireç esaslı harç, çimentolu harç ve kireçli harç olmak üzere 5 farklı harç karışımı üretilmiştir. Deney sonuçları, 7 ve 28 günlük YFC-kireç esaslı harçlarda en yüksek basınç dayanımının elde edildiğini göstermektedir. Ayrıca YFC içeren harçların durabilite özelliklerinin diğer harçlara kıyasla daha yüksek olduğu ifade edilmiştir [22]. Shi yaptığı çalışmada, kireç-puzolan katkılı çimentolu hamurların özelliklerini ve bu hamurların hidrotasyonuna etki eden bazı faktörleri incelemiştir. Çalışmada, farklı oranlarda volkanik kül, SK ve çimento kullanılarak hamur karışımları hazırlanmıştır. Kireç-puzolan katkılı çimentolu numunelerde, kirecin %0~20 oranına kadar kullanılması durumunda su ihtiyacının artmadığı, ancak %20'den fazla kireç katılmasının hamurun su ihtiyacını arttırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca, hamur karışımları arasında en yüksek basınç dayanımı %20 SK içeren numunelerde belirlenmiştir [23].

Nayaka vd. yaptıkları çalışmada, çimento-kireç esaslı duvar harçlarında çimento yerine yüksek hacimde palm yağı klinker tozunun kullanımını araştırmışlardır. Çalışmada, çimento-kireç esaslı harç karışımlarında çimento yerine %80 oranına kadar palm yağı klinker tozu kullanılarak harç numuneleri üretilmiştir. Harç karışımlarında %50'ye kadar palm yağı klinker tozunun katılması ile ~12 MPa'lık basınç dayanımı elde edildiği ve bu dayanım değerinin ASTM C270 standardına uygun olduğu belirtilmiştir. Üretilen harçlar kür açısından incelendiğinde, su kütürünün hava kütürüne göre daha olumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Buna ek olarak, geleneksel harçlara kıyasla harç karışımlarında %40 oranında palm yağı klinker tozu kullanılarak karbon ayak izinin ~%32 oranında azaltılabileceği ve %20 oranında maliyet ve potansiyel enerji tasarrufu sağlanabileceği ifade edilmiştir [24]. Tampus vd. yaptıkları çalışmada, çimento-kireç esaslı harç üretiminde odun talaşı külünün kullanımını incelemiştir. Çalışmada, harç karışımları SK yerine %25, %50, %75 ve %100 oranlarında odun talaşı külü katılarak üretilmiştir. Sonuçta, harç karışımlarında odun talaşı külü miktarı arttıkça hava içeriğinin azaldığı, priz başlangıç ve sonu sürelerinin kısaldığı, 7 ve 28 günlük numunelerde basınç dayanımının göreceli olarak arttığı tespit edilmiştir [25]. Veiga vd. puzolan-kireç esaslı harçların tarihi kale duvarlarına uygulanmasını deneysel olarak incelemiştir. Araştırmada, hava kireci-doğal kireç harcı, hava kireci-beyaz çimento harcı, hava kireci-doğal puzolan harcı, hava kireci-silis dumanı harcı ve hava kireci-metakaolin harcı olmak üzere farklı numuneler hazırlanmıştır. Harç karışımları arasında, en

yüksek basınç dayanımı ve elastisite modülü hava kireci-beyaz çimento numunelerinde tespit edilmiştir. Ayrıca, taze ve sertleşmiş harçlar arasında en düşük yoğunluk hava kireci-silis dumanı esaslı harçlarda elde edilmiştir [26].

Yapılan deneysel araştırmalarda, değişik oranlarda puzolanik malzeme ve SK içeren hamur ve harçlarla ilgili bazı araştırmalara rastlanılmaktadır. Bu araştırmalarda genellikle; atık malzeme kullanılarak çimento kullanımının azaltılması, çevre dostu ve düşük maliyetli harç üretimi ile harçların fiziksel ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesine odaklanılmıştır. Çimento hamur ve harçları ile ilgili önceki araştırmamızda, karışımda çimento yerine %80 oranına kadar yalnız SK ikame yöntemi ile kullanılmış ve sönmüş kirecin çimento hamur ve harç özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Araştırmada elde edilen sonuçlara göre; çimento hamur ve harç karışımlarında SK miktarı arttıkça hamurların kıvam suyu miktarının arttığı, priz sürelerinin uzadığı ve genleşme miktarının azaldığı tespit edilmiştir. Diğer taraftan sertleşmiş harç numunelerinde karışım suyu değerleri artarken, birim ağırlık, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir [27].

Bu deneysel çalışmada ise, çimento hamur ve harç karışımlarında çimento yerine farklı kombinasyonlarda SK ve YFC'nin birlikte kullanılmasıyla elde edilen hamur ve harçların fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi hedeflenmiş, dolayısıyla çimento, SK ve YFC'nin hamur ve harç özelliklerine birlikte etkisi incelenmiştir. Aynı zamanda çalışmada, kontrol çimentosu olarak CEM I'in yanı sıra CEM III çimentosu da kullanılmıştır. CEM III'ün kontrol çimentosu olarak kullanılmasının sebebi, bu çimentonun YFC katkılı bir çimento olması dolayısıyla deneysel çalışmada YFC ikameli hamur ve harçlar ile kıyaslayarak sonuçların değerlendirilmesidir.

## 2. DENEYSEL PROGRAM (EXPERIMENTAL PROGRAM)

### 2.1. Malzemeler (Materials)

Çalışmada, kontrol çimentoları olarak Bolu Çimento Fabrikası üretimi CEM III/A 42.5R yüksek fırın cürufu çimento ile Limak Ankara Çimento Fabrikası üretimi CEM I 42.5R Portland çimentosu (PÇ) kullanılmıştır. Her iki çimento torbalar halinde laboratuvara getirilmiştir. Deneylerde, hem endüstriyel atık hem de yapay bir puzolan olan YFC kullanılmış olup bu atık, Ereğli Demir-Çelik fabrikasının yan ürünü olup Bolu Çimento fabrikasından öğütülmüş halde hava almayan plastik kapalı bir kap içerisinde temin edilmiştir. Ayrıca hamur ve harç numuneleri karışımında, TS EN 459-1 [28]'e göre üretilen Paksan Kireç ürünü CL 90S sönmüş yüksek kalsiyumlu torba sönmüş kireç (SK) kullanılmıştır. Hamur ve harç üretiminde kullanılan CEM I, CEM III, YFC ve SK (CL 90S) malzemelerine ait fiziksel ve kimyasal özellikler Çizelge 1'de verilmiştir. Bütün harç numunelerinde ince agrega

olarak CEN standart kumu kullanılmıştır [29]. Hamur ve harç numuneleri Ankara şehir şebeke suyu kullanılarak hazırlanmıştır.

kıvam suyu ve priz süresi deneyleri Vicat aleti, hacim sabitliği deneyi ise Le Chatelier aleti kullanılarak tespit edilmiştir. Elde edilen deney sonuçları üç deneyin

