



DOĞAL ALKALİ MALZEMELERİN ÇİMENTOLU MACUN DOLGUNUN DAYANIM-DURAYLILIK VE MİKROYAPI PERFORMANSINA ETKİSİ

Tekin YILMAZ^{1*}, Bayram ERÇIKDI²

¹ Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane MYO, Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, Gümüşhane, Türkiye

² Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Çimentolu Macun Dolgu,
Sülfürlü Maden Atığı,
Doğal Alkali Malzemeler,
Dayanım-Duraylılık,
Mikroyapı.*

Öz

Bu çalışmada, çimentolu macun dolgu (ÇMD) içerisinde doğal alkali malzemelerin (D_{AL-M}) sülfürlü maden atığına (S-MA) ikame (%5-15) olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Kontrol numuneleri %8,5 bağlayıcı oranında hazırlanırken, D_{AL-M} ikameli numuneler %7,5-8,5 bağlayıcı oranında S-MA yerine kalsitik ve dolomitik kireçtaşı kullanılarak üretilmiştir. Numuneler üzerinde 7-360 gün aralığında basınç dayanımı ve 28-180 günde mikroyapı testleri uygulanmıştır. Dayanım-duraylılık bulguları, D_{AL-M} ikamesinin ÇMD'nin dayanımını arttırdığını ve uzun dönemde meydana gelen dayanım kayıplarını azalttığını göstermiştir. Ayrıca, 28-360 gün boyunca istenen asgari basınç dayanımı ($\geq 1,0$ MPa) %5 D_{AL-M} ikameli ÇMD numuneleri (%7,5) haricinde sağlanmıştır. Mikroyapı sonuçları değerlendirildiğinde, kür süresinin artmasıyla tüm numunelerin toplam poroziteleri (n_{top}) azalmış ve Kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında, S-MA yerine yapılan %15 D_{AL-M} ikamesi numunelerin n_{top} değerlerini düşürmüştür. ÇMD'nin dayanım-duraylılık ve mikroyapı performansı ve D_{AL-M} 'lerin oluşturduğu olası çevresel problemler göz önüne alındığında, sonuçlar, bu malzemelerin ÇMD karışımlarında kullanımının faydalı olabileceğini ortaya koymuştur.

EFFECT OF NATURAL ALKALINE MATERIALS ON THE STRENGTH-STABILITY AND MICROSTRUCTURE PERFORMANCE OF CEMENTED PASTE BACKFILL

Keywords

*Cemented Paste Backfill,
Sulphide Mine Tailings,
Natural Alkaline Materials,
Strength-Stability,
Microstructure.*

Abstract

In this study, the usability of natural alkaline materials (N_{AL-M}) as partial replacement (5-15wt.%) to sulphide-mine tailings (S-MT) in cemented paste backfill (CPB) was investigated. Control samples were prepared at 8.5wt.% binder dosage, whilst, CPB samples containing N_{AL-M} were produced by utilising the calcitic and dolomitic limestone at 7.5-8.5 wt.% cement dosages. Compressive strength between 7-360 days and microstructure tests at 28-180 days were performed on the samples. The strength-stability findings demonstrated that the replacement of N_{AL-M} increased the strength of CPB, and decreased the strength loses occurred at long-term. The minimum compressive strength (≥ 1.0 MPa) desired during 28-360 days was provided except CPB samples (7.5 wt.%) containing 5wt.% N_{AL-M} . When the microstructure results were evaluated, the total porosity (n_{tot}) values of all samples were decreased with the increase of curing time, and the replacement of 15wt.% N_{AL-M} to S-MT decreased the n_{tot} of samples compared to Control samples. Considering the strength-stability and microstructural performance of CPB, and the possible environmental problems caused by N_{AL-M} , the results revealed that the utilisation of these materials in CPB mixtures can be beneficial.

Alıntı / Cite

Yılmaz, T., Erçikdi, B., (2022). Doğal Alkali Malzemelerin Çimentolu Macun Dolgunun Dayanım-Duraylılık ve Mikroyapı Performansına Etkisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(4), 1474-1483.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

T. Yılmaz, 0000-0003-3288-5192
B. Erçikdi, 0000-0003-4900-5382

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	11.03.2022
Revizyon Tarihi / Revision Date	31.05.2022
Kabul Tarihi / Accepted Date	01.06.2022
Yayın Tarihi / Published Date	30.12.2022

* İlgili yazar / Corresponding author: yilmaz@gumushane.edu.tr

1. Giriş (Introduction)

Kireçtaşı, farklı jeolojik süreçlerde oluşan ve yer kabuğunun üst katmanında yaygın bir biçimde bulunan minerallerden birisidir. Kireçtaşı, kimyasal ve organik etkiler vasıtasıyla sularda çökelen maddelerin meydana getirdiği bir kayadır. Karbonatlı tortul kayalar ve fosiller için kullanılan genel bir tabir olan kireçtaşları, esas olarak kalsit, dolomit, aragonit ve manyezit gibi kalsiyum (Ca) bakımından zengin CaCO_3 veya $\text{CaCO}_3/\text{MgCO}_3$ bileşiklerine sahip minerallerden oluşmaktadır (Parlakıldız, 2008; Semerci, 2008; Yılmaz, 2019).

