



Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 11.05.2024
Kabul Tarihi : 15.06.2024

Received Date : 11.05.2024
Accepted Date : 15.06.2024

HARÇ ATIĞI İKAMELİ MİKRO BETONLARDA SERTLEŞMİŞ HAL VE MİKROYAPI DEĞERLENDİRİLMESİ

EVALUATION OF HARDENED STATE AND MICROSTRUCTURE PROPERTIES OF MORTAR WASTE SUBSTITUTED MICRO CONCRETES

Melek AKGÜL¹ (ORCID: 0000-0001-8815-3762)

Osman HANSU^{2*} (ORCID: 0000-0003-1638-4304)

¹ Munzur Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Tunceli, Türkiye

² Gaziantep İslam Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gaziantep, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Osman HANSU, osman.hansu@gibtu.edu.tr

ÖZET

İnşaat yıkıntı atığının sürdürülebilirlik ve geri dönüşüm süreçlerine dahil edilme çalışmaları özellikle yıkım gücü büyük depremler ve kentsel dönüşüm stratejileri sonrası hız kazanmıştır. Bu deneysel çalışmada, İnşaat Harç Atığı (HA)'nın CEM-I 42,5R çimentoya hacimce değişken oranlarda ikame edilmesi ile tasarlanan Mikro Beton (MB)'ların fiziksel, mekanik, durabilite ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir. HA çimentoya hacimce %0, %5, 10, 15, 20, 25, 30 oranlarında ikame edilmiştir. Referans setinde kullanılan bağlayıcı miktarı 830 kg/m^3 'tür. Tüm MB karışımlarında su ve Silis Dumanı (SD) miktarı sabittir ve sırasıyla 400 kg/m^3 ve 150 kg/m^3 olarak tasarımda kullanılmıştır. $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta kirece doymun su kürü 7 ve 28 gün olmak üzere iki farklı periyotta uygulanmıştır. Ayrıca birer takım numune 28 gün su kürü sonrası 56. ve 90. güne kadar laboratuvar ortamında bekletilmiştir. İlgili deney günlerinde sertleşmiş numuneler ile bir dizi fiziksel, mekanik ve durabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı analizi değerlendirmeleri 28 günlük su kürü sonrası %0, %15 ve %30 HA ikamelili numuneler ve karışımda kullanılan HA'nın X-ışını Difraktometresi (XRD) verilerden sağlanmıştır. Tüm veriler karşılaştırmalı grafikler ile sunulmuştur. Sonuç olarak, %10 HA'nın ikame edildiği 7 ve 28 günlük numunelerde mekanik özellikleri iyileşmesine rağmen, bu oran dahil tüm ikame oranlarında ve sonraki yaşlarda mukavemet kayıpları gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Harç atığı, mikro beton, mekanik özellikler, fiziksel özellikler, mikroyapı.

ABSTRACT

Studies on the inclusion of construction debris waste in sustainability and recycling processes have gained momentum, especially after major earthquakes and urban regeneration strategies. In this experimental study, the physical, mechanical, durability and microstructural properties of Micro concrete (MC) designed by substituting varying proportions of Construction Mortar Waste (MW) by volume into CEM-I 42,5R cement were investigated. MW was substituted into the cement at 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% by volume. The amount of binder used in the reference set was 830 kg/m^3 . The amount of water and Silica Fume (SF) was kept constant in all MC mixtures and used in the design as 400 kg/m^3 and 150 kg/m^3 respectively. Lime saturated water curing was applied at $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ for two different periods of 7 and 28 days. In addition, one set of specimens was kept in the laboratory until the 56th and 90th day after 28 days of water curing. On the respective test days, a series of physical, mechanical and durability tests were performed with the hardened specimens. The evaluations microstructural analysis were obtained from X-Ray Diffractometer (XRD) data of 0%, 15% and 30% MW substituted specimens and MW used in the mixture after 28 days of water curing. All data are presented in comparative graphs. As a result, although the mechanical properties improved in the 7 and 28-day specimens in which 10% HA was substituted, strength losses were observed at all substitution rates including this rate and at subsequent ages.

Keywords: Mortar waste, micro concrete, mechanical properties, physical properties, microstructure.

ToCite: AKGÜL, M., & HANSU, O., (2024). HARÇ ATIĞI İKAMELİ MİKRO BETONLARIN SERTLEŞMİŞ HAL VE MİKROYAPI DEĞERLENDİRİLMESİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(3), 1089-1101.

GİRİŞ

Dünya ekonomisinde kayda değer bir hacme sahip olan inşaat sektörü (Bayrak & Telatar, 2021) yıllık 6 milyar ton CO₂ salınımına neden olmaktadır (Huang vd., 2018) ve bu veriye bağlı olarak yapılan değerlendirmelere göre sektör, en büyük endüstriyel kirlilik kaynağı olan sektörler sıralamasında ilk üçte yer alır. İnşaat sektörünün en önemli üretim süreçlerinden biri çevreci ve sürdürülebilir kabul edilmeyen çimento üretim sürecidir (Gao vd., 2017). Çünkü çimento üretim süreci, yıllık 500,000 tondan fazla kükürt dioksit (SO₂), azot dioksit (NO₂) ve karbonmonoksit (CO) yayılımından sorumludur. Çimento üretimine bağlı CO₂ emisyonunun yaklaşık %83,1'i yakma işleminden kaynaklanır (Kwon vd., 2015). Ayrıca sürecin sebep olduğu hava kirliliği; partikül madde (PM), azot oksitler (NO_x) ve sülfür dioksit (SO₂) salınımı şeklindedir (Korkmaz, 2019). Ülkelerin sürdürülebilir kalkınma hedefleri; doğal kaynakların korunması, atıkların azaltılması, bertarafı ve geri dönüşüm süreçleri ile şekillenir (Aydın İpekçi, Coşkun, & Tıkansak Karadayı, 2017). Atıkların birçoğu bertaraf edilirken geri kazanımı ile ilgili çalışmalar ancak 1990'lardan sonra ivme kazanmıştır (Aydın İpekçi vd., 2017). Son 50 yılda birçok ülke çevre yasaları doğrultusunda bina yıkıntı atıklarının da dahil olduğu çoğu atık türünün bertarafı ve geri dönüşümü için stratejiler geliştirmiştir (Gao vd., 2017). Agregaya veya çimentoya ikame ürün olarak yeni ürün arayışlarına yönelik yapılan çalışmalarda; üretilen beton veya harç elemanların mekanik ve durabilite özelliklerinin çoklu fonksiyonlar ile değerlendirilmesi hem mühendislik hem de sürdürülebilir üretim açısından önemlidir. Bu çalışmalarda elde edilen sonuçlar, bazı ikame oranlarının optimum fayda düzeyini sunmanın yanı sıra çevre ve atmosferin korunumuna önemli katkılar sağlanabileceği yönündedir (Etili vd., 2024; Akgül & Etili, 2024, 2023; Hansu & Etili, Etili, 2023a, 2023b, 2022; 2022a, 2022b; Cemalgi vd., 2021; Akgül vd., 2020; Cemalgi & Etili, 2020, 2019; Cemalgi, vd., 2018; Etili vd., 2021, 2018a; Gesoglu vd., 2017).

