



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



Geri dönüştürülmüş çimento harç tozunun çimento bağlayıcılı kompozitler üzerindeki etkisi

Effect of recycled cement mortar powder on cementitious composites

Yazar(lar) (Author(s)): Gazi GÜNEL¹, Erdinç Halis ALAKARA², Özer SEVİM³, İlhami DEMİR⁴

ORCID¹: 0000-0003-4175-9032

ORCID²: 0000-0001-7925-4190

ORCID³: 0000-0001-8535-2344

ORCID⁴: 0000-0002-8230-4053

To cite to this article: Günel G., Alakara E.H., Sevim Ö. ve Demir İ., “Geri dönüştürülmüş çimento harç tozunun çimento bağlayıcılı kompozitler üzerindeki etkisi”, *Journal of Polytechnic*, 27(2): 533-543, (2024).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Günel G., Alakara E.H., Sevim Ö. ve Demir İ., “Geri dönüştürülmüş çimento harç tozunun çimento bağlayıcılı kompozitler üzerindeki etkisi”, *Politeknik Dergisi*, 27(2): 533-543, (2024).

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

DOI: 10.2339/politeknik.1135957

Geri Dönüştürülmüş Çimento Harç Tozunun Çimento Bağlayıcı Kompozitler Üzerindeki Etkisi

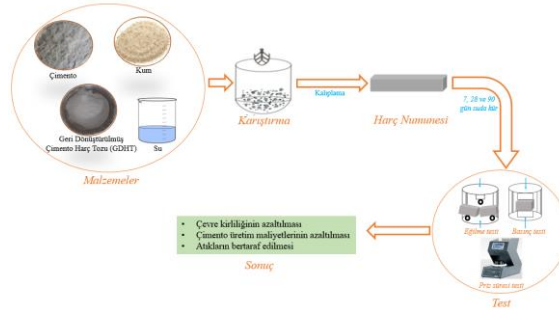
Effect of Recycled Cement Mortar Powder on Cementitious Composites

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Çimento bağlayıcı kompozitlerde geri dönüştürülmüş çimento harç tozu (GDHT) kullanımı/ The use of recycled cement mortar powder (RCMP) on cementitious composites.
- ❖ GDHT ikameli çimento bağlayıcı kompozitlerin priz süreleri, mekanik özellikleri ve mikroyapısı/ Setting times, mechanical properties and microstructures of RCMP substituted cementitious composites.
- ❖ %25 oranına kadar GDHT ikamesi tavsiye ediliyor/Up to 25% RCMP substitution is recommended.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Çalışmanın aşamaları ve elde edilen sonuçlar/ Stages of the study and the results.



Şekil. Çalışma aşamalarının grafik özeti /Figure. Graphical abstract of the study stages

Amaç (Aim)

Bu çalışmada 7 günlük $15 \times 15 \times 15$ cm boyutlarındaki küp numunelerin kırılıp öğütülmesi ile elde edilen geri dönüştürülmüş harç tozu (GDHT) ikameli çimento bağlayıcı kompozitlerin priz süreleri, mekanik özellikleri ve mikroyapısı incelenmiştir/ In this study, setting times, mechanical properties and microstructures of recycled cement mortar powder (RCMP) substituted cementitious composites obtained by crushing and grinding 7-day-old cubic samples of $15 \times 15 \times 15$ cm were investigated.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Hazırlanan GDHT ikameli çimento bağlayıcı harçlar 7, 28 ve 90 gün su küründe bekletildikten sonra eğilme ve basınç dayanımı testlerine tabi tutulmuştur. /The prepared RCMP-based cementitious mortars were subjected to flexural and compressive strength tests after being kept in water curing for 7, 28 and 90 days.

Özgünlük (Originality)

7 günlük $15 \times 15 \times 15$ cm boyutlarındaki küp numunelerden geri dönüştürülmüş harç tozu / Recycled cement mortar powder from 7 days old cubic $15 \times 15 \times 15$ cm samples.

Bulgular (Findings)

GDHT ikamesinin ilk günlerde referans harçlara kıyasla mekanik özelliklerde düşümlere neden olduğu, ilerleyen günlerde ise referans harçlara kıyasla daha yüksek mekanik özellikler gösterdiği tespit edilmiştir/RCMP replacement caused decreases in mechanical properties compared to the reference mortars in the first days, and showed higher mechanical properties compared to the reference mortars in the prolonged days.

Sonuç (Conclusion)

Sonuç olarak çalışma kapsamında GDHT %25 oranına kadar çimento yerine kullanılması tavsiye edilmiştir. / As a result, it is recommended to use RCMP up to 25% instead of cement within the scope of the study.

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.

Geri Dönüştürülmüş Çimento Harç Tozunun Çimento Bağlayıcılı Kompozitler Üzerindeki Etkisi

Araştırma Makalesi / Research Article

Gazi GÜNEL¹, Erdiç Halis ALAKARA^{1,2}, Özer SEVİM³, İlhami DEMİR³

¹Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale Üniversitesi, Türkiye

²Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Türkiye

³Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Kırıkkale Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 26.06.2022 ; Kabul/Accepted : 21.09.2022 ; Erken Görünüm/Early View : 27.11.2022)

ÖZ

Bu çalışmada 7 günlük 15×15×15 cm boyutlarındaki küp numunelerin kırılıp öğütülmesi ile elde edilen geri dönüştürülmüş harç tozu (GDHT) %0, %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında çimento ağırlığına çimento yerine ikame edilmiş ve GDHT ikameli çimento bağlayıcılı hamurlarının priz süreleri, GDHT ikameli çimento bağlayıcılı harçların ise mekanik ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Hazırlanan GDHT ikameli çimento bağlayıcılı harçlar 7, 28 ve 90 gün su küründe bekletildikten sonra eğilme ve basınç dayanımı testlerine tabi tutulmuştur. Mikroyapı analizleri ise 7 ve 90 günlük su kürüne tabi tutulmuş referans ve %15 GDHT ikameli çimento bağlayıcılı harçlar üzerinde yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde GDHT ikame oranının artmasıyla çimento bağlayıcılı hamurların priz süreleri artmıştır. Ayrıca GDHT ikamesinin ilk günlerde referans harçlara kıyasla mekanik özelliklerde düşüslere neden olduğu, ilerleyen günlerde ise referans harçlara kıyasla daha yüksek mekanik özellikler gösterdiği tespit edilmiştir. Mikroyapı analizlerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde ise GDHT ikame oranının artmasıyla ilk günlerdeki hidrasyon gelişimlerinin yavaş olduğu, ilerleyen günlerde GDHT ikameli harçların hidrasyon gelişimlerinin referans harçlardan daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak çalışma kapsamında GDHT %25 oranına kadar çimento yerine kullanılması tavsiye edilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Geri dönüştürülmüş harç tozu, çimento bağlayıcılı kompozitler, mekanik özellikler, mikroyapı.

Effect of Recycled Cement Mortar Powder on Cementitious Composites

ABSTRACT

In this study, recycled cement mortar powder (RCMP) obtained by crushing and grinding of 7-day-old cubic samples with dimension of 15×15×15 cm was substituted for cement at the ratios of 0, 5, 10, 15, 20 and 25% by weight of cement and setting times of RCMP-based cementitious pastes, mechanical properties, and microstructures of RCMP-based cementitious mortars were investigated. The prepared RCMP-based cementitious mortars were subjected to flexural and compressive strength tests after being kept in water curing for 7, 28 and 90 days. Microstructure analyzes were carried out on reference and 15% RCMP-based cementitious mortars subjected to water curing for 7 and 90 days. Results reveal that the setting times of cement pastes were prolonged with the increase in the RCMP. In addition, it was determined that the RCMP replacement caused decreases in mechanical properties compared to the reference mortars in the first days, and showed higher mechanical properties compared to the reference mortars in the prolonged days. The microstructure analyzes showed that the hydration developments in the first days were slow with the increase in the RCMP, and the hydration developments of the RCMP substituted cementitious mortars were better than the reference mortars in the prolonged days. As a result, it is recommended to use recycled cement mortar powder up to 25% instead of cement within the scope of the study.

