

Çimentolu Macun Dolgunun Dayanım ve Porozite Performansı: Sülfürce Zengin Maden Atığı Yerine Yüksek Fırın Cürufu İkamesi

Strength and Porosity Performance of Cemented Paste Backfill: Substituting Sulphide-rich Mine Tailings with Blast Furnace Slag

Tekin YILMAZ^{1*}, Bayram ERÇIKDI²

Öz

Bu çalışmada, sülfürce zengin maden atığı (Sz-Ma) yerine yüksek fırın cürufu (YFC) ikamesinin çimentolu macun dolgunun (ÇMD) kısa (7-28 gün) ve uzun (>28 gün) dönem mekanik ve mikroyapısal özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda, Sz-Ma'nın %5, %10 ve %15 oranlarında YFC ile yer değiştirilmesiyle hazırlanan ÇMD numuneleri 7-360 gün süreyle kürlenmiş, basınç dayanımı ve porozite (28 günde) testleri gerçekleştirilmiştir. Bulgular, YFC ikamesinin tüm kür sürelerinde basınç dayanımını belirgin şekilde artırdığını, en yüksek performansın %15 ikame oranında elde edildiğini göstermektedir. Ayrıca, YFC katkısı toplam ve kademeli porozite değerlerini düşürerek mikroyapı bütünlüğünü iyileştirmiştir. Elde edilen sonuçlar, optimum düzeyde YFC ikamesinin hem dayanım kayıplarını azaltabileceğini hem de çimento tüketimini önemli ölçüde düşürerek ekonomik ve çevresel fayda sağlayabileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Maden atığı, Yüksek fırın cürufu, Çimentolu macun dolgu, Basınç dayanımı, Porozite.

Abstract

This study researches the efficacies of replacing sulphide-rich mine tailings (Sr-Mt) with blast furnace slag (BFS) on the cemented paste backfill (CPB) materials' short- (7-28 days) and long-term (> 28 days) mechanical and microstructural features. CPB specimens were prepared by substituting Sz-Ma with BFS (5-10-15%) and cured for periods ranging from 7 to 360 days. Unconfined compressive strength and porosity (28 days) tests were conducted. The results indicated that BFS replacement significantly enhanced the compressive strength at all curing ages, with the highest performance observed at a 15% substitution level. Additionally, BFS reduced total and incremental porosity values, thereby improving microstructural integrity. These findings demonstrate that optimal BFS incorporation can reduce strength loss over time and substantially lower cement consumption, providing both economic and environmental benefits.

Keywords: Mine tailings, Blast furnace slag, Cemented paste backfill, Compressive strength, Porosity.

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

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

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: yilmaz@gumushane.edu.tr

Geliş/Received: 26.11.2025

Kabul/Accepted: 05.02.2026

Yayın/Published: 03.09.2026

1. Giriş

Küresel ölçekte teknolojik gelişmelerin hız kesmeden devam etmesiyle beraber artan hammadde ihtiyacı, madencilik alanında düşük tenörlü cevherlerin ekonomiye kazandırılmasını hem gerekli hem de stratejik bir öncelik hâline getirmiştir. Bununla birlikte, bu tür düşük tenörlü cevherlerin flotasyon gibi cevher zenginleştirme teknikleriyle işlenmesi sonucunda, büyük kısmı tehlikeli nitelikte olan ince taneli katı atıkların (tüvenan cevherin %95-98'i) miktarı giderek artış göstermektedir (Erçikdi vd., 2012; Yılmaz, 2019). Günümüzde, çimentolu macun dolgu (ÇMD) tekniğinin geniş çapta uygulanması, hem büyük miktarda ortaya çıkan katı atık kaynaklarının ikincil kullanımına hem de madenlerin sürdürülebilir büyümesine önemli katkılar sunmuştur (Wang vd., 2023; He vd., 2025). Bu teknik ayrıca, derin zemin basıncı (Liv vd., 2024), kaya tabakalarının hareketinin kontrolü (Keskin vd., 2024), yerüstü zemininin çökmesi (Guo vd., 2024), atık barajı kaynaklı büyük boyutlu arazilerin işgal edilmesi (Hou vd., 2024) ve yeraltı su kaynaklarının kirlenmesi (Jiang vd., 2024) gibi sorunları çözmektedir (He vd., 2025).