Kireçtaşları, en yaygın kullanılan hammaddelerden birisidir. Çimento ve betonda kullanılan kireçtaşı; yüksek erken dayanım, yüksek işlenebilirlik, düşük su ihtiyacı, betonun üretim maliyetini azaltması ve çimento üretiminde düşük CO_2 emisyonu sağlaması gibi birçok avantaj sunar (Vuk vd., 2001; Ramezianpour vd., 2009; Wang vd., 2015). Dahası, kireçtaşı, puzolanik özellik göstermemesine rağmen boşlukları doldurma özelliği sayesinde çimento hamurunun matrisine ve betonun performansını arttırabilen daha yoğun agrega ile çimento matrisi arasındaki ara yüzey geçiş bölgesinin doldurulmasına katkı sağlayabilir (Wang vd., 2015). Yukarıda bahsedilen avantajlardan dolayı, son yıllarda farklı çalışma alanlarında kullanımı giderek artan kireçtaşı ülkelerin ekonomik koşulları göz önüne alındığında, çimento sanayinde hammadde olarak (Salas vd., 2016), metalürji endüstrisinde yüksek fırın ve elektrik fırınlarında demir cevheri içerisinde bulunan safsızlıkların uzaklaştırılmasında, seramik, cam ve tuğla üretiminde (Algin ve Turgut, 2008; Shaaban vd., 2019) ve inşaat endüstrisinde (beton üretiminde, karayolu ve demiryolu yapımında, vb.) iri ve/veya ince agrega (Elbahi ve Boukli Hacene, 2016; Moon vd., 2017; Turk ve Demirhan, 2017; Liu vd., 2018) olarak değerlendirilmektedir. Elbahi ve Boukli Hacene (2016) çimento yerine farklı oranlarda kireçtaşı tozu (%10-30) ve doğal puzolan (%10-30) kullanarak hazırladıkları betonun mühendislik özelliklerini inceledikleri çalışmalarında 28 günden itibaren farklı oranlardaki kireçtaşı ikamesinin betonun basınç dayanımını arttırdığını belirlemişlerdir. Bir başka çalışmada, öğütülmüş kireçtaşının (KT) Portland çimentosu (PÇ) yerine farklı ikame oranlarında (%15-35) kullanımının beton numunelerinin basınç dayanımı (3-7-28 gün) ve porozite (28 gün) gelişimine etkisinin araştırılan Moon vd. (2017), KT ikame oranının artmasıyla beton numunelerinin basınç dayanımının azaldığını, karışım tipi ve kür süresinden bağımsız olarak en yüksek dayanımın %15 KT ikameli numunelerde elde edildiğini belirlemiştir. Ayrıca, yazarlar, basınç dayanımı gelişimine benzer olarak sadece %15 KT içeren beton numunelerinin kontrol numunelerine kıyasla daha düşük (%3,8-8,7) porozite ürettiğini rapor etmiştir. Turk ve Demirhan (2017) silika kumu yerine farklı ikame oranlarında (%25, %50, %75 ve %100) KT kullanımının beton dayanım, duraylılık ve akışkanlık özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar, beton karışımı içerisindeki KT ikame oranının artması ile karışımların akışkanlığında azalma meydana gelirken, numunelerin erken kür sürelerindeki (3 ve 28 gün) mekanik özelliklerinin (basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve kırılma tokluğu) olumlu yönde etkilendiğini belirtmişlerdir. Buna karşın duraylılık özelliklerinde (90 gün) dikkate değer bir değişiklik gözlenmemiştir. Çimentolu macun dolgu (ÇMD) teknolojisi alanında gerçekleştirilen bir çalışmada, araştırmacılar (Hu vd., 2019) çimento yerine %20'ye kadar KT ikame ederek hazırladıkları ÇMD numunelerinde KT ikamesinin 3 ve 7 gün sonunda dayanım düşüşüne sebep olduğunu, 28 gün sonundaki dayanım gelişimi üzerinde ise önemli bir etki gözlenmediğini rapor etmişlerdir. Ayrıca yazarlar KT ikamesinin artmasıyla ÇMD'nin mikroyapı özelliklerinin (porozite, makro gözenek oranı ve ortalama gözenek yarıçapı) gelişim kaydettiğini bildirmişlerdir. Başka bir çalışmada, Zheng vd. (2016) %5,14 sülfür içerikli ve iri taneli atık malzemeye ikame olarak %10-22,5 oranlarında öğütülmüş KT kullanarak ÇMD numuneleri üretmişler ve KT ikamesinin ÇMD'nin dayanım (7-112 gün) ve mikroyapı (7-28 gün) özelliklerine etkisini araştırmışlardır. KT ikameli ÇMD numunelerinin tüm kür sürelerinde kontrol numunelerine kıyasla daha yüksek basınç dayanımı ürettiğini belirten yazarlar, %10 KT ikamesinin daha yüksek ikame oranına (%22,5) kıyasla ÇMD'nin dayanımını daha fazla arttırdığını gözlemlemişlerdir. ÇMD'nin mikroyapısı değerlendirildiğinde, %10-22,5 KT ikameli numunelerinin 7 günlük porozite değerlerinin kontrol numunelerine kıyasla daha yüksek (%38,6-41,5>%35,5) olduğu, buna karşın, 28 gün sonunda %22,5 kireçtaşı ikameli numunenin porozitesinin kontrol numunesinden daha düşük (%33,4<%34,8) olduğu tespit edilmiştir (Zheng vd., 2016). Doğal atık malzemelerin (D_{AL-M} : kalsitik kireçtaşı (KK) ve dolomitik kireçtaşı (DK)) sülfürlü maden atığı (S-MA) içeren ÇMD'nin asit-sülfat oluşumuna karşı nötralizasyon performansının incelendiği çalışmada, Yılmaz vd. (2020) ÇMD karışımı içerisinde S-MA yerine %5-15 oranında ikame olarak kullanılan KK ve DK'nin yüksek oranda CaO içeriğine sahip olması ve S-MA'ya kıyasla daha fazla ince tane içermesinden dolayı hem ÇMD bünyesindeki potansiyel asit oluşumunun nötralize edildiğini hem de dolgu mikroyapısının iyileştirdiğini (daha düşük toplam porozite vb.) ve bu sayede kontrol ÇMD'ye kıyasla oldukça düşük oranda asit ve sülfat oluşumu meydana geldiğini belirtmişlerdir. Diğer bir çalışmada Yılmaz ve Erçikdi (2022) hazırladıkları ÇMD numunelerini uzun dönem (30-360 gün) dinamik tank liçi testlerine tabi tutarak S-MA yerine yapılan KK ve DK ikamesinin ÇMD'nin jeokimyasal özellikleri (pH, sülfat ve ağır metal salınımı) üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. ÇMD karışımında ikame olarak KK ve DK kullanımıyla sızıntı suyunun alkali pH'larda kaldığını ve sülfat salınımının epey düştüğünü tespit eden araştırmacılar KK ve DK ikameli ÇMD numunelerinde meydana gelen daha düşük poroziteli mikroyapı sonucunda sızıntı suyuna salınan ağır metal konsantrasyonlarının engellendiğini veya önemli ölçüde kısıtlandığını ifade etmişlerdir. Yapılan literatür araştırmaları sonucu doğal alkali malzeme (D_{AL-M}) sınıfında yer alan kireçtaşlarının

başta inşaat sektörü olmak üzere birçok farklı alanda kullanımıyla ilgili çok sayıda çalışma yapılmasına karşın ÇMD uygulamalarında kullanımına yönelik oldukça sınırlı sayıda araştırma gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma, doğal alkali malzemelerin (D_{AL-M} 'lerin) (kalsitik kireçtaşı: KK ve dolomitik kireçtaşı: DK) ÇMD'nin ana bileşeni olan sülfürlü maden atığı (S-MA) yerine %5-15 oranında ikamesinin ÇMD'nin dayanım-duraylılık (7-360 gün) ve mikroyapı (28 ve 180 gün) performansının incelenmesini ve D_{AL-M} 'lerin ÇMD karışımı içerisinde kullanılabilirliğinin değerlendirilmesini içermektedir.

2. Deneysel Çalışmalar (Experimental Studies)

2.1. Malzemeler ve Karakterizasyon (Materials and Characterization)

ÇMD karışımını oluşturan ana bileşenlerden sülfürlü maden atığı (S-MA) ve bağlayıcı (PÇ: CEM I 42,5R) malzeme sırasıyla Etibakır (Kastamonu-Küre) İşletmesi ve Aşkale Çimento (Trabzon) Fabrikası'ndan temin edilirken, S-MA yerine %5-15 oranında ikame olarak kullanılan D_{AL-M} 'ler (kalsitik kireçtaşı: KK ve dolomitik kireçtaşı: DK) sırasıyla Araklı-Taşönü'nde bulunan Aşkale Çimento A.Ş.'ye ait hammadde ocağından ve Antalya-Karaöz bölgesinden temin edilmiştir. S-MA, ÇMD karışımlarının hazırlanmasından önce homojenleştirme işlemine tabi tutulurken, iri boyutlu olarak temin edilen kireçtaşları (KK ve DK) öncelikle çeneli kırıcı kullanılarak -2 mm boyutuna kırılmış, ardından malzemelerin doğal kuruluşunun sağlanması için (50°C/36 saat) etüvde kurutulmuş ve sonrasında bilyalı değirmen vasıtasıyla -100 µm boyutuna öğütülmüştür (Şekil 1).