**Çizelge 1.** CEM I, CEM III, SK ve YFC'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri (Physical and chemical properties of CEM I, CEM III, SL and GBFS)

| Oksit (%)                                    | CEM I | CEM III | SK     | YFC   |
|--|-------|---------|--------|-------|
| CaO  | 64.14 | 55.86   | 68.61  | 35.61 |
| SiO <sub>2</sub>                             | 18.46 | 26.36   | -      | 39.14 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>               | 4.36  | 7.31    | -      | 13.34 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>               | 2.92  | 2.33    | -      | 1.52  |
| SO <sub>3</sub>                              | 2.83  | 2.13    | -      | 0.19  |
| MgO  | 2.15  | 2.58    | -      | 5.85  |
| Na <sub>2</sub> O                            | 0.16  | 0.94    | -      | 0.76  |
| K <sub>2</sub> O                             | 0.69  | 0.47    | -      | 0.33  |
| TiO <sub>2</sub>                             | -     | -       | -      | 1.44  |
| Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>               | -     | -       | -      | 0.84  |
| Cl   | 0.01  | 0.015   | -      | 0.017 |
| Çözünmeyen kalıntı                           | 0.40  | -       | -      | -     |
| Kızdırma kaybı                               | 3.17  | -       | 3.17   | 0.01  |
| Ca(OH) <sub>2</sub>                          | -     | -       | 90.56  | -     |
| Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )                | 3.13  | 3.02    | 2.2    | 2.89  |
| Özgül yüzey, Blaine (cm <sup>2</sup> /g)     | 3266  | 4260    | -      | 5011  |
| Özgül yüzey, Bet metodu (cm <sup>2</sup> /g) | -     | -       | 403000 | -     |
| 90 µm elek üstü (%)                          | -     | -       | 0.95   | -     |
| 200 µm elek üstü (%)                         | -     | -       | 0.12   | -     |
| 630 µm elek üstü (%)                         | -     | -       | 0.0    | -     |

## 2.2. Yöntem (Method)

Araştırmada kullanılan YFC, öğütülmüş halde laboratuvara getirildiğinden herhangi bir işleme tabi tutulmadan hamur ve harç karışımlarına katılmıştır. Çalışmada, PÇ yerine ikame metodu kullanılarak SK ve SK+YFC farklı oranlarda hamur ve harç karışımlarına katılmıştır. Harç üretiminde kullanılan CEN standart kumuna ait tane dağılımı Çizelge 2'de verilmiştir.

**Çizelge 2.** CEN standart kumu tane dağılımı [29] (CEN standard sand grain distribution [29])

| Kare göz açıklığı (mm) | Kümülatif elekte kalan (%) |
|------------------------|----------------------------|
| 2.00                   | 0                          |
| 1.60                   | 7±5                        |
| 1.00                   | 33±5                       |
| 0.50                   | 67±5                       |
| 0.16                   | 87±5                       |
| 0.08                   | 99±1                       |

Çalışmada; 4 adet kontrol hamur ve harcı (H1, H2, H3, H4) ile SK+YFC'li 3 adet (H5, H6, H7) olmak üzere toplamda 7 adet hamur ve harç deney grubu hazırlanmıştır. Harç karışımlarında bağlayıcı/agrega (b/a) oranı 1/3 olarak sabit tutulmuştur. Harç karışımlarını oluşturan malzemelerin oran ve miktarları Çizelge 3'te verilmiştir.

Hamur ve harçlarda kullanılan karışım malzemeleri, ilk önce hassas terazi ile tartılmış ve ardından otomatik harç mikseri yardımıyla karıştırılmıştır. Hazırlanan çimento hamurları sırasıyla standart kıvam suyu, priz süresi ile hacim sabitliği deneylerine tabi tutulmuştur. TS EN 196-3 [30] standardına uygun olarak standart

aritmetik ortalamasıdır. Deneyler sırasında laboratuvarında sıcaklık 20±2°C ve bağıl nem %50-60'tır. Harç karışımlarının işlenebilirliği, yayılma tablası aleti ile ölçülen yayılma değeri ile belirlenmiştir. Bu deneyde, ASTM C109/C109M-16a [31] standardına uygun olarak yayılma çapı %110±5 mm olacak şekilde bu değer sabit tutulmuştur. Hazırlanan taze harç karışımları, 40×40×160 mm ebatlı ve üç gözlü çelik kalıplara iki tabaka halinde doldurulmuştur. Taze harç, kalıba yarıya kadar doldurulduktan hemen sonra kalıp sarsma cihazına yerleştirilerek 60 vuruş yapılmıştır. Daha sonra harcın kalan kalıba ikinci tabaka olarak doldurulmuş ve sarsma cihazında 60 vuruş daha yapılarak sıkıştırma işlemi tamamlanmıştır. Ardından kalıp yüzeyi çelik bir master ile düzeltilerek kalıp üzerine cam plaka konulmuştur. Harç karışımında bağlayıcı olarak SK kullanıldığından harçların tam priz alması için kalıplar, 48 saat [32] süreyle laboratuvar ortamında sarsıntısız bir tezgâh üzerinde üstü naylon bir örtü ile örtülü bir şekilde bekletilerek saklanmıştır. SK kullanılan harç karışımları 48 saat kalıpta bekletildiğinden 24 saat sonra kalıptan çıkarılması gereken çimentolu kontrol harcı numuneleri de 48 saat süre geçtikten sonra kalıptan çıkarılmıştır. Takiben harç numuneleri kalıplardan özenle çıkartılıp deney gününe kadar kür kabini içinde havada bekletilmiştir (Şekil 1).

**Çizelge 3.** Harç karışım oranları (The ratios of mortar mixture)

| Harç no | Harç kodu | Bağlayıcı oranı* | CEN kumu (g) | s/b  | Su (g) | CEM I (g) | CEM III (g) | SK (g) | YFC (g) |
|---------|-----------|------------------|--------------|------|--------|-----------|-------------|--------|---------|
| 1       | H1        | SK100            | 1350         | 1.56 | 702    | -         | -           | 450    | -       |
| 2       | H2        | CEM I50SK50      | 1350         | 0.73 | 329    | 225       | -           | 225    | -       |
| 3       | H3        | CEM I100         | 1350         | 0.56 | 252    | 450       | -           | -      | -       |
| 4       | H4        | CEM III100       | 1350         | 0.58 | 261    | -         | 450         | -      | -       |
| 5       | H5        | CEM I80SK10YFC10 | 1350         | 0.61 | 275    | 360       | -           | 45     | 45      |
| 6       | H6        | CEM I60SK20YFC20 | 1350         | 0.64 | 288    | 270       | -           | 90     | 90      |
| 7       | H7        | CEM I40SK30YFC30 | 1350         | 0.68 | 306    | 180       | -           | 135    | 135     |

\*Harçlar, ağırlıkça bağlayıcı miktarına göre yüzde (%) olarak belirtilmiştir.



**Şekil 1.** Harç numuneleri kür kabini (The curing cabinet for mortar specimens)

Şekil 1’de görüldüğü gibi harç numuneleri arasında yatayda en az 1 cm boşluk bırakılmış, düşeyde ise bu boşluk 1.5 cm kalınlığındaki ahşap çiteler kullanılarak sağlanmıştır. Kür kabininin bağıl nemi  $95 \pm 5\%$ ’dir. Sertleşmiş harç numuneleri mekanik deneylere tabi tutulmadan önce birim hacim ağırlık deneyi yapılmıştır. 7, 28 ve 90 gün yaşlarındaki harç numunelerinde mekanik deneyler TS EN 196-1 [29]’e göre gerçekleştirilmiştir. Harç numuneleri, suda bekletilmediği için kür kabinden çıkarıldıktan hemen sonra eğilmede çekme dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. Bu deneyde Ele markalı çimento üç noktalı eğilme ve basınç deney cihazı kullanılmış ve yükleme hızı 50 N/sn alınmıştır. Harçların eğilmede çekme dayanımı değerleri, aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır [29].

$$R_f = \frac{1.5 \times F_f \times l}{b^3} \quad (1)$$

Formülde; Rf: Eğilmede çekme dayanımı (MPa), b: Harç numunesinin kenar boyutu (mm), Ff: Harç

numunesi kırıldığında orta noktasındaki yük (N), l: Mesnetler arası mesafe (mm) dir.