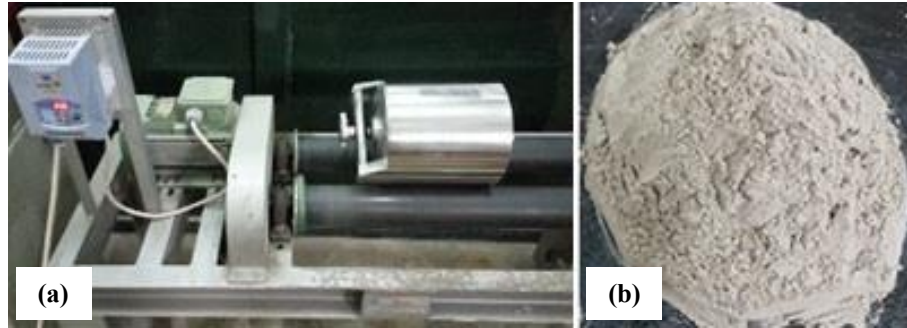
Ancak, metal madenlerinin karmaşık ve değişken kimyasal bileşimi ve jeolojik özellikleri nedeniyle, bazı madenlerin atıkları, tıpkı kurşun-çinko (Pb-Zn) madeni cevher zenginleştirme sürecinde ortaya çıkan kükürt (sülfür) elementleri başta olmak üzere çok sayıda ağır metal ve zararlı element içerir (Chen vd., 2021; Sun vd., 2024). Bu atıklar, yeraltındaki cevheri alınmış üretim odalarının doldurulmasında hammadde olarak kullanıldığında, içerdikleri sülfürlü mineraller oksijen ve suyla temas ettiklerinde oksitlenerek sülfat (SO_4^{2-}) ve asit (H^+) üretir ve böylece çözümü oldukça zorlayıcı ve uğraştırıcı olan asit maden drenajına (AMD) sebep olabilir (Yılmaz vd., 2020; Mafra vd., 2022; Saedi vd., 2022). Ayrıca, yeraltı sıcaklık ve nem ortamlarını simüle eden uzun süreli kürleme koşulları altında, yüksek miktarda kükürt içeren atıkların bulunduğu dolgu malzemeleri, yüksek iç-basınç kaynaklı yenilmelerle sonuçlanan çok sayıda genleşme (şişme) safhası (Zheng vd., 2018) ve sülfat erozyonu (Liu vd., 2020) oluşturmaya eğilimlidir. Bu durumda alkalilikten asitliğe dönüşebilen dolgunun iç kimyasal yapısı (Dong vd., 2019) sebebiyle dolgu malzemesinin mukavemet kazanımında azalma meydana gelir ve hatta madenin gerektirdiği temel mukavemet sağlanamaz (Tang vd., 2021).

Bu çalışmada, yukarıda vurgulanan sorunların çözümü için geleneksel mücadelenin (bağlayıcı malzemeye mineral katkı ikamesi) aksine sülfürce zengin maden atığı (Sz-Ma) yerine kısmen (%5-15) yüksek fırın cürufu (YFC) ikame edilmesinin ÇMD'nin kısa ve uzun dönem (7-360 gün) dayanım ve porozite (28 gün) performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Malzemeler

Bu çalışmada, ÇMD karışımlarında kullanılan malzemelerden Sz-Ma ve bağlayıcı (PÇ) Eti Bakır A.Ş. Küre Bakır İşletmesi (Kastamonu) ve Trabzon Çimento Fabrikası (Aşkale Çimento Sanayii A.Ş.)’ndan temin edilirken, YFC; Karabük’te ham demir üretimi gerçekleştirilen bir fabrikadan (Kardemir) getirtilmiştir. YFC, öğütme işleminden önce etüvde (36 saat ve 50°C) kurutulmuştur. Ardından, laboratuvar tipi bilyeli değirmen vasıtasıyla gerekli inceliğe (-100 µm) kadar öğütülmüştür. Öğütme işlemlerinde, değirmene öğütücü eleman olarak 5 farklı çapa (17,25-19,5-30,0-40,0-44,5 mm) sahip toplam 84 adet paslanmaz çelik bilye eklenmiştir (Tablo 1). Kritik hızı 102,6 dev/dk olan bilyeli değirmende dönme hızı; kritik hızın %79,9’una tekabül eden 82,0 dev/dk olarak uygulanmıştır. Ayrıca, boyut küçültme işlemlerinde kullanılan bilyeli değirmenin şarj oranı %30 iken, bilye şarjı-öğütülen malzeme oranı 5,1’dir (Tablo 1). Tablo 1’de açıklanan parametreler uyarınca YFC’nin birim miktar başına öğütme süresi 4 saat sürmüştür. Numune hazırlama ve deneysel prosedürler öncesinde Şekil 1’de verilen değirmen kullanılarak yeteri miktarda YFC malzemesi hazırlanmıştır.