Şekil 1. KK (a) ve DK'nın (b) boyut küçültme süreci (Size reduction process of CL (a) and DL (b))

ÇMD karışımında kullanılan malzemelerin (S-MA, PÇ, KK ve DK) fiziksel karakterizasyonları (özellikler (ÖA), tane boyut dağılımı (TBD) ve özgül yüzey alanı (ÖYA)), sırasıyla piknometre, tane boyutu ölçer (Malvern Mastersizer) ve yüzey alanı ölçer (Atom-CM-BL 101) cihazı ile gerçekleştirilmiş ve ilgili değerler Tablo 1'de verilmiştir. Ayrıca, S-MA, KK ve DK'nın şlam (<20 µm) malzeme miktarı, sırasıyla %48,41, %67,95 ve %58,69 olarak ölçülmüştür. Malzemelerin kimyasal karakterizasyonu XRF ve gravimetrik yöntem kullanılarak belirlenmiş ve S-MA'nın büyük oranda Fe_2O_3 ve SiO_2 minerallerinden oluştuğu, buna karşın, PÇ, KK ve DK'nın baskın olarak CaO minerali içerdiği tespit edilmiştir (Tablo 1).

Tablo 1. Malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri (Physical, chemical and mineralogical properties of materials)

Malzemeler	Fiziksel Özellikler						Mineralojik Özellikler
	Tane boyutu (µm)				ÖA (g/cm ³)	ÖYA (cm ² /g)	
	D ₁₀	D ₃₀	D ₅₀	D ₈₀			
S-MA	2,0	8,0	22,0	68,5	3,37	4440	Pirit, Albit, Kuvars, Kalsit, Klorit
PÇ	2,2	8,9	21,7	49,9	3,12	4335	-
KK	1,35	4,2	9,4	36,0	2,63	5665	Kalsit
DK	1,5	5,0	14,3	49,0	2,79	5020	Kalsit, Dolomit
Malzemeler	Kimyasal Özellikler						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	S ⁻²	FeS ₂
S-MA	31,89	8,97	33,09	4,08	3,48	15,82	29,66
PÇ	21,02	5,27	3,06	2,19	62,91	-	-
KK	0,86	0,23	0,06	0,22	55,26	-	-
DK	0,12	0,09	0,06	20,18	32,28	-	-

ÇMD karışımında kullanılan malzemelerin mineralojik karakterizasyon analizleri ise XRD (X- ışınları difraktometre) cihazı ile yapılmış ve S-MA'nın yüksek miktarda pirit minerali ($FeS_2 = \%29,66$) içerdiği, buna bağlı olarak sülfür (S^{2-}) içeriğinin $\%15,82$ olduğu belirlenmiştir. S-MA yerine ikame olarak kullanılan KK baskın olarak kalsit içerirken, DK'nın ise ve kalsit ve dolomit minerallerinden oluştuğu tespit edilmiştir (Tablo 1).

2.2. ÇMD Numunelerinin Hazırlanması

ÇMD numunelerinin üretiminde kullanılan karışımlar 19,05 cm akışkanlık değerinde S-MA yerine $\%5$, $\%10$ ve $\%15$ oranında ayrı ayrı KK ve DK ikame edilerek hazırlanmıştır. Karışım içerisinde kullanılan bağlayıcı malzeme (CEMI 42,5R) 19,05 cm akışkanlık değerine karşılık gelen katı oranına göre eklenmek üzere; kontrol numuneleri ($\%100$ S-MA) sadece $\%8,5$ çimento oranında hazırlanırken, D_{AL-M} (KK ve DK) ikameli numuneler $\%7,5-8,5$ bağlayıcı oranında (BO) hazırlanmıştır (Tablo 2).

Tablo 2. ÇMD numunelerinin deneysel çalışma koşulları (Experimental study conditions of CPB samples)

Karışım tipi	İkame oranı (%)	Bağlayıcı oranı (%)	Katı oranı (%)		Su/çimento oranı		Slamp (cm)	Numune sayısı	
			$\%8,5$	$\%7,5$	$\%8,5$	$\%7,5$		TEBD	MIP
Kontrol	0	8,5	73,70	-	4,20	-	19,05	15	2
5KK	5-10-15	7,5-8,5	73,38	72,97	4,27	4,94		45	4
10KK			73,69	73,10	4,20	4,91			
15KK			74,02	73,58	4,13	4,79			
5DK			73,65	73,41	4,21	4,83			
10DK			74,03	73,68	4,13	4,76			
15DK			74,31	73,91	4,07	4,71			

S-MA, PÇ, D_{AL-M} (KK, DK, vb.) ve musluk suyundan oluşan ÇMD karışımının uygun bir şekilde karıştırılmasının sağlanması için Univex SRMF 20 model bir laboratuvar tipi mikser kullanılmış ve mikserin karıştırma hızı ve süresi sırasıyla 105 devir/dk ve 7 dakika olarak uygulanmıştır (Şekil 2a). Karıştırma işlemi tamamlanan ÇMD karışımları alttan drenajlı olan 5x10 cm (çap x boy) boyutlu silindirik numune kalıplarına doldurulmuş ve numuneler 1 gün boyunca drenaj masalarında muhafaza edilerek bünyesindeki fazla suyun drene olması sağlanmıştır (Şekil 2b). Drenaj masasından alınan ÇMD numuneleri, kür odasında bulunan kür dolabında ($\sim\%85$ nem ve $20^\circ C$ sıcaklık) 7-360 gün boyunca kür işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 2c).



Şekil 2. Kullanılan mikser (a), ÇMD numunelerinin drenaj (b) ve kür işlemi (c) (Mixer (a), drainage (b) and curing process (c) of CPB samples)

2.3. Basınç Dayanımı ve Porozite (MIP) Testi

Önceden belirlenen her bir kür süresi (7-28-90-180-360) sonunda 3'er adet olmak üzere toplam 105 adet ÇMD numunesinin tek eksenli basınç dayanımı (TEBD) testi UTEST marka bilgisayar kontrollü basınç ve deformasyon ünitesinde (yük kapasitesi= 50 kN ve yükleme hızı= 1,0 mm/dk) gerçekleştirilmiştir (Şekil 3a) (ASTM C 39, 2016). Basınç dayanımı testi öncesinde silindirik kalıplardan çıkarılan numunelerin yüzeylerinin paralel olması amacıyla alt ve üst yüzeyleri düzeltilmiştir. Porozite (MIP) testleri $\%8,5$ bağlayıcı oranında hazırlanan Kontrol ve D_{AL-M} ikameli (5KK, 15KK, 5DK ve 15DK) ÇMD numuneleri üzerinde 28 ve 180 gün sonunda uygulanmıştır. Bu test için her kür süresi için 1 adet olmak üzere toplam 10 adet ÇMD numunesi hazırlanmış ve test öncesinde hiçbir deneye tabi tutulmamıştır. Kür süreleri (28 ve 180 gün) tamamlanan numuneler, kimyasal reaksiyonlarının (hidratasyon vb.) sona erdirilmesi ve ağırlıklarının sabitlenmesi amacıyla etüvde (60 saat/ $50^\circ C$ sıcaklık) kurutulmuş ve sonrasında desikatörde soğutulmuştur.



Şekil 3. TEBD ünitesi (a) ve MIP cihazı (b) (Compressive strength (a) and MIP (b) devices)

ÇMD numunelerinin porozite testleri için maksimum 414 MPa (60.000 psi) hidrostatik basınç sağlayabilen sıvı Porozimetre cihazı (Micromeritics Autopore IV 9410) kullanılmıştır (Şekil 3b) (ASTM D 4404-10, 2010). MIP analizlerinin ardından Uluslararası Kuramsal ve Uygulamalı Kimya Sınıflaması Birliği'nin (IUPAC) önerdiği gözenek boyutu sınıflaması doğrultusunda ÇMD numunelerinin porozite karakterizasyonu çalışmaları gerçekleştirilmiştir (Everett, 1972). Bu sınıflama ile ÇMD numunelerinin orta gözenek boyutuna (0,002-0,05 μm) ve büyük gözenek boyutuna (>0,05 μm) sahip gözeneklerinin analizi yapılmıştır.