Keywords: Recycled cement mortar powder, cementitious composites, mechanical properties, microstructure.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Beton çimento, agrega, su ve kimyasal katkılardan oluşmaktadır. Betonun önemli ana bileşeni olan çimento üretiminde doğal kaynakların aşırı kullanılması, fazla enerji tüketimi ve çevresel kirlilik sorunlarını ortaya çıkarmaktadır [1]. Çimento üretimi dünyadaki CO₂'nin yaklaşık olarak %7'sini oluşturur. Bir ton çimento üretimi sonucunda çimento/klinker oranına, üretim sürecine, yakıt tipine bağlı olarak 0,86 ton CO₂ salınımı ve 1,5 ton hammadde kullanımı gerçekleşir [2,3]. Doğal

ve yapay atık malzemelerinin çimentoya ikame edilerek kullanılması çimento üretimi sonucunda çevreye verilen zararı azaltmada alternatif yöntem olabilmektedir.

Yapı ihtiyacını karşılamak için beton üretimi devam ederken diğer servis ömrünü tamamlamış yapıların yıkımı sonucunda oluşan yıkıntı atıklarının da çevreye verdiği zararı da göz önünde bulundurmamak gerekir [1,4]. Toplam katı atıklarının %30-40'ını oluşturan yıkıntı atıkları 2050 yılına kadar 27 milyar ton olacağı tahmin ediliyor [5,6]. Hammadde kaynaklarının tüketimi azaltmak ve çevreye verilen zararı en aza indirmek için beton üretiminde yapay ve doğal atık

*Sorumlu Yazar : (Corresponding Author)
e-posta : ozersevim@kku.edu.tr

malzemelerin değerlendirilmesi bir alternatif olarak görülmektedir [7,8]. Araştırmacılar inşaat yıkıntı atıklarını betonda agrega yerine [4,9-13] ve çimento [14-20] yerine ikame ederek kullanmışlardır.

Demirel ve Şimşek [21] kür yaşı 7 gün olan C30 beton atıklarından elde ettikleri iri ve ince agregaları %0, %10, %20, %30, %40, %50 ve %100 oranlarında agrega yerine ikame ederek beton karışımlarında kullanmışlardır. Sonuçlar incelediğinde, iri ve ince agrega içeren taze betonun çökme değeri ikame oranı arttıkça azalmıştır. İnce agrega ikame edilmiş beton karışımlarına kıyasla iri agrega ikameli betonların basınç dayanımı daha yüksek çıkmıştır. Kim ve Choi [14] yaptıkları çalışmada 928 cm²/g ve 1360 cm²/g Blaine inceliğindeki atık inşaat tozunu çimento yerine %0, %15, %30 ve %45 oranlarında ikame etmişlerdir. Her iki incelikteki beton atık tozlarının ikame oranının artmasıyla basınç dayanımları azalmıştır ve priz bitiş süreleri 2 saat uzamıştır. Aydın vd. [4] çalışmalarında atık beton ve atık tuğladan elde ettikleri iri agregaları kullanarak çimento harçları üretmişlerdir. Hazırlanan harçlarda atık beton agregası ve atık tuğla agregası doğal agrega yerine ağırlıkça %0, %25, %50, %75 ve %100 oranında ikame edilerek kullanılmıştır. Atık beton agregası ve atık tuğla agregası içeren betonların basınç dayanımı, kompasitesi ve yoğunluğu ikame oranı arttıkça azalmıştır. Gümüşsoy [9] yapmış olduğu çalışmada inşaat yıkıntı atığından elde edilen agregaları standart agrega yerine %0, %25, %50, %75 ve %100 oranında ikame etmiştir. Çalışmanın sonucunda ikame oranının artmasıyla birlikte işlenebilirlik, birim hacim ağırlık, basınç ve eğilme dayanımında azalma ve aşınma direncinde artış görülmüştür. Sui vd. [15] atık beton tozuna 200, 400, 600, 700 ve 800 °C'de ısıtma işlemi uygulayarak, çimentoya %30 oranında ikame etmişlerdir. Çimento harçlarının 28 günlük basınç dayanımlarında referans numuneye göre azalmalar olmuştur. Referans numuneye en yakın basınç dayanımı değerini 700 °C ısıtma işlemi uygulanmış atık beton tozu vermiştir. Çalışma sonucunda 700 °C'de ısıtma işlemi uygulanmış atık beton tozunun beton karışımlarında kullanılabileceği tespit edilmiştir. Rahees vd. [16] beton karışımlarında 10, 15, 20 ve 25 yıllık yıkıntı beton atığı tozunu %0, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında çimento yerine ikame ederek kullanmışlardır. İkame oranının %20'yi geçmesi ile birlikte basınç dayanımında önemli azalmalar olduğu görülmüştür. Ayrıca yıkıntı beton atığı tozlarının yaşının önemli olmadığı tespit edilmiştir. Rosman vd. [22] çalışmalarında beton atığını %5 ve %15 oranlarında çimento yerine ikame etmişlerdir. Sonuçlar incelendiğinde beton atığının ikame oranının artmasıyla birlikte basınç dayanımında ve yoğunlukta azalma olmuştur. Horsakulthai [23] atık beton tozunun kendiliğinden yerleşen betonda mekanik ve fiziksel özelliklerini incelemiştir. Çalışmada atık beton tozu %20, %40 ve %60 oranlarında çimentoya ikame edilmiştir. İkame oranının artmasıyla porozite ve su emme oranında artışlar olmuştur. Atık beton tozunun basınç dayanımı

üzerindeki olumsuz etkiyi en aza indirmek için optimum ikame oranının %20'ye kadar olabileceği belirlenmiştir.

Detaylı literatür araştırması sonucunda yapılan çalışmaların 28 gün ve sonrası yaşlarda hidrasyonunu tamamladığı kabul edilen beton atık tozlarının çimento ikamesi olarak kullanılması üzerine odaklandığı görülmüştür. Bu çalışmada ise henüz hidrasyonunu tamamlamamış 7 günlük 15×15×15 cm boyutlarındaki küp numuneler kırılıp iri agregalardan ayrıştırılmış ve harç fazı ise toz haline getirilerek elde edilen geri dönüştürülmüş harç tozu (GDHT) çimento yerine ikame edilerek çimento bağlayıcı kompozitler üretilmiştir. Bu kapsamda, beton santralleri tarafından basınç dayanım testi için üretilen 15×15×15 cm boyutlarındaki 7 günlük beton küp numuneleri dayanım testi sonrasında alınarak kırıcılar yardımıyla kırılmış iri agrega ve harç fazı ayrıştırılmıştır. Harç fazı bilyeli değirmen tarafından öğütülmüş ve elde edilen toz malzeme (GDHT) çimento yerine %5, %10, %15, %20 ve %25 oranında çimento ağırlıkça ikame edilerek çimento bağlayıcı harç numuneleri üretilmiştir. Hazırlanan karışımlar için priz başlangıç ve bitiş süreleri, eğilme ve basınç dayanım deneyleri ile mikroyapı analizleri uygulanmıştır. Eğilme ve basınç dayanım testleri 7, 28 ve 90 günlük su kürüne tabi tutulmuş çimento bağlayıcı harçlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı analizleri ise 7 ve 90 günlük su kürüne tabi tutulmuş referans ve %15 GDHT ikameli çimento bağlayıcı harçlar için yapılmıştır. SEM analizleri GDHT ikamesinin, hidrasyon gelişim sürecini nasıl etkilediğini gözlemlemek amacıyla yapılmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

2.1. Materyal (Material)

Hazırlanan harç numunelerinde çimento olarak CEM I 42,5 R çimentosu (PÇ), geri dönüştürülmüş harç tozu (GDHT), standart kum ve şehir şebeke suyu kullanılmıştır. PÇ ve GDHT kimyasal özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. GDHT'nin üretim aşaması Şekil 1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1. PÇ ve GDHT'nin kimyasal özellikleri
(The chemical properties of cement and RCMP)