Şekil 1. Öğütme işleminde kullanılan bilyeli değirmen (a) ve öğütme sonrasında YFC (b)

Tablo 1. YFC’nin öğütme işleminde kullanılan bilyeli değirmene ait parametreler

Bilye çapı (mm)	Bilye sayısı	Kritik hız (dev/dk)	Dönme hızı (dev/dk)	Şarj oranı (%)	Bilye şarjı-malzeme oranı	Öğütme süresi (saat)
44,5	6	102,6	82	30	5,1	4
40,0	10					
30,0	16					
19,5	20					
17,25	32					

YFC’nin öğütme süreci tamamlandıktan sonra, ÇMD bileşenlerinin (Sz-Ma, PÇ ve YFC) fiziksel, kimyasal ve mineralojik analizleri gerçekleştirilerek Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. ÇMD bileşenlerinin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri

Malzemeler	Fiziksel Özellikler					Mineralojik Özellikler	
	Tane boyutu (µm)				ÖA (g/cm³)		ÖYA (cm²/g)
	D10	D30	D50	D80			
Sz-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	-
YFC	1,8	6,6	17,3	53,0	2,91	4640	Camsı faz
Malzemeler	Kimyasal Özellikler						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	S ⁻²	FeS ₂
Sz-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	-	-
YFC	39,85	10,58	1,21	6,26	37,02	-	-

Malzemelerin D₈₀ tane boyutu değerleri incelendiğinde, malzemelerin %80'inin geçtiği elek açıklıklarının 49,9-68,5 µm olduğu saptanmıştır. Ayrıca, Sz-Ma, PÇ ve YFC'den oluşan ÇMD karışım malzemelerinin özgül ağırlıkları sırasıyla 3,37; 3,12 ve 2,91 g/cm³ olarak ölçülmüş olup, bu malzemelerin özgül yüzey alanları 4335 ile 4640 cm²/g arasında değişim göstermiştir (Tablo 2). Karışımı oluşturan malzemelerin kimyasal bileşimleri; maden atığının silisyum dioksit (SiO₂) ve demir oksit (Fe₂O₃) açısından zengin olduğunu, buna karşın, PÇ ve YFC'nin baskın olarak SiO₂ ve kalsiyum oksit (CaO) içerdiğini göstermiştir. Sülfürce zengin maden atığının pirit (FeS₂) ve buna bağlı olarak sülfür (S⁻²) içeriklerinin sırasıyla %29,66 ve %15,82 olduğu tespit edilmiştir (Tablo 2).

2.2. Numune Hazırlık Süreci

Bu çalışmada, tüm ÇMD numuneleri 19,05 cm karışım akışkanlığında ve %8,5 çimento oranında hazırlanmıştır. Kontrol ÇMD numuneleri tamamen (%100) Sz-Ma içerirken, YFC içeren ÇMD numuneleri Sz-Ma yerine %5-10-15 oranlarında ikame edilerek üretilmiştir (Tablo 3).

