

Atf İçin: Şenol, A. F. ve Karakurt, C. (2023). Öğütülmüş Pişmiş Kil ve Mermer Atıklarının Çimentolu Harçlarda Dayanım Gelişimine Etkisi. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(4), 2692-2705.

To Cite: Şenol, A. F. & Karakurt, C. (2023). Effect of Ground-Baked Clay and Marble Wastes on Strength Development of Cementitious Mortars. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13(4), 2692-2705.

Öğütülmüş Pişmiş Kil ve Mermer Atıklarının Çimentolu Harçlarda Dayanım Gelişimine Etkisi

Ahmet Ferdi ŞENOL^{1*}, Cenk KARAKURT¹

Öne Çıkanlar:

- Pişmiş kil atığı işlenebilirlikleri azaltdı
- Karışımda %5'ten daha fazla atık mermer kullanımı dayanımları azaltdı
- Harç serilerinin 7, 28, 56 ve 90 günlük dayanımları incelendi

Anahtar Kelimeler:

- Pişmiş kil atığı,
- Mermer atığı,
- Çimento,
- Porozite,
- Mekanik özellikler

ÖZET:

Türkiye'deki nüfus artışı, yapıların hizmet ömrünün tamamlanması, kentsel dönüşümlerin uygulanması, yeni konut ve altyapı ihtiyaçları ile birlikte çimentoya olan talep istikrarlı bir şekilde artmaya devam etmektedir. Bununla birlikte çimento üretimindeki artış, yüksek karbon emisyonuna ve fazladan enerji tüketimine de sebep olmaktadır. Bu çalışmada, inşaat endüstrisindeki çimento kullanımını azaltmak, atık mermer ve inşaat yıkım sahaları kaynaklı çevre kirliliğini bertaraf etmek amacıyla, öğütülmüş pişmiş kil (K) ve mermer (M) atıklarının çimentolu harçlarda kullanımı araştırılmıştır. Bu amaçla tasarlanan harç serilerinde, çimento yerine ağırlıkça; %0 (kontrol), %5, %10 ve %15 oranlarında atık toz malzemeler kullanılarak yedi serilik harç karışımları üretilmiş, taze harç serilerinin işlenebilirlik özellikleri belirlendikten sonra üretilen numunelere; 7, 28, 56 ve 90 günlük standart kür uygulanarak fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Taze harç serilerinde, K ikamesi arttıkça yayılma değerleri azalırken, M ikamesi arttıkça yayılma değerleri de artmıştır. Serilere uygulanan 90 günlük kür sonunda elde edilen en yüksek dayanım sonuçları kontrol serisine göre karşılaştırıldığında; çimento yerine %10 oranında K kullanılarak üretilen harçların basınç ve eğilme dayanımları sırasıyla; %8 ve %4 oranlarında artarken, %5 oranında M kullanılarak üretilen harçların dayanımları da %2 ve %4 oranlarında artmıştır.

Effect of Ground-Baked Clay and Marble Wastes on Strength Development of Cementitious Mortars

Highlights:

- Addition of baked clay waste reduced workability
- The use of more than 5% waste marble in the mixture reduced the strengths
- The 7, 28, 56 and 90-day strengths of the mortar series were examined

Keywords:

- Baked clay waste,
- Marble waste,
- Cement,
- Porosity,
- Mechanical properties

ABSTRACT:

The demand for cement continues to increase steadily in Turkey due to population growth, completion of the service life of buildings, implementation of urban transformations, new housing and infrastructure needs. However, the increase in cement production also leads to high carbon emissions and extra energy consumption. In this study, the use of ground baked clay (K) and marble (M) wastes in cement mortars was investigated in order to reduce the use of cement in the construction industry and to eliminate environmental pollution caused by waste marble and construction demolition sites. In the mortar series designed for this purpose, seven series of mortar mixtures were produced by using waste powder materials at 0% (control), 5%, 10% and 15% by weight instead of cement. After determining the workability properties of the fresh mortar series, the physical and mechanical properties of the samples were investigated by applying standard curing for 7, 28, 56 and 90 days. In the fresh mortar series the spreading values decreased as the K substitution increased, while the spreading values increased as the M substitution increased. When the highest strength results obtained at the end of 90-day curing were compared with the control series; the compressive and flexural strengths of the mortars produced by using 10% K instead of cement respectively; increased by 8% and 4%. The strengths of the mortars produced using 5% M are also; increased by 2% and 4%.

¹Ahmet Ferdi ŞENOL ([Orcid ID: 0000-0002-6663-3340](https://orcid.org/0000-0002-6663-3340)), Cenk KARAKURT ([Orcid ID: 0000-0002-4204-5341](https://orcid.org/0000-0002-4204-5341)), Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bilecik, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Ahmet Ferdi ŞENOL, e-mail: ahmetferdi.senol@bilecik.edu.tr

GİRİŞ

Dünya üzerindeki nüfus ve kentleşme artışı, inşaat sektöründeki beton üretimi ile birlikte Portland çimentosunun üretimini de artırmaktadır. T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nca en son yayımlanan Çimento Sektör Raporunda (Anonim, 2022); 2021 yılındaki küresel çimento üretiminin yaklaşık 4.4 milyar ton olduğu, bu üretimlerin %59'unun Çin tarafından, %4.1'inin de Avrupa Birliği ülkeleri tarafından gerçekleştirildiği bildirilmiştir. Türkiye ise 78.9 milyon tonluk üretimi ile dünya çimento üretiminde 5'inci sırada yer almıştır. Çimento üretimindeki bu artışın, daha fazla enerji tüketimine ve yüksek karbon emisyonlarına sebep olduğu bilinmektedir. Bu nedenle araştırmacılar, beton sektöründe çimento kullanımını azaltabilmek amacıyla, farklı malzemelerin çimento yerine kullanımını araştırmaktadırlar.

Ülkemizde meydana gelen depremler, kentsel dönüşümler ve yapıların hizmet ömrünün tamamlanması gibi nedenlerle birçok inşaat yapısı yıkılarak çevremizde atık sahalar oluşturmaktadır. Bu atık sahaların bertaraf edilerek ekonomiye kazandırılması amacı ile inşaat yıkım alanlarındaki atık pişmiş kil tuğla ve kiremitlerin öğütülerek, çimento yerine kullanılabilirliği kapsamlı bir şekilde araştırılmalıdır. Afet ve Acil Durum Yönetimi (AFAD) Deprem Dairesi Başkanlığının verilerine göre (Anonim, 2023); 6 Şubat 2023 tarihinde, sırası ile merkez üssü Pazarcık (Kahramanmaraş) ve Elbistan (Kahramanmaraş) olan 7.7 ve 7.6 (Mw) büyüklüklerinde depremler meydana gelmiştir. Bu depremler, Türkiye'nin 11 ilini etkileyerek, son yüzyılda yaşanan en yıkıcı depremleri olarak kayda geçmiştir. Depremlerin etkisi ile birçok şehirde yapılar yıkılarak yüksek miktarda inşaat yıkım atıkları oluşturmuştur (Şekil 1). Deprem sonrasında oluşan, ağır ve orta hasarlı betonarme binaların duvarları ile yerleşim alanlarındaki yığma binaların inşaat yıkım atıkları; çoğunlukla pişmiş kilden üretilen tuğla ve kiremitlerden meydana gelmektedir.