Basınç dayanımı deneyi ise, eğilmede çekme dayanımı deneyinde ikiye ayrılan prizmatik harç numuneleri kullanılarak yapılmıştır [29]. Deney, parça harç numunesinin masterla düzeltilen yüzeyi yan tarafa gelecek şekilde cihaza yerleştirilerek gerçekleştirilmiş ve cihazın yükleme hızı  $(2400 \pm 200)$  N/s alınmıştır. Harçların basınç dayanımı değerlerinin hesaplanmasında aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır [29].

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (2)$$

Formülde; Rc: Basınç dayanımı (MPa), Fc: Kırılma anındaki maks. yük (N), 1600: Yükleme plakalarının alanı ( $40 \times 40$  mm<sup>2</sup>)’dir.

Harçların üç noktalı eğilmede çekme dayanımı değerleri; 3 numuneden, basınç dayanımı değerleri ise 6 numuneden (eğilmede çekme deneyinde ikiye ayrılan prizmatik numuneler kullanılarak) elde edilen dayanım değerlerinin aritmetik ortalamasıdır.

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

#### 3.1. Hamur özellikleri (Properties of paste)

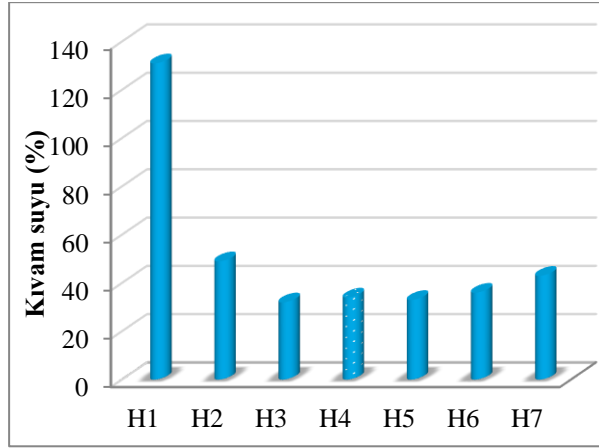
##### 3.1.1. Kıvam suyu (Consistency water)

Kontrol hamurları (H1, H2, H3, H4) ile SK+YFC esaslı hamurların (H5, H6, H7) kıvam suyu miktarları Şekil 2’de gösterilmektedir. Şekil 2’ye göre, hamur karışımlarında çimento yerine artan oranlarda SK ve SK+YFC’nin birlikte kullanımının hamurların kıvam suyu değerini artırdığı tespit edilmiştir.

H3 ve H4 kontrol hamurlarının kıvam suyu değerleri ile H5 hamurunun kıvam suyu değerleri yaklaşık olarak aynıdır. Ancak H3’e göre, H6 ve H7 hamurlarının kıvam suyu değerleri sırasıyla  $\sim 13\%$  ve  $\sim 35\%$ ; H4’e göre ise aynı hamurların sırasıyla  $\sim 5\%$  ve  $\sim 26\%$  daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda, çimento esaslı hamurlarda çimento yerine ağırlıkça  $10\%$



SK+%10 YFC karışım oranından daha yüksek oranda SK+YFC karışımı ikame edilmesinin hamurların kıvam suyu değerini arttırdığı görülmektedir. Bu artış, çimento ile ikame edilen hem SK'nin hem de YFC'nin daha büyük özgül yüzey değerine sahip olması ile açıklanabilir. Literatürde, çimentolu hamur karışımlarında %20'den fazla SK ve puzolanın birlikte kullanılması durumunda hamurların su ihtiyacının ~%80'e varan oranda arttığı belirlenmiştir [23]. Elde edilen sonuçlar literatür ile benzerlik göstermektedir.



Şekil 2. Hamur karışımlarının kıvam suyu değerleri (Paste mixtures's consistency water values)

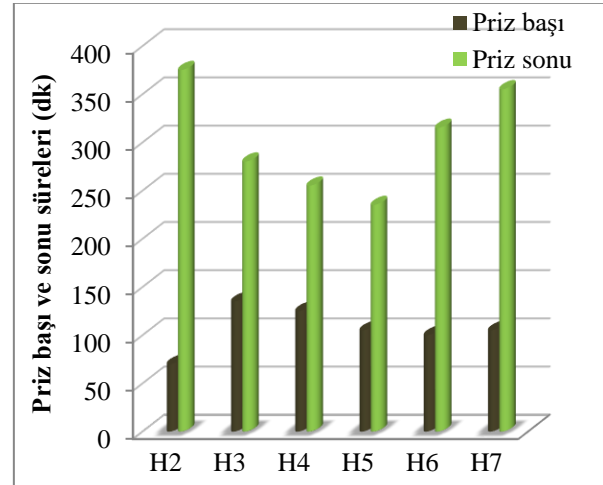
Buna ek olarak, en yüksek kıvam suyu miktarı %100 kireç bağlayıcı ile hazırlanan H1 hamurunda elde edilmiştir. Çimento yerine sadece sönmüş kirecin ikame edildiği H2 hamuru kıvam suyu miktarı, kontrol hamurları olan H3 ve H4'ün kıvam suyu ile karşılaştırıldığında sırasıyla %53 ile %44 daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bu durum, yoğunluğu çimentoya göre daha düşük olan sönmüş kireç hacimce hamur karışımında daha fazla yer aldığından kirecin tane yüzeylerini ıslatmak için daha fazla suya ihtiyaç duyması ile açıklanabilir.

Diğer taraftan, H6 ve H7 hamurlarının kıvam suyu değerleri, H2 hamuru kıvam suyu ile kıyaslandığında sırasıyla %36 ile %14 daha az olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, Çizelge 1'de verilen sönmüş kirecin yoğunluğunun YFC yoğunluğundan düşük olması dolayısıyla hamur karışımlarına daha çok kireç girmesi ve çimento+SK esaslı hamur karışımlarında kullanılan YFC'nin sönmüş kirece göre tane iriliğinin daha büyük olması ile açıklanabilir. Benzer olarak çimentolu sistemlerde YFC artışıyla kıvam suyu ihtiyacının arttığı yapılan çalışmalarla da desteklenmektedir [33].

### 3.1.2. Priz süreleri (Setting times)

Kontrol hamurları (H1, H2, H3, H4) ve SK+YFC esaslı hamurların priz değerleri Şekil 3'te gösterilmiştir. TS EN 197-1 [34]'de, CEM III/A(S) 42.5R (H4) ve CEM I 42.5R (H5) çimento esaslı hamurların priz başlangıcı süreleri  $\geq 60$  dk olarak sınırlandırılmaktadır. Şekil 3'te

görüldüğü gibi, H3 ile H4 kontrol hamurları ile üretilen diğer hamurların standartta belirtilen priz başı süresi sınırlamasına uygunluk gösterdiği tespit edilmiştir. Hamur karışımları arasında priz başı süresinin en kısa H2, en uzun H3'te olduğu belirlenmiştir. Ayrıca hamurların priz sonu süreleri birbirleri ile kıyaslandığında en kısa H5, en uzun H2'de olduğu tespit edilmiştir. Öte yandan Vicat aleti kullanılarak yapılan priz deneyinde H1 (%100 SK) hamurunda katılma gerçekleşmediği görülmüş, dolayısıyla priz süreleri tespit edilemediğinden Şekil 3'te gösterilememiştir. Literatürde kireç ve çimentonun birlikte kullanılması durumunda, hamur karışımında %80'e kadar kireç miktarı arttıkça her iki priz süresinin de arttığı bildirilmiştir [27]. Buna göre H1 hamurunda elde edilemeyen priz değerleri literatür ile uyumludur [32].