Tablo 3. ÇMD numunelerinin üretilmesinde kullanılan karışım içerikleri

Karışım tipi	İkame oranı (%)		Bağlayıcı oranı (%)	Katı oranı (%)	Su/çimento oranı (%)	Akışkanlık (cm)
	Sz-Ma	YFC				
Kontrol	100	-		73,70	4,20	
%5 YFC	95	5	8,5	73,80	4,18	19,05
%10 YFC	90	10		74,14	4,10	
%15 YFC	85	15		74,55	4,02	

Tüm ÇMD karışımları, laboratuvar tipi bir karıştırıcı kullanılarak sabit bir hız (105 devir/dk) ve sürede (7 dk) titizlikle karıştırılmış (Şekil 2a) ve ardından numune kalıplarına (5x10 cm ve alttan drenajlı) yerleştirilerek sıkılama işlemine tabi tutulmuştur. Numune kalıpları içerisindeki ÇMD karışımları 24 saat drenaj masalarında fazlalık sularının uzaklaşması için bekletilmiş (Şekil 2b) ve

sonrasında her bir kür süresi (7-28-90-180-360 gün) tamamlanınca kadar kür dolabında (sıcaklık: 20°C ve nem: ~%85) muhafaza edilmiştir (Şekil 2c).



Şekil 2. Karıştırma (a), drenaj (b) ve kür işlemi (c) (Yılmaz ve Erçikdi, 2022)

2.3. Basınç Dayanımı ve Porozite Testi

Karışım özelliklerinden bağımsız olarak her bir kür süresi için 3'er adet olmak üzere toplam 60 adet ÇMD numunesinin 7-28-90-180-360 gün sonundaki basınç dayanımı (BD) testleri 50 kN yük kapasitesine sahip bilgisayardan kontrol edilebilen test ünitesi (UTEST) kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3a) (ASTM C39, 2016). Test öncesinde numune yüzeylerinin paralellliğini sağlayabilmek adına her bir numunenin alt-üst yüzeyleri düzeltilmiş ve test sırasında cihaz numuneye 1,0 mm/dk hızında yük uygulamıştır.



Şekil 3. BD ünitesi (a) ve porozite cihazı (b) (Yılmaz, 2019)

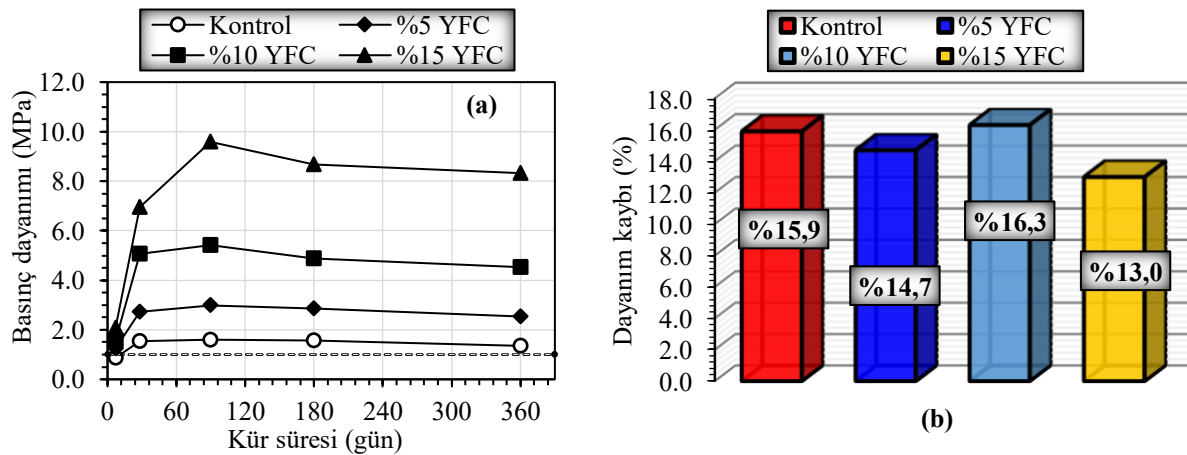
Kür süresi (28 gün) tamamlanan ÇMD numuneleri; porozite testine hazır hale gelmeleri için etüv (sıcaklık: 50°C ve süre: 60 saat) ve desikatör vasıtasıyla kurutma ve soğutma işlemine tabi tutularak bünyelerindeki reaksiyonlar sona erdirilmiştir. Farklı karışım özelliklerinde deformasyona uğramamış 1'er adet numune hazırlanmış olarak kontrol ve YFC ikameli (%5 YFC ve %15 YFC) numunelerin porozite testlerinde hidrostatik basınç kapasitesi 60.000 psi olan Micromeritics Autopore IV 9410 marka/model cihazdan faydalanılmıştır (Şekil 3b) (ASTM D4404-18, 2018).