Kimyasal Bileşim (%)	PÇ	GDHT
SiO ₂	21,34	14,9
Al ₂ O ₃	4,58	3,87
Fe ₂ O ₃	3,85	1,68
CaO	62,26	51,19
MgO	1,73	1,08
Na ₂ O	0,38	0,21
K ₂ O	0,40	0,69
SO ₃	3,69	0,1

Beton santrallerinde basınç dayanımı testi için üretilen 7 günlük $15 \times 15 \times 15$ cm boyutlarındaki kübik beton numuneler dayanım testi sonrasında elde edilmiş ve kırılarak iri agrega ve çimento harcı fazına ayrıştırılmıştır. Daha sonra harç fazı laboratuvar tipi çeneli kırıcı yardımıyla daha küçük boyutlara getirilmiş ve 2 mm boyutundaki elekten elenmiştir. 2 mm elek

Üretilen harçların Su/Bağlayıcı oranı 0,50'dir. Çizelge 2'de karışımların malzeme miktarı gösterilmiştir



Şekil 1. GDHT'nin üretim aşaması (The production phase of the RCMP)

altında kalan malzeme bilyeli değirmende tekrar öğütülerek toz haline getirilmiş ve son olarak 75 µm boyutundaki elekten elenerek elek altında kalan geri dönüştürülmüş harç tozu (GDHT) elde edilmiştir. Yapılan GDHT üretim aşamasında ince agrega tozunun GDHT içeriğine etkisinin az olduğu Çizelge 1'de oksit analizinde görülmektedir. Çizelge 1 incelendiğinde normal Portland çimentosunun CaO ve SiO₂ içeriğinin sırasıyla %62,26 ve %21,34 olduğu görülürken elde edilen GDHT için bu oranların sırasıyla %51,19 ve %14,90 olduğu görülmüştür. Ayrıca ince agrega SiO₂ içeriğinin CaO ile reaksiyona girme kabiliyetlerinin düşük olduğu literatürde sunulmuştur [24]. Farklı literatür çalışmalarında ise ince agrega SiO₂ içeriğinin CaO ile reaksiyona girme kabiliyetini minimuma indirmek için çimento harç fazını 450 °C [25], 1150 °C [26] gibi yüksek sıcaklık etkisiyle 8 saate varan kalsinasyon işlemine tabi tutulmuştur. Fakat üretilen çimento bağlayıcılı kompozitlerin maliyetine çok olumsuz bir etken olacağından ve literatürde sunulduğu gibi ince agrega SiO₂ içeriğinin CaO ile reaktivitesi zaten düşük olduğundan GDHT üretim aşamasından önce çimento harç fazına kalsinasyon işlemi uygulanmamıştır.

2.2. Metod (Method)

2.2.1 Karışım içeriği (Mixture proportions)

Çalışmada sürecinde üretilen çimento harçları TS EN 196-1 [27] 'e göre hazırlanmıştır. Çimento harçları, çimento ağırlığına %0 (Referans), %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında GDHT ikame edilerek üretilmiştir.

Çizelge 2. Farklı çimento esaslı kompozit harçların karışım oranları (The mixture proportions of the different cementitious composite mortars)

Karışım Kodu	GDHT (%)	GDHT (g)	Çimento (g)	Su (g)	Kum (g)
Ref	0	0,0	450,0	225	1350
GDÇ5	5	22,5	427,5	225	1350
GDÇ10	10	45,0	405,0	225	1350
GDÇ15	15	67,5	382,5	225	1350
GDÇ20	20	90,0	360,0	225	1350
GDÇ25	25	112,5	337,5	225	1350

2.2.2. Priz süresi tayini (Setting characteristics)

Burada CEM I 42,5 R çimentosuna ağırlıkça %0 (Referans), %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında GDHT ikame edilerek hazırlanan altı farklı çimento hamuru grubunun priz başlama ve bitiş süreleri TS EN 196-3 [28] standardına uygun olarak belirlenmiştir. Priz başlangıcı ve priz sonu değerleri için 3 adet farklı deney sonucunun ortalaması alınmıştır.

2.2.3. Harç numunelerinin eğilme ve basınç dayanımlarının belirlenmesi (Determination of flexural and compressive strength properties)

Çimento harçlarının eğilme ve basınç dayanımları TS EN 196-1'e göre belirlenmiştir [27]. Çimento harçlarının eğilme dayanımını belirlenmesinde 7, 28 ve 90 gün normal su kürüne tabi edilmiş 3 adet $40 \times 40 \times 160$ mm ölçülerine sahip prizmatik çimento harcı kullanılmıştır. Eğilme deneyi sonucunda oluşan 6 adet 40×40 mm ölçülerindeki numuneler basınç dayanımının

belirlenmesinde kullanılmıştır. Eğilme dayanımı ve basınç dayanımı sonuç değerleri için sırasıyla 3 ve 6 adet numunenin dayanım sonucu ortalamaları alınmıştır.

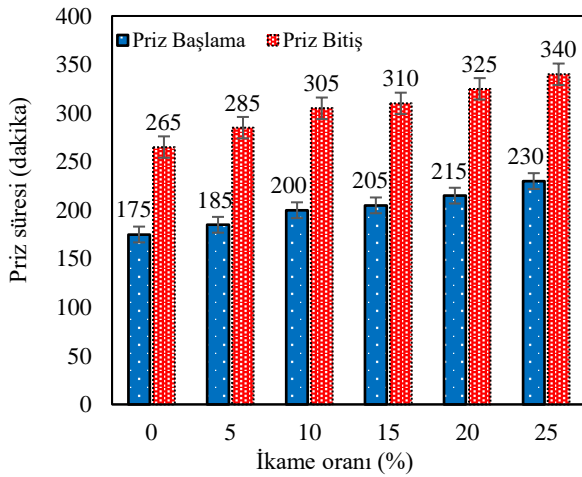
2.2.4. Mikroyapı analizi (Microstructure analysis)

%0 (referans) ve %15 GDHT ikameli karışımların mikroyapılarını incelemek için SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin mikroyapı analizleri Zeiss EVO 40XP SEM cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SEM analizleri, basınç dayanımı sonrasında elde edilen küçük numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. SEM analizlerinde görüntülerin net olarak elde edilebilmesi amacıyla küçük numuneler altınla kaplanmıştır.

3. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA (EXPERIMENTAL FINDINGS AND DISCUSSION)

3.1. Priz Süresi Bulguları (Findings of Setting Characteristics)

TS EN 196-3'e uygun olarak yapılan GDHT ikameli çimento hamurlarının priz başlama ve bitiş sürelerine ait deney sonuçları standart sapmalarını gösteren hata çubuklarıyla birlikte Şekil 2'de gösterilmiştir.