Şekil 1. Kahramanmaraş merkezli depremler (6 Şubat 2023) sonrası oluşan inşaat yıkım atıkları (Antakya)

Atık pişmiş kil tuğla ve kiremit tozlarının (K) yapısı incelendiğinde; bu tozların puzolanik malzeme özelliğinde olduğu ve bileşimlerindeki; SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 'ün toplam yüzdelerinin genellikle %70'in üstünde olduğu görülmektedir. Öğütülmüş pişmiş killerin yüksek su emmesine sahip olması, çimento yerine ikame edildiğinde çimento esaslı malzemelerin işlenebilirliğini de azaltabilmektedir (Atyia ve ark., 2021). Zhao ve ark. (2020), pişmiş kil atıkları için yapılan öğütme süresinin artmasıyla, kil taneciklerinin özgül yüzey alanlarının ve puzolanik aktivitelerinin arttığını, ancak uzun öğütme süresinin de topaklanmaya ve yüksek enerji tüketimine neden olduğunu değerlendirmişlerdir. K'nin beton teknolojisinde kullanımı, son yıllarda araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Ge ve ark. (2015) yaptıkları bir çalışmada, çimentonun üç farklı partikül boyutlarındaki tuğla tozu ile; %10, 20 ve 30 oranlarında değiştirilmesinin, betonun taze ve sertleşmiş özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, %10'un üzerindeki tuğla tozu ikamesinin, taze betonun çökme miktarını büyük ölçüde azalttığını, ikame oranlarının artması ile erken yaş dayanımlarının azaldığını, ancak kür yaşı arttıkça tuğla tozu ikameli beton dayanım sonuçlarının

kontrol betonunkine benzer sonuçlarda olduğunu tespit etmişlerdir. Wu ve ark. (2021), ultra yüksek dayanımlara sahip çimentolu harçların üretiminde, atık pişmiş kil tuğla tozlarını hacimce; %10, 20, 30, 40 ve 50 oranlarında çimento yerine kullanmışlardır. Atık pişmiş kil tuğla tozlarının %20 oranında ikame edildiği harç serilerinin, basınç ve eğilme dayanımlarında en yüksek değerlere ulaştığı ve çimentonun atık pişmiş kil tuğla tozları ile ikame edilmesinin, erken yaşlardaki toplam hidrasyon ısısını azalttığını tespit etmişlerdir.

Türkiye’de çevre sorunu oluşturan diğer bir atık üründe, ülkemizin en yüksek ihracat payına sahip doğal taşlarından olan mermerlerin, üretimi sonrası ortaya çıkan atık mermer ürünleridir. Mermer atıkları; toz, bulamaç ve mermer parçaları şeklinde arazilere gelişigüzel dökülerek ocak ve tesislerin yakınındaki su kaynaklarının ve yeşil arazilerin kirletilmesine sebep olmaktadır (Boğa ve Şenol, 2023). Mermer bloklarının %70’i taş ocağından çıkarma ve kesme işlemlerinden sonra atık olarak çevrede depolanırken, bu oranın %40’ı, kesim ve şekillendirme için kullanılan sistem nedeniyle atık mermer çamuruna dönüşmektedir (Bilir ve ark., 2022). Mermer; kalker (CaCO_3) ve dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) yüksek sıcaklık ve basınç altında yeniden kristalleşmesi sonucu oluşan doğal bir taşıdır (Demirel ve Alyamaç, 2018). Günümüze kadar yapılan bazı çalışmalarda; atık mermer tozunun (M) çimento ikamesi olarak, atık mermer parçalarının da agrega ikamesi olarak inşaat teknolojisindeki kullanımı araştırılmıştır.

Belkadi ve ark. (2023), farklı inceliklerdeki M’yi, çimento yerine; %5, 10, 15 ve 20 oranlarında kullanarak harç serileri oluşturmuşlar ve 28 günlük kür sonundaki numuneler üzerinde fiziksel ve mekanik deneyler gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda, M’nin özgül yüzey alanının, harçların mekanik dayanımı ve su emmesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu, sürdürülebilir ve ekonomik harçların imalatında; çimento yerine, yaklaşık $4900 \text{ cm}^2/\text{g}$ ortalama incelikte ve %5 ile %8 ağırlık oranlarında M kullanmanın uygun olacağını değerlendirmişlerdir. Çelikten ve Canbaz (2021), çimento yerine ağırlıkça; %5, 10, 15 ve 20 oranlarında atık andezit ve M’yi ayrı ayrı kullanarak harç numuneleri üretmişler, üretilen numuneler üzerinde ultrases geçiş hızı, eğilme ve basınç dayanımı deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçlarına göre, çimento yerine kullanılacak M için en uygun ikame oranının; %15 olabileceğini bildirmişlerdir. Seghir ve ark. (2018), Portland çimentosunun %15 oranlarına kadar M ile değiştirilmesinin, hava ile kürlenmiş çimento harcının fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda; M ilavesi ile çimento harçlarının kıvam ve priz sürelerinin çok düşük aralıklarda değiştiği, M’nin %10’dan fazla ikame edilmesi ile harçların mekanik özelliklerinin düşme eğiliminde olduğu ve %5’e kadar yapılan ikamenin, en uygun sonuçları oluşturduğunu bildirmişlerdir.

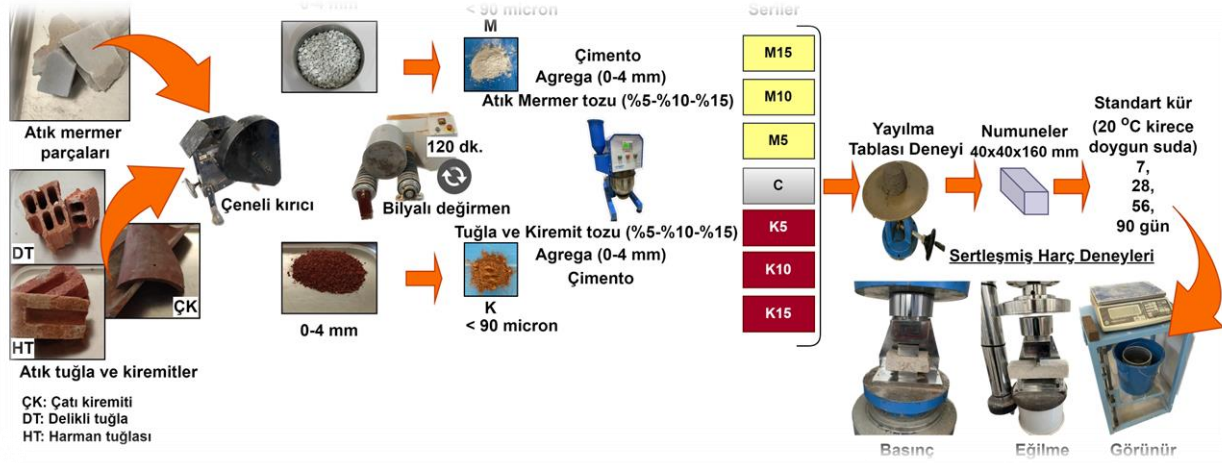
Günümüze kadar yapılan çalışmalarda, atık mermerlerin beton teknolojisinde çoğunlukla dolgu malzemesi (ince veya kaba agrega) olarak kullanıldığı tespit edilmiştir. Literatürdeki birçok beton ve harç çalışmasında, atık mermerlerin agrega yerine kullanılması, çimento yerine kullanılmasına göre mekanik özellikler üzerinde daha fazla etkili olmuştur. Bu kapsamda, öğütülmüş mermer atıklarının çimento yerine ikame edildiği harçların, farklı kür sürelerindeki mekanik özellikleri ile ilgili daha fazla araştırmaya ihtiyaç bulunmaktadır. Bununla birlikte, yakın zamanda Türkiye’de meydana gelen ve son yüzyılın en büyük depremlerinin etkisi ile oluşan yüksek miktardaki pişmiş kil tuğla ve kiremit atıklarının da geri dönüştürülerek farklı kullanım alanlarında değerlendirilmesine ihtiyaç bulunmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, atık mermer sahalarından elde edilen mermer parçaları ile inşaat yıkım sahalarından elde edilen atık pişmiş kil tuğla ve kiremitlerin öğütülmesi ile elde edilen tozların, çimento harçlarında belli oranlarda kullanımıyla üretilen numunelerin, farklı kür sürelerindeki fiziksel ve mekanik özelliklerini araştırmaktır. Böylece, ülkemizdeki atık mermer alanları ve inşaat yıkım

sahalarının bertaraf edilerek ekonomik ürünlere dönüştürülmesine katkıda bulunabileceği değerlendirilmektedir. Bu amaçla yapılan çalışmada, çimento yerine ağırlıkça; %0, 5, 10 ve 15 oranlarına kadar K ve M'nin ayrı ayrı kullanılarak üretilen harçların; 7, 28, 56 ve 90 günlük standart kür sonundaki fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır.