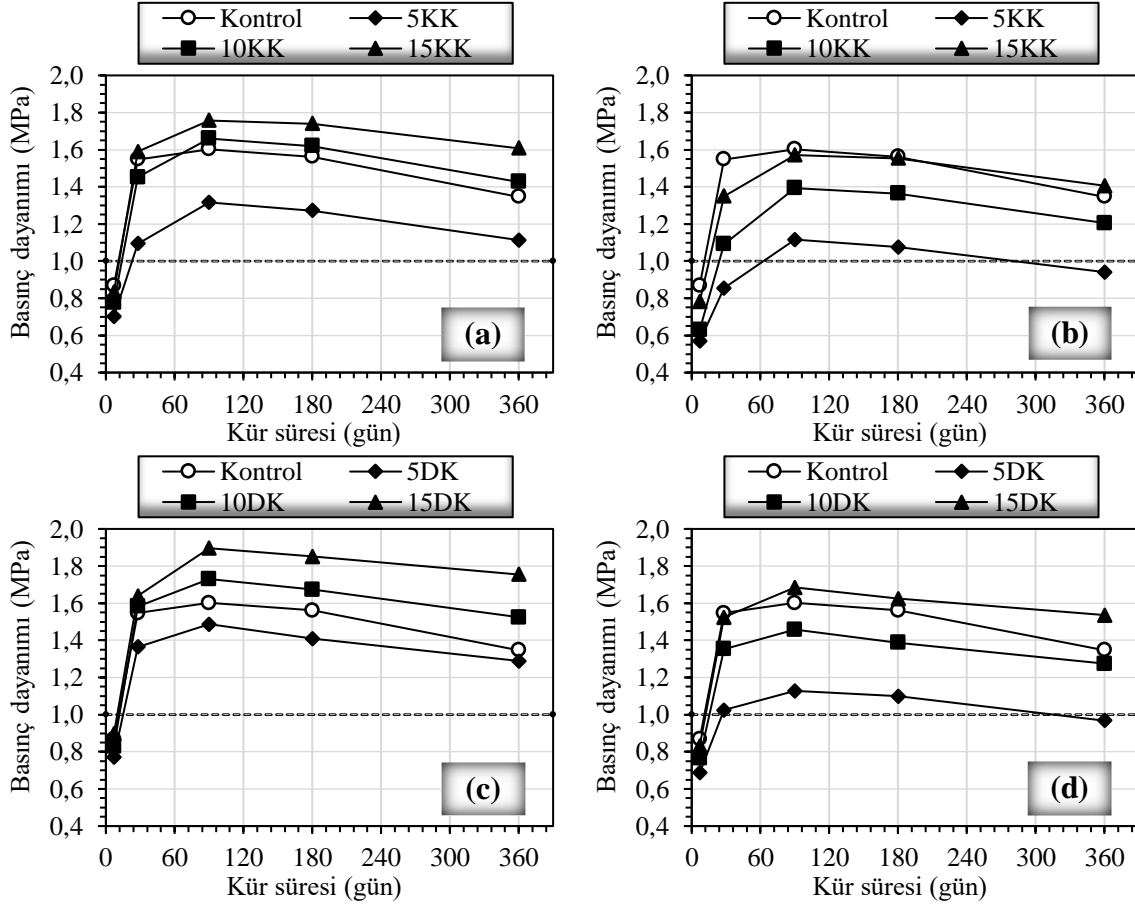
3. Bulgular ve Tartışma (Results and Discussion)

3.1. Dayanım-Duraylılık Performansı (Strength-Stability Performance)

Tamamen (%100) S-MA kullanılarak %8,5 bağlayıcı oranında üretilen Kontrol numuneleri ve %7,5-8,5 çimento oranında S-MA yerine %5-15 oranında ayrı ayrı KK ve DK ikame edilerek hazırlanan ÇMD numunelerinin 7-360 gün aralığındaki dayanım ve duraylılık performansına ait sonuçlar Şekil 4'te gösterilmiştir. Karışım özelliklerinden bağımsız olarak tüm ÇMD numunelerinin (Kontrol, KK ve DK ikameli) basınç dayanımları 90 günlük kür süresine kadar artmış, sonrasında (90-360 gün aralığında) ise düşüş eğilimi göstermiştir (Şekil 4). S-MA yerine D_{AL-M} (KK ve DK) ikamesinin dayanım ve duraylılık performansına etkisi incelendiğinde, KK ve DK ikame oranının artması bağlayıcı oranı ve kür süresinden bağımsız olarak ÇMD numunelerinin basınç dayanımını arttırmıştır. Ayrıca, %8,5 bağlayıcı oranında hazırlanan %10 ve %15 D_{AL-M} (10KK, 15KK, 10DK ve 15DK) ikameli ÇMD numunelerinin 28 günden sonra Kontrol numunelerine kıyasla %30,3'e kadar daha yüksek basınç dayanımı ürettikleri tespit edilmiştir (Şekil 4a,c). Daha yüksek oranlardaki (%10 ve %15) KK ve DK ikamesinin dayanım kazanımına yaptığı olumlu katkı, ÇMD karışımında kullanılan KK ve DK'nın S-MA'ya kıyasla daha yüksek özgül yüzey alanına (Tablo 1) sahip olması sebebiyle daha fazla miktarda küçük boyutlu tane içeren KK ve DK'nın daha büyük boyutlu S-MA taneleri arasındaki boşlukları doldurmasıyla karışımın su ihtiyacının azalması (su/çimento oranının azalması) ve böylece katı oranının artması (Tablo 2) ile açıklanabilir (Erçikdi vd., 2013; Yılmaz ve Erçikdi, 2016; Yılmaz vd., 2018). Buna ek olarak, Moon vd. (2017) öğütülmüş alkali malzemelerin (KK, DK vb.) karışım içerisinde çekirdeklenme (nükleasyon) bölgesi oluşturarak çimentonun hidrasyonunu hızlandırmasının ve ilave hidrasyon ürünleri oluşturmasının basınç dayanımı kazanımını geliştirdiğini rapor etmiştir.

