

Atık Malzemelerin Çimentolu Macun Dolgunun Dayanım-Duraylılık Performansına ve Üretim Maliyetine Etkisi

Tekin YILMAZ^{1*}, Bayram ERÇIKDI²

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

² Karadeniz Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Trabzon, TÜRKİYE

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

Araştırma Makalesi/Research Article
Geliş Tarihi/Received: 06.03.2022
Kabul Tarihi/Accepted: 15.04.2022

ÖZ

Bu çalışma ile çimentolu macun dolgu (ÇMD) karışımında sülfürlü-maden atığı (S-MA) yerine %15 oranında ikame edilen atık malzemelerin (inşaat-yıkıntı atığı: İYA, kireçtaşı: KT, uçucu kül: UK ve yüksek fırın cürufu: YFC) ÇMD'nin dayanım/duraylılık performansına ve üretim maliyetine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, üretilen ÇMD numuneleri (kontrol: ve %15 atık malzeme ikameli) 7-360 gün boyunca dayanım testine tabi tutulmuştur. ÇMD üretim maliyetinin araştırılması için karışımlarda kullanılan çimento miktarları ve maliyetleri belirlenirken, atık malzemelerin öğütme sırasındaki enerji tüketimleri ve maliyetleri hesaplanmıştır. Tüm numuneler kısa ve uzun dönemde istenen 1,0 MPa dayanımı sağlamış ve %15 UK ve YFC ikameli ÇMD numuneleri kontrol numunelerine kıyasla 4 kata kadar daha yüksek dayanım üretmiştir. 1,0 m³ ÇMD üretimi için kontrol karışımında 130,0 kg çimento (%8,5) kullanılırken, atık malzeme ikameli karışımlarda bağlayıcı oranının %1,0 düşürülmesi yaklaşık %15 çimento tasarrufu sağlamıştır. Atık malzemelerin öğütme işlemlerinde 6,55-18,89 kW-saat/ton elektrik enerjisi tüketilmiş ve böylece 2,99 ₺ (UK)-8,85 ₺ (İYA) arasında para harcanmıştır. ÇMD üretimi için toplam maliyet değerlendirildiğinde, kontrol karışımı için 153,4 ₺ harcanırken, %15 atık malzeme ikameli karışımların maliyetinin 133,5 ₺'ye kadar (%12,98'e kadar tasarruf) düşürülebilmesi öngörülmüştür. Sonuçlar, ÇMD'nin dayanım/duraylılık performansını ve üretim maliyeti konusunda en uygun karışım tipinin %15 UK ikameli ÇMD karışımı olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Macun dolgu, Sülfürlü-maden atığı, Üretim maliyeti, Dayanım, Atık malzemeler

Effect of Waste Materials on the Strength-Stability Performance and Production Cost of Cemented Paste Backfill

ABSTRACT

In this study, the effect of the waste materials (WMs) (construction-demolition waste: CDW, limestone: LS, fly ash: FA and blast furnace slag: BFS), replaced at 15wt.% to sulphide-mine tailings (S-MT) in cemented paste backfill (CPB) mixture, on the strength/stability performance and production cost of CPB were examined. Within this scope, CPB samples (Control and 15wt.% WM) were subjected to the strength tests for 7-360 days. To investigate the production cost of CPB, the amount and costs of the binder were determined, while the energy consumption and costs of