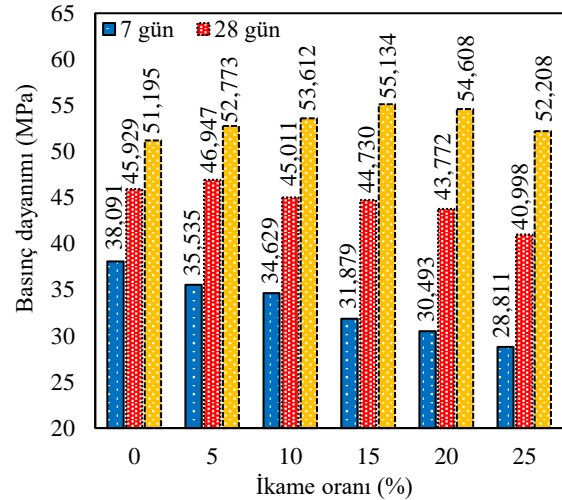
Şekil 2. Çimento hamuru priz süreleri (Setting times of cement pastes)

Şekil 2'de verilen deney sonuçları incelendiğinde GDHT ikame oranının artmasıyla priz başlangıç ve bitiş sürelerinin uzadığı görülmüştür. %5, %10, %15, %20 ve %25 GDHT ikameli çimento hamurlarının priz başlama süreleri referans (%0 GDHT ikameli) çimento hamuruna kıyasla sırasıyla %5,71, %14,29, %17,14, %22,85 ve %31,43 oranlarında artış göstermiştir. %5, %10, %15, %20 ve %25 GDHT ikameli çimento hamurlarının priz bitiş süreleri ise referans çimento hamuruna kıyasla %7,55, %15,09, %16,98, %22,64 ve %28,30 oranlarında artış göstermiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, GDHT'nin hidrasyona geç başladığı ve priz sürelerini uzattığı görülmüştür. Ayrıca ikame oranının artmasıyla hidrasyon sürelerinin uzadığı tespit edilmiştir. Bu durum literatürde yapılan çalışmalarla benzerlik göstermiştir [14-16]. Kim ve Choi [14], yapmış oldukları

çalışmada atık beton tozlarını çimentoya farklı oranlarda ikame etmişler ve hidrasyonun geciktiğini tespit etmişlerdir. Bu durumu ise atık beton tozlarının artmasıyla hidrasyon reaksiyonunu hızlandıran C₃A ve C₃S bileşenlerinin azalmasından dolayı olduğunu belirtmişlerdir. Wu vd. [30] ise atık beton tozlarını çimento hamurunda %50 ikame oranına kadar kullanmış ve ikame oranının artmasıyla priz sürelerinin uzadığını tespit etmişlerdir. Bu durumun nedenini, yapılan diğer çalışmada olduğu gibi çimento hamurundaki aktif bileşenlerin içeriğinin azalmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Yapılan çalışmada da literatüre benzer durumlar tespit edilmiş olup bu durumun nedeninin GDHT ikamesinin hidrasyon için gerekli olan aktif bileşen oranlarını azaltmasından dolayı olduğu düşünülmektedir.

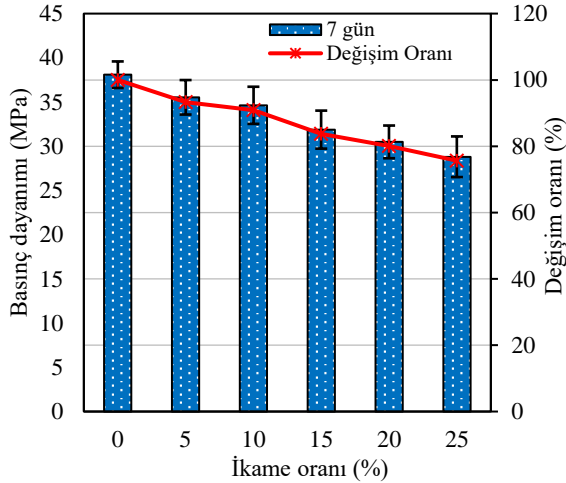
3.2. Basınç Dayanımı Bulguları (Findings of Compressive Strength Test)

TS EN 196-1'e uygun olarak üretilen çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük su kürü sonucundaki basınç dayanımı sonuçları Şekil 3'te gösterilmiştir. Basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde, GDHT ikameli harçların ilk günlerdeki dayanımlarının referans (%0 ikameli) harçlardan düşük olduğu ancak ileriki yaşlarda referans harçlardan daha yüksek dayanım gösterdiği görülmektedir.



Şekil 3. Basınç dayanımı sonuçları (Compressive strength test results)

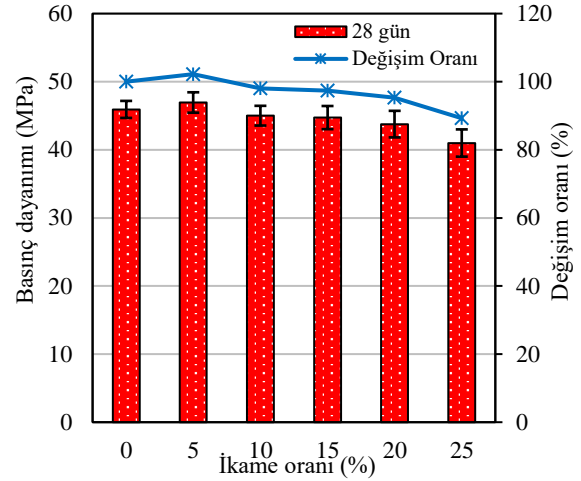
Şekil 4'te, 7 günlük kür süresi sonucunda basınç dayanımı testine tabi tutulan çimento harçlarının basınç dayanımı sonuçları ile GDHT ikameli harçların referans harçlara kıyasla basınç dayanımlarındaki yüzdesel değişim oranı 7 günlük basınç dayanımı standart sapmalarını gösteren hata çubuklarıyla birlikte gösterilmiştir. Basınç dayanımları belirlenirken eğilme dayanımı sonucunda elde edilen 2 parça halindeki numuneler kullanılmıştır. Her bir karışım toplamda 6 adet basınç dayanımı sonucunun ortalaması nihai değer olarak alınmıştır.



Şekil 4. 7 günlük basınç dayanımı sonuçları (7-day Compressive strength test results)

Şekil 4'te verilen 7 günlük basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde, GDHT ikame oranının artmasıyla basınç dayanımlarında azalmalar görülmüştür. %5, %10, %15, %20 ve %25 GDHT ikameli harçların basınç dayanımları referans harçlarla kıyaslandığında, sırasıyla %6,71, %9,09, %16,31, %19,95 ve %24,36 oranlarında düşüşler görülmüştür. Ayrıca ikame oranının artmasıyla birlikte dayanımlardaki yüzdesel kayıp oranı da artış göstermiştir. En yüksek standart sapma %15 ikame oranında 2,15 MPa olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürle benzerlik göstermiştir. Moon vd. [31] ile Kim ve Choi [14] atık beton tozunu çimentoya ikame etmişler ve ikame oranının artmasıyla birlikte 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarında azalmalar tespit etmişlerdir. Wu vd. [30] tarafından yapılan çalışmada da atık beton tozu ikamesi ile basınç dayanımlarının düştüğü görülmüştür. Bu durumun nedenini ise atık beton tozu ikamesinin, harçtaki aktif bileşenlerin miktarını ve hidratasyon ürünlerini azaltmasından kaynaklı olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca çimento esaslı tamamlayıcı malzemelerin, çimentolu kompozitlerin ilk günlerdeki hidratasyon gelişimlerinin yavaş olduğu ve dayanımı düşürdüğü göz önüne alınırsa elde edilen sonuçların literatürle uyumlu olduğu belirlenmiştir [32-35].

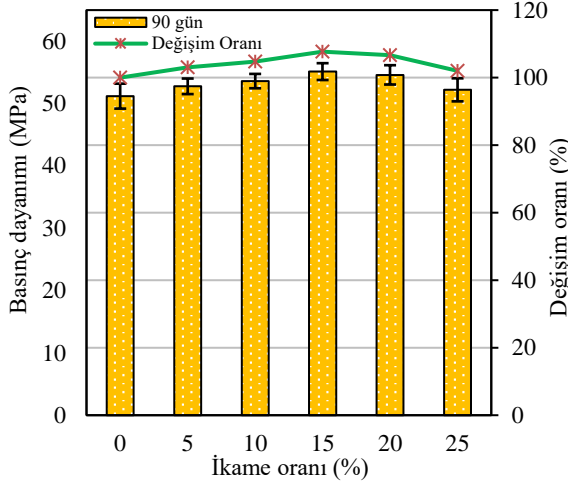
Şekil 5'te, 28 günlük kür süresi sonucunda basınç dayanımı testine tabi tutulan çimento harçlarının basınç dayanımı sonuçları ile GDHT ikameli harçların referans harçlara kıyasla basınç dayanımlarındaki yüzdesel değişim oranı 28 günlük basınç dayanımı standart sapmalarını gösteren hata çubuklarıyla birlikte gösterilmiştir.