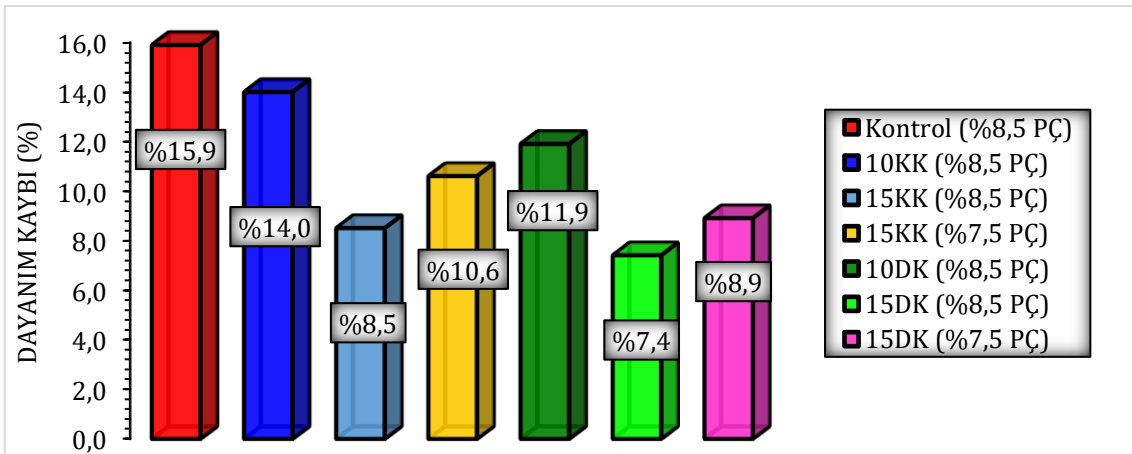
Benzer dayanım sonuçlarının elde edildiği bir çalışmada, araştırmacılar ince kum agrega yerine %5-15 oranında kireçtaşı tozu (KT) ikame ederek beton numuneleri hazırlamışlar ve KT içeren beton numunelerinin kontrol numunelerinden daha yüksek dayanım ürettiklerini bildirmişlerdir (Binici vd., 2007). Başka bir çalışmada çimentoya %30'a kadar öğütülmüş dolomitik kireçtaşı (DK) ikamesinin betonun 7-28 gün aralığındaki mekanik performansına etkisi incelenmiş ve kontrol numunelerine kıyasla 14 ve 28 gündeki en yüksek basınç dayanımı kazanımları (sırasıyla %16,7 ve %23,5) DK ikamesinin %25 oranında olduğu karışımlardan elde edildiği belirlenmiştir (Mikhailova vd., 2013). Araştırmacılar bu olumlu katkıyı, bu çalışmadaki bulgularla uyumlu olarak betonun yoğunluğunun artması ile sonuçlanan DK'daki yüksek yüzey alanına (5500 cm^2/g) bağlamışlardır. KK ve DK ikameli ÇMD karışımlarında bağlayıcı oranı %7,5'e düşürüldüğünde ise 15KK numunesinin uzun dönemde (90 ve 180 gün) Kontrol numunesinin dayanım değerlerini yakaladığı ve 360 günde geçtiği görülürken, 15DK numunesi aynı kür sürelerinde Kontrol numunesine kıyasla daha yüksek dayanım sağlamıştır (Şekil 4b,d).

ÇMD uygulaması yapılan yeraltı madenlerinde emniyetli çalışma şartları tesis edilerek çalışanların ve ekipmanların güvenliğinin sağlanması, ocak üretim faaliyetlerinin sorunsuz sürmesi ve ÇMD uygulaması yapılmış bölge yanında üretim yapılırken cevher seyrelmesinin engellenmesi gibi amaçlardan dolayı yeraltı üretim boşluklarına doldurulan ÇMD'nin kısa ve uzun dönemde istenen dayanım değerini (28-360 gün arasında $\geq 1,0$ MPa) sadece %7,5 PÇ oranında hazırlanan 5KK ve 5DK numunelerinin sağlayamadığı belirlenmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. %8,5 (a,c) ve %7,5 (b,d) bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD'nin dayanım ve duraylılık sonuçları (Strength-stability results of CPB prepared at 8,5wt.% (a,c) and %7,5wt.% (b,d))

Çalışma kapsamında üretilen ÇMD numunelerinin (Kontrol, KK ve DK ikameli) ana bileşenlerinden biri olan atık malzemedeki sülfürlü minerallerin oksidasyonu sonucunda oluşan asit ve sülfat atak kaynaklı hidrasyon ürünlerinin (C-S-H jelleri ve portlandit) yapısal deformasyonlara uğraması (Tariq ve Nehdi, 2007; Erçikdi vd., 2015; Cihangir ve Akyol, 2018; Yin vd., 2018; Yılmaz vd., 2020) ile bağlantılı olarak uzun dönemde (90-360 gün) meydana gelen dayanım kaybı miktarları Şekil 5'te sunulmuştur. %8,5 PÇ oranına sahip 10KK ve 15KK numunelerinde sırasıyla %14,0 ve %8,5 oranlarında dayanım kaybı tespit edilirken, Kontrol ÇMD numunelerinde %15,9 seviyesinde dayanım düşüşü meydana gelmiştir. Bağlayıcı oranı %7,5'e düşürülerek hazırlanan KK ikameli ÇMD numuneleri değerlendirildiğinde ise, Kontrol ÇMD numuneleri ile yaklaşık aynı seviyelerde dayanım üreten 15KK numunelerinin daha düşük oranda (%10,6<%15,9) dayanım kaybı ürettiği belirlenmiştir (Şekil 5). DK ikameli ÇMD numunelerinin dayanım kaybı değerleri incelendiğinde ise %8,5 çimento oranında hazırlanan 10DK ve 15DK numuneleri sırasıyla %11,9 ve %7,4 dayanım kaybı üretirken, %7,5 PÇ oranına sahip 15DK numunesinde %8,9 oranında dayanım düşüşü tespit edilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. ÇMD numunelerinin uzun dönem (90-360 gün) dayanım kaybı değerleri (Long-term (90-360 days) strength loss values of CPB samples)

ÇMD karışımlarında karışımda kullanılan çimento miktarları ve karışım içerisinde kullanılan S-MA yerine belirli oranlarda (%5, 10 ve 15) D_{AL-M} 'ler (KK ve DK) ikame edilerek ÇMD uygulamasında en büyük maliyet kalemini oluşturan çimento sarfiyatı konusunda tasarruf edilebilme olanağına ait sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir. Bu kapsamda bağlayıcı sarfiyatında tasarruf değerlendirmesi; %8,5 PÇ oranında hazırlanan Kontrol ÇMD karışımı ile %7,5 PÇ oranındaki D_{AL-M} ikameli ÇMD karışımları arasında yapılmıştır. 1,0 m³ ÇMD üretiminde, %8,5 oranında PÇ kullanılan Kontrol numunelerinde 130 kg bağlayıcı kullanılırken, %7,5 PÇ oranında hazırlanan ve Kontrol numunelerinin dayanımına oldukça yakın dayanım üreten veya onu geçen 15KK ve 15DK numunelerinin üretiminde sırasıyla 110,4 ve 112,4 kg çimento kullanılarak sırasıyla %15,1 ve %13,5 oranında bağlayıcı tasarrufu elde edilmiştir (Şekil 4 ve Tablo 3).