20. Yüzyıl süresince inşa edilmiş birçok yapı türü ve özellikle binalar son 20 yılda yıpranma ve büyük yıkımlar sonrası inşaat yıkıntı atığı (İYA) sorununa dönüşmüştür. Kentsel dönüşüm ve büyük afetler sonrası meydana gelen İYA Avrupa'da üretilen toplam atıkların büyük bir kısmını oluşturmaktadır (Gálvez-Martos vd., 2018). Dünya Yeşil Bina Konseyi'nin verilerine göre, küresel atıkların yaklaşık %50'si inşaat sektöründen kaynaklanan atıklardan oluşmaktadır (Joseph vd., 2023). Bu anlamda inşaat sektörünün önemli üretim ve geri dönüşüm stratejilerine ihtiyacı vardır (Tu, Chen, & Hwang, 2006). Son yıllarda yapılan birçok akademik ve sektörel çalışma İYA'nın bertarafından çok geri dönüşüm sürecine dahil edilmesini hedefleyen stratejilere dayanır (Aydın İpekçi vd., 2017; Tu vd., 2006). Geri dönüşüm süreci sonrası İYA, zemin iyileştirmesinden, karayolu tasarımlarına kadar geniş bir yelpazede kullanım alanına sahiptir (Omrane vd., 2017; Lidmila vd., 2013). İYA'nın en önemli geri dönüşüm ürünü Geri Dönüştürülmüş Agregaya (GDA)'dır. Özellikle GDA'nın ince ve iri agregaya ikame edilmesi, beton ve harç sistemlerinin mekanik, fiziksel ve durabilite özelliklerinde belirleyicidir. Bu sebeple GDA'nın yapısal inşaatlarda kullanımı halen sınırlıdır. GDA'nın su emme kapasitesinin yüksek olması ve kusurlu agregaya formu gibi kullanımını etkileyen baskın özellikleri vardır. Çünkü su emme oranındaki artış ve düzensiz fiziki şekil işlenebilirliği büyük oranda etkilemektedir. Ayrıca GDA'ların çevrelendiği harç matrisi agregaya incelik modülü ile değişkenlik gösterebilir. Bazı çalışmalar bu durumun dezavantajlarını azaltmak için çimento dozajındaki artışı uygulanabilir kabul etse de halen iyileştirilmesi gereken mekanik ve fiziksel olgular söz konusudur (Hafez vd., 2020; Tu vd., 2006; Ajdukiewicz & Kliszczewicz, 2002; Hansen, 1986;). Benzer eğilim İYA'nın öğütme ve ön işlemler sonrası çimentoya ikame edilerek kullanımının değerlendirildiği çalışma sonuçlarında da sunulmuştur (Günel vd., 2024; Yu & Shui, 2014). Sertleşmiş harç elemanların öğütülüp farklı sıcaklıklarda (300, 620, 900 C⁰) kalsinasyonu sonrası çimentoya ikame ürün olma potansiyeli olduğu kabul edilmektedir (Shui vd., 2009; Castellote vd., 2004;). Portland Çimentoya oranla CO₂ emisyon oranının %94 azaltılabileceği kabul edilen atık ürün kalsinasyon sıcaklığı 450-800 °C aralığıdır (He vd., 2019). Ancak kalsinasyon sonrası da Portland Çimentoya kıyasla su ihtiyacındaki artış ve hızlı rehidratasyon tespit edilmiştir (Shui vd., 2009).

MB; parçacık boyutu yaklaşık 0,5 mm'den 1 µm'ye kadar değişen mikro agregalarla tasarlanmış, yüksek performanslı çimento esaslı ürünlerdir (Felekoğlu, 2007). Genellikle tasarımda ince öğütülmüş ve çoğu zamanda puzolonik özellikteki bileşenler agregaya olarak tercih edilir. MB genel olarak "en büyük tane büyüklüğü 0,1-1 mm arasında değişen farklı tipteki toz malzemelerle" hazırlanan özel bir tasarım türü olarak kabul edilir (Etili vd., 2024; Etili, 2023a, 2022a; Thomas vd., 2021). MB'lerin taze hal işlenebilirlik özelliklerinin tahsisi genellikle sabit S/B oranı ve buna bağlı olarak değişken plastikleştirici katkı miktarı ile sağlanır (Thomas vd., 2021; Felekoğlu vd., 2009; Felekoğlu, 2007). MB'lerde büzülme çatlağı oluşumu hassasiyetini azaltmak önemli bir araştırma sorunsalıdır. Bu amaçla farklı kür uygulamaları hatta büzülme engelleyici kimyasalların yanı sıra çatlağın yayılma ve genişlemesini sınırlayıcı liflerin kullanımı yaygındır (Akgül & Etili, 2023; Etili, 2022a; Etili vd., 2018b). Büzülme çatlağı oluşum süreci parçacık boyutu dağılımı ile ilişkilidir. Su ihtiyacını artırıcı mikro agregaya ve bağlayıcılar bu süreci olumsuz etkiler. Parçacık boyutu dağılımının optimizasyonu ile maksimum kompaktlık elde etmek MB elemanların birçok

mühendislik özellikleri üzerinde etkilidir. Mikro agregaların parçacık boyutu arttıkça eğilme mukavemetinde azalma gözlenmektedir. Bunun yanı sıra kullanım alanındaki çeşitliliğe bağlı olarak değişimle birlikte; kendiliğinden yerleşebilme, vibrasyonla yerleşme veya püskürtme yoluyla yerleştirme durumları için tasarımdan istenen reolojik davranışlar farklılık göstermektedir (Felekoğlu, 2009).

HA'nın ikincil ön çalışmalar gerektirmeden sadece mekanik parçalanma ve öğütme ile çimentoya ikame ürün olarak MB üretiminde kullanımını amaçlamaktadır. Karışım tasarımında bir tanesi referans olmak üzere toplamda 7 farklı MB karışım oluşturulmuştur. Çimentoya hacimce ikame edilen HA'nın değişim oranı artan %5'lik oranlar ile %0-%30 bandındadır. Tüm MB setleri için toplamda 42 adet 50x50x50 mm ayrıtlı küp ve 84 adet 40x40x160 mm ayrıtlı prizma üretilmiştir. MB setlerinin test yaşı 7, 28, 56 ve 90 gündür. Sertleşmiş numuneler ile etüv kurusu birim hacim ağırlık, porozite, su emme, eğilmede çekme, eksenel basınç ve yarmada çekme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca mikroyapı analizleri 28 günlük %0, %15 ve %30 HA ikamesi içeren MB setleri ve karışımında kullanılan HA tozu ile gerçekleştirilmiştir.

MATERYAL VE METOT

MB'lerin tasarımında kullanılan malzeme ve uygulanan deneysel süreçler bu bölümde alt başlıklar ile sunulmuştur.

Materyal

MB üretimi için çalışma kapsamında CEM-I 42,5R çimento (PÇ) (TS EN 197-1, 2011), SD, doğal kum (DK), çimentoya ikame HA, şehir şebeke suyu (TS EN 1008, 2003) ve ürün kodu Sika Visco Crete Hi-Tech-28 olan polikarboksilat bazlı yüksek oranda su azaltıcı kullanılmıştır (TS EN 934-2+A1, 2014). HA, önce küçük parçalar şeklinde kırılmış ardından konkasörde kırılarak 2 mm'lik elek ile elenmiş ve ikincil bir öğütme ve eleme işlemi sonrası 0,063 mm'lik kare gözlü elek altı malzeme çalışmada kullanılmıştır. DK, 0-4 mm'lik agrega yığınınından temin edilmiş ve eleme sonrası 1 mm kare gözlü elek altı malzeme karışım tasarımında kullanılmıştır. DK'ye ait elek analizi verisi Tablo 1'de sunulmuştur (TS EN 933-1, 2012).

Tablo 1. DK'nin Elek Analizi

Elek açıklığı (mm)	Yığılı Geçen (%)
1	100,00
0,5	57,00
0,25	11,90
0,125	7,72
0,063	0,95

PÇ, SD, HA, DK ve akışkanlaştırıcının özgür ağırlığı sırasıyla 3,15, 2,32, 2,38 ve 2,58 ve 1,06'dır. Karışım tasarımında kullanılan PÇ ve SD'nin teknik özellikleri sırasıyla Tablo 2 ve Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 2. PÇ'nin Teknik Özellikleri

Kimyasal bileşim (%)	CaO	63,57
	SiO ₂	19,34
	Al ₂ O ₃	3,75
	Fe ₂ O ₃	4,15
	MgO	2,90
	SO ₃	3,15
	K ₂ O	0,81
Na ₂ O	0,41	
Kızdırma kaybı	1,92	
Blaine (cm ² /g)	3804	
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	3,15	

Tablo 3. SD'nin Teknik Özellikleri

SiO ₂	93%
H ₂ O(Nem)	0,3%
Kızdırma kaybı	3,5%
+45 µ	2,5%
Hacim yoğunluğu	0,55-0,65 kg/dm ³
BET	Min 1 5-28 m ² /gr (doğruluk 23,36 m ² /gr)