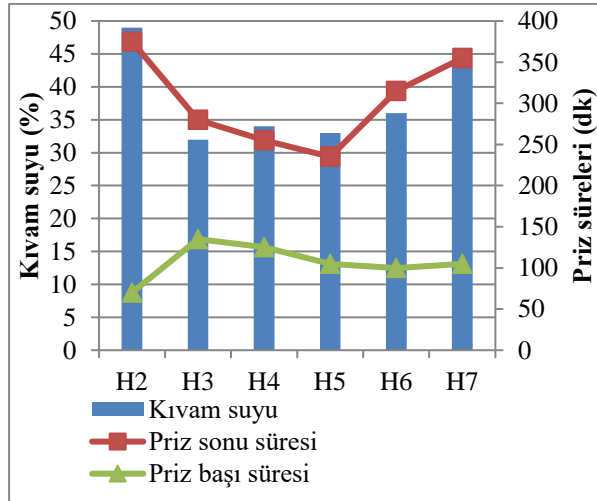
Şekil 3. Hamur karışımlarının priz başı ve priz sonu süreleri (Initial and final setting times of paste mixtures)

Şekil 3 incelendiğinde, artan oranlarda SK+YFC içeren H5, H6 ve H7 hamurlarının priz başı sürelerinin birbirine çok yakın olduğu ve bu hamurların kontrol hamurları H3 ve H4'e göre daha erken priz aldığı tespit edilmiştir. Ayrıca bütün hamur karışımları arasında çimentoya sadece kireç ikameli olan H2 hamurunun en erken prize başladığı belirlenmiştir. Şekil 3'te görüldüğü gibi, SK+YFC içeren çimento hamurları olan H5, H6 ve H7'nin priz başı sürelerinin, H2 hamuruna göre daha uzun olmasına YFC'nin neden olduğu söylenebilir. Bilindiği gibi puzolanlar hamur ve harçların priz sürelerini geciktirmektedirler [35].

Buna ek olarak Şekil 3'te gösterildiği gibi, H5 hamurunun, kontrol hamurları olan H3 ve H4'e göre priz sonu sürelerinin daha kısa olduğu tespit edilmiştir. Ancak artan oranlarda SK+YFC karışımı içeren H6 ve H7 hamurlarının priz sonu sürelerinin kontrol hamurlarına göre daha uzun olduğu belirlenmiştir. Bu durum, çimento esaslı hamur karışımlarında çimento yerine ağırlıkça %20 kireç+%20 YFC karışım miktarından daha fazla miktarda SK+YFC ikame



edilmesinin hamurların priz sonu süresini uzattığı anlaşılmaktadır. Buna ek olarak, tüm kireç-YFC içeren hamur karışımlarının sadece kireç ikameli H2 hamurundan daha kısa priz sonu süresine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, çimento+SK esaslı hamur karışımlarında cüruf kullanımının priz sonu süresini kirece göre kısalttığını göstermektedir. Bu çalışmada elde edilen priz başı ve priz sonu sürelerinin, literatürdeki deneysel çalışmalarda elde edilen priz süreleri ile benzerlik gösterdiği görülmektedir [25, 27, 36].



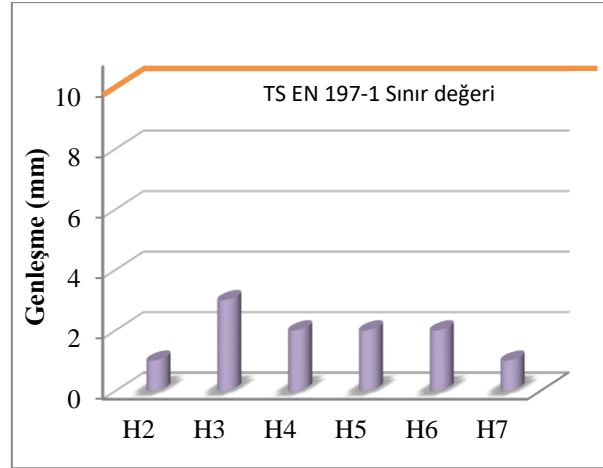
Şekil 4. Hamurların kıvam suyu - priz süreleri ilişkisi (The relationship between consistency water and initial and final setting times of pastes)

Diğer taraftan SK ve YFC'nin, hamurların priz sürelerine etkisine ek olarak kıvam suyu ile priz süreleri arasındaki ilişki irdelendiğinde, kıvam suyu oranındaki değişimin de hamur numunelerin priz sürelerini etkilediği söylenebilir (Şekil 4). Hamurlar arasında en yüksek kıvam suyu oranına sahip olan H2'de aynı zamanda en kısa priz başlangıcı ve en yüksek priz sonu süreleri elde edilmiştir. Buna benzer bir sonuç çimento hamurlarına kirecin etkisinin araştırıldığı bir deneysel çalışmada da elde edilmiştir [27]. Şekil 4'te görüldüğü gibi, H5, H6 ve H7'nin kıvam suyu değerleri arttıkça priz sonu değerleri de artmaktadır. Elde edilen deney sonuçlarının hamur karışımında puzolan olarak UK'nin kullanıldığı deneysel çalışma ile uyumlu olduğu görülmektedir [37].

### 3.1.3. Hacim genişmesi (Volume expansion)

Şekil 5'te kontrol hamurları ile çimento+SK esaslı ve SK+YFC esaslı hamurların genişleme miktarları gösterilmiştir. H1 karışımının genişleme miktarı, sönmüş kirecin suda tamamen çözülmesi sebebiyle tespit edilememiştir. TS EN 197-1 [34] standardına göre, çimento hamurlarının genişleme miktarı, en fazla 10 mm olacak şekilde sınırlandırılmaktadır. Şekil 5'e göre, üretilen tüm hamurların standartta belirtilen sınır

değerinden oldukça düşük olduğu görülmektedir. Bu sonuca göre, elde edilen tüm hamurların genişleme miktarları, TS EN 197-1 [34]'e uygunluk göstermektedir.



Şekil 5. Hamur karışımlarının genişleme miktarları (Expansion amounts of paste mixtures)

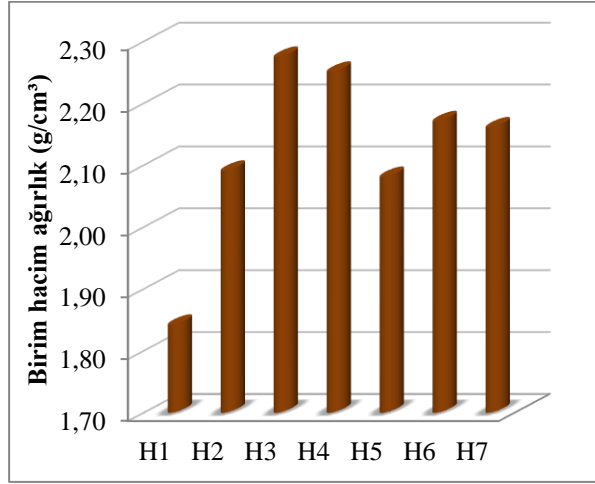
Buna ek olarak, hamur karışımlarında en yüksek genişleme miktarı H3 hamurundan elde edilmiştir. H4, H5 ve H6 kodlu hamurların genişleme miktarları ise birbirine yakındır. Ayrıca en fazla kireç ve YFC içeren H2 ve H7 hamurlarının ise en düşük genişleme miktarına sahip olduğu tespit edilmiştir. Dave vd. [17] çalışmalarında, farklı oranlarda çeşitli puzolanik katkıları ile hazırladıkları çimentolu hamur numuneleri arasındaki en düşük genişleme miktarını, çalışmamıza benzer şekilde en yüksek oranda kireç ve YFC içeren hamurlardan elde etmişlerdir. Hamurlarda elde edilen genişleme değerleri, Aruntaş vd. tarafından yapılan çalışmada bulunan genişleme değerleri ile benzerlik göstermektedir [27].