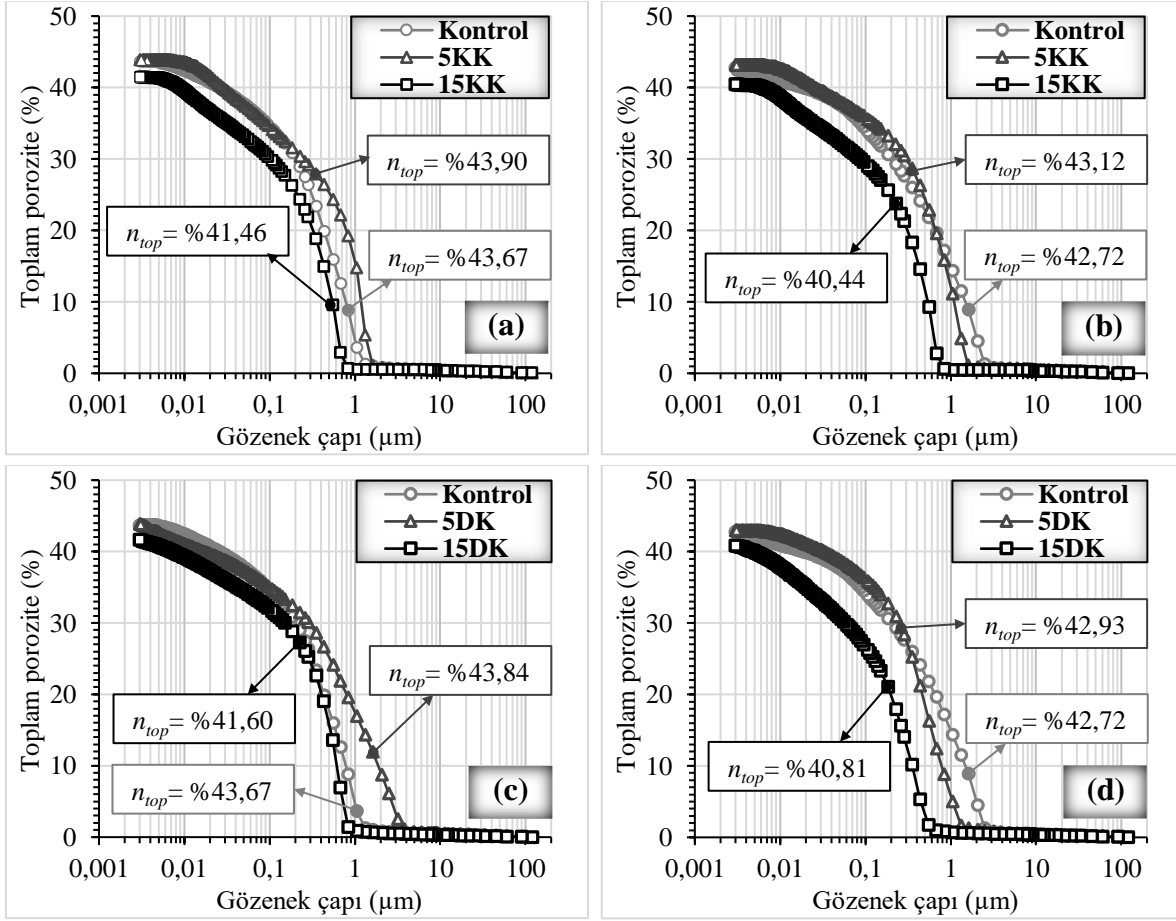
Tablo 3. 1,0 m³ ÇMD karışımında kullanılan bağlayıcı miktarı ve tasarruf oranı (binder content used in 1.0 m³ CPB mixture and saving ratio)

Özellikler	Karışım tipi		
	Kontrol	15KK	15DK
Katı oranı (%)	73,70	73,58	73,91
Akışkanlık (cm)	19,05		
Bağlayıcı oranı (%)	8,5	7,5	
Bağlayıcı miktarı (kg/m ³)	130,0	110,4	112,4
Bağlayıcı tasarrufu (%)	-	15,1	13,5

3.2. Mikroyapı Performansı (Microstructure Performance)

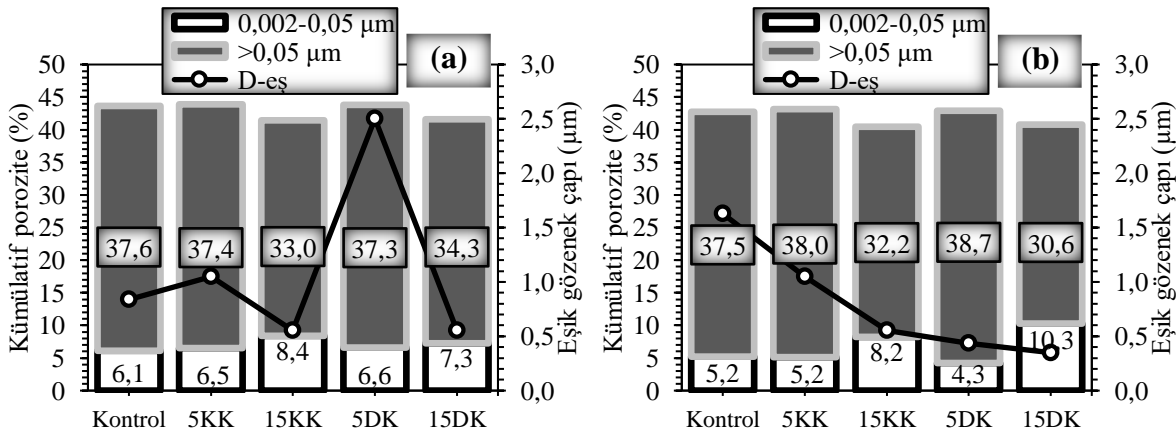
%8,5 çimento (PÇ) oranında hazırlanan Kontrol (%100 S-MA) ve %5-15 oranında D_{AL-M} ikameli (5KK, 15KK, 5DK ve 15DK) ÇMD numunelerinin 28 ve 180 gün sonunda gerçekleştirilen MIP testlerinden elde edilen toplam porozite (n_{top}) sonuçları Şekil 6'da gösterilmiştir. Kür süresinin 28 günden 180 güne artması tüm ÇMD numunelerinin (Kontrol, 5KK, 15KK, 5DK ve 15DK) n_{top} değerlerinde düşüş meydana getirmiştir. 28 gün sonundaki toplam porozite değerleri %43,90-41,46 arasında değişen ÇMD numunelerinin 180 gün sonundaki n_{top} değerleri %43,12-40,44 arasında ölçülmüştür (Şekil 6). Bu çalışmadaki bulguları destekleyen önceki çalışmalarda (Ghirian ve Fall, 2014; Yılmaz vd., 2014; Mangane vd., 2018) farklı kür sürelerinde (7-150 gün, 7-90 gün ve 7-28 gün) yapılan porozite testleri kür süresinin artmasıyla birlikte porozitenin azaldığını göstermiştir. Ayrıca, kür süresinin artışıyla ÇMD numunelerinin n_{top} değerlerinde meydana gelen düşüşün basınç dayanımında meydana gelen artışlar ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4 ve 6). KK ve DK ikamesinin ÇMD numunelerinin n_{top} sonuçlarına etkisi değerlendirildiğinde, 5KK ve 5DK numunelerinin 28 ve 180 günlük n_{top} değerleri Kontrol numunesinden daha büyük iken, %15 D_{AL-M} ikameli numunelerin (15KK ve 15DK) aynı kür sürelerindeki n_{top} değerleri Kontrol numunelerine kıyasla %5,3'e kadar daha düşüktür (Şekil 6). %15 ikameli numunelerin mikroyapısında (porozite) gözlemlenen iyileşme; KK ve DK'nın S-MA'dan daha yüksek ÖYA'ya sahip olması ve bu sayede daha fazla miktarda ince boyutlu tane içermesinden (Tablo 1) dolayı S-MA ile bağlayıcı (çimento) taneleri arasında filler etkisi sağlaması sonucunda ÇMD'nin iç yapısının yoğunlaşmasına (sıklaşmasına) bağlanabilir. Böylece aynı slamp değerinde ÇMD karışımında istenen su miktarının azalması sağlanarak daha yüksek katı oranı (%74,02-74,31>%73,70) ve daha düşük su/çimento oranına (4,07-4,13<4,20) sahip daha yoğun ve kompakt bir dolgu yapısı elde edilmiştir (Tablo 2) (Erçikdi vd., 2013; Yılmaz ve Erçikdi, 2016; Moon vd., 2017; Yılmaz vd., 2018). Bu çalışmadaki porozite bulgularıyla uyumluluk gösteren önceki çalışmalarda, beton ve ÇMD içerisinde farklı oranlarda (%15 ve %22,5) kireçtaşı tozu (KT) kullanımının numunelerin 28 günlük porozite gelişimine etkisini inceleyen yazarlar, kontrol numunelerine kıyasla beton numunelerinde (Moon vd., 2017) %3,8-8,7 ve ÇMD numunelerinde (Zheng vd., 2016) %4,0 oranlarında daha düşük porozite değerlerinin ölçüldüğünü rapor etmişlerdir.