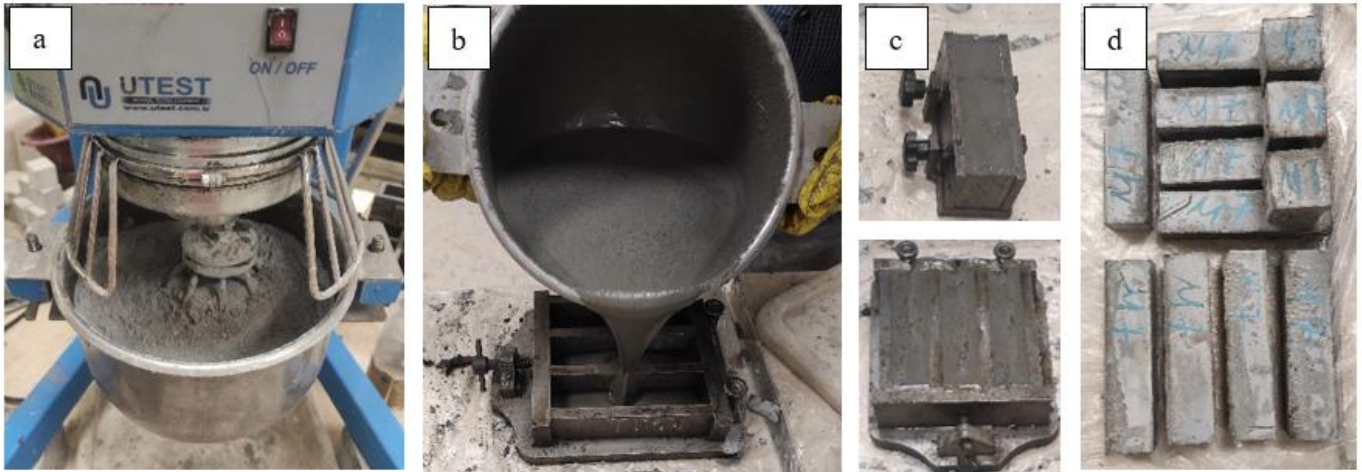
Metot

HA'nın ikame oranı değişken tutularak 1 adet MB karışımı referans olmak üzere 7 farklı MB karışımı deneysel çalışma kapsamında üretilmiştir. MB'nin çimento ile değişim oranı hacimce % 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30'dur. S/B oranı referans setinde 0.46 olarak alınmıştır. Tüm MB setlerinde kullanılan su miktarı 382 kg/m^3 ve SD miktarı 150 kg/m^3 ile sınırlandırılmıştır. Akışkanlaştırıcının kullanım miktarı, üretici firma kullanım sınır değer aralığı korunarak, MB'lerin işlenebilirlik ve vizkozitesinin tahsisi için değişken oranlarda tutulmuştur. MB setlerine ait 1 m^3 karışım tasarımı Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. MB Karışım Tasarımı (kg/m^3)

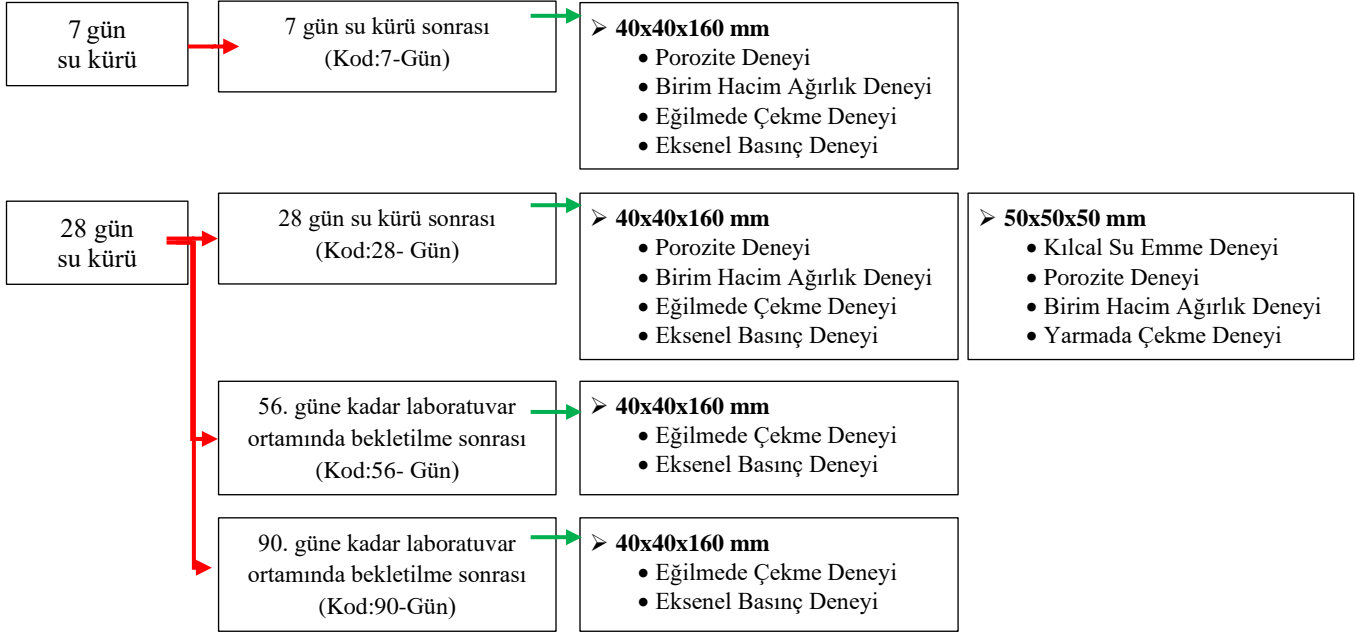
	MB-HA0	MB-HA5	MB-HA10	MB-HA15	MB-HA20	MB-HA25	MB-HA30
PC	680	646	612	578	544	510	476
SD	150	150	150	150	150	150	150
HA	0	25,7	51,4	77,1	102,8	128,4	154,1
Su	382	382	382	382	382	382	382
Akışkanlaştırıcı	5,45	5,55	5,70	5,75	5,80	6,00	6,20
DK	855	855	855	855	855	855	855

Karışımlarının üretiminde 3 dm^3 kapasiteli laboratuvar tipi mikser kullanılmıştır (Şekil 1.a). Küp ve prizma kalıplara sıkıştırılmadan yerleştiren MB'ler (Şekil 1.b ve Şekil 1.c.), 24 saat sonunda kalıplardan çıkarılıp $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta kirece doymun su kürü ile 7 ve 28. güne kadar olgunlaştırılmıştır. Toplamda 42 adet küp ve 84 adet prizma numune üretilmiştir (Şekil 1.d).



Şekil 1. Numune Hazırlama Süreci

Numunelerin olgunlaştırılmasında 2 farklı kür şartları (su ve su+hava kürü) ve 4 farklı periyot (7, 28, 56, 90) esas alınmıştır. Numuneler 4 gruba ayrılmış birinci grup 7 gün, diğer 3 grup ise 28 gün $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta kirece doymun su küründe bekletilmiştir. 28 gün su kürü sonrası numune gruplarından bir takım 28. günde ilgili deneylerde kullanılmış, diğer iki takım ise sırasıyla 56. ve 90. deney gününe kadar laboratuvar ortamında bekletilmiş ve akabinde ilgili deneyler yapılmıştır. Numune kodları, kür şartları ve numune yaşını belirtir şekilde oluşturulmuştur. Örnekle; MB-HA0 referans setini ifade ederken; 7-Day, 7 gün su kürü uygulanan numune grubunu; 56-Day, 28 gün su kürü sonrası 56. deney gününe kadar laboratuvar ortamında bekletilen numune grubunu ifade etmektedir. Şekil 2. MB setleri ile gerçekleştirilen deneysel prosedürü ve numune kodlama verisini sunmaktadır.



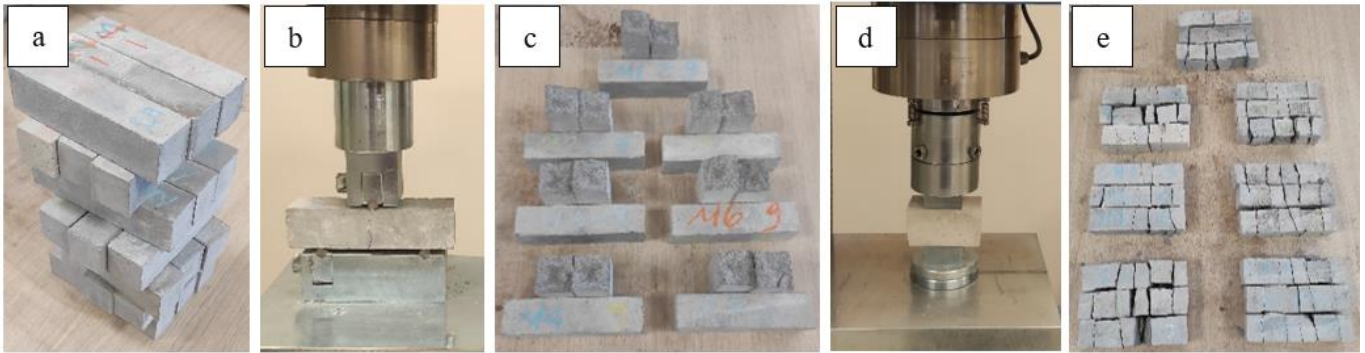
Şekil 2. MB Setleri, Numune Kodları, Kür ve Test Prosedürü

DeneySEL Çalışma

Üretilen tüm MB setleri ile etüv kurusu birim hacim ağırlık, porozite, kılcal su emme, eğilmede çekme dayanımı, eksenel basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı değerlendirmesi %0, %15 ve %30 HA içeren numuneler ve karışımda kullanılan HA tozu ile belirlenmiş, tüm deneysel çalışma ve mikroyapı analizi verileri bulgular bölümünde grafikler yardımı ile yorumlanmış ve karşılaştırılmıştır.