3. Bulgular ve Tartışma

3.1 Basınç Dayanımı Bulguları

Şekil 4, %8,5 PÇ oranında üretilen kontrol ÇMD (%100 Sz-Ma) ve Sz-Ma yerine %5-15 oranında YFC ikameli ÇMD numunelerinin 360 güne kadar gerçekleştirilen basınç dayanımı (BD) bulgularını (a) ve dayanım kaybı sonuçlarını (b) göstermektedir.

Tüm ÇMD numunelerinin 90 günlük kür süresi sonuna kadar basınç dayanımlarının arttığı, sonrasında (>90 gün) ise BD değerlerinin düşüş eğilimi sergilediği tespit edilmiştir. Sz-Ma'nın %5-15 oranında YFC ile yer değiştirmesinin ÇMD'nin dayanım/duraylılık performansı üzerindeki etkisi incelendiğinde, kür süresinden bağımsız olarak ikame oranının artması dolgu dayanımını arttırmıştır ve bu artış, %15 YFC ikamesinde oldukça belirgin görünmektedir. Şöyle ki, kontrol ÇMD numuneleri dayanım artışının devam ettiği kür süreleri boyunca (7-90 gün) %84,35 oranında dayanım kazanmışken, YFC ikameli numunelerde aynı kür süresi aralığında dayanım artışı %138,94-359,76 arasında değişmiştir (Şekil 4a). Bu oldukça faydalı etki, i) YFC'nin puzolanik karakteristiği sonucu atık ve bağlayıcı taneleri arasındaki mukavemet bağımlı güçlendiren ilave C-S-H ürünlerinin üretilmesi ve ii) PÇ ve Sz-Ma'dan daha yüksek yüzey alanı değeri gösteren YFC tanelerinin ($4640 \text{ cm}^2/\text{g} > 4335\text{-}4440 \text{ cm}^2/\text{g}$) çimento ile Sz-Ma taneleri arasını doldurması ile açıklanabilir (Ercikdi vd., 2009; Fall vd., 2009; Yılmaz vd., 2020). Bunlara ek olarak, YFC ikamesiyle birlikte ÇMD karışımlarının katı oranlarının artması ve su-çimento oranlarının azalması; YFC içeren ÇMD numunelerindeki belirgin dayanım artışının muhtemel sebepleri arasında gösterilebilir (Tablo 3) (Ercikdi vd., 2013; Yılmaz vd., 2018).



Şekil 4. YFC ikamesinin ÇMD'nin mekanik performansına etkisi (a) ve dayanım kaybı sonuçları (b)

İmal edilen ÇMD numunelerinde baskın bileşen olan Sz-Ma'da oksidasyon kaynaklı içsel olarak oluşan asit-sülfat atak sonucu numunelerde üretilen hidratasyon bileşenlerinin (Portlandit, C-S-H, vb.) yapısal bütünlüklerini yitirmesi (Cihangir ve Akyol, 2018; Yin vd., 2018; Yılmaz vd., 2020) ile ilişkilendirilen dayanım kaybı sonuçları Şekil 4b'de sergilenmiştir.