Şekil 5. 28 günlük basınç dayanımı sonuçları (28-day compressive strength test results)

Şekil 5'te verilen 28 günlük basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde, %5 GDHT ikameli çimento harçlarının basınç dayanımlarının referans harçlara kıyasla artış gösterdiği ve en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu görülmektedir. En yüksek standart sapma %25 ikame oranında 2,00 MPa olarak elde edilmiştir. GDHT ikameli çimento harçlarının referans harçlara kıyasla basınç dayanımlarındaki yüzdesel değişim oranları incelendiğinde; %10, %15, %20 ve %25 GDHT ikame oranları için sırasıyla %2, %2,61, %4,70 ve %10,74 oranlarında düşüşler görülmüştür. İkame oranının artmasıyla birlikte dayanımlardaki yüzdesel kayıp oranları 7 günlük harçlarda olduğu gibi artış göstermiştir. Bu durumun nedeni, 7 günlük harçlarda olduğu gibi GDHT'nin harçlardaki aktif bileşenlerin miktarını ve hidratasyon ürünlerini azaltmasına bağlanmıştır. 7 ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçları birlikte incelendiğinde ise 28 günlük harçlardaki dayanım kayıplarındaki değişim oranının daha düşük seviyelerde olduğu görülmüştür. Bu durum, çimento esaslı tamamlayıcı malzemelerin ileriki yaşlardaki hidratasyon gelişimlerinin ilk günlere kıyasla daha iyi olduğu kanıtlar niteliktedir [29,31]. %5 GDHT ikameli çimento harçlarının basınç dayanımı ise referans harçlara göre %2,22 daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca %25 GDHT ikameli harçlar hariç tüm harç gruplarının 28 günlük basınç dayanımları, şartnamede 28 günlük harç numuneleri için verilen minimum basınç dayanımı (42,5 MPa) değerini geçmiştir.

Şekil 6'da 90 günlük kür süresi sonucunda basınç dayanımı testine tabi tutulan çimento harçlarının basınç dayanımı sonuçları ile GDHT ikameli harçların referans harçlara kıyasla basınç dayanımlarındaki yüzdesel değişim oranı 90 günlük basınç dayanımı standart sapmalarını gösteren hata çubuklarıyla birlikte gösterilmiştir.

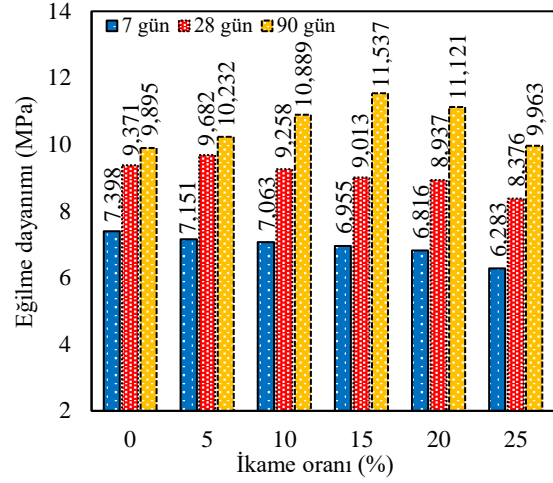


Şekil 6. 90 günlük basınç dayanımı sonuçları (90-day compressive strength test results)

Şekil 6'da verilen 90 günlük basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde, genel olarak GDHT ikame oranının artmasıyla basınç dayanımlarında artışlar olduğu görülmüştür. Şekil 6'da GDHT ikameli çimento harçlarının referans harçlara kıyasla basınç dayanımlarındaki yüzdesel değişim oranları incelendiğinde; %5, %10, %15, %20 ve %25 GDHT ikame oranları için sırasıyla %3,08, %4,72, %7,69, %6,67 ve %1,98 oranlarında artışlar olduğu tespit edilmiştir. En yüksek basınç dayanımı değerinin ise %15 GDHT ikameli çimento harçlarından elde edildiği görülmüştür. En yüksek standart sapma %25 ikame oranında 1,85 MPa olarak elde edilmiştir. Şekil 6'da verilen sonuçlar değerlendirildiğinde kür süresinin uzamasıyla, GDHT ikameli çimento harçlarının basınç dayanımlarının referans harçlara kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum, çimento esaslı tamamlayıcı malzemelerin hidrasyon gelişimlerinin ilk günlerde düşük ilerleyen günlerde ise yüksek olması ile açıklanabilmektedir.

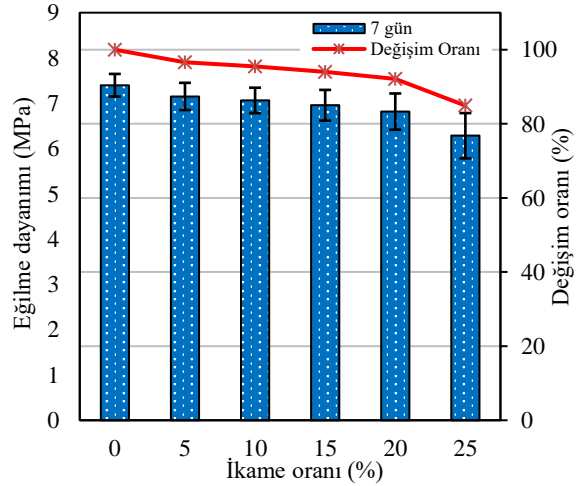
3.3. Eğilme Dayanımı Bulguları (Findings of Flexural Strength Test)

TS EN 196-1'e uygun olarak yapılan GDHT ikameli çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük su kürü sonucundaki eğilme dayanımı sonuçları Şekil 7'de gösterilmiştir. Eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde, basınç dayanımı sonuçları ile benzerlik göstermektedir. GDHT ikame oranının artmasıyla, 7 ve 28 günlük eğilme dayanımlarının azaldığı görülmüştür. Ancak 28 günlük eğilme dayanımları incelendiğinde %5 GDHT ikameli çimento harçlarının eğilme dayanımının, referans harçlara kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. 90 günlük eğilme dayanımlarında ise GDHT ikame oranının artmasıyla birlikte %15 ikame oranına kadar eğilme dayanımları artmış sonrasında ise düşüşe geçmiştir. İkamelilerin tümünün 90 günlük eğilme dayanımının, referans harçlardan daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 7. Eğilme dayanımı sonuçları (Flexural strength test results)

Şekil 8'de, 7 günlük kür süresi sonucunda eğilme dayanımı testine tabi tutulan çimento harçlarının eğilme dayanımı sonuçları ile GDHT ikameli harçların referans harçlara kıyasla eğilme dayanımlarındaki yüzdesel değişim oranı 7 günlük eğilme dayanımı standart sapmalarını gösteren hata çubuklarıyla birlikte gösterilmiştir. Her bir karışım grubu için 3 adet numune eğilme testine tabi tutulmuş olup bu sonuçların ortalaması nihai değer olarak alınmıştır. Numunelere ait standart hatalar grafik üzerinde gösterilmiştir.