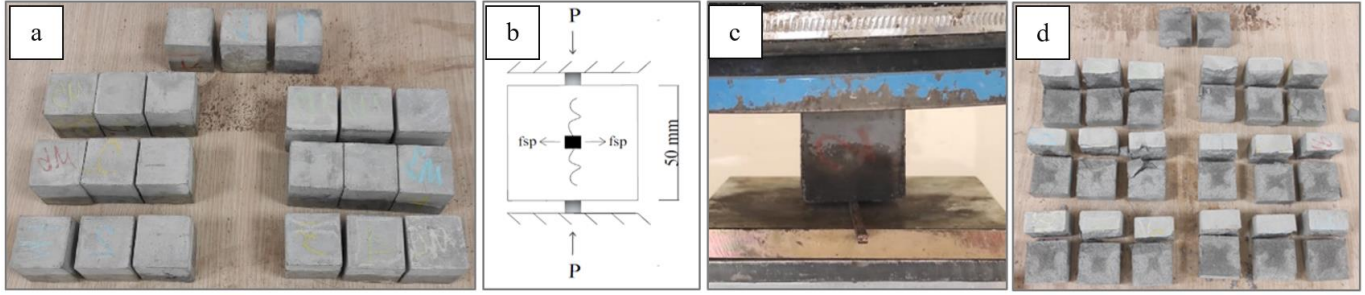
Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Şekil 2’de verilen deney günlerinde 40x40x160 mm ayrıtlı prizma numuneler ile eksenel basınç deneyi (ASTM C348-02, 2002) 15 kN yükleme kapasiteli üniversal bir test makinesi ile gerçekleştirilmiştir. Deney sonrası elde edilen 2’şer adet numune parçası ile 250 kN kapasiteli üniversal basınç dayanımı test pres makinesi kullanılarak eksenel basınç deneyi (ASTM C349-08, 2008) yapılmıştır (Şekil 3). Eksenel basınç deneyinde 1 kN/s basınç yükü uygulanmıştır (ASTM C109/C109M, 2007).



Şekil 3. Eğilmede Çekme ve Eksenel Basınç Deneyi

28 gün kirece doymuş su kürü uygulanan 50x50x50 mm ayrıtlı numuneler ile yarmada çekme deneyi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Yarmada Çekme Deneyi

Fiziksel ve Durabilite Özelliklerinin Belirlenmesi

Fiziksel özelliklerin tespitinde 40x40x160 mm ayrıtlı prizma ve 50x50x50 mm ayrıtlı küp numuneler kullanılmıştır. Çalışma prosedürüne göre tüm numunelerin su kürü sonrası sırasıyla su içindeki asılı ağırlığı, doymuş kuru yüzey ağırlığı ve etüv kurusu ağırlığı saptanarak; etüv kurusu birim hacim ağırlık ve porozite oranı tespit edilmiştir.

28 günlük küp numuneler ile kılcal su emme deneyi gerçekleştirilmiştir. Su kürü sonrası, 24 saat hava sirkülasyonlu etüv de 110 ± 2 °C'de bekletilerek etüv kurusu sabit ağırlığı sağlanmış numuneler laboratuvar ortamında oda sıcaklığına kadar bekletilip, dört tarafı su geçirmez parafin tabakasıyla yalıtılmıştır. Yalıtılmayan iki yüzeyden biri su ile temas edecek şekilde su haznesine yerleştirilmiş ve 0, 5, 10, 30, 60, 240 ve 1440 dakikalarında tek yüzeyden (50x50 mm²) emilen su miktarı 0,01 g hassasiyeti ile tespit edilmiştir (ASTM C1585-13, 2013).

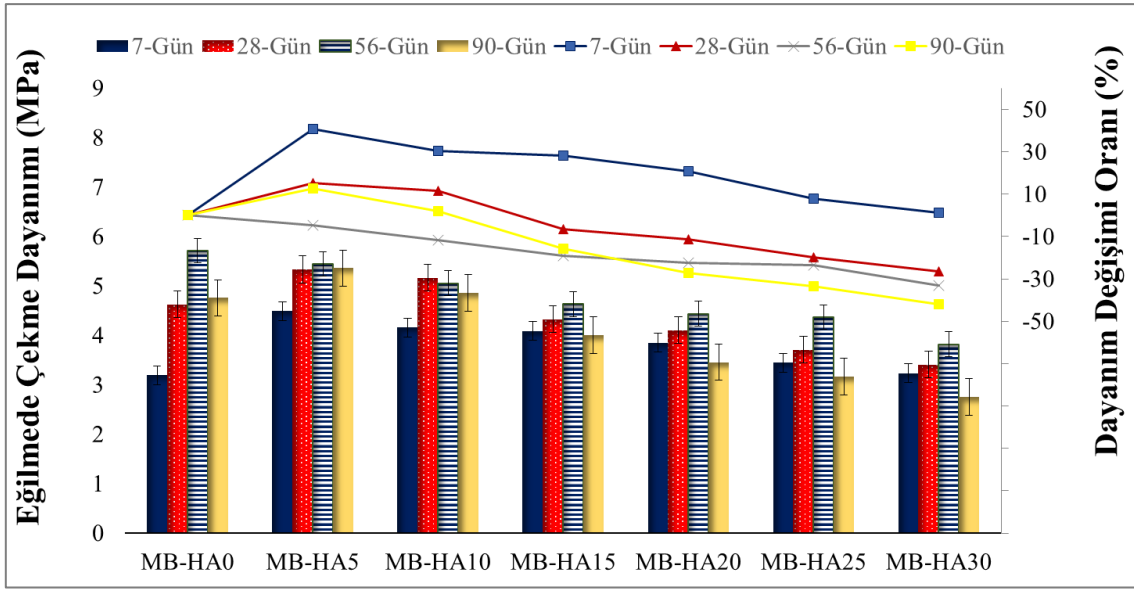
Mikroyapının Belirlenmesi

Mikroyapı analizine yönelik değerlendirmeler; 28 gün su kürü sonrası MB-HA0, MB-HA15 ve MB-HA30 setlerine ait numunelerden elde edilen toz örnekler ve karışımda kullanılan HA tozunun XRD verilerine dayanır. Analizlerde kullanılan numune örnekleri, aksel basınç dayanımı deneyinde kullanılan numunelerin deney sonrası yeterli boyut ve miktarda öğütülmesi ile sağlanmıştır. Mikroyapı analizleri Munzur Üniversitesi MUNTEAM bünyesinde RİGAKU-Miniflex 600 X-ışını kırınım cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Eğilmede Çekme Dayanımı Bulguları