MATERYAL VE METOT

Harç serilerinin üretimi ve uygulanan deneyler Şekil 2'deki akış şemasında gösterilmiştir.



Şekil 2. Akış şeması

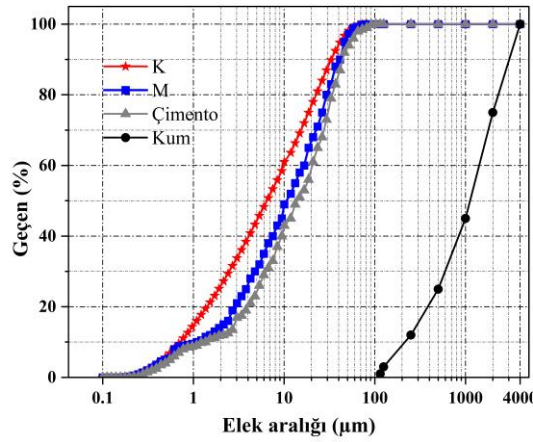
Materyal

Çalışmada kullanılan K, şehir merkezindeki inşaat yıkım alanlarındaki; harman tuğlası (HT), çatı kiremiti (ÇK) ve delikli tuğlaların (DT) toplanmasıyla, M ise; yerel mermer kesim işletmelerinden temin edilen atık mermer parçalarının toplanması ile elde edilmiştir. İnşaat yıkımları içerisindeki tuğla ve kiremit atıkları toplandıktan sonra çevresindeki kirleticileri ortadan kaldırmak amacıyla, harçlı tabakaları ayrılarak temizlenmiştir. Daha sonra, 105 °C'de 24 saat boyunca etüvde kurutularak içeriğindeki nem uzaklaştırılmış ve ürün gruplarına göre (ÇK, DT, HT ve M) ayrılarak, laboratuvarındaki çeneli kırıcıda 0-4 mm boyutlarına getirilmiştir. Son işlem olarak, malzemelerin yüzey alanını artırmak ve toz haline getirmek için her bir çeşidinden (ÇK, DT ve HT'den) eşit miktarda alınarak hazırlanan atık pişmiş kil paketi (K) ve M, laboratuvarındaki bilyalı değirmende 60 devir/dk hızla 120 dakika boyunca öğütülerek %95'inin 90 µm'lik elekten geçebilecek şekilde olması sağlanmıştır.

Harç serilerinin üretiminde; Vezirhan Çimento Fabrikasından temin edilen CEM I 42.5 R Portland çimentosu ve 0-4 mm elek aralığındaki (incelik modülü; 2.55) Osmaneli doğal nehir kumu (özgül ağırlık; 2.65) kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılan çimento, M ve K (ÇK, DT ve HT) üzerinde yapılan kimyasal analiz sonuçları Çizelge 1'de, kullanılan toz malzemeler ve kumun tanecik boyut analizi Şekil 3'te verilmiştir. Çizelge 1'de görüldüğü üzere çimento ve M'nin ana kimyasal bileşeni CaO iken, öğütülmüş pişmiş kil atıklarının SiO₂'dir. Ayrıca, Çizelge 1'deki ÇK, DT ve HT'nin SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ toplamları, %70'in üstündedir. TS 25 (2015)'e göre bu oksitlerin ağırlıkça toplamının en az %70 olması, bu malzemelerin doğal puzolanların sahip olması gereken bir özelliği karşıladığını göstermektedir. Harç serilerinin üretiminde, karışım suyu olarak şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

Çizelge 1. Toz malzemelerin kimyasal ve fiziksel analizleri

Oksitler. %	ÇK	K DT	HT	M	CEM I 42.5R
SiO ₂	43.7	48.9	45.6	1.2	18.7
Al ₂ O ₃	15.7	16.2	17.2	-	4.6
Fe ₂ O ₃	12.2	8.1	8.8	1.2	3.4
CaO	8.8	4.7	7.5	72.1	63.7
MgO	5.2	6.5	6.8	0.4	1.3
SO ₃	0.3	3.5	0.3	-	2.7
K ₂ O	1.6	3.2	3.2	-	0.7
TiO ₂	1.9	0.8	0.8	-	-
P ₂ O ₅	1.3	1.2	1.1	-	-
MnO	0.2	0.1	0.1	-	-
Kızdırma Kaybı	9.1	6.8	8.6	25.1	3.9
Serbest CaO	-	-	-	-	1.1
Özgül yüzey alanı cm ² /g		6040		4640	3295
Özgül ağırlık		2.80		2.35	3.12



Şekil 3. Toz malzemeler ve kumun tanecik boyut analizi

Metot

Harç karışımları; TS EN 196-1 (2016) standartlarına göre, 7 farklı seri olarak hazırlanmıştır. K ve M, çimento ile ağırlıkça; %5, %10 ve %15 oranlarında değiştirilmiştir. Karışım serilerine ilave olarak bağlayıcının sadece çimentodan oluştuğu kontrol (C) karışım serisi de üretilmiştir. Tüm serilerde; agrega/bağlayıcı oranı; 3 ve su/bağlayıcı oranı; 0.5 olarak sabit oranlarda kullanılmıştır. Karışım serilerindeki bağlayıcı ifadesi; çimento, M veya K'den oluşmaktadır. Harç serileri; C, M5, M10, M15, K5, K10 ve K15 olarak adlandırılmıştır. Seri kodlarındaki M; öğütülmüş mermer atıklarını, K; öğütülmüş pişmiş kil atıklarını, sayılar ise çimento yerine ağırlıkça ikame edilen toz yüzdesini ifade etmektedir. Örnek olarak, M5; %5 oranında öğütülmüş mermer atıklarını içeren harç serisidir. Harç serilerindeki malzeme karışım içerikleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Harçların karışım içerikleri (g)

Seriler	ÇK	K DT	HT	M	Çimento	Kum	Su
C	-	-	-	-	450	1350	225
K5	7.5	7.5	7.5	-	427.5	1350	225
K10	15	15	15	-	405	1350	225
K15	22.5	22.5	22.5	-	382.5	1350	225
M5	-	-	-	22.5	427.5	1350	225
M10	-	-	-	45.0	405	1350	225
M15	-	-	-	67.5	382.5	1350	225

Taze harç serilerinin yayılma tablası ile işlenebilirlik tayini, TS EN 1015-3/A2 (2007) standardına göre belirlenmiştir. Her seri için 12 adet numune ($40 \times 40 \times 160$ mm³ boyutlarında) üretilmiştir. Kalıplardan çıkartılan sertleşmiş harç numuneleri, laboratuvar ortamındaki kirece doygun



suda (20 ± 2 °C sıcaklıkta), 7, 28, 56 ve 90 günlük kür sürelerine kadar bekletilip (Şekil 4) daha sonra sertleşmiş harç deneyleri uygulanmıştır.