Şekil 7, MIP testlerine tabi tutulan ÇMD numunelerine (Kontrol ve D_{AL-M} ikameli) ait teknik parametreleri (büyük boyutlu porozite: $n_{Büyük}$, orta boyutlu porozite: n_{Orta} ve eşik gözenek çapı: $d_{eş}$) göstermektedir. Tüm ÇMD numunelerinin orta boyutlu (n_{Orta} = 0,002-0,05 μ m) porozite miktarlarının kür süresi artışıyla paralel olarak arttığını, buna rağmen, aynı numunelerin (5KK ve 5DK hariç) büyük boyutlu ($n_{Büyük}$ = >0,05 μ m) porozitelerinin azaldığını göstermiştir. D_{AL-M} ikamesinin (KK ve DK) etkisi incelendiğinde, %5 D_{AL-M} ikamesinin ÇMD numunelerinin büyük ve orta boyutlu porozite miktarlarını kür süresinden bağımsız olarak Kontrol numunelerine kıyasla kısmen iyileştirdiği belirlenirken, ikame oranı %15'e artırıldığında $n_{Büyük}$ değerlerinin 28 ve 180 günde sırasıyla %8,7-12,2 ve %14,1-18,5 oranlarında düştüğü tespit edilmiştir. Buna ek olarak %15 D_{AL-M} ikamesi ÇMD numunelerinin n_{Orta} değerlerini önemli ölçüde iyileştirmiştir (Şekil 7). ÇMD karışımı içerisinde S-MA yerine yapılan %15 D_{AL-M} ikamesinin $n_{Büyük}$ değerlerini azaltması ve n_{Orta} değerlerini artırmasının sebebi olarak, KK ve DK'nın S-MA'ya kıyasla daha ince tane boyutuna (yani daha yüksek ÖYA) sahip olmasından dolayı büyük boyutlu gözeneklerin kapanması ve/veya küçülerek orta boyutlu gözeneğe dönüşmesi ve bu sayede toplam porozitenin azalması ile sonuçlanan daha büyük boyutlu S-MA taneleri arasındaki boşlukların KK ve DK taneleri ile dolması gösterilebilir (Tablo 1) (Şekil 6 ve 7) (Zheng vd., 2016; Yılmaz vd., 2018).



Şekil 6. ÇMD numunelerinin 28 (a,c) ve 180 (b,d) gündeki toplam porozite sonuçları (Total porosity results of CPB samples at 28 (a,c) and 180 days (b,d))

ÇMD'nin hidrolik iletkenlik özellikleri (permabilite vb.) üzerinde önemli bir etkiye sahip olan ve akışkan taşınım kabiliyetini kontrol eden (Yılmaz vd., 2011; Cihangir ve Akyol, 2018) eşik gözenek çapının (d_{es}) kür süresinin artmasıyla birlikte küçüldüğü (Kontrol numunesi hariç) gözlenmiştir. S-MA yerine yapılan D_{AL-M} ikamesinin etkisi değerlendirildiğinde, %5 oranındaki ikamenin Kontrol numunesinin eşik gözenek çapına kıyasla 28 günlük numunelerin d_{es} değerlerini büyüttüğü açıkça görülürken, 180 gün sonunda gözle görülür derecede küçülttüğü tespit edilmiştir (Şekil 7). İkame oranının %15 olması ise ÇMD numunelerinin d_{es} değerlerinde kür süresinden bağımsız olarak %78,5'e kadar küçülme sağlamıştır. Dolgu karışımı içerisinde yapılan özellikle %15 D_{AL-M} ikamesi ile KK ve DK'nın boşlukları doldurucu etkisinden kaynaklı aynı slump değerinde ÇMD karışımının katı oranı yükseltilmiş, su/çimento oranı azaltılmış (Tablo 2) ve böylece gözenek yapısı önemli derecede iyileştirilmiş ve daha yoğun bir ÇMD mikroyapısı oluşturulmuştur (Şekil 6 ve 7).



Şekil 7. ÇMD numunelerinin 28 (a) ve 180 (b) günlük MIP testlerine ait teknik parametreleri (Technical parameters of 28 (a) and 180 (b) days-MIP tests of CPB samples)

4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışma, ÇMD'nin ana bileşeni olan S-MA yerine doğal alkali malzemelerin (D_{AL-M}) ikame olarak kullanımının ÇMD'nin dayanım-duraylılık (7-360 gün) ve mikroyapı (28 ve 180 gün) performansına etkilerinin incelenmesini içermektedir. Bu amaçla, %8,5 bağlayıcı oranında hazırlanan Kontrol ÇMD numunelerinde tamamen S-MA kullanılırken, D_{AL-M} ikameli ÇMD numuneleri iki farklı bağlayıcı oranında (%7,5-8,5) ve S-MA yerine %5-15 oranında KK ve DK ikame edilerek hazırlanmıştır. Üretilen ÇMD numunelerinin basınç dayanımı (7-28-90-180-360 gün) ve MIP (porozite) (28 ve 180 gün) testleri gerçekleştirilmiştir. Dayanım-duraylılık sonuçları incelendiğinde, D_{AL-M} ikame oranının artması ÇMD numunelerinin basınç dayanımlarını aynı bağlayıcı oranına (%8,5) sahip Kontrol numunelerine kıyasla 28 günden sonra %30,3'e kadar arttırırken, %7,5 bağlayıcı oranında sadece 15DK numunesi Kontrol numunesinden daha yüksek dayanım üretmiştir. ÇMD'nin dayanım ve duraylılığı açısından istenen basınç dayanımı değerini (28-360 gün arasında $\geq 1,0$ MPa) sadece %7,5 PÇ oranında hazırlanan %5 D_{AL-M} ikameli ÇMD numuneleri üretememiştir. Uzun dönemde (90-360 gün) yaşanan dayanım kayıpları değerlendirildiğinde, Kontrol numunelerinin dayanım kaybının %15,9 seviyesinde gerçekleştiği, buna karşın, D_{AL-M} ikamesi ile ÇMD numunelerinin dayanım kaybının %7,5'e kadar düştüğü tespit edilmiştir. Porozite bulgularına bakıldığında, kür süresi artışı tüm numunelerin toplam porozite (n_{top}) değerlerinin düşmesine katkıda bulunmuştur. Kontrol numunelerinin n_{top} değerleri ile karşılaştırıldığında, düşük D_{AL-M} ikameli numuneler kür süresinden bağımsız olarak daha yüksek n_{top} değerleri üretirlerken, ikame oranının %15'e arttırılması; numunelerin (15KK ve 15DK) toplam porozitelerinde %5,3'e kadar düşüş sağlamıştır. %15 D_{AL-M} ikameli ÇMD numunelerinin n_{top} sonuçlarında meydana gelen iyileşme numunelerin büyük boyutlu porozitelerinin ($n_{Büyük}$) azalması (%18,5'e kadar) ve orta boyutlu porozitelerinin (n_{Orta}) artması (%98,1'e kadar) ile desteklenmiştir.