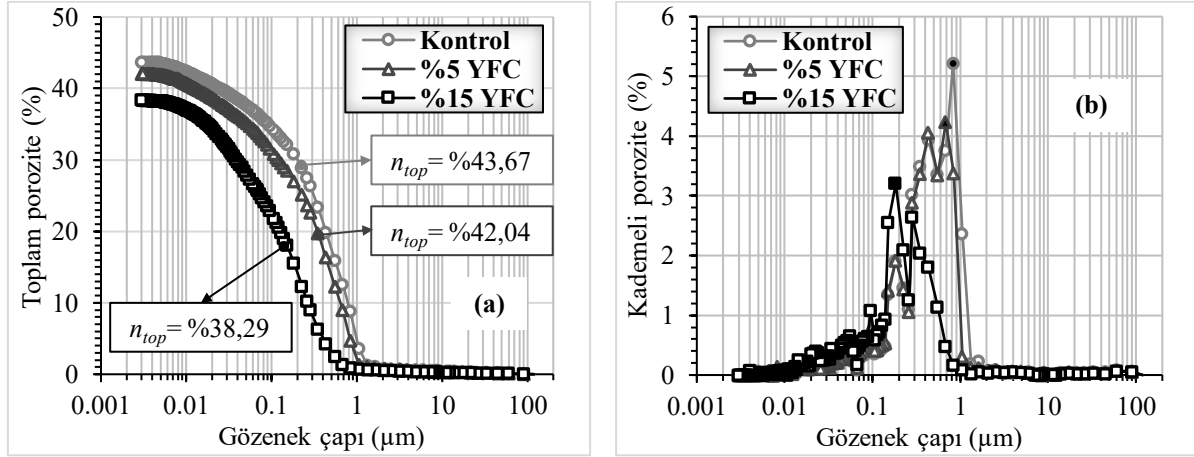
Şekil 4a'dan da açıkça görüleceği üzere, numunelerde 90 günden sonra başlayan dayanım düşüşleri incelendiğinde, kontrol ÇMD numunelerinde %15,9 oranında dayanım kaybı meydana gelirken, %5, %10 ve %15 YFC içeren numunelerde bu oranlar sırasıyla %14,7, %16,3 ve %13,0 olarak gerçekleşmiştir (Şekil 4b). Kontrol ÇMD numuneleri ile kıyaslandığında, %15 YFC'li numuneler hem 90 günlük kür süresi sonunda %498,4 daha yüksek BD üretmiş (Şekil 4a) hem de 90-360 gün arasında %18,2 daha düşük dayanım kaybı meydana getirmiştir (Şekil 4a ve b). 360 gün sonunda ortaya çıkan basınç dayanımı değerleri ve 90-360 gün arasında basınç dayanımlarında meydana gelen kayıplar dikkatle irdelendiğinde, kontrol ÇMD'lerinin 360 günde ürettiği dayanım değerini (1,35 MPa) sağlama adına maden atığı yerine makul düzeyde (%15) YFC ikame edilerek %8,5 oranında kullanılmış olan çimento miktarında azımsanmayacak derecelerde tasarruf edilebilir. Böyle bir durumda macun dolgu tesisinde harcanan çimento miktarının ve dolayısıyla maliyetinin kayda değer bir derecede azaltılacağı tahmin edilmektedir.

3.2 Porozite Bulguları

%8,5 Portland çimentosu dozajında imal edilen kontrol ÇMD ve Sz-Ma'nın %5 ve %15 oranında YFC ile yer değiştirilmesiyle hazırlanan ÇMD'lerin 28 günde gerçekleştirilen toplam ve kademeli porozite bulguları Şekil 5'te sunulmuştur.

MIP cihazı vasıtasıyla yapılan ölçümlerde; kontrol numunesinin 28 gün sonundaki toplam porozite (n_{top}) değeri %43,67 olarak ölçülürken, %5 ve %15 YFC kodlu numunelerde %42,04 ve %38,29 oranlarında toplam porozite saptanmıştır. ÇMD karışımlarında YFC ikamesi arttıkça n_{top} değerlerinin azaldığı ve %15 YFC numunesinde toplam porozite (%38,29) düşüşünün basınç dayanımında yaşanan dikkate değer artış (Şekil 4a) ile uyumlu olarak oldukça belirgin olduğu görülmektedir (Şekil 5a). Nicel olarak ifade etmek gerekirse, %5 YFC ve %15 YFC kodlu ÇMD'lerde, kontrol grubuna kıyasla n_{top} değerinde sırasıyla %3,7 ve %12,3 düşüş meydana gelmiştir. Diğer taraftan kademeli porozite bulguları incelendiğinde (Şekil 5b), YFC ikamesinin numunelerin gözenek çaplarını küçülttüğü ve kademeli porozite değerlerinin (kontrol, %5 ve %15 YFC) sırasıyla %5,21, %4,23 ve %3,20 oranlarında olduğu belirlenmiştir. Porozite performansında meydana gelen gelişim, YFC'nin puzolanik yapısından kaynaklanan ve atık ile bağlayıcı taneler arasındaki dayanım bağını pekiştiren ekstra C-S-H yapılarının oluşumuna atfedilebilir (Fall vd., 2007; Zheng vd., 2016). Ayrıca, Sz-Ma'ya kıyasla daha küçük tane boyutu ve daha geniş yüzey alanı (Tablo 2) ile YFC, atık