Şekil 4. Kür uygulanan harç numuneleri

Deney gününde numunelere TS EN 772-4 (2000)'e göre görünür porozite (Şekil 5.a), TS EN 196-1 (2016)'e göre üç noktalı eğilme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır (Şekil 5.b ve 5.c). Sonuçlar üç numunenin deney sonuçlarının ortalaması alınarak belirlenmiştir.

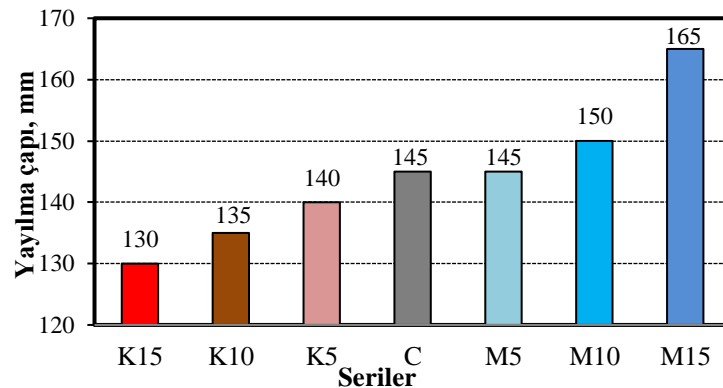


Şekil 5. Sertleşmiş harç numunelerine uygulanan deneyler; a) Görünür porozite ölçümleri b) Eğilme dayanımı c) Basınç dayanımı

BULGULAR VE TARTIŞMA

İşlenebilirlik Deney Sonuçları

Harç serilerinin işlenebilirlik özellikleri, yayılma tablası deneyi ile belirlenmiştir. Üretilen harç serilerinin yayılma çaplarındaki değişimler Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Yayılma deneyi sonuçları

Serilerin yayılma değerleri 130 ile 165 mm arasında değişmiştir. Serilerde, K ikamesi arttıkça yayılma değerleri azalırken, M ikamesi arttıkça yayılma değerleri de artmıştır. K5, K10 ve K15

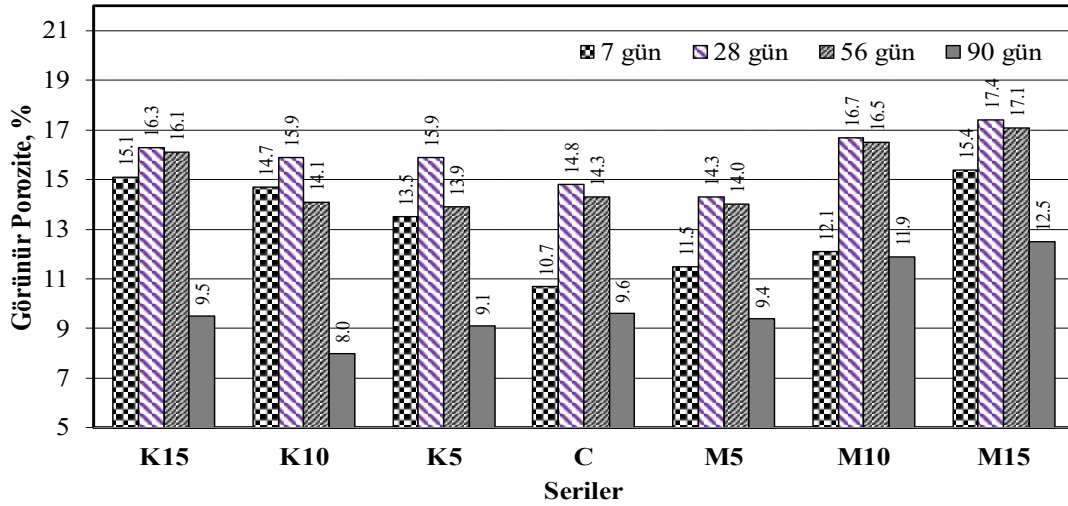
serilerindeki yayılma çapları, C serisine göre sırasıyla; %3.4, %6.9 ve %10.3 oranlarında azalmıştır. Harç serilerinde K ikamesi arttıkça, karışımın su ihtiyacı artmış ve işlenebilirliği de azalmıştır. Lam ve ark. (2021) ve Schackow ve ark. (2015)'nin yaptıkları çalışmalarda da çimento harçları içerisine ilave edilen atık pişmiş kil tuğla tozları, yayılma değerlerini azaltmıştır. Bu durum su/bağlayıcı oranının sabitliği ile birlikte K'nin özgül yüzey alanının çimentodan yüksek olmasına ve artan su talebine bağlanabilir. Chen ve ark. (2023) yaptıkları bir çalışmada, atık pişmiş kil tuğla tozunun çimento harçlarının işlenebilirliğini azalttığını, bu duruma neden olarak da; atık pişmiş kil tuğla tozunun çimentodan daha büyük özgül yüzey alanına sahip olmasına ve partiküllerinin düzensiz bir yüzeye sahip olmasının su emilimini daha fazla artıran gözenekler oluşturmalarına bağlamışlardır.

M5, M10 ve M15 serilerinin yayılma çapları, C serisine göre sırasıyla; %0.7, %3.4 ve %13.8 oranlarında artmıştır. Bu durum, M'nin özgül ağırlığının çimentodan düşük olmasına ve dolayısı ile işlenebilirliğin artmasına katkı sağladığı şeklinde değerlendirilebilir. Yamanel ve ark. (2019)'da yaptıkları bir çalışmada, çimento harçlarında kullanılan M ikamesi ile benzer işlenebilirlik artışlarına ulaşmışlardır. Çalışmalarındaki M'den kaynaklı işlenebilirlik artışına neden olarak; karışımda kullanılan M'nin, çimento ile ağırlıkça yer değiştirdiği, çimento yerine aynı ağırlıkta M'nin ikamesi ile karışımın toplam hamur hacminin arttığı ve toplam hamur hacminin artmasının da harçların işlenebilirliklerini artırdığı şeklinde değerlendirmişlerdir. Özkılıç ve ark. (2023) yaptıkları bir çalışmada, çimentoyu %40 oranlarına kadar M ile yer değiştirmişler ve üretilen taze betonların işlenebilirliklerinin iyileştiğini bildirmişlerdir. Ma ve ark. (2019), çimentolu harç karışımlarında %30 oranına kadar M ve %4 oranlarına kadar nano silika kullandıkları çalışmalarında, artan M ile işlenebilirliklerin arttığını, bu duruma neden olarak; çimentonun hidrasyon sürecinde su ile reaksiyona girerek, M'den daha yüksek su ihtiyacına yol açtığını ve böylece M artışlarının, karışımdaki su ihtiyacını azaltarak işlenebilirliği artırdığına bağlamışlardır. Bununla birlikte, M'nin işlenebilirliği artırmasına başka bir nedende, çimentodan daha küçük taneciklere sahip olan M'nin (Şekil 3'te), çimento parçacıkları arasındaki boşlukları doldurarak dolgu suyunu serbest bırakmasına ve daha fazla yağlama suyu oluşturarak çimento parçacıkları arasındaki sürtünmenin azaltılmasına ve dolayısı ile harcın işlenebilirliğinin artmasına katkı sağladığı şeklinde değerlendirilmektedir.