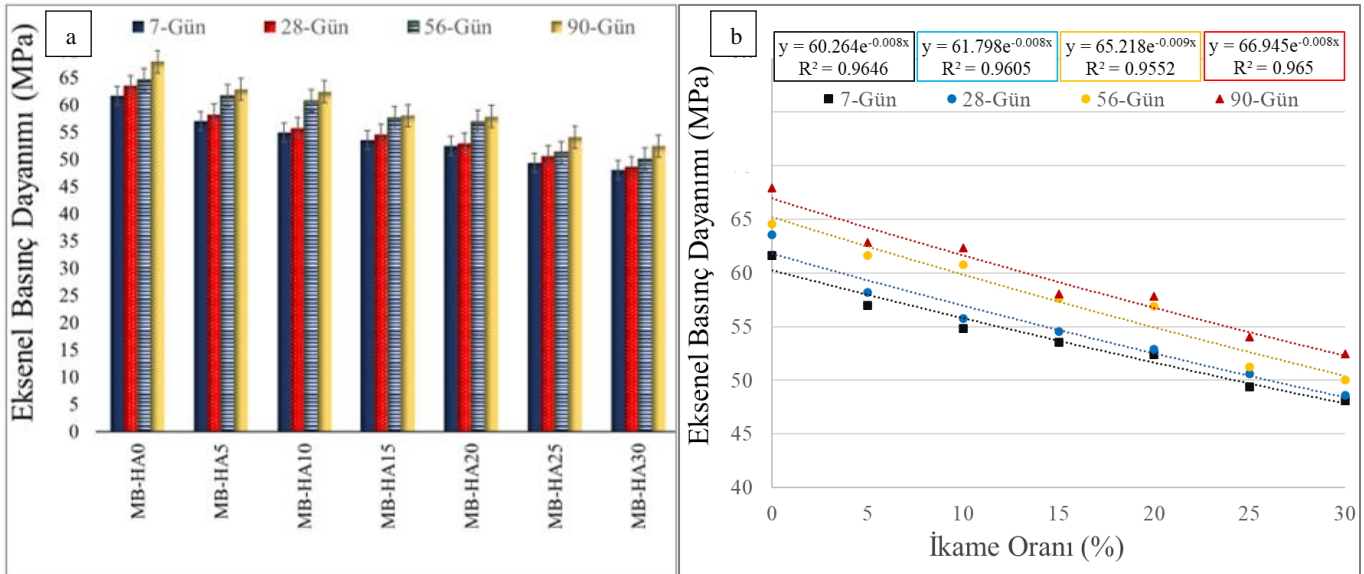
7, 28, 56 ve 90 günlük numuneler ile gerçekleştirilen eğilmede çekme deneyi verileri Şekil 5'te sunulmuştur. 7-Gün ve 28-Gün numunelerinde en yüksek eğilmede çekme dayanımı MB-HA5 setine aittir. Tüm karışımların 7-Gün setleri referans setine göre daha fazla eğilmede çekme dayanımı vermektedir. 28-Gün numunelerinde eğilmede çekme dayanımı verileri MB-HA0, MB-HA5 ve MB-HA10 için sırasıyla 4,63, 5,33, 5,16 MPa'dır ve referans setinden MB-HA5 setine kadar artış ile devam etmektedir. Ancak MB-HA10 setinden MB-HA30 setine kadar eğilmede çekme dayanımı azalmakta ve bu aralıktaki tüm grupların çekme dayanımı referans setinden daha düşük değerler vermektedir. Harç atığı ikameli çalışmalar (Moon vd., 2005) ile benzerlik içeren bu sonuçlara ilaveten; 56-Gün ve 90-Gün numunelerinin eğilmede çekme dayanımı verileri incelendiğinde; 56-Gün numunelerinde eğilmede çekme dayanımının kendi grupları içinde artışa devam ettiği (MB-HA10 hariç) ancak 90-Gün numunelerinde benzer eğilimi vermediği görülmektedir. Bu durum akışkanlaştırıcının ve SD'nin ilerleyen yaşlardaki mekanik performansa etkisi ile açıklanabilir (Etlı, 2022a, 2023a; Etlı vd., 2024; Thomas vd., 2021). Eğilmede çekme dayanımı verileri literatürdeki mikro elemanlardan sağlanan sonuçlar ile örtüşmektedir. Mikro elemanlar bünyesindeki mikro agregaya bağlı olarak gevrek yapıda bir davranış sergiler. Bu hali ile büzülme hassasiyeti klasik betona ve harç elemanlara göre çok daha fazladır (Victor & Tetsushi, 1998).



Şekil 5. Eğilmede Çekme Dayanımı Sonuçları

Eksenel Basınç Dayanımı Bulguları

Eksenel basınç verileri 7, 28, 56 ve 90 günlük numuneler ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçlarını içermektedir (Şekil 6). Eksenel basınç dayanımı en yüksek olan MB seti MB-HA0 olan referans setidir. Artan HA'nın MB'lerde eksenel basınç dayanımını azalttığı Şekil 6'da sunulan verilerden tespit edilmiştir. Tüm yaşlarda en yüksek eksenel basınç dayanımı referans setine aittir. 28-Gün numunelerinin MB-HA0 setinde 63,55 MPa olan eksenel basınç dayanımı aynı kür grubunun MB-HA30 setine kadar azalmaktadır. En fazla eksenel basınç kaybının yaşandığı MB-HA30 setinde bu değişim referans setine göre yaklaşık -%23,5'tir. Tüm ikame durumları için artan kür süresine bağlı olarak 7-Gün'den 90-Gün'e kadar eksenel basınç artmaktadır. HA katkı oranı %0'dan %30'a artarken eksenel basınç dayanımı düşük periyotta seyretse de kür süresine bağlı artış HA ikame oranından olumsuz etkilenmez. Çimentoya ikame ürünler aktif bileşen miktarını doğrudan azaltır. Bu durum basınç dayanımı başta olmak üzere mekanik performans kriterleri üzerinde olumsuz etkiye sahiptir. Benzer deneysel çalışma verileri ile Şekil 6'da verilmiş olan tüm HA ikame durumlarında elde edilen sonuçlar benzerlik göstermektedir (Kim, 2017; Moon vd., 2005).

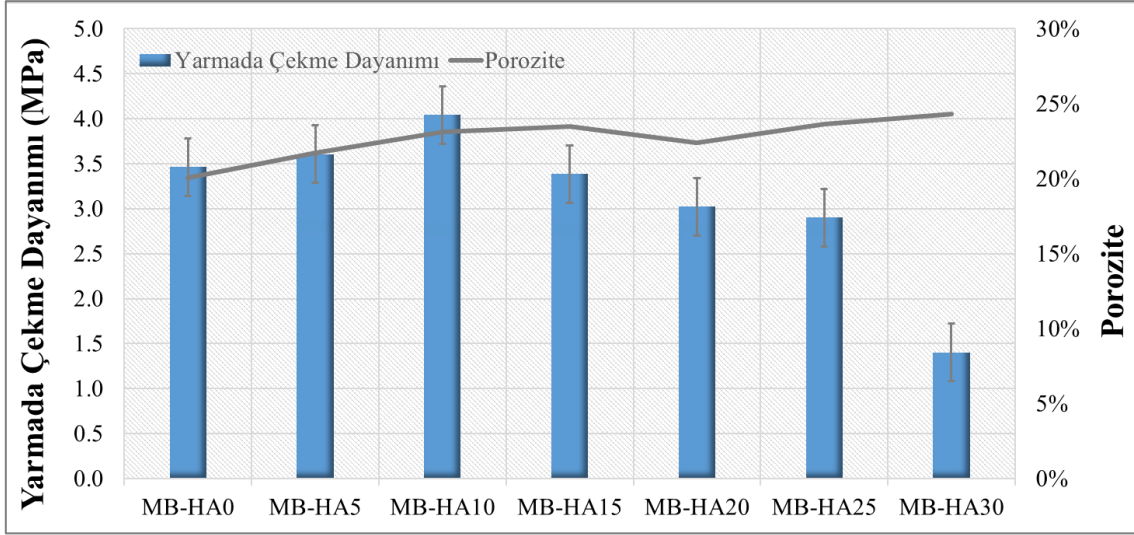


y: Eğilmede çekme dayanımı (MPa)
x: İkame oranı (%)

Şekil 6. Eksenel Basınç Dayanımı Sonuçları

Yarmada Çekme Dayanımı Bulguları

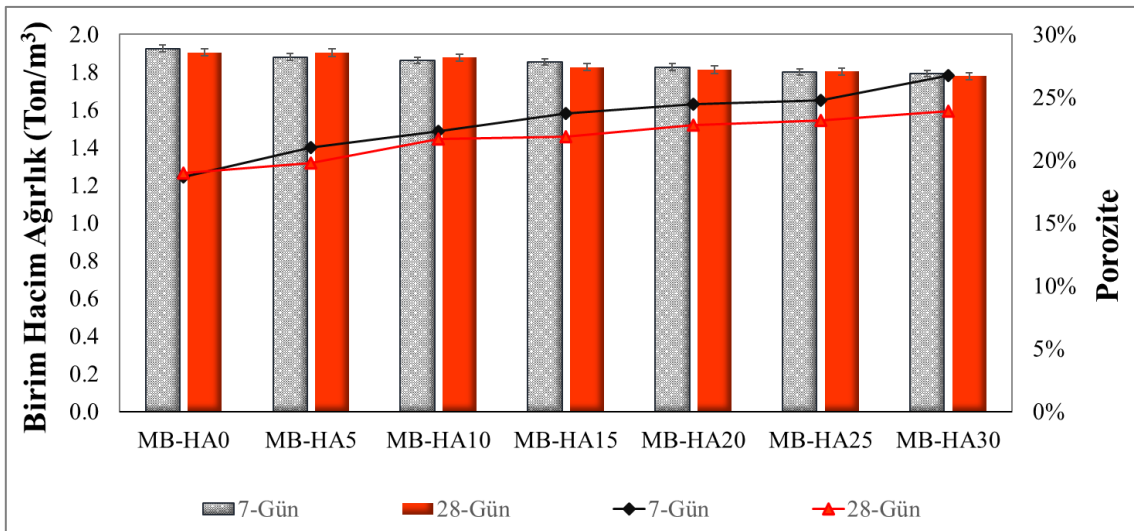
50x50x50 ayrıtlı 28-Gün numuneleri ile gerçekleştirilen porozite ve yarmada çekme dayanımı verileri Şekil 7'de verildiği gibidir. En yüksek yarmada çekme dayanımı 4,04 MPa ile MB-HA10 setine aittir. MB-HA10'dan sonra yarmada çekme dayanımı düşüş sergiler. En düşük çekme dayanımı ve en yüksek porozitenin kaydedildiği MB-HA30 setinin küp numuneleri için porozite değeri yaklaşık %24'tür. %5 ve %10 HA ikamesi içeren MB-HA5 ve MB-HA10 setlerinde yarmada çekme dayanımı referans setine oranla artış gösterir. Ayrıca tüm setlerin porozite oranı referans setine oranla %2-%5 bandında daha fazladır.