## 3.2. Harç özellikleri (Properties of mortar)

### 3.2.1. Birim hacim ağırlık (Unit volume weight)

Sertleşmiş kontrol harç numuneleri ile çimento+SK esaslı ve SK+YFC esaslı harç numunelerinin birim ağırlıkları Şekil 6'da gösterilmiştir. Buna göre, en yüksek ve en düşük birim ağırlıklar sırasıyla H3 ve H1 harçlarında tespit edilmiştir.

H3'e göre, SK+YFC ikameli H5, H6 ve H7 harçlarının birim ağırlık değerleri sırasıyla %9, %5 ve %5 daha düşük iken; H4'e göre ise sırasıyla %8, %4 ve %4 daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda, çimento esaslı harçlarda çimento yerine SK+YFC'nin birlikte kullanımının sertleşmiş harçların kuru birim ağırlığını azalttığı tespit edilmiştir. Benzer bir sonuç [19], yüksek oranda UK içeren sertleşmiş harç numunelerinde de elde edilmiştir. Öte yandan SK+YFC esaslı harçlar kendi aralarında kıyaslandığında ise, H5 harcının göreceli olarak daha düşük birim ağırlığa sahip olduğu görülmektedir.

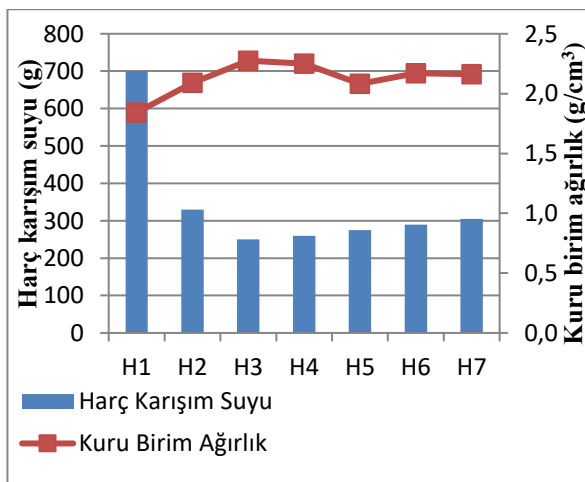


Şekil 6. Harç numuneleri birim hacim ağırlık değerleri (Unit volume weight values of mortar specimens)

H2 harcının birim ağırlık değeri, H1'e göre %14 daha fazla iken, H3 ve H4'ün birim ağırlığı ile karşılaştırıldığında ise %8 daha az olduğu belirlenmiştir. Başka bir çalışmada da çimentolu sertleşmiş numunelerde SK miktarı arttıkça numunelerin kuru birim ağırlığının azaldığı belirlenmiştir [27]. Ayrıca H2 harcının birim ağırlık değeri, H5 harcı ile yaklaşık olarak aynı iken, H6 ve H7 harçlarına göre %4 daha azdır. Tüm harç karışımları incelendiğinde, özellikle hafif sıva üretiminde çimento yerine %50 SK veya %30 SK+%30 YFC karışım oranına kadar SK+YFC'nin birlikte kullanılabilirliği düşünülmektedir. Elde edilen bu sonuca göre, bir binada sıvadan kaynaklı ölü yükün gıreceli olarak azaltılabileceği söylenebilir.

### 3.2.2. İşlenebilirlik (Workability)

Şekil 7'de, kontrol harç numuneleri ile SK+YFC esaslı harç numunelerinin aynı işlenebilirlik değerine sahip olması için gerekli karışım suyu değerleri gösterilmiştir.

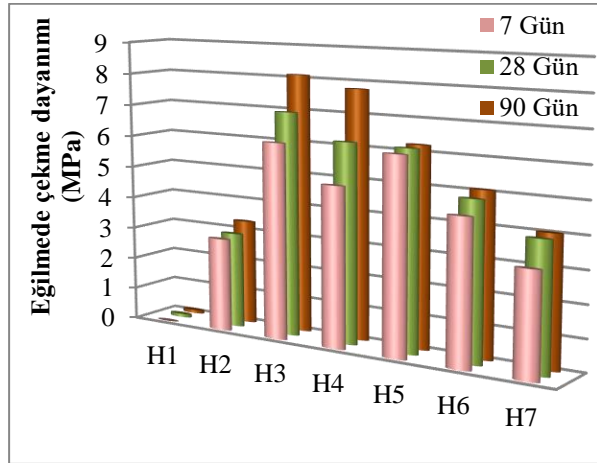


Şekil 7. Harçlarda karışım suyu - birim hacim ağırlık arasındaki ilişki (The relationship between mixing water and unit volume weight in mortars)

Aynı işlenebilirlik değeri ile hazırlanan harç karışımlarında en yüksek ve en düşük karışım suyu değerleri sırasıyla H1 ve H3 harçlarında tespit edilmiştir. H1 harç karışımında, tüm harç karışımlarına göre karışım suyu değerinin fazla olmasının nedeni kireç özgül yüzey alanının çimento ve YFC'ye göre oldukça yüksek olması ile açıklanabilir. H3'e göre, SK+YFC ikameli H5, H6 ve H7 harçlarının karışım suyu değerleri sırasıyla %10, %16 ve %22 daha fazla iken, H4'e göre bu oranlar sırasıyla %6, %12 ve %17 daha fazladır. Öte yandan SK+YFC esaslı harçlar kendi aralarında kıyaslandığında ise, en yüksek karışım suyu değeri SK+YFC karışım miktarının en fazla kullanıldığı H7 harç karışımında belirlenmiştir. Bu durum, çimentodan daha fazla özgül yüzey alanına sahip olan SK ve YFC'nin karışım içerisindeki oranlarının artışı ile açıklanabilir. Benzer şekilde Ince vd. tarafından rapor edilen deneysel bir çalışmada, SK ve SK'dan daha fazla yüzey alanına sahip zeolit ile hazırlanan harç karışımlarında zeolit oranı arttıkça harçların su ihtiyacının arttığı ve harç karışımları arasında sabit işlenebilirliği sağlamak için daha fazla su ilave edilmesi gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca harç karışımlarında daha ince olan zeolit ve Bayburt taşı tozunun kullanılması sebebiyle daha az geçirgen ve daha az gözenekli bir yapıya meydana gelmesi dolayısıyla harç kıvamlarında azalmaların gerçekleştiği açıklanmıştır [38]. Ayrıca H2 harcının karışım suyu değerinin; H3 ve H4'e göre sırasıyla %32 ve %27 daha fazla olduğu görülmektedir. Buna ek olarak, H2 harcı karışım suyu değeri H7 harcı karışım suyu değerinden %8 daha fazladır. Elde edilen deney sonuçlarına göre, çimento yerine kireç ve SK+YFC karışımının ikame edilmesinin karışım suyu miktarını arttırdığı belirlenmiştir. Aruntaş vd. çalışmalarında, kontrol harcına göre, %40 çimento ve %60 SK kullanarak hazırladıkları harçların karışım suyu değerinin ~%54 daha fazla olduğunu belirlemişlerdir [27]. Ancak, bu çalışmada farklı olarak H3 ve H4 kontrol harçlarına göre çimento yerine SK ve YFC'nin birlikte en çok kullanıldığı H7 karışımı esas alındığında harç karışımında YFC kullanımı sayesinde karışım suyu miktarının azaltılabildiği görülmektedir. Diğer taraftan, harçların karışım suyu ile harç numunelerinin kuru birim ağırlıkları birlikte değerlendirildiğinde, harca katılan SK oranı arttıkça karışım suyu artmakta, birim hacim ağırlık değerleri ise azalmaktadır. Benzer deney sonuçları, literatürdeki farklı deneysel çalışmalarda da rapor edilmiştir [27, 39].