ve bağlayıcı taneleri arasındaki boşlukları doldurarak (filler etkisi) karışımda gerekli su miktarını azaltmış; bu da aynı akışkanlıkta katı oranında artışa ve su/çimento oranında düşüşe (Tablo 3) yol açarak porozite performansının iyileşmesini sağlamıştır (Erçikdi vd., 2013; Yılmaz ve Erçikdi, 2016; Yılmaz vd, 2017; Yılmaz vd., 2018).



Şekil 5. ÇMD numunelerinin 28 gündeki toplam (a) ve kademeli (b) porozite bulguları (Yılmaz, 2019)

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışma, sülfürce zengin maden atığının (Sz-Ma) yüksek fırın cürufu (YFC) ile kısmen ikamesinin çimentolu macun dolgu (ÇMD) malzemelerinin kısa ve uzun dönemlerdeki mekanik ve mikroyapı performansına etkilerini araştırmaktadır. Deneysel süreçte, Sz-Ma yerine %5-10-15 oranlarında YFC kullanılarak imal edilen ÇMD numuneleri 7 ile 360 gün arasında kürlenmiş; tüm kür sürelerinde basınç dayanımı, 28 gün sonunda ise porozite testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen can alıcı bulgular aşağıda vurgulanmıştır.

- ® YFC ikamesi, kür süresinden bağımsız olarak ÇMD'nin basınç dayanımını artırmış, bu artış %15 YFC içeren numunelerde oldukça belirgin değerlere ulaşmıştır.
- ® 90 günlük kür süresi sonunda, %15 YFC ikameli numuneler kontrol grubuna kıyasla yaklaşık beş kat daha yüksek basınç dayanımı göstermiştir.
- ® YFC katkısı, toplam (%43,7'den %38,3'e) ve kademeli (%5,2'den %3,2'ye) porozite değerlerini azaltarak gözenek yapısını iyileştirmiş ve dayanım kazanımını desteklemiştir.
- ® Kontrol numunelerinde 90–360 gün aralığında gözlenen dayanım kaybı (%15,9), YFC ikamesiyle kısmen azaltılmıştır (%15 YFC= %13,0).

Sonuç olarak, %15 YFC ikamesi, aynı dayanım seviyesinin daha düşük çimento oranıyla sağlanabileceği ihtimaliyle çimento tüketimini ve dolayısıyla maliyeti düşürme potansiyeli taşımaktadır. Ayrıca, en uygun seviyede YFC ikamesi, sülfürce zengin maden atıklarının neden

olduğu dayanım düşüşü ve mikroyapı (porozite vb.) bozulmalarını önlemede etkili bir strateji olarak değerlendirilebilir.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- ASTM C39. (2016). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, Annual Book of ASTM Standards. American Society of Testing Material.
- ASTM D4404-18. (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.
- Chen, Q., Chen, H., Wang, P., Chen, X. and Chen, J. (2021). Effect of sulphur-containing tailings content and curing temperature on the properties of M32.5 cement mortar. *Materials*, 14(19), 5751. <https://doi.org/10.3390/ma14195751>
- Dong, Q., Liang, B., Jia, L. and Jiang, L. (2019). Effect of sulfide on the long-term strength of lead-zinc tailings cemented paste backfill. *Construction and Building Materials*, 200, 436-446. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.069>
- Ercikdi, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Devci, H. and Alp, İ. (2009). Utilization of industrial waste products as pozzolanic material in cemented paste backfill of high sulphide mill tailings. *Journal of Hazardous Materials*, 168(2-3), 848-856. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.100>
- Ercikdi, B., Baki, H. and 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>
- Fall, M., Belem, T., Samb, S. and Benzaazoua, M. (2007). Experimental characterization of the stress-strain behaviour of cemented paste backfill in compression. *Journal of Materials Science*, 42, 3914-3922. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0403-2>
- Fall, M., Adrien, D., Célestin, J. C., Pokharel, M. and Touré, M. (2009). Saturated hydraulic conductivity of cemented paste backfill. *Minerals Engineering*, 22(15), 1307-1317. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.08.002>
- Guo, Z., Qiu, J., Kirichek, A., Zhou, H., Liu, C. and Yang, L. (2024). Recycling waste tyre polymer for production of fibre reinforced cemented tailings backfill in green mining. *Science of the Total Environment*, 908, 168320. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168320>
- He, Q., Cao, S. and Yilmaz, E. (2025). Characterizing mechanical and multiscale porosity features of cementitious high sulfur tailings backfill using CT technology. *Process Safety and Environmental Protection*, 194, 858-872. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.12.070>