Şekil 7. Yarmada Çekme Dayanımı ve Porozite Sonuçları

Etüv Kuru Birim Hacim Ağırlık ve Porozite Bulguları

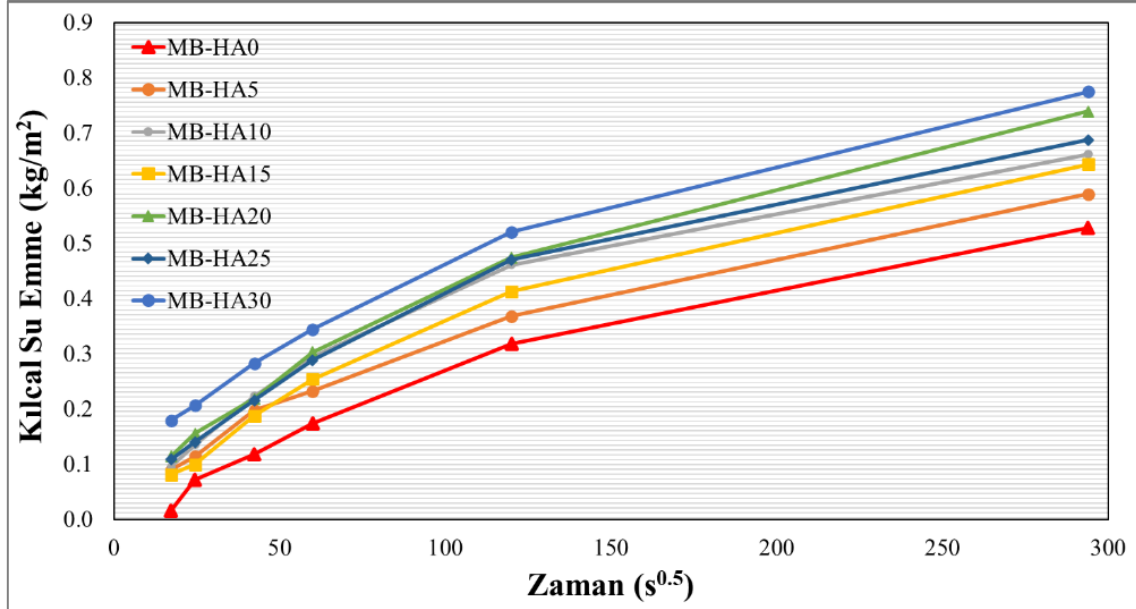
40x40x160 mm ayrıtlı prizma numuneleri ile gerçekleştirilen etüv kuru birim hacim ağırlık ve porozite verileri Şekil 8'de verilmiştir. En düşük birim hacim ağırlık değeri MB-HA30 setine aittir. Ayrıca en fazla porozite oranı da yine aynı setin 7-Gün ve 28-Gün setlerinde kaydedilmiştir. Referans setine oranla birim hacim ağırlıktaki değişim -%1 ile -%7 aralığındadır. Artan HA oranı ile porozite artar ve etüv kuru birim hacim ağırlık azalır. Birim hacim ağırlıktaki değişim azalan PÇ oranı ve artan HA oranı ile de ilişkilidir. Bu durum PÇ ile HA'nin özgül ağırlık farkından kaynaklanabilir. Birim hacim ağırlıktaki değişim dar bir aralıkta kalsa da porozite de değişim HA ikamesinden daha çok etkilenir.



Şekil 8. Etüv Kuru Birim Hacim Ağırlık ve Porozite Sonuçları

Kılcal Su Emme Bulguları

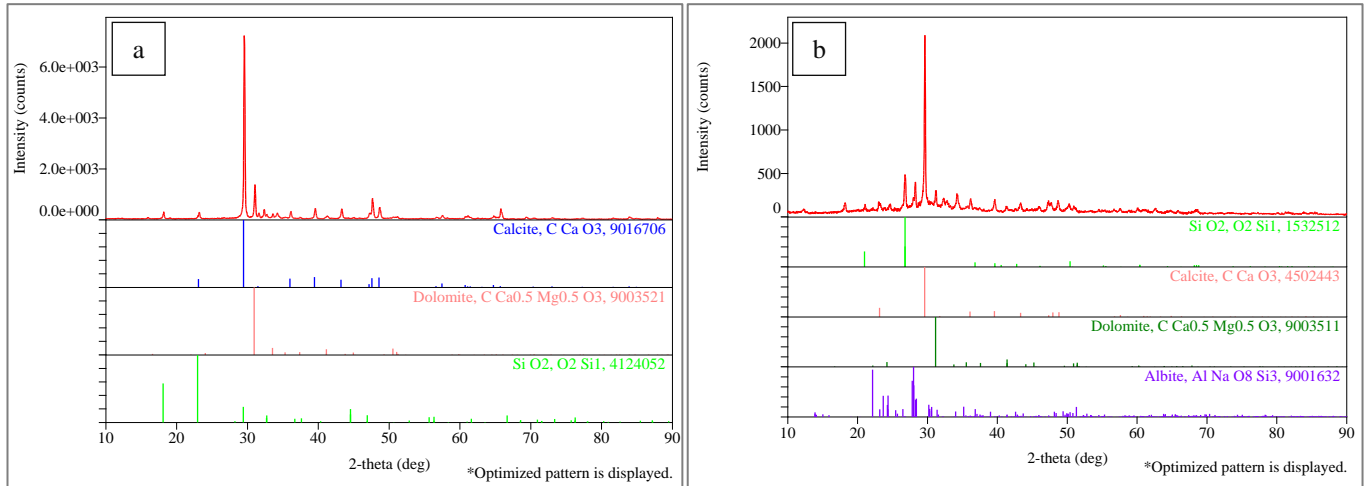
28-Gün küp numuneler ile gerçekleştirilen tek yüzeyden birim alanda emilen kılcal su miktarının zamana bağlı değişimi Şekil 9'da verilmiştir. HA oranının artması ile kılcal su emme miktarı artmaktadır. En fazla ve en az kılcal su emme miktarı sırasıyla MB-HA30 ve MB-HA0 setinde kaydedilmiştir.