### 3.2.3. Eğilmede çekme dayanımı (Flexural strength)

Kontrol harç numuneleri ile çimento+SK esaslı ve SK+YFC esaslı harç numunelerinin 7, 28 ve 90 gün yaş eğilmede çekme dayanımı değerleri Şekil 8'de gösterilmektedir. Şekil 8'de gösterildiği gibi, H3 ve H4'e göre, çimento yerine artan oranlarda SK+YFC karışımının birlikte ikame edildiği harçların 28 ve 90 günlük eğilmede çekme dayanımlarının azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 8. Harç numunelerin eğilmede çekme dayanımı-numune yaşı ilişkisi (The relationship between flexural strength-ages of mortar specimens)

H3 harcının 7 günlük, H4 harcının ise 28 günlük eğilmede çekme dayanımı ile H5 harcının 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımlarının yaklaşık olarak aynı olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde Kang ve diğerlerinin [40] çalışmasında da, kontrol numunesi ile çimento yerine %50 oranında öğütülmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC) ikame edilerek üretilen numunelerin eğilmede çekme dayanımı değerlerinin birbirine yakın değerler aldığı belirtilmiştir. Buna benzer bir sonuç Doven ve diğerlerinin [19] yaptığı en düşük eğilmede çekme dayanımı değerlerinin elde edildiği puzolan içeren kireçli hamur karışımlarında da görülmüştür.

H3 harcının 7, 28 ve 90 günlük eğilmede çekme dayanımları ile H5, H6 ve H7 harçlarının dayanımları karşılaştırıldığında; H5 harcının sırasıyla %1, %11 ve %23, H6 harcının sırasıyla %27, %30 ve %37, H7 harcının ise sırasıyla %47, %43 ve %50 daha az dayanıma sahip olduğu tespit edilmiştir. Öte yandan CEM III ile üretilen H4 kontrol harcının 7, 28 ve 90 günlük eğilmede çekme dayanımlarına göre sırasıyla kıyaslandığında ise; H6 harcının sırasıyla %10, %21 ve %35, H7 harcının ise sırasıyla %35, %36 ve %48 daha az dayanım gösterdiği tespit edilmiştir. Diğer taraftan H4'e göre, H5 harcının 7 günlük eğilmede çekme dayanımı %22 daha fazla iken 90 günlük numunelerde ise %20 daha az olduğu belirlenmiştir.

7, 28 ve 90 günlük tüm harçlarda en düşük eğilmede çekme dayanımı beklendiği gibi sadece SK içeren H1 karışımında elde edilmiştir. H3'e göre, H2 harcının 7, 28 ve 90 günlük eğilmede çekme dayanımı değerlerinin sırasıyla %52, %57 ve %59 daha az olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, H4'e göre, H2 harcının 7, 28 ve 90 günlük eğilmede çekme dayanımlarının sırasıyla %41, %52 ve %58 daha az olduğu belirlenmiştir. Buna ek olarak, çimento yerine en çok SK ve YFC ikamesinin yapıldığı H2 ve H7 harçların 7, 28 ve 90 günlük eğilmede çekme dayanımı değerleri karşılaştırıldığında ise numunelerin dayanım değerlerinin birbirine çok yakın olduğu anlaşılmaktadır. Aruntaş vd. [27]

yaptıkları çalışmada, çimentolu harç karışımlarında çimento yerine %60 oranında SK ikame edildiğinde eğilme dayanımının 1.5 MPa olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada ise, %60 oranında SK+YFC'nin birlikte kullanıldığı numunelerde eğilmede çekme dayanımının 4 MPa değerine ulaştığı tespit edilmiştir. Bu sonuç, SK ile birlikte yapay bir puzolan olan YFC'nin birlikte kullanımının eğilmede çekme dayanımı üzerinde oldukça etkin olduğunu göstermektedir.

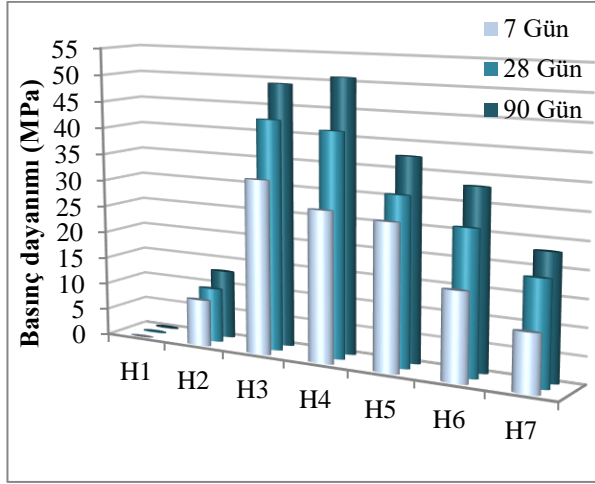
### 3.2.4. Basınç dayanımı (Compressive strength)

Şekil 9'da, kontrol harç numuneleri ile çimento+SK esaslı ve SK+YFC esaslı harç numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri gösterilmektedir. TS EN 197-1 [34] standardında CEM I ile CEM III çimentolu harçların 28 günlük basınç dayanımları en az 42.5 MPa olarak sınırlandırılmıştır. Şekil 8'de gösterildiği gibi, kontrol çimentoları CEM I (H3) ve CEM III'ün (H4) 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin TS EN 197-1 [34]'e uygun olduğu söylenebilir.

CEM I çimentosuyla hazırlanan kontrol harcı H3'ün 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları beklendiği gibi diğer harçlardan daha yüksek elde edilmiştir. Buna göre H3'ün 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları; H5, H6 ve H7 harcına göre sırasıyla %17, %27 ve %24; %50, %38 ve %33 ile %67, %55 ve %53 daha fazla dayanıma sahip olduğu tespit edilmiştir. Öte yandan H4'ün 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları; H5, H6 ve H7 harcına göre sırasıyla %3, %25 ve %26; %41, %36 ve %35 ile %62, %54 ve %55 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durumda, çimento yerine artan oranlarda SK+YFC birlikte ikame edildiğinde basınç dayanımlarının azaldığı söylenebilir. Literatürde basınç dayanımı değerlerinin azaldığı benzer bir deneysel sonuç, çimentolu harçlarda çimento yerine ~%80 oranına kadar ÖYFC'nin ikame edildiği harçlarda elde edilmiştir [41]. Her iki kontrol harcı olan H3 ve H4'ün basınç dayanımları birbiriyle karşılaştırıldığında, 7 ve 28 gün gibi erken yaşlarda H3'ün dayanımının H4'ten yüksek, 90 gün gibi ileri yaşta ise H4'ün basınç dayanımının %3 daha yüksek olduğu görülmektedir. YFC'li çimento kullanılarak hazırlanan H4 harcında karışım YFC kullanımının önemli bir sorunu olan erken yaşlarda düşük dayanım olgusu, literatürdeki deneye dayalı çalışmalarda elde edilen basınç dayanımı değerleriyle örtüşmektedir [42, 43]. Bu sonuca göre, YFC'li harcın (H4) CEM I harcına (H3) kıyasla 180 gün ve daha ileri yaşlarda daha yüksek dayanım göstereceği söylenebilir. Beton karışımında ÖYFC kullanıldığında puzolanik özellik sebebiyle numunelerin ileri yaşlarda CEM I betonuna göre basınç dayanımlarının daha fazla olduğu tespit edilmiştir [44].