- Hou, Y., Yang, K., Yin, S., Yu, X., Kou, P. and Wang, Y. (2024). Enhancing workability, strength, and microstructure of cemented tailings backfill through mineral admixtures and fibers. *Journal of Building Engineering*, 84, 108590. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108590>
- Jiang, M., Cao, S. and Yilmaz, E. (2024). Analyzing microscopic structure and macroscopic strength behavior of cement-based tail fills incorporating fiber by X-ray CT scanning technique. *Construction and Building Materials*, 440, 137453. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137453>
- Keskin, T., Yilmaz, E., Kasap, T., Sari, M. and Cao, S. (2024). Toward viable industrial solid residual waste recycling: a review of its innovative applications and future perspectives. *Minerals*, 14(9), 943. <https://doi.org/10.3390/min14090943>
- Li, X., Cao, S. and Yilmaz, E. (2024). Effect of magnetic induction intensity and steel fiber rate on strength improvement of cementitious filling composites. *Construction and Building Materials*, 428, 136417. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136417>
- Liu, L., Xin, J., Huan, C., Qi, C., Zhou, W. and Song, K. I. (2020). Pore and strength characteristics of cemented paste backfill using sulphide tailings: Effect of sulphur content. *Construction and Building Materials*, 237, 117452. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117452>
- Mafra, C., Bouzahzah, H., Stamenov, L. and Gaydardzhiev, S. (2022). An integrated management strategy for acid mine drainage control of sulfidic tailings. *Minerals Engineering*, 185, 107709. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107709>
- Saedi, A., Jamshidi-Zanjani, A., Darban, A. K., Mohseni, M. and Nejati, H. (2022). Utilization of lead-zinc mine tailings as cement substitutes in concrete construction: Effect of sulfide content. *Journal of Building Engineering*, 57, 104865. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104865>
- Sun, L., Wan, F., Wang, G., Duan, S., Huang, Q. and Li, W. (2024). Pore-fracture structures and seepage flow characteristics during spontaneous coal combustion based on CT 3D reconstruction. *Energy*, 305, 132398. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132398>
- Tang, Y., Zheng, J., Guo, L. and Zhao, Y. (2021). Effect of gypsum addition on the mechanical and microstructural performance of sulphide-rich cemented paste backfill. *Minerals*, 11(3), 283. <https://doi.org/10.3390/min11030283>
- Wang, A., Cao, S. and Yilmaz, E. (2023). Quantitative analysis of pore characteristics of nanocellulose reinforced cementitious tailings fills using 3D reconstruction of CT images. *Journal of Materials Research and Technology*, 26, 1428-1444. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.08.004>
- Yilmaz, T. and 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., Erçikdi, B. ve Cihangir, F. (2017). Yüksek fırın cürufu ve perlit ikamesinin çimentolu macun dolgunun mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(2), 239-252. <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.358429>
- Yılmaz, T., Ercikdi, B. and Deveci, H. (2018). Utilization 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. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Yılmaz, T., Ercikdi, B. and Cihangir, F. (2020). Evaluation of the neutralization performances of the industrial waste products (IWPs) 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. ve Erçikdi, B. (2022). Doğal alkali malzemelerin çimentolu macun dolgunun dayanım-duraylılık ve mikroyapı performansına etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 10(4), 1474-1483. <https://doi.org/10.21923/jesd.1086405>
- Zheng, J., Zhu, Y. and 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>
- Zheng, J., Guo, L., Sun, X., Li, W. and Jia, Q. (2018). Study on the strength development of cemented backfill body from lead-zinc mine tailings with sulphide. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018(1), 7278014. <https://doi.org/10.1155/2018/7278014>