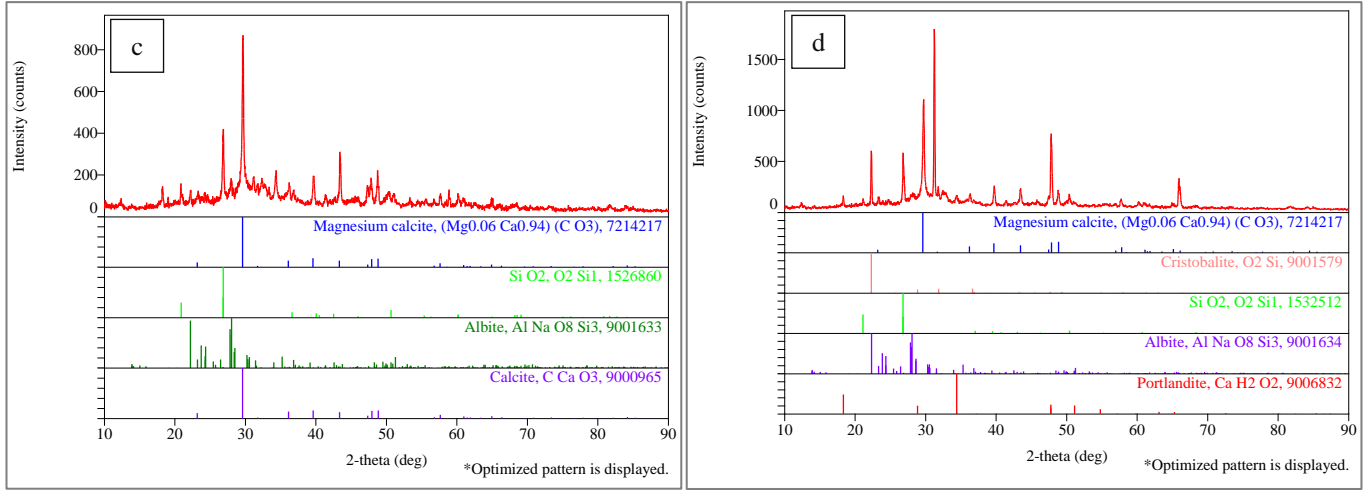
Şekil 9. Kılcal Su Emme Deneyi Sonuçları

Mikroyapı Bulguları

Mikroyapı analizi kapsamında yapılan XRD testinde, karışımlarda kullanılan HA ve %0, %15, %30 HA içeren numune gruplarından elde edilen örnekler kullanılmıştır. Örneklerden elde edilen grafikler Şekil 10'da verilmiştir. Karışımda kullanılan HA'nın; Calcite, Dolomit, SiO₂ pikleri yoğun olarak gözlenmektedir (Şekil 10.a). İkinci XRD analizi verisi MB-HA0 setine ait numunelerden elde edilmiştir. Bu set referans numune grubunu temsil etmektedir (Şekil 10.b). MB-HA0 setinde en yüksek pikler Calcite için gözlemlenmiştir. MB-HA15 ve MB-HA30 karışımlarında ise HA oranı sırası ile %15 ve %30 olmakla birlikte yine en yüksek pik değerleri Calcite değerleri olarak görülmektedir. Elde edilen XRD sonuçları referans karışımı hariç Albite, Magnezyum Calcite ve Dolomit içermektedir. Bunlar doğal kayalardan elde edilen mineral içerikleridir (Özay vd., 2020). Özellikle geri dönüşüme ait malzeme harçlardan temin edildiğinden içeriğinde doğal kayaların bulunduğu söylenebilir.



Şekil 10. XRD Sonuçları a. HA, b. MB-HA0, c. MB-HA15, d. MB-HA30



Şekil 10 (Devamı). XRD Sonuçları a. HA, b. MB-HA0, c. MB-HA15, d. MB-HA30

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında; MB'lerin tasarımındaki PÇ miktarı HA ile %0-%30 aralığında değiştirilerek 7 farklı MB üretilmiştir. 4 farklı numune yaşında mekanik ve durabilitenin tespitine yönelik deneyler yapılmıştır. Ayrıca karışımlarda kullanılan HA ve %0, %15, %30 HA ikameli olarak üretilen MB setlerinden sağlanan örnekler ile mikro yapı analizleri uygulanmıştır. MB tasarımlarında HA miktarının artırılması ve PÇ miktarının azaltılmasına bağlı olarak mekanik dayanımda kayıplar tespit edilmiştir. Bu hali ile referans seti en yüksek aksel basınç dayanımına sahiptir ve aksel basınçtaki en fazla kayıp yaklaşık %23,5 ile MB-HA30 setine aittir. 7-Gün ve 28-Gün numunelerinde en yüksek eğilmede çekme dayanımı MB-HA5 setine aittir. Tüm HA ikame edilen setlerde erken yaş (7-Gün) eğilmede çekme dayanımı referans setine oranla artmaktadır. Ayrıca 28-Gün setlerinde %5 ve %10 HA ikameli gruplarda eğilmede çekme dayanımı referans setine oranla artış ile kaydedilmiştir. Erken yaş eğilmede çekme dayanımına pozitif katkı sunan HA, 90 gün sonunda sadece %5 HA ikameli setlerde benzer eğilimi sergilemektedir. HA'nın ikamesi yarmada çekme dayanımını üzerinde de benzer etkiye sahiptir. %5 ve %10 HA ikameli gruplarda yarmada çekme dayanımı artmakta, diğer ikame durumlarında ise referans setinin altında değerler almaktadır. HA ikame oranının artması ile kılcal su emme oranı artmaktadır. Birim hacim ağırlık, referans seti ve diğer tüm ikame durumları için yakın değer aralığında kalsa da porozite oranı HA ikamesi ile artış eğilimi göstermektedir. MB'lerde amaçlanan en önemli 4 olgudan biri "hedef işlenebilirlik özelliğine göre istenen reolojik davranışı sağlayabilmek"tir. Çimento ve mikro agregaların tasarım matrisinde bir arada bulunmasını sağlayan çeşitli kuvvetler vardır. Parçacıklar karşılıklı etkileşim halindedir ve suyun polarize edilebilirliği üzerinde koloidal kökenli kuvvetler söz konusudur (Houst vd., 2002). Çalışma kapsamında üretilen tüm MB'ler hedeflenen işlenebilirlik düzeyindedir. Ancak PÇ'ya ikame edilen HA'nın karışımın suyu ihtiyacını artırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca HA'nın MB tasarımdaki artan miktarı aktif bileşen miktarını azaltmaktadır. HA ikamesine bağlı değişen vizkoziteyi düzenlemek için artırılan akışkanlaştırıcı miktarı ve karışımda kullanılan SD, ilerleyen yaşlarda mekanik dayanım üzerinde negatif etki sunabilir. Bu sebeple HA'nın yalnızca öğütme işlemi ile çimentoya ikame edilmesi kullanılan HA'nın kimyasal ve fiziksel özellikleri ile yakından ilişkilidir. Buna alternatif olarak, HA'nın kalsinasyonu veya HA'nın dolgu malzemesine ikame edilmesi daha faydalı bir yaklaşım olabilir. Öğütme işlemi sonrası uygun dağılım ile bilhassa ince taneler bakımından zengin malzeme ihtiyacının HA ile sağlanması sürdürülebilir bir yaklaşım olacaktır.

KAYNAKLAR

- Ajdukiewicz, A., & Kliszczewicz, A. (2002). Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement and Concrete Composites*, 24(2), 269-279. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00012-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00012-9)
- Akgül, M., Doğan, O., & Etili, S. (2020). Farklı Çimento ile Üretilen Granül Atık Kauçuk Agregaların İkame Edilmiş Kendiliğinden Yerleşen Beton Harcının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 12(2), 787-798. <https://doi.org/10.29137/umagd.734614>
- Akgül, M., & Etili, S. (2023). Effect of Partial Inclusion of Tiles and Brick Waste as Binders in SCM Elements on Fresh State and Early Age Mechanical Properties. *3rd International Conference on Innovative Academic Studies*, 699-706.