7, 28 ve 90 günlük harç numuneleri arasında en düşük basınç dayanımı H1 karışımında belirlenmiştir. H3 ve H4 kontrol harçlarına göre, H2 harcının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları sırasıyla %73, %77 ve %74

ile %69, %76 ve %75 daha düşük olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 9. Harç numunelerin basınç dayanımı-numune yaşı ilişkisi (The relationship between compressive strength-ages of mortar specimens)

Diğer taraftan, çimento yerine en çok SK ve YFC'nin ikame edildiği H7 harçlarının basınç dayanımları ile %50 SK+%50 CEM I bağlayıcı kullanılan H2 harcı ile karşılaştırıldığında; H7 harcının 7, 28 ve 90 günlük dayanımlarının sırasıyla %23, %90 ve %81 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. %30 SK+%30 YFC ikame edilen H7 harcında CEM I çimento oranı %40 iken, H2 harcında bu oran %50'dir. Bu sonuca göre, harç karışımında YFC kullanımının harcın basınç dayanımını pozitif yönde etkilediği görülmektedir. Bu sonuç, YFC'nin puzolanik reaksiyon sebebiyle harç karışımındaki  $Ca(OH)_2$ 'i bağlayarak ilave bağlayıcı bileşikler oluşturmasıyla açıklanabilir. TS EN 998-1[45] kâgir harç standardı incelendiğinde, sertleşmiş harç basınç dayanımı sınıflandırılmasında basınç dayanımı  $\geq 6 \text{ N/mm}^2$  olan harçlar CS IV olarak kategorize edilmektedir. Benzer şekilde Aruntaş vd. [27], çimento yerine %40 oranına kadar SK kullanılarak hazırlanan harç karışımlarının CS IV sınıfında yer aldığını, %40'tan daha fazla SK kullanıldığında ise harç numunelerin basınç dayanımının giderek azaldığını ifade etmişlerdir. Bu deneysel çalışmada da üretilen çimentolu karışımların tamamının 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin  $6 \text{ N/mm}^2$ 'den büyük olduğu için CS IV sınıflandırmasına uygun olduğu söylenebilir.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özet olarak verilmiştir:

- Çimentolu hamur karışımlarına katılan hava kireci ve SK+YFC karışım oranı arttıkça kıvam suyu miktarı da artmaktadır. Bununla birlikte YFC'nin SK'ye göre kıvam suyu miktarını azalttığı görülmektedir.

- Çimentolu hamur karışımlarına katılan SK ve SK+YFC karışım miktarı arttıkça CEM I ve CEM III'e kıyasla priz başlangıcı kısalmakta, priz sonu süresi ise uzamaktadır. Ancak YFC'nin SK'ye göre priz başlama süresini daha da uzattığı gözlenmektedir.
- SK ve YFC'nin birlikte kullanımı çimentolu harçların genleşme değerlerini azaltmaktadır.
- SK ve YFC kullanımını çimentolu harçların birim ağırlık değerlerini azaltmaktadır.
- Harç karışımlarında SK ve YFC oranı arttıkça sabit işlenebilirlik sağlayabilmek için gereken karışım suyu miktarı da artmaktadır. Ancak SK, YFC'ye göre daha fazla karışım suyu miktarını arttırmaktadır.
- Harç karışımlarında SK ve SK+YFC karışımı oranı arttıkça eğilme dayanımları azalmaktadır. SK ile birlikte yapay bir puzolan olan YFC'nin birlikte kullanımının eğilmede çekme dayanımı üzerinde pozitif etkisinin olduğu söylenebilir.
- Harç karışımlarında SK ve SK+YFC karışımı oranı arttıkça basınç dayanımları azalmaktadır. Bununla birlikte bu harçların tamamının basınç dayanımı değerlerinin ilgili standart TS 998-1'de belirtilen sınır değerinde olduğu görülmektedir.
- SK ve YFC'nin birlikte kullanıldığı harç karışımları arasında en yüksek mekanik dayanımlar %10SK ve %10YFC kullanılan harç karışımında elde edildiğinden optimum SK ve YFC birlikte kullanım oranı %10 olarak belirlenmiştir.

Sonuç olarak; çimentolu hamur ve harçlarda çimento yerine değişik oranlarda kireç ve YFC'nin birlikte kullanılmasının hamur ve harçların fiziksel ve mekanik özelliklerine önemli derecede etki ettiği açıklanmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlara göre, çeşitli uygulamalarda kullanılacak çimentolu harçlarda, SK ve YFC birlikte kullanılabilir. Öte yandan, ilgili standarda uygun bir harç üretiminde endüstriyel bir atık olan YFC'nin kullanılması sayesinde  $CO_2$  salınımının azaltılabileceği ve çevre kirliliğinin önlenilebileceği söylenebilir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Çalışmada kullanılan çimento ve cürufun kimyasal analizini yapan sırasıyla Ankara Limak Çimento fabrikası ve Oyak Bolu Çimento fabrikası ile Cihan KÖSE'ye, kirecin kimyasal analizini yapan Paksan Kireç firması ile Neval YILDIRIM'a teşekkür ederiz.

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.



## YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Hüseyin Yılmaz ARUNTAŞ:** Deneyleerin tasarımı, sonuçların analizini ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir. / Designing experiments, analyzing results and writing article.

**Melih ŞAHİNÖZ:** Deneyleeri yapmış, analiz ve yazım işlemini gerçekleştirmiştir. / Experimenting, analyzing and writing article.