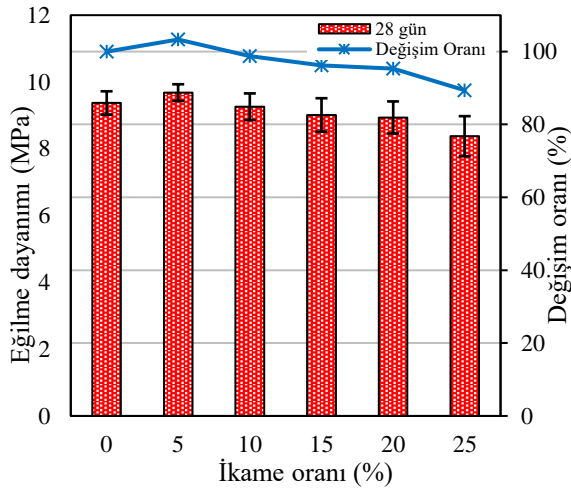


Şekil 8. 7 günlük eğilme dayanımı sonuçları (7-day flexural strength test results)

Şekil 8'de verilen 7 günlük eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde GDHT ikame oranının artmasıyla eğilme dayanımlarında azalmalar görülmüştür. Şekil 8'de verilen grafik incelendiğinde; %5, %10, %15, %20 ve %25 GDHT ikameli çimento harçlarının eğilme dayanımı referans harçlara kıyasla sırasıyla %3,34, %4,53, %5,99, %7,87 ve %15,07 oranlarında daha düşük çıkmıştır. En yüksek standart sapma %25 ikame oranında 0,5 MPa olarak elde edilmiştir. Ayrıca ikame oranının artmasıyla birlikte dayanımlardaki yüzdesel kayıp oranı da artış göstermiştir. Elde edilen sonuçlar 7 günlük

basınç dayanımı sonuçlarıyla paralellik göstermiştir. Ancak basınç dayanımlarındaki düşüş oranları, eğilme dayanımındaki düşüş oranlarından daha belirgin bir şekilde olmuştur. Bu durum literatürdeki çalışmalarla benzerlik göstermiştir [30]. Bu durumun nedeni Wu vd. (2021) [30] tarafından yapılan benzer bir çalışmada atık beton tozu ikamesinin, harçtaki aktif bileşenlerin miktarını azaltması ve hidrasyon ürünlerinin azalmasına neden olması ile açıklanmıştır. Ayrıca basınç dayanımında olduğu gibi çimento esaslı tamamlayıcı malzemelerin, çimentolu kompozitlerin ilk günlerdeki hidrasyon gelişimlerini yavaşlatması da eğilme dayanımındaki bu düşüşlerden sorumlu olmaktadır [32,33].

Şekil 9'da 28 günlük kür süresi sonucunda eğilme dayanımı testine tabi tutulan çimento harçlarının eğilme dayanımı sonuçları ile GDHT ikameli harçların referans harçlara kıyasla eğilme dayanımlarındaki yüzdesel değişim oranı 28 günlük eğilme dayanımı standart sapmalarını gösteren hata çubuklarıyla birlikte gösterilmiştir.

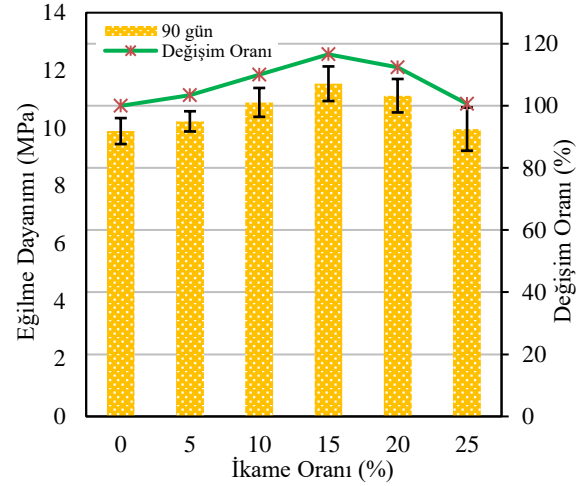


Şekil 9. 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları (28-day flexural strength test results)

Şekil 9'da verilen 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde; %5 GDHT ikameli çimento harçlarının eğilme dayanımının, referans harçlara göre daha yüksek olduğu görülmüştür. En yüksek standart sapma %25 ikame oranında 0,6 MPa olarak elde edilmiştir. Şekil 9'da verilen yüzdesel değişim oranları incelendiğinde; %10, %15, %20 ve %25 GDHT ikameli harçların eğilme dayanımı, referans harçlara kıyasla sırasıyla %1,21, %3,82, %4,63 ve %10,62 oranlarında daha düşük çıkmıştır. %5 GDHT ikameli çimento harçlarının eğilme dayanımı ise referans harçlara kıyasla %3,32 daha yüksek çıkmıştır. 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları, 28 günlük basınç dayanımına benzer bir eğilim göstermiştir. 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları birlikte incelendiğinde; 7 günlük eğilme dayanımı değerlerindeki yüzdesel değişim oranlarının, 28 günlük eğilme dayanımı değerlerindeki yüzdesel değişim oranlarından daha yüksek olduğu görülmektedir. Kür

süresi arttıkça yüzdesel değişim oranları düşmüştür. Bu durum kür süresinin uzamasıyla birlikte hidrasyonun geliştiğinin bir göstergesidir.

Şekil 10'da 90 günlük kür süresi sonucunda eğilme dayanımı testine tabi tutulan çimento harçlarının eğilme dayanımı sonuçları ile GDHT ikameli harçların referans harçlara kıyasla eğilme dayanımlarındaki yüzdesel değişim oranı 90 günlük eğilme dayanımı standart sapmalarını gösteren hata çubuklarıyla birlikte gösterilmiştir.



Şekil 10. 90 günlük eğilme dayanımı sonuçları (90-day flexural strength test results)

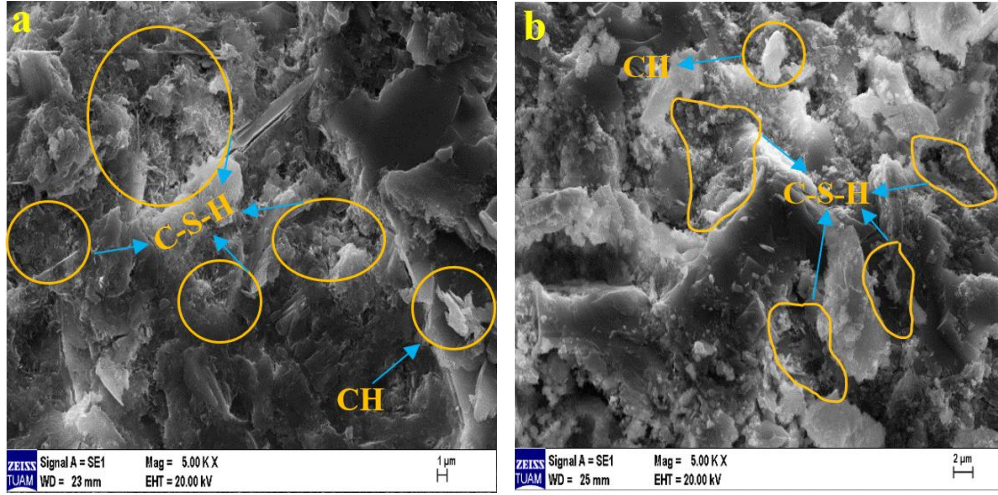
Şekil 10'da verilen 90 günlük eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde, GDHT ikame oranının artmasıyla birlikte referans harçlara kıyasla eğilme dayanımlarında artışlar görülmüştür. En yüksek standart sapma %25 ikame oranında 0,75 MPa olarak elde edilmiştir. 90 günlük basınç dayanımı sonuçlarında olduğu gibi %15 GDHT ikameli çimento harçlarının en yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu görülmüştür. %5, %10, %15, %20 ve %25 GDHT ikameli çimento harçlarının 90 günlük eğilme dayanımları, referans harçlarla kıyaslandığında sırasıyla %3,41, %10,05, %16,59, %12,39 ve %0,69 oranlarında daha yüksek çıkmıştır. Bu durum, basınç dayanımlarında olduğu gibi çimento esaslı tamamlayıcı malzemelerin hidrasyon gelişimlerinin yavaş olmasıyla açıklanabilmektedir.

Genel olarak basınç ve eğilme dayanımı testlerinden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, çimento harçlarındaki GDHT ikame oranının artmasıyla 7 ve 28 günlük basınç ve eğilme dayanımı sonuçlarında azalmalar görülmüştür. Elde edilen bu sonuçlar Moon vd. [31] ve Kim ve Choi [14] çalışmalarındaki sonuçlarla benzerlik göstermiştir. Ayrıca GDÇ ikameli çimento harçlarının kür süresinin uzamasıyla (90 gün) birlikte basınç ve eğilme dayanımı değerlerinde artışlar görülmüştür. Bu durum ileriki yaşlarda GDÇ ikameli çimento harçlarının eğilme ve basınç dayanımı değerlerinin referans harçlara kıyasla daha da yüksek olabileceğini göstermektedir.