M ikamesinin harç serilerinin işlenebilirliğini iyileştirmesi, karışımda kullanılacak su miktarının belirli bir orana kadar azaltılabilesine katkı sağlayabilecektir. Karışımda K ikamesinin artışı ile işlenebilirlikler bozulduğundan, K kullanılan serilerde akışkanlaştırıcı katkı kullanımı ile harçların işlenebilirliklerinin de korunabileceği değerlendirilmektedir.

Görünür Porozite

Harç serilerinin görünür porozite değerlerinin, kür sürelerine göre değişimi Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7'de görüleceği üzere tüm serilerdeki görünür porozite değerleri 28'inci güne kadar artmış ve daha sonraki 56'ncı ve 90'ıncı günlerde, zamanla azalmıştır. K ve M serilerinden elde edilen görünür porozite değerleri 90 günlük kür sonunda; %8-12.5 arasında değişmiştir. Kontrol (C) serisinin 7; 28; 56 ve 90 günlük kür sonundaki görünür porozite değerleri sırasıyla %10.7, %14.8, %14.3 ve %9.6 olmuştur.



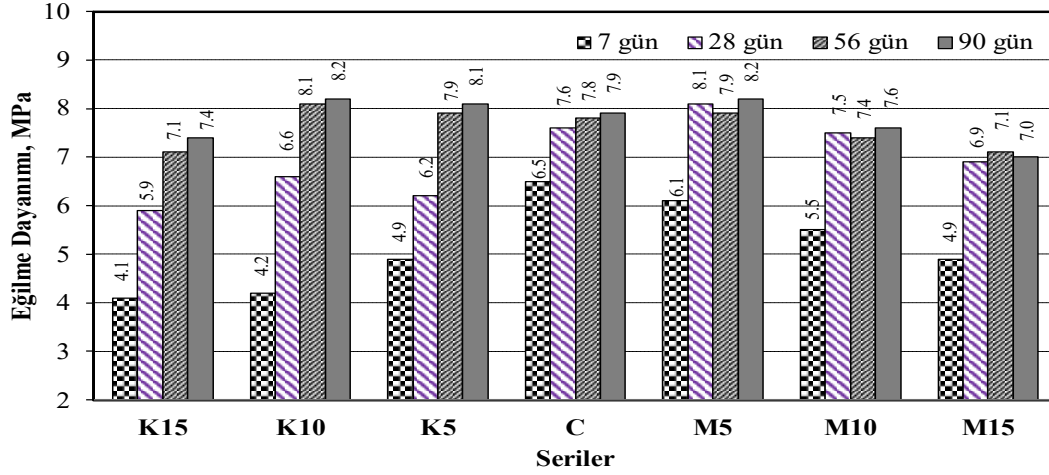
Şekil 7. Harç serilerinin kür süresi ve görünür porozite sonuçlarına göre değişimi

Şekil 7 incelendiğinde; 7'nci gün sonundaki K5, K10 ve K15 serilerinin görünür porozite değerleri, C serisine göre sırasıyla; %26, %37 ve %41 oranında artarken, M5, M10 ve M15 serilerinin porozite değerleri; %7, %13 ve %44 oranında artmıştır. İlk 7 gün sonunda, serilerdeki K ve M ikameleri arttıkça görünür porozitelerde artmıştır. 28'inci gün sonundaki K5, K10 ve K15 serilerinin görünür porozite değerleri, C serisine göre sırası ile; %7, %7 ve %10 oranında artarken, M5'de %3 azalmış, M10 ve M15 serilerinde ise; %13 ve %18 oranlarında artmıştır. 56'ncı gün sonundaki K serilerinin görünür porozite değerleri, C serisine göre K5 ve K10'da sırası ile %3 ve %1 oranlarında azalırken, K15'de %13 artmıştır. M serilerinde ise; M5'te %2 azalırken, M10 ve M15 serilerinde; %15 ve %19 oranlarında artmıştır. Böylece 56'ncı gün sonunda, serilerdeki K ve M ikamesinin artışı ile K15, M10 ve M15'in görünür porozite değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. 90 günlük kür sonundaki görünür porozite değerleri incelendiğinde, K5, K10 ve K15 serilerinin porozite değerleri, C serisine göre sırasıyla; %5, %17 ve %1 oranında azalırken, M serilerinde ise M5'de %2 oranında azaldığı, M10 ve M15 serilerinde; %24 ve %30 oranlarında arttığı tespit edilmiştir. Böylece, 90'ncü gün sonundaki serilerde K ikamesinin artışı ile görünür porozite değerlerinin azaldığı, M serilerinde ise M5 serisi hariç diğerlerinde arttığı tespit edilmiştir. Yüksek miktarlarda M'nin ikame edilmesi (%10'nun üstünde), çimento ile M tanelerinin farklı boyuttaki taneciklerinden kaynaklı topaklaşmaya (Aydın ve Arel, 2019), bu durumun da görünür porozite yapısının zayıflamasına neden olduğu şeklinde değerlendirilebilir. Tüm K serilerinin görünür porozite değerleri 7 ve 28 günlük kür sonunda C serisinin üstündeyken, 56 ve 90 günlük kür sürelerinde ise altında değerler almıştır. Bilindiği üzere, K'nin yüksek su emmesine sahip olması (Atyia ve ark., 2021), taze harç üretiminde yüksek miktarda su tutmasına neden olabileceği ve çimentonun hidrasyon sürecinin başlaması ve ortamdaki bağlı nemin düşmesiyle birlikte, K'de depolanan suyun serbest kalarak K ikameli harç serilerinin görünür porozitelerinin C serisine göre artmasına neden olabileceği şeklinde değerlendirilmektedir. K serilerinin 56 ve 90 günlük kür sonundaki görünür porozite değerlerinin C serisine göre daha düşük elde edilmesi ise uzun kür süreleri sonundaki puzolanik aktiviteye, K'nin C'ye göre daha yüksek inceliğe sahip olmasına ve harçların mikro gözeneklerini doldurma kabiliyetine bağlanmıştır. M serilerinde ise; sadece M5 serisinin 28, 56 ve 90'ncü günlerdeki görünür porozite değerlerinin azaldığı, M10 ve M15 serilerinin görünür porozite değerlerinin tüm kür sürelerinde C serisine göre yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, çimento harçlarına %5 oranında ikame edilen M tanelerinin,

çimentoya göre daha ince olmasına ve çimento partiküllerinin arasındaki boşlukları doldurabilmesinden kaynaklandığı şeklinde değerlendirilmiştir.

Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları

Harç serilerinin kür süreleri ve eğilme dayanımlarına göre değişimi Şekil 8’de verilmiştir. Şekil 8’de görüldüğü üzere, kür sürelerinin artması ile genel olarak eğilme dayanımları da artmıştır. En uzun kür süresi olan 90 gün sonundaki eğilme dayanımları 7 ile 8,2 MPa arasında değişmiştir. Kontrol (C) harcının 7; 28; 56 ve 90 günlük kür sonundaki eğilme dayanımı değerleri sırasıyla; 6,5, 7,6, 7,8 ve 7,9 MPa olmuştur.



Şekil 8. Harç serilerinin kür süresi ve eğilme dayanımı sonuçlarına göre değişimi

Şekil 8 incelendiğinde; 7’nci gün sonundaki K5, K10 ve K15 serilerinin eğilme dayanımları, C serisine göre sırasıyla; %25, %35 ve %37 oranlarında, M5, M10 ve M15 serilerinin eğilme dayanımları da %6, %15 ve %25 oranlarında azalmıştır. Böylece ilk 7 gün sonunda, serilerdeki K ve M ikamesi arttıkça eğilme dayanımları da azalmıştır. K5, K10 ve K15 serilerinin 28’inci gün sonundaki eğilme dayanımları, C serisine göre sırasıyla; %18, %13 ve %22 oranında azalırken, M5 serisinde %7 oranında artmış, M10 ve M15 serilerinde ise; %1 ve %9 oranlarında azalmıştır. 28’inci gün sonunda serilerdeki K ve M ikamesinin artışı ile eğilme dayanımları M5 serisi hariç tamamında azalmıştır.