Bu sonuçlardan, ÇMD karışımlarında S-MA yerine KK ve DK gibi doğal alkali malzemelerin kullanımının ÇMD'nin dayanım-duraylılık performansını arttırdığı, mikroyapı özelliklerini geliştirdiği ve böylelikle bu malzemelerin yeraltı üretim açıklıklarında depolanarak çevresel problemler (toz, görüntü kirliliği ve depolama alanı ihtiyacı vb.) oluşturma potansiyellerinin bertaraf edilebileceği anlaşılmıştır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (FDK 2016-5500) tarafından desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Algin, H.M., Turgut, P., 2008. Cotton and Limestone Powder Wastes as Brick Material. *Construction and Building Materials*, 22(6), 1074-1080. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.03.006>
- ASTM C39/C39M-16b, 2016. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, Annual Book of ASTM Standards. American Society of Testing Material.
- ASTM D 4404-18, 2018. Standard Test Method for Determination of Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry. Annual Book of ASTM Standards, American Society of Testing Material.
- Binici, H., Kaplan, H., Yılmaz, S., 2007. Influence of Marble and Limestone Dusts as Additives on Some Mechanical Properties of Concrete. *Scientific Research and Essays*, 2(9), 372-379. <https://doi.org/10.5897/SRE.9000594>
- Cihangir, F., Akyol, Y., 2018. Mechanical, Hydrological and Microstructural Assessment of the durability of Cemented Paste Backfill Containing Alkali-Activated Slag. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 32(2), 123-143. <https://doi.org/10.1080/17480930.2016.1242183>
- Elbahi, B., Boukli Hacene, S.M.A., 2016. Influence of Limestone Fillers and Natural Pozzolan on Engineering Properties of Concrete. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 30(16), 1795-1807. <https://doi.org/10.1080/01694243.2016.1161970>
- Ercikdi, B., Baki, H., İzki, M., 2013. Effect of Desliming of Sulphide-rich Mill Tailings on the long-term Strength of Cemented Paste Backfill. *Journal of Environmental Management*, 115, 5-13. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.11.014>
- Ercikdi, B., Külekci, G., Yılmaz, T., 2015. Utilization of Granulated Marble Wastes and Waste Bricks as Mineral Admixture in Cemented Paste Backfill of Sulphide-rich Tailings. *Construction and Building Materials*. 93, 573-583. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.042>
- Ghirian, A., Fall, M., 2014. Coupled Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical Behaviour of Cemented Paste Backfill in Column Experiments: Part II: Mechanical, Chemical and Microstructural Processes and Characteristics. *Engineering Geology*, 170, 11-23. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.12.004>
- Hu, J., Ding, X., Ren, Q., Luo, Z., Jiang, Q., 2019. Effect of incorporating waste limestone powder into solid waste cemented paste backfill material. *Applied Sciences*, 9(10), 2076. <https://doi.org/10.3390/app9102076>

- Liu, Y., Qian, Z.D., Zheng, D., Huang, Q.B., 2018. Evaluation of Epoxy Asphalt-based concrete substructure for high-speed Railway Ballastless Track. *Construction and Building Materials*, 162, 229-238. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.028>
- Mangane, M.B.C., Argane, R., Trauchessec, R., Lecomte, A., Benzaazoua, M., 2018. Influence of Superplasticizers on Mechanical Properties and Workability of Cemented Paste Backfill, *Minerals Engineering*, 116, 3-14. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.11.006>
- Mikhailova, O., Yakovlev, G., Maeva, I., Senkov, S., 2013. Effect of Dolomite Limestone Powder on the Compressive Strength of Concrete. *Procedia Engineering*, 57, 775-780. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.098>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.189>
- Parlakıyıldız, M., 2008. Hammadde olarak Kireçtaşı ve Üretilen Kirecin Standartlara Uygunluğunun Araştırılması, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana, 91s.
- Ramezaniapour, A.A., Ghiasvand, E., Nickseresht, I., Mahdikhani, M., Moodi, F., 2009. Influence of various amounts of Limestone Powder on Performance of Portland Limestone Cement Concretes. *Cement and Concrete Composites*, 31(10), 715-720. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.08.003>
- Salas, D.A., Ramirez, A.D., Rodríguez, C.R., Petroche, D.M., Boero, A.J., Duque-Rivera, J., 2016. Environmental Impacts, Life Cycle Assessment and Potential Improvement Measures for Cement Production: A Literature Review, *Journal of Cleaner Production*, 113, 114-122. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.078>
- Semerci, F., 2008. Mardin Kireçtaşının Yapı Taşı olarak Araştırılması, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 124s.
- Shaaban, K.H.S., Saddeek, Y.B., Aly, K.A., Dahshan, A., Ali, A.M., 2019. Fabrication and Characterization of Glass and Glass-Ceramic from Cement Dust and Limestone Dust. *Silicon*, 11(2), 807-815. <https://doi.org/10.1007/s12633-018-9964-3>
- Tariq, A., Nehdi, M., 2007. Developing Durable Paste Backfill from Sulphidic Tailings, *Waste Management Research*, 160(4), 155-166. <https://doi.org/10.1680/warm.2007.160.4.155>
- Turk, K., Demirhan, S., 2017. Effect of Limestone Powder on the Rheological, Mechanical and Durability Properties of ECC. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 21(9), 1151-1170. <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1150902>
- Vuk, T., Tinta, V., Gabrovšek, R., Kaučič, V., 2001. The Effects of Limestone Addition, Clinker Type and Fineness On Properties of Portland Cement. *Cement and Concrete Research*, 31(1), 135-139. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00427-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00427-0)
- Wang, Y.H., Xu, Y.D., He, Z.H., 2015. Effect of Limestone Powder on Creep of High-Strength Concrete. *Materials Research Innovations*, 19(sup9), S9-220. <https://doi.org/10.1179/1432891715Z.0000000001969>
- Yılmaz, T., Ercikdi, B., 2016. Predicting the Uniaxial Compressive Strength of Cemented Paste Backfill from Ultrasonic Pulse Velocity Test. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 31(3), 247-266. <https://doi.org/10.1080/10589759.2015.1111891>
- Yılmaz, T., Ercikdi, B., Devci, H., 2018. Utilisation of Construction and Demolition Waste as Cemented Paste Backfill Material for Underground Mine Openings. *Journal of Environmental Management*, 222, 250-259. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.05.075>
- Yılmaz, T., 2019. Asit Nötralize Edici Malzemeler Kullanılarak Sülfürlü Atıklardan Duraylı Macun Dolgu Üretiminin Araştırılması, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon, 153s.
- Yılmaz, T., Ercikdi, B., Cihangir, F., 2020. Evaluation of the Neutralization Performances of the Industrial Waste Products (IWP) in Sulphide-rich Environment of Cemented Paste Backfill. *Journal of Environmental Management*, 258, 110037. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.110037>
- Yılmaz, T., Ercikdi, B., 2022. Kalsitik ve dolomitik kireçtaşlarının çimentolu macun dolgunun çevresel davranışına etkisi. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 61(1), 31-40. <https://doi.org/10.30797/madencilik.967090>
- Yılmaz, E., Belem, T., Benzaazoua, M., 2014. Effects of Curing and Stress Conditions on Hydromechanical, Geotechnical and Geochemical Properties of Cemented Paste Backfill. *Engineering Geology*, 168, 23-37. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.10.024>
- Yin, S., Shao, Y., Wu, A., Wang, Y., Chen, X., 2018. Expansion and Strength Properties of Cemented Backfill Using Sulphidic Mill Tailings. *Construction and Building Materials*, 165, 138-148. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.005>
- Zheng, J., Zhu, Y., Zhao, Z., 2016. Utilization of Limestone Powder and Water-Reducing Admixture in Cemented Paste Backfill of Coarse Copper Mine Tailings. *Construction and Building Materials*, 124, 31-36. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.055>