- Akgül, M., & Etili, S. (2024). Investigation of the variation of mechanical and durability properties of elements manufactured with rubber substituted SCMs with element height. *Construction and Building Materials*, 428, 136300. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136300>
- ASTM C109/C109M. (2007). Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). *ASTM International*, 32(10), 2141-2147. <https://doi.org/10.1520/C0109>
- ASTM C348-02. (2002). *ASTM C348-02 Standard test method for flexural strength of hydraulic cement mortars*. 7.
- ASTM C349-08. (2008). Standard test method for compressive strength of hydraulic-cement mortars (using portions of prisms broken in flexure). *ASTM International*, 1-4.
- ASTM C1585-13. (2013). *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes*, *ASTM International 41*. 1-6.
- Aydın İpekçi, C., Coşkun, N., & Tıkansak Karadayı, T. (2017). İnşaat Sektöründe Geri Kazanılmış Malzeme Kullanımının Sürdürülebilirlik Açısından Önemi. *TUBAV, II. Uluslararası Sürdürülebilir Yapılar Sempozyumu ISBS-2015*, 10(2), 43-50.
- Bayrak, İ. C., & Telatar, O. M. (2021). İnşaat Sektörü ve Ekonomik Büyüme İlişkisi: Türkiye Ekonomisi Üzerine Ampirik Bir Analiz. *Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi (GUSBEED)*, 12(3).
- Castellote, M., Alonso, C., Andrade, C., Turrillas, X., & Campo, J. (2004). Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction. *Cement and Concrete Research*, 34(9), 1633-1644. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00229-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00229-1)
- Cemalgil, S., & Etili, S. (2019). Polypropylene Fiber Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Harçların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Munzur 1. Uluslararası Uygulamalı Bilimler Kongresi*, 101-110.
- Cemalgil, S., & Etili, S. (2020). Numune Boyutunun Kauçukla Modifiye Edilmiş Kendiliğinden Yerleşen Betonun Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkileri. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 6(2), 118-129. <https://doi.org/10.29132/ijpas.789480>
- Cemalgil, S., Etili, S., & Onat, O. (2018). Curing effect on mortar properties produced with styrene-butadiene rubber. *Computers and Concrete*, 21(6), 705-715. <https://doi.org/10.12989/cac.2018.21.6.705>
- Cemalgil, S., Onat, O., Tanaydın, M. K., & Etili, S. (2021). Effect of waste textile dye adsorbed almond shell on self compacting mortar. *Construction and Building Materials*, 300, 123978. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123978>
- Etili, S. (2022a). Evaluation of curing time for micro concrete mixes containing silica fume, nano-silica and fly ash. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 21(42), 304-316. <https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1093891>
- Etili, S. (2022b). Investigation of the Effect of Glass Sand Used in SCC on the Behavior of the SCC Stress- Strain Relationship. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 6(2), 237-244. <https://doi.org/10.46460/ijiea.1108476>
- Etili, S. (2023a). Effect of glass sand used as aggregate on micro-concrete properties. *Journal of the Croatian Association of Civil Engineers*, 75(01), 39-51. <https://doi.org/10.14256/JCE.3538.2022>
- Etili, S. (2023b). Evaluation of the effect of silica fume on the fresh, mechanical and durability properties of self-compacting concrete produced by using waste rubber as fine aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 384, 135590. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135590>
- Etili, S., Cemalgil, S., & Onat, O. (2018a). Mid-Temperature Thermal Effects on Properties of Mortar Produced with Waste Rubber as Fine Aggregate. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 4(1), 10-22. <https://doi.org/10.29132/ijpas.341413>
- Etili, S., Cemalgil, S., & Onat, O. (2018b). Properties of Self-Compacting Mortars with Different Contents of Synthetic Macro Fiber. *6th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, 593-602.
- Etili, S., Cemalgil, S., & Onat, O. (2021). Effect of pumice powder and artificial lightweight fine aggregate on self-compacting mortar. *Computers and Concrete*, 27(3), 241-252. <https://doi.org/10.12989/cac.2021.27.3.241>

- Etli, S., Yılmaz, T., & Hansu, O. (2024). Effect of White-Portland cement containing micro and nano silica on the mechanical and freeze-thaw properties of self compacting mortars. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 50, 101614. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101614>
- Felekoğlu, B. (2007). Effects of PSD and surface morphology of micro-aggregates on admixture requirement and mechanical performance of micro-concrete. *Cement and Concrete Composites*, 29(6), 481-489. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.12.008>
- Felekoğlu, B. (2009). Yüksek Performanslı Mikro Beton Tasarımı. *Dokuz Eylül Üniversitesi, Doktora Tezi, İzmir*.
- Felekoğlu, B., Tosun, K., & Baradan, B. (2009). Effects of fibre type and matrix structure on the mechanical performance of self-compacting micro-concrete composites. *Cement and Concrete Research*, 39(11), 1023-1032. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.07.007>
- Gao, T., Shen, L., Shen, M., Liu, L., Chen, F., & Gao, L. (2017). Evolution and projection of CO2 emissions for China's cement industry from 1980 to 2020. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 522-537. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.006>
- Gesoglu, M., Güneyisi, E., Hansu, O., Etli, S., & Alhassan, M. (2017). Mechanical and fracture characteristics of self-compacting concretes containing different percentage of plastic waste powder. *Construction and Building Materials*, 140, 562-569. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.139>
- Günel, G., Alakara, E. H., Demir, İ., & Sevim, O. (2024). Geri Dönüştürülmüş Çimento Harç Tozunun Çimento Bağlayıcılı Kompozitler Üzerindeki Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 27(2), 533-543. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1135957>
- Hafez, H., Kurda, R., Kurda, R., Al-Hadad, B., Mustafa, R., & Ali, B. (2020). A Critical Review on the Influence of Fine Recycled Aggregates on Technical Performance, Environmental Impact and Cost of Concrete. *Applied Sciences*, 10(3), 1018. <https://doi.org/10.3390/app10031018>
- Hansen, T. C. (1986). Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945–1985. *Materials and Structures*, 19(3), 201-246. <https://doi.org/10.1007/BF02472036>
- Hansu, O., & Etli, S. (2022). Beton ile Üretilen Suda Yüzebilen Kano Tasarımı Üzerine Bir Araştırma. *European Journal of Science and Technology*, (35), 330-334. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1052105>
- He, Z., Zhu, X., Wang, J., Mu, M., & Wang, Y. (2019). Comparison of CO2 emissions from OPC and recycled cement production. *Construction and Building Materials*, 211, 965-973. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.289>
- Houst, Y. F., Bowen, P., & Siebold, A. (2002). Some basic aspects of the interaction between cement and superplasticizers. *Innovations and Developments in Concrete Materials and Construction*, 12, 225-234.
- Joseph, H. S., Pachiappan, T., Avudaiappan, S., Maureira-Carsalade, N., Roco-Videla, Á., Guindos, P., & Parra, P. F. (2023). A Comprehensive Review on Recycling of Construction Demolition Waste in Concrete. *Sustainability*, 15(6), 4932. <https://doi.org/10.3390/su15064932>
- Kim, Y.-J. (2017). Quality properties of self-consolidating concrete mixed with waste concrete powder. *Construction and Building Materials*, 135, 177-185. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.174>
- Korkmaz, A. V. (2019). *Portland Çimento Üretiminde ve Kullanımında İş Güvenliği Risklerinin ve Sağlık Önlemlerinin Değerlendirilmesi*. MT Bilimsel(15), 21-30.
- Kwon, E., Ahn, J., Cho, B., & Park, D. (2015). A study on development of recycled cement made from waste cementitious powder. *Construction and Building Materials*, 83, 174-180. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.086>
- Lidmila, M., Tesárek, P., Plachy, T., Rácová, Z., Padevět, P., Nežerka, V., & Zobal, O. (2013). Utilization of Recycled Fine-Ground Concrete from Railway Sleepers for Production of Cement-Based Binder. *Applied Mechanics and Materials*, 486, 323-326. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.486.323>
- Moon, D.-J., Moon, H.-Y., & Kim, Y.-B. (2005). Fundamental Properties of Mortar Containing Waste Concrete Powder. *Geosystem Engineering*, 8(4), 95-100. <https://doi.org/10.1080/12269328.2005.10541243>

- Omrane, M., Kenai, S., Kadri, E.-H., & Ait-Mokhtar, A. (2017). Performance and durability of self compacting concrete using recycled concrete aggregates and natural pozzolan. *Journal of Cleaner Production*, 165, 415-430. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.139>
- Özay, P., Karagülle, M., Kardeş, S., & Karagülle, M. Z. (2020). Chemical and mineralogical characteristics of peloids in Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(12), 805. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08777-2>
- Shui, Z., Xuan, D., Chen, W., Yu, R., & Zhang, R. (2009). Cementitious characteristics of hydrated cement paste subjected to various dehydration temperatures. *Construction and Building Materials*, 23(1), 531-537. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.016>
- Thomas, C., Tamayo, P., Setién, J., Ferreño, D., Polanco, J. A., & Rico, J. (2021). Effect of high temperature and accelerated aging in high density micro-concrete. *Construction and Building Materials*, 272, 121920. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121920>
- TS EN 197-1. (2011). Çimento- Bölüm 1: Genel çimentolar- Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara*.
- TS EN 933-1. (2012). *Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımının tayini - Eleme yöntemi*. Ankara.
- TS EN 934-2+A1. (2014). Kimyasal katkıları - Beton, harç ve şerbet için - Bölüm 2: Beton kimyasal katkıları - Tarifler, gerekler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara*.
- TS EN 1008. (2003). *Beton-Karma suyu-Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları*.
- Tu, T. Y., Chen, Y. Y., & Hwang, C. L. (2006). Properties of HPC with recycled aggregates. *Cement and Concrete Research*, 36(5), 943-950. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.11.022>
- Victor, C. L., & Tetsushi, K. (1998). Engineered Cementitious Composites for Structural Applications. *Innovations Forum in ASCE J. Materials in Civil Engineering*, 10(2).
- Yu, R., & Shui, Z. (2014). Efficient reuse of the recycled construction waste cementitious materials. *Journal of Cleaner Production*, 78, 202-207. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.003>