M serili harç serilerinde, hidrasyonun ilerlemesi ile artan C–S–H fazları, çimento matrisi ile M parçacıkları arasındaki boşlukları doldurabilmektedir. Eğilme dayanımındaki bu iyileşme (M5’teki), hem çimento hamuru matrisinin hem de arayüzey geçiş bölgelerinin düşük gözenekliliğinden de kaynaklanabilmektedir (Dobiszewska ve ark., 2023). Shirule ve ark. (2012)’da yaptıkları çalışmada, çimento ağırlığının %10’una kadar M ikame edilmesiyle üretilen numunelerin basınç ve yarmada çekme dayanımlarının arttığını bildirmişlerdir. Genel olarak, çekme dayanımındaki bu iyileşme hem çimento hamuru matrisinin hem de arayüzey geçiş bölgesinin düşük gözenekliliğine ve iyi dayanımına atfedilmiştir. M ikamesinin, agrega ile çimento hamuru arasındaki arayüzey geçiş bölgesini güçlendirerek çekme dayanımlarının artışına neden olduğu, Ashish (2018) tarafından yapılan çalışmada da tespit edilmiştir.

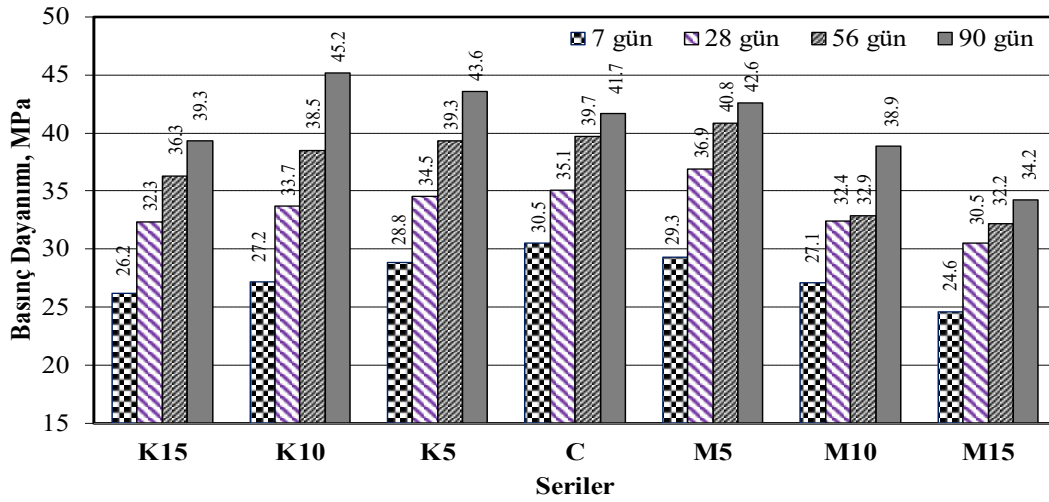
Serilere uygulanan 56 günlük kür sonunda; K serilerinin eğilme dayanımları, C serisine göre; K5’te %1, K10’da %4 oranında artarken, K15’te %9 oranında azalmıştır. Bu sonuçlar; Xue ve ark. (2021)’nin yaptıkları bir çalışmadaki, çimento yerine %20 oranına kadar atık pişmiş kil tuğla tozu ile üretilen harç numunelerinden elde edilen 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları ile uyumludur. Xue ve ark. (2021) bu durumu; optimum miktardaki (%20’ye kadar) tuğla tozu kullanımının, çimento

parçacıkları arasındaki boşlukları doldurabildiğini ve tuğla tozunun harçtaki terlemeyi azaltarak çimento hamuru ile kum arasındaki geçiş bölgesinin yapısını iyileştirerek eğilme dayanımlarına katkı sağladığı şeklinde açıklamışlardır.

M serilerinin 56 günlük kür süresi sonundaki dayanımları incelendiğinde; M5'te; %1 oranında artış olurken, M10 ve M15 serilerinde; %5 ve %9 oranlarında eğilme dayanımları azalmıştır. 90 günlük kür süresi sonundaki eğilme dayanımları incelendiğinde, K5 ve K10 serilerinin dayanımlarının C serisine göre sırasıyla; %3 ve %4 oranlarında arttığı, K15 serisinde ise %6 oranında azaldığı tespit edilmiştir. M serilerinde ise; M5 serisinin 90'uncu günündeki eğilme dayanımı C serisine göre %4 oranında artarken, M10 ve M15 serilerinin dayanımları da %4 ve %11 oranlarında azalmıştır. Bu sonuçlar, Ergün (2011)'ün; çimento yerine %5 oranında M kullandığı çalışmasındaki harç serilerinin, 90 günlük kür sonundaki dayanım sonuçları ile uyumludur.

Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Harç serilerinin basınç dayanımlarının kür sürelerine göre değişimi Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. Harç serilerinin kür süresi ve basınç dayanımı sonuçlarına göre değişimi

Şekil 9'da görüldüğü üzere, kür sürelerinin artması ile tüm serilerin basınç dayanımları da artmıştır. Serilere uygulanan 90 günlük kür sonundaki basınç dayanımları; 34.2-45.2 MPa arasında değişmiştir. Kontrol (C) harcının 7; 28; 56 ve 90 günlük kür sonundaki basınç dayanımları sırasıyla; 30.5; 35.1; 39.7 ve 41.7 MPa olmuştur. Şekil 9 incelendiğinde; ilk 7 gün sonunda, serilerde K ve M ikamesi arttıkça basınç dayanımları da azalmıştır. 7'nci gün sonundaki K5, K10 ve K15 serilerinin basınç dayanımları C serisine göre sırasıyla; %6, %11 ve %14 oranlarında, M5, M10 ve M15 serilerinin basınç dayanımları da; %4, %11 ve %19 oranlarında azalmıştır. Serilerin 28'inci gün sonundaki basınç dayanımları, K ve M ikamesinin artışı ile M5 hariç azalmıştır. K5, K10 ve K15 serilerinin 28'inci gün sonundaki basınç dayanımları C serisine göre, sırasıyla; %2, %4 ve %8 oranında azalırken, M serilerinde ise; M5'te %5 oranında arttığı, M10 ve M15'te; %8 ve %13 oranlarında azaldığı tespit edilmiştir. Wang ve ark. (2022)'da yaptıkları bir çalışmada; çimento harçlarına %5-25 oranlarında ilave edilen M'nin, harçların erken basınç ve eğilme dayanımlarını iyileştirdiği, en iyi dayanımların %5 ilavesi ile oluştuğu, %15'ten daha fazla M ilavesinin, dayanımları ciddi oranda düşürdüğünü tespit etmişlerdir.