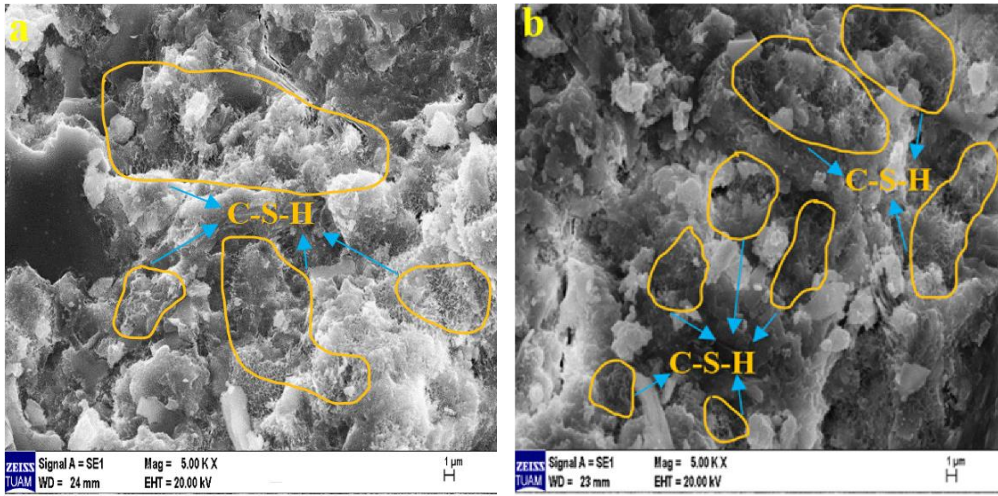
3.4. Mikroyapı Analizi (Microstructure Analysis)

Çalışma kapsamında, mikroyapı analizleri Ref ve GDÇ15 kodlu harçlar için 7 ve 90 günlük kür süresi sonunda gerçekleştirilmiştir. Bu sayede GDÇ ikamesinin ilk ve ileri günlerdeki hidrasyon gelişimleri incelenmiştir.

Şekil 12’de Ref ve GDÇ15 kodlu harçların 90 günlük su kürü sonucundaki SEM analizlerine ait görüntüler verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde; GDÇ15 kodlu harçlardaki CSH jelinin, Ref kodlu harçlara kıyasla daha yoğun olduğu görülmektedir. Bu durum, çimento esaslı tamamlayıcı malzemelerin hidrasyon gelişimlerinin ilerleyen günlerde daha yoğun olması ile



Şekil 11. (a) Ref ve (b) GDÇ15 kodlu harçlara ait 7 günlük SEM görüntüleri (7-day SEM images of (a) Ref (b) GDÇ15)



Şekil 12. (a) Ref ve (b) GDÇ15 kodlu harçlara ait 90 günlük SEM görüntüleri (90-day SEM images of (a) Ref (b) GDÇ15)

Şekil 11’de Ref ve GDÇ15 kodlu harçların 7 günlük su kürü sonucundaki SEM analizlerine ait görüntüler verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde; Ref kodlu harçlarda, GDÇ15 kodlu harçlara kıyasla daha yoğun CSH jeli görülmektedir. Çimento esaslı tamamlayıcı malzemelerin hidrasyon gelişimleri ilk günlerde yavaş olduğu için GDÇ15 kodlu harçlardaki CSH yoğunluğu, Ref kodlu harçlara kıyasla daha azdır. SEM görüntülerinden elde edilen sonuçlar basınç ve eğilme dayanımı sonuçlarını destekler niteliktedir. Çimentolu kompozitlerin mekanik özelliklerinin CSH jellerinin yoğunluğa bağlı olduğu düşünülürse, GDÇ15 kodlu harçların mekanik özelliklerinin Ref kodlu harçlardan düşük olmasının nedeni Şekil 11 ile desteklenmektedir.

açıklanabilmektedir. SEM görüntülerinden elde edilen sonuçlar, 90 günlük eğilme ve basınç dayanımı sonuçlarını destekler niteliktedir. GDÇ15 kodlu harçlardaki CSH yoğunluğunun fazla olması basınç ve eğilme dayanımının da yüksek olmasını sağlamıştır. Ayrıca 90 günlük SEM görüntüleri 7 günlük SEM görüntüleriyle kıyaslandığında, CSH yoğunluğunun kür süresinin artmasıyla daha da arttığı görülmektedir. Bu durum çimento esaslı tamamlayıcı malzemelerin hidrasyon gelişimlerinin ilerleyen günlerde daha iyi olduğunu bir kez daha kanıtlar niteliktedir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Hidratasyonunu tamamlamamış 7 günlük 15×15×15 cm boyutlarındaki küp numuneler kırılıp iri agregalardan ayrıştırılmış ve harç fazı ise toz haline getirilerek elde edilen geri dönüştürülmüş harç tozu (GDHT) çimento yerine ikame edilerek çimento bağlayıcılı kompozitler üzerinde etkileri araştırılmıştır. GDHT, çimento bağlayıcılı harç karışımlarına çimento ağırlığına %5, %10, %15, %20 ve %25'i oranında ikame edilmiştir. Hazırlanan karışımlar için priz başlangıç ve bitiş süreleri, eğilme ve basınç dayanım deneyleri ile mikroyapı analizleri uygulanmıştır. Elde edilen ana sonuçlar sunulmuştur.

1. GDHT içeren hamurunun ikame oranı arttıkça priz başlangıç ve priz bitiş süreleri uzatmıştır. Elde edilen sonuçlara göre GDHT prizi geciktirdiği sonucuna varılmıştır. Bu durumun GDHT ikamesinin hidratasyon için gerekli olan C₃A ve C₃S aktif bileşen oranlarını azaltmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
2. 7 ve 28 günlük basınç ve eğilme dayanımları incelendiğinde GDHT ikame oranının artmasıyla basınç ve eğilme dayanımlarında azalmalar görülmüştür. 90 günlük basınç ve eğilme dayanımları incelendiğinde ise ikame oranının artmasıyla birlikte genel olarak dayanım artışı olduğu görülmüştür. Ayrıca %25 ikame oranında dahi basınç ve eğilme dayanımları referans harçların dayanımlarından daha yüksek olduğu görülmüştür.
3. GDHT ikameli çimento harçlarının kür süresinin uzamasıyla birlikte basınç ve eğilme dayanımı değerlerinde artışlar olduğu görülmüştür. Bu durum GDHT'nin çimento bağlayıcılı kompozitlerde ilk günlerde hidratasyon gelişimlerini yavaşlatıp ileriki günlerde ise hidratasyon gelişimini hızlandırmasından kaynaklanmaktadır.
4. 7 günlük SEM görüntüleri incelendiğinde referans harçlardaki CSH yoğunluğunun, %15 GDHT ikameli harçlardan daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum çimento esaslı tamamlayıcı malzemelerin erken yaşlarda hidratasyon gelişimlerinin yavaş olmasına bağlanmıştır. 90 günlük SEM görüntüleri incelendiğinde ise referans harçlardaki CSH yoğunluğunun, %15 GDHT ikameli harçlardan daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durum çimento esaslı tamamlayıcı malzemelerin ilerleyen yaşlardaki hidratasyon gelişimlerinin daha iyi olmasına bağlanmıştır.