**Mustafa DAYI:** Deneyleerin kontrol, analiz ve yazım işlemini yapmıştır. / Controlling the experiment, analyzing and writing the article.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Akman S., "Harçlar", *Yapı malzemeleri*, İTÜ Yayınevi, 122-123, (1987).
- [2] Gleize, P.J.P., Müller, A., Roman, H.R., "Microstructural investigation of a silica fume-cement-lime mortar", *Cement and Concrete Composites*, 25(2), 171-175, (2003).
- [3] Umoh, A.A., Odesola, I.A., "Characteristics of bamboo leaf ash blended cement paste and mortar", *Civil Engineering Dimension*, 17(1), 22-28, (2015).
- [4] Akman, M.S., "Yapı Malzemelerinin Tarihsel Gelişimi", *TMH-Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426, 30-36, (2003).
- [5] Van Balen K., "Understanding the lime cycle and its influence on historical construction practice", *In Proceedings of the First International Congress on Construction History*, Vol. 20, p. 24th, Universidad Politécnica de Madrid: Instituto Juan de Herrera, (2003).
- [6] Seabra, M.P., Paiva, H., Labrincha, J.A., Ferreira, V.M., "Admixtures effect on fresh state properties of aerial lime based mortars", *Construction and Building Materials*, 23(2), 1147-1153, (2009).
- [7] Damtoft, J.S., Lukasik, J., Herfort, D., Sorrentino, D., Gartner, E.M., "Sustainable development and climate change initiatives", *Cement and Concrete Research*, 38(2), 115-127, (2008).
- [8] Rahman, M.A., Sarker, P.K., Shaikh, F.U.A., Saha, A.K., "Soundness and compressive strength of Portland cement blended with ground granulated ferronickel slag", *Construction and Building Materials*, 140, 194-202, (2017).
- [9] T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Çimento sektör raporu, 4-8, (2021).
- [10] Amin N., "Use of clay as a cement replacement in mortar and its chemical activation to reduce the cost and emission of greenhouse gases", *Construction and Building Materials*, 34, 381-384, (2012).
- [11] Aruntaş H.Y., Tokyay M., "Katkılı çimento üretiminde diatomitin puzolanik malzeme olarak kullanılabilirliği", *Çimento ve Beton Dünyası*, 1(4), 33-41, 1996.
- [12] Maria, S., "Use of natural pozzolans with lime for producing repair mortars", *Environmental Earth Sciences*, 75(9), 758, (2016).
- [13] Hu, G., Rohani, S., Jiang, X., Li, J., Liu, Q., Liu, W., "CO<sub>2</sub> Mineral Sequestration and Faujasite Zeolite Synthesis by Using Blast Furnace Slag: Process Optimization and CO<sub>2</sub> Net-Emission Reduction Evaluation", *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(41), 13963-13971, (2021).
- [14] Gökalp, İ., Uz, V.E., Saltan, M., Tutumluer, E., "Technical and environmental evaluation of metallurgical slags as aggregate for sustainable pavement layer applications", *Transportation Geotechnics*, 14, 61-69, (2018).
- [15] Siddique, R., Bennacer, R., "Use of iron and steel industry by-product (GGBS) in cement paste and mortar", *Resources, Conservation and Recycling*, 69, 29-34, (2012).
- [16] Prošek, Z., Nežerka, V., Hlůzek, R., Trejbal, J., Tesárek, P., Karra'a, G., "Role of lime, fly ash, and slag in cement pastes containing recycled concrete fines", *Construction and Building Materials*, 201, 702-714, (2019).
- [17] Dave, N., Misra, A.K., Srivastava, A., Kaushik, S.K., "Experimental analysis of strength and durability properties of quaternary cement binder and mortar", *Construction and Building Materials*, 107, 117-124, (2016).
- [18] Carrajola, R., Hawreen, A., Flores-Colen, I., de Brito, J., "Fresh properties of cement-based thermal renders with fly ash, air lime and lightweight aggregates", *Journal of Building Engineering*, 101868, (2020).
- [19] Doven, A.G., Pekrioglu, A., "Material properties of high volume fly ash cement paste structural fill", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(6), 686-693, (2005).
- [20] Sepulcre-Aguilar, A., Hernández-Olivares, F., "Assessment of phase formation in lime-based mortars with added metakaolin, Portland cement and sepiolite, for grouting of historic masonry", *Cement and Concrete Research*, 40(1), 66-76, (2010).
- [21] Manita, P., Triantafillou, T.C., "Influence of the design materials on the mechanical and physical properties of repair mortars of historic buildings", *Materials and Structures*, 44(9), 1671-1685, (2011).
- [22] Cerulli, T., Pistolesi, C., Maltese, C., Salvioni, D., "Durability of traditional plasters with respect to blast furnace slag-based plaster", *Cement and Concrete Research*, 33(9), 1375-1383, (2003).
- [23] Shi, C., "Studies on several factors affecting hydration and properties of lime-pozzolan cements", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 13(6), 441-445, (2001).
- [24] Nayaka, R.R., Alengaram, U.J., Jumaat, M.Z., Yusoff, S.B., Alnahhal, M.F., "High volume cement replacement by environmental friendly industrial by-

- product palm oil clinker powder in cement-lime masonry mortar”, *Journal of Cleaner Production*, 190, 272-284, (2018).
- [25] Tampus, R.M., Lardizabal, J.R., Acena, D.L.M., Uy, M.A.M., Arcenal, K.V.R., “Proportion and property specifications and strength behavior of mortar using wood ash as partial replacement of lime”, *International Journal*, 18(70), 49-55, (2020).
- [26] Veiga M.R., Velosa A., Magalhães A., “Experimental applications of mortars with pozzolanic additions: characterization and performance evaluation”, *Construction and Building Materials*, 23(1), 318-327, (2009).
- [27] Aruntaş, H.Y., Şahinöz, M., Dayı, M., “Çimento Hamur ve Harçlarında Kireç Kullanımının İncelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 24, 1045-1054, (2021).
- [28] TS EN 459-1, “Yapı kireci-Bölüm 1: Tarifler, özellikler ve uygunluk kriterleri”, (2015).
- [29] TS EN 196-1, “Çimento deney metotları-Bölüm 1: Dayanım tayini”, (2016).
- [30] TS EN 196-3, “Çimento deney yöntemleri-Bölüm 3: Priz süreleri ve genleşme tayini”, (2017).
- [31] ASTM C109/C109M-16a, “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars”, (2016).
- [32] Altun, M.G., Süleyman, Ö. Mardani-Aghabaglou, A. “Polipropilen lif kullanımının doğal hidrolik kireçli harçların kuruma büzülmesine etkisi”, *Sakarya University Journal of Science*, 22(2), 427-435, (2018).
- [33] Thakur, I.C., Kumar, S., Singh, J.P. “Assessment of the properties of cement & mortar using GGBS”, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 5(8), 15224-15231, (2016).
- [34] TS EN 197-1, “Çimento-Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri”, (2012).
- [35] Erdoğan, T.Y., “Beton”, *ODTÜ Yayıncılık*, Ankara, 5. Baskı, 172-212, (2015).
- [36] Su-Cadirci, T.B., Ince, C., Calabria-Holley, J., Ball, R.J. “Use of brick dust to optimise the dewatering process of hydrated lime mortars for conservation applications”, *Materials and Structures*, 56(3), 56, (2023).
- [37] Dorum, A., Tekin, İ. “Uçucu kül ikameli çimento harcının basınç dayanımı ve priz zamanına distile su etkisinin araştırılması”, *Politeknik Dergisi*, 7(3), 243-250, (2004).
- [38] Ince, C., Derogar, S., Tiryakioğlu, N.Y., Toklu, Y.C. “The influence of zeolite and powdered Bayburt stones on the water transport kinetics and mechanical properties of hydrated lime mortars”, *Construction and Building Materials*, 98, 345-352, (2015).
- [39] Pavia, S., Walker, R., Veale, P., Wood, A. “Impact of the properties and reactivity of rice husk ash on lime mortar properties”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(9), 04014066, (2014).
- [40] Kang, C.W., Ban, C.C., Wei, O.C., Ken, P.W., Heng, L.K. “The properties of slag-silica fume ternary blended mortar with quarry dust”, *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 14(1), 6443-6451, (2020).
- [41] Babu, K.G., Kumar, V.S.R., “Efficiency of GGBS in concrete”, *Cement and Concrete Research*, 30(7), 1031-1036, (2000).
- [42] Demirboğa, R., Türkmen, İ., Karakoc, M.B. “Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixed concrete”, *Cement and Concrete Research*, 34(12), 2329-2336, (2004).
- [43] Joseph, S., Cizer, Ö. “Hydration of hybrid cements at low temperatures: A study on portland cement-blast furnace slag-Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>”, *Materials*, 15(5), 1914, 1-20, (2022).
- [44] Aruntaş, H.Y., Yıldız, E., Kaplan, G. “The engineering performance of eco-friendly concretes containing diatomite fly ash and ground granulated blast furnace slag”, *Acta Polytechnica*, 62(5), 505-521, (2022).
- [45] TS EN 998-1, “Kâgir harcı-Özellikler-Bölüm 1: Kaba ve ince sıva harcı”, (2017).