Serilerin 56'ncı gün sonundaki basınç dayanımları; K ikamesinin artışı ile azalırken, M serilerinde ise M5 serisi hariç dayanımların azaldığı ve M10 ile M15'in dayanım kayıplarının 28 günlük sonuçlara göre daha da arttığı tespit edilmiştir. Çeşitli çalışmalarda (Moon ve ark., 2017;

Manzoor ve ark., 2022; Dobiszewska ve ark., 2023). M gibi inert mineral katkıların çimento hidratasyonunu erken yaşlarda hızlandırarak iyileştirdiği bildirilmiştir. Literatüre göre, M'nin çimento hidratasyonu üzerinde fiziksel bir etkisi vardır ve bu durum M'nin dolgu etkisi ile ilişkilidir. Çimentolu harçlara M ikamesi ile karışımın su/çimento oranı yükselir. Karışımdaki çimento miktarının azalması sonucunda her parçacığa tahsis edilen su miktarındaki artış, çimento parçacıklarının sınırlı miktarda su emdiği bir duruma göre çimento hidratasyonu için iyileştirilmiş koşullar sağlarken, C-S-H fazının çekirdeklenmesini de kolaylaştırabilir. Karışımdaki M ikame oranının daha fazla artmasıyla (M10 ve M15'teki gibi) çimento miktarının azalarak daha az hidratasyon ürünü olduğu ve böylece M10 ve M15 serilerinin 28 gün sonraki görünür porozitelerinin C serisine göre daha da artarak, basınç ve eğilme dayanımlarının da azalmasına katkı sağladığı değerlendirilmektedir. 56'ncı gün sonundaki K5, K10 ve K15 serilerinin basınç dayanımları C serisine göre sırasıyla; %1, %3 ve %9 oranında azalırken, M serilerinde ise; M5'te %3 oranında arttığı, M10 ve M15'te; %17 ve %19 oranlarında azaldığı tespit edilmiştir. K'nin çimentolu harçlara %15 oranına kadar dahil edilmesi ile karışımdaki çimentonun bağıl içeriği azalmış, bu durumun da hidratasyon ürünü miktarının azalmasına bağlı olarak, K serilerinin 56 günlük küre kadarki basınç dayanımlarını, C serisine göre azalttığı şeklinde değerlendirilmiştir.

Harç serilerine uygulanan kür süresi 90 güne ulaştığında, K5 ve K10'nun basınç dayanımlarının, C serisine göre; %5 ve %8 oranlarında arttığı, K15 serisinin ise %6 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Bu sonuç, Shao ve ark. (2019)'nın harç üretiminde çimento yerine belli oranlarda atık pişmiş kil tuğla tozunun ikame edilmesi ile yaptıkları bir çalışmada; üretilen numunelere uyguladıkları 7, 28 ve 90 günlük kür sonundaki basınç dayanım sonuçlarına benzerdir. Zhang ve ark. (2023)'nin yaptıkları benzer bir çalışmada da, çimentonun %10, 20 ve 30 oranlarında atık pişmiş kil tuğla tozu ile yer değiştirdiği serilerden elde edilen basınç dayanım kayıplarının 90 güne kadar zamanla azaldığı ve %10 ikameli serideki dayanım kaybının %0.1'e kadar düştüğünü tespit etmişlerdir. Harç serilerine uygulanan 90 günlük kür sonunda, K10 serisi; 45.2 MPa ile tüm K serilerinden elde edilen en yüksek basınç dayanımına ulaşmıştır. Kullanılan K'nin 90 gün sonundaki puzolanik performansı, yüksek miktardaki inceliğine (6040 cm²/g) bağlanabilir. Puzolanların inceliği, puzolanik reaksiyonları hızlandırmada etkili bir faktördür (Ebrahimi ve ark., 2023). K15 serisinin tüm kür sürelerindeki basınç dayanımlarının, C serisi dayanımlarının altında kalması, karışımdaki çimento içeriğinin azalarak, basınç dayanımını sağlayan kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) jellerinin ve kalsiyum-hidrat (C-H) miktarlarının azalmasına bağlanabilir.

M serilerinin 90 günlük kür sonundaki basınç dayanımları incelendiğinde; M5 serisinin basınç dayanımı C serisine göre %2 oranında artarken, M10 ve M15 serilerinin basınç dayanımları; %7 ve %18 oranlarında azalmıştır. Aliabdo ve ark., (2014)'a göre literatürdeki iç yapı analizleri; M içeren ve içermeyen harç numunelerinin iç yapı morfolojisinin birbirinden önemli ölçüde farklı olmadığını ve bu durumunda, M'nin hidratasyon işlemi sırasında belirgin bir rolünün bulunmamasını doğruladığını bildirmişlerdir. Çalışmada, M'nin %5 oranında çimento ile yer değiştirmesi, basınç dayanımında bir miktar artışa (%5'lik) yol açmıştır. Basınç dayanımındaki bu artış, çimentodan daha ince öğütülmüş olan M'nin (Şekil 3'te), gözenek doldurucu etkisinin hidratasyon için uygun çekirdek sağlamasına ve bunun sonucunda da hidratasyonu katalize etmesine (Ergün, 2011) bağlanabilir.

Genel olarak harç serilerindeki K ve M ikame artışı, erken yaş basınç dayanımlarını azaltırken, kürlenme yaşı arttıkça dayanım kayıplarının özellikle K serilerinde giderek azaldığı, K5, K10 ve M5 serilerinde ise C serisinin üstünde basınç dayanımları elde edildiği tespit edilmiştir. M5 serisinin 28, 56 ve 90 günlük kür sonundaki basınç dayanımları, C serisine göre daha yüksek elde edilmiştir. Bu durum, Singh ve ark. (2017)'nin çalışmalarında değerlendirdikleri gibi, M'nin harç karışımındaki

boşlukları doldurarak daha yoğun bir karışım oluşturmaya yardımcı olan mikro doldurucu etkisine bağlanabilir. Bununla birlikte harç serilerinde %5'ten daha fazla M kullanılarak üretilen M10 ve M15'in basınç dayanımlarının, her kür süresi için C serisi basınç dayanımlarının altında değerler alması; karışımlardaki çimento miktarının azalmasından ve M10 ile M15'in görünür porozitelerinin, C serisinden her zaman daha yüksek miktarlara ulaşmasından kaynaklandığı şeklinde değerlendirilmektedir.

SONUÇ

DeneySEL çalışmalar kapsamında elde edilen sonuçlara göre yapılan değerlendirmeler aşağıda sunulmuştur;

- Harç serilerinde K ikamesinin artışı ile yayılma değerleri %10.3 oranına kadar azalırken, M ikamesinin artışı ile %13.8 oranına kadar artmıştır.

- Harç serilerinin görünür poroziteleri; K ikamesi ile 28 güne kadar artmış, bu süreden sonra K15 serisi hariç genellikle azalmıştır. M serilerinde ise; M5 serisinin tüm kür sürelerinde genellikle azalırken, M10 ve M15 serilerinde artmıştır.

- Çimentolu harçlara, %5 oranında M ikame edilmesi, harçların 90 günlük küre kadar ki basınç dayanımlarını %5 oranına kadar artırırken, eğilme dayanımlarını da %7 oranına kadar artırmıştır. K'nin %5 ve %10 ikamesi, harçların 90 günlük küre kadar ki basınç dayanımlarını sırası ile %5 ve %8 oranlarına kadar artırırken, eğilme dayanımlarını da %3 ve %4 oranlarına kadar artırmıştır.

- M'nin basınç ve eğilme dayanımına katkısı %5 çimento değişimi ile sınırlı olurken, K'de ise %10 oranına kadar sınırlı olmuştur. Bu oranlardan daha yüksek M ve K ikamelerinde, basınç ve eğilme dayanımları olumsuz etkilenmektedir.

Yapılan bu çalışmadan elde edilen sonuçların; depremlerden kaynaklanan büyük miktardaki atığın yönetilmesine bir katkı olarak, yıkılmış veya çökmüş yığma ve betonarme binalardan elde edilen tuğla ve kiremit atıklarının kullanımı ile mermer endüstrisinden kaynaklı atık mermerlerin kullanımına yönelik uygun teknolojilerin geliştirilmesine katkı sağlayabileceği değerlendirilmektedir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, deney çalışmalarında yardımcı olan, İnşaat Mühendisliği Bölümü lisans öğrencilerinden; *Büşra Elgün ve Eren Gündüz*'e teşekkür eder.

Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

KAYNAKLAR

Aliabdo, A. A., Abd Elmoaty, M., & Auda, E. M. (2014). Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete. *Construction and building materials*, 50, 28-41.

Anonim, (2022). T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, <https://www.sanayi.gov.tr/plan-program-raporlar-ve-yayinlar/sector-raporlari/mu0102011404>, (Erişim adresi: 26 Nisan, 2023).

Anonim, (2023). <https://www.afad.gov.tr/duyurular>, (Erişim adresi: 26 Nisan, 2023).

Ashish, D. K. (2018). Feasibility of waste marble powder in concrete as partial substitution of cement and sand amalgam for sustainable growth. *Journal of Building Engineering*, 15, 236-242.

- Atyia, M. M., Mahdy, M. G., & Abd Elrahman, M. (2021). Production and properties of lightweight concrete incorporating recycled waste crushed clay bricks. *Construction and Building Materials*, 304, 124655.
- Aydin, E., & Arel, H. Ş. (2019). High-volume marble substitution in cement-paste: Towards a better sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 237, 117801
- Belkadi, A. A., Kessal, O., Chiker, T., Achour, Y., Rouabhi, A., Messaoudi, O., & Khouadjia, M. L. K. (2023). Full factorial design of mechanical and physical properties of eco-mortars containing waste marble powder. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48(4), 4325-4338.
- Bilir, T., Karadağ, Ö., & Aygün, B. F. (2022). Waste marble powder. In *Sustainable Concrete Made with Ashes and Dust from Different Sources* (pp. 479-506). Woodhead Publishing.
- Boğa, A. R., & Şenol, A. F. (2023). The effect of waste marble and basalt aggregates on the fresh and hardened properties of high strength self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 363, 129715.
- Chen, G., Li, S., Zhao, Y., Xu, Z., Luo, X., & Gao, J. (2023). Hydration and microstructure evolution of a novel low-carbon concrete containing recycled clay brick powder and ground granulated blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, 386, 131596.
- Çelikten, S., & Canbaz, M. (2021). Atık Andezit ve Mermer Tozunun Çimento Harçlarının Dayanım Özelliklerine Etkisi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(1), 43-48.
- Demirel, B., & Alyamaç, K. E. (2018). Waste marble powder/dust. In *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete* (pp. 181-197). Woodhead Publishing.
- Dobiszewska, M., Bagcal, O., Beycioğlu, A., Goulias, D., Köksal, F., Płomiński, B., & Ürünveren, H. (2023). Utilization of rock dust as cement replacement in cement composites: An alternative approach to sustainable mortar and concrete productions. *Journal of Building Engineering*, 106180.
- Ebrahimi, M., Eslami, A., Hajirasouliha, I., Ramezanpour, M., & Pilakoutas, K. (2023). Effect of ceramic waste powder as a binder replacement on the properties of cement-and lime-based mortars. *Construction and Building Materials*, 379, 131146.
- Ergün, A. (2011). Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete. *Construction and building materials*, 25(2), 806-812.
- Ge, Z., Wang, Y., Sun, R., Wu, X., & Guan, Y. (2015). Influence of ground waste clay brick on properties of fresh and hardened concrete. *Construction and Building Materials*, 98, 128-136.
- Lam, M. N. T., Nguyen, D. T., & Nguyen, D. L. (2021). Potential use of clay brick waste powder and ceramic waste aggregate in mortar. *Construction and Building Materials*, 313, 125516.
- Ma, B., Wang, J., Tan, H., Li, X., Cai, L., Zhou, Y., & Chu, Z. (2019). Utilization of waste marble powder in cement-based materials by incorporating nano silica. *Construction and Building Materials*, 211, 139-149.
- Manzoor, S., Ganesh, S., & Danish, P. (2022). Effect on properties of concrete by utilization of metakaolin and marble powder. *Materials Today: Proceedings*, 62, 6689-6694.)
- Moon, G. D., Oh, S., Jung, S. H., & Choi, Y. C. (2017). Effects of the fineness of limestone powder and cement on the hydration and strength development of PLC concrete. *Construction and Building Materials*, 135, 129-136

- Özkılıç, Y. O., Zeybek, Ö., Bahrami, A., Çelik, A. İ., Mydin, M. A. O., Karalar, M., & Jagadesh, P. (2023). Optimum usage of waste marble powder to reduce use of cement toward eco-friendly concrete. *Journal of materials research and technology*, 25, 4799-4819
- Schackow, A., Stringari, D., Senff, L., Correia, S. L., & Segadães, A. M. (2015). Influence of fired clay brick waste additions on the durability of mortars. *Cement and concrete composites*, 62, 82-89.
- Seghir, N. T., Mellas, M., Sadowski, Ł., & Żak, A. (2018). Effects of marble powder on the properties of the air-cured blended cement paste. *Journal of Cleaner Production*, 183, 858-868.
- Shao, J., Gao, J., Zhao, Y., & Chen, X. (2019). Study on the pozzolanic reaction of clay brick powder in blended cement pastes. *Construction and Building Materials*, 213, 209-215.
- Shirule, P. A., Rahman, A., & Gupta, R. D. (2012). Partial replacement of cement with marble dust powder. *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, 1(3), 2249.
- Singh, M., Srivastava, A., & Bhunia, D. (2017). An investigation on effect of partial replacement of cement by waste marble slurry. *Construction and Building Materials*, 134, 471-488.
- TS 25. (2015), Doğal puzolan (tras)-Çimento ve betonda kullanılan-Tarifler, gerekler ve uygunluk kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 1015-3/A2. (2007), Kagir harcı-deney metotları-bölüm 3: taze harç kıvamının tayini (yayımla tablası ile), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 196-1. (2016), Çimento deney metotları- Bölüm 1: Dayanım tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 772-4. (2000), Kagir birimler- Deney metotları- Bölüm 4: Tabii taş kagir birimlerin toplam ve görünen porozitesi ile boşluksuz ve boşluklu birim hacim kütlelerinin tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Wang, T., Yang, W., & Zhang, J. (2022). Experimental Studies on Mechanical Properties and Microscopic Mechanism of Marble Waste Powder Cement Cementitious Materials. *Crystals*, 12(6), 868.
- Wu, J. D., Guo, L. P., & Qin, Y. Y. (2021). Preparation and characterization of ultra-high-strength and ultra-high-ductility cementitious composites incorporating waste clay brick powder. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127813.
- Xue, C., Qiao, H., Cao, H., Feng, Q., & Li, Q. (2021). Analysis on the strength of cement mortar mixed with construction waste brick powder. *Advances in Civil Engineering*, 1-10.
- Yamanel, K., Durak, U., İlkentapar, S., Atabey, İ. İ., Karahan, O., & Duran, C. (2019). Influence of waste marble powder as a replacement of cement on the properties of mortar. *Revista de la Construcción. Journal of Construction*, 18(2), 290-300.
- Zhang, H., Zhang, C., He, B., Yi, S., & Tang, L. (2023). Recycling fine powder collected from construction and demolition wastes as partial alternatives to cement: A comprehensive analysis on effects, mechanism, cost and CO2 emission. *Journal of Building Engineering*, 71, 106507.
- Zhao, Y., Gao, J., Liu, C., Chen, X., & Xu, Z. (2020). The particle-size effect of waste clay brick powder on its pozzolanic activity and properties of blended cement. *Journal of cleaner production*, 242, 118521.