Sonuç olarak GDHT, çimentoya %25 oranına kadar kullanılması tavsiye edilmiştir. Çimento üretim maliyetleri ve doğaya vermiş olduğu zararlar göz önünde bulundurulduğunda, GDHT, çimentoya ikame edilmesi ile hem atık malzemelerin geri dönüşümü sağlanacak hem de çimento üretimi sonucunda meydana gelen çevre kirliliği önemli ölçüde azaltılacaktır. İleride yapılacak çalışmalarda daha yüksek ikame oranına sahip GDHT'nin çimento bağlayıcılı kompozitlerin mühendislik özelliklerine etkileri araştırılabilir. Ayrıca

%100 GDHT içeren alkali aktivite/geopolimer kompozitlerin mühendislik özellikleri incelenebilir.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Gazi GÜNEL: Deneyleri yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir.

Erdinç Halis ALAKARA: Deneyleri yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir.

Özer SEVİM: Deney sonuçlarını analiz etmiş, makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

İlhami DEMİR: Deney sonuçlarını analiz etmiş, makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI

(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Kaliyavaradhan S. K. and Ling T. C., "Potential of CO₂ sequestration through construction and demolition (C&D) waste an overview", *Journal of CO₂ Utilization*, 20: 234-242, (2017).
- [2] Shaaban M., "Properties of concrete with binary binder system of calcined dolomite powder and rice husk ash", *Heliyon*, 7(2): e06311, (2021).
- [3] Hendriks C. A., Worrell E., De Jager D., Blok K. and Riemer P., "Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry", *In Proceedings of the fourth international conference on greenhouse gas control technologies*, Interlaken, Austria, IEA GHG R&D Programme, 939-944, (1998 August).
- [4] Aydın Ş., Çelik A. G. ve Güneş İ., "Geri Dönüştürülmüş Beton ve Tuğla Agregalarının Beton Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması", *MT Bilimsel*, 20: 11-22, (2021).
- [5] Singh, N. and Singh S. P., "Carbonation resistance and microstructural analysis of low and high volume fly ash self compacting concrete containing recycled concrete aggregates", *Construction and Building Materials*, 127: 828-842, (2016).
- [6] Wu H., Zuo J., Yuan H., Zillante G. and Wang J., "A review of performance assessment methods for construction and demolition waste management", *Resources, Conservation and Recycling*, 150: 104407, (2019).
- [7] Demir, İ. ve Elmalı M., "Organik atıkların yapı malzemesi olarak kullanılabilirliğinin

- araştırılması”, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(4): 1303-1311, 2020.
- [8] Tavakoli D., Hashempour M. and Heidari A., “Use of waste materials in concrete: A review”, *Pertanika J. Sci. Technol.*, 26(2): 499-522, (2018).
- [9] Gümüşsoy M., “*Geri dönüştürülmüş agregaların harç özelliklerine etkisi*”, yüksek lisans tezi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2019).
- [10] Sefidehkan H. P. ve Şimşek O., “Farklı oranlarda geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen betonun bazı mühendislik özelliklerinin araştırılması”, *Politeknik Dergisi*, 21(1): 83-91, (2018).
- [11] Durmuş, G., Şimşek, O. ve Dayı M. “Geri dönüşümlü iri agregaların beton özelliklerine etkisi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(1): 183-189, (2008).
- [12] Şimşek O. ve Demir Ş., “Mermer Tozu Katkılı Lifli Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Lif Tipi ve Oranının Etkisi”, *Politeknik Dergisi*, 1-1.
- [13] Korkut M. K. ve Şimşek O., “İri Agregalar Olarak İnşaat Yıkıntı Atığı, İnce Agregalar Olarak Doğal ve Kırmızı Kum Kullanılan Betonun Bazı Mühendislik Özelliklerinin İncelenmesi”, *International Journal of Engineering Research and Development*, 13(2): 508-520, (2021).
- [14] Kim Y. J. and Choi Y. W., “Utilization of waste concrete powder as a substitution material for cement”, *Construction and Building Materials*, 30: 500-504, (2012).
- [15] Sui Y., Ou C., Liu S., Zhang J. and Tian Q., “Study on properties of waste concrete powder by thermal treatment and application in mortar”, *Applied Sciences*, 10(3): 998, (2020).
- [16] Rahees R., Deepak C. and Abdul V., Muhammed S., “Demolished Waste Concrete Powder As Partial Replacement Of Cement”, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 6(4): 56-59, (2017).
- [17] Şimşek O. ve Çiftçi M.M., “Tuğla Ununun Çimentoda Puzolanik Katkı Maddesi Olarak Kullanılabilirliği”, *Politeknik Dergisi*, 9(4): 325-329, (2006).
- [18] Şimşek O., Erdal M. ve Sancak E., “Silis dumanının çelik lifli betonun eğilme dayanımına etkisi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20(2): 211-215, (2005).
- [19] Şimşek O., Sancak E. ve Çelik M., “Silis dumanı kullanımının çimento priz başlama bitiş sürelerine etkisi”, *Politeknik Dergisi*, 4(4), (2001).
- [20] Wu H., Liang C., Xiao J., Xu J. and Ma Z., “Early-age behavior and mechanical properties of cement-based materials with various types and fineness of recycled powder”, *Structural Concrete*, 23(2): 1253-1272, (2022).
- [21] Demirel C. ve Şimşek O., “Erken yaşdaki atık betonların geri dönüşüm agregası olarak beton üretiminde kullanılabilirliği ve sürdürülebilirlik açısından incelenmesi”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 3(1): 226-235, (2015).
- [22] Rosman M. S., Abas N. F. and Mydin M. O., “Concrete waste as a cement replacement material in concrete blocks for optimization of thermal and mechanical properties”, *Sustainable Built Environment Symposium*, SHS Web of conferences, 09/09/2014, p. 01013, (2014).
- [23] Horsakulthai V., “Effect of recycled concrete powder on strength, electrical resistivity, and water absorption of self-compacting mortars”, *Case Studies in Construction Materials*, 15: e00725, (2021).
- [24] Kwon E., Ahn J., Cho B. and Park D. “A study on development of recycled cement made from waste cementitious powder”, *Construction and Building Materials*, 83: 174-180, (2015).
- [25] He Z., Zhu X., Wang J., Mu M. and Wang Y. “Comparison of CO2 emissions from OPC and recycled cement production”, *Construction and Building Materials*, 211: 965-973, (2019).
- [26] Wang J., Mu M. and Liu Y. “Recycled cement”, *Construction and Building Materials*, 190: 1124-1132, (2018).
- [27] TS EN 196-1, “Çimento deney metotları-Bölüm 1: Dayanım tayini”, (2016).
- [28] TS EN 196-3, “Çimento deney yöntemleri-Bölüm 3: Priz süreleri ve genleşme tayini”, (2016).
- [29] Tang Q., Ma Z., Wu H. and Wang W., “The utilization of eco-friendly recycled powder from concrete and brick waste in new concrete: A critical review”, *Cement and Concrete Composites*, 114: 103807, (2020).
- [30] Wu H., Yang D. and Ma Z., “Micro-structure, mechanical and transport properties of cementitious materials with high-volume waste concrete powder and thermal modification”, *Construction and Building Materials*, 313: 125477, (2021).
- [31] Moon D. J., Moon H. Y. and Kim Y.B., “Fundamental properties of mortar containing waste concrete powder”, *Geosystem Engineering*, 8(4): 95-100, (2005).
- [32] Sevim O., Baran M. and Demir Ş., “Mechanical and physical properties of cementitious composites containing fly ash or slag classified with help of particle size distribution”, *Revista Romana de Materiale*, 51(1): 67-77, (2021).
- [33] Sevim Ö. and Demir İ., “Physical and permeability properties of cementitious mortars having fly ash

- with optimized particle size distribution”, *Cement and Concrete Composites*, 96: 266-273, (2019).
- [34] Demir İ., Güzelkücük S. and Sevim Ö. “Effects of sulfate on cement mortar with hybrid pozzolan substitution”, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21(3): 275-283, (2018).
- [35] Sevim Ö. and Demir İ. “Optimization of fly ash particle size distribution for cementitious systems with high compactness”, *Construction and Building Materials*, 195: 104-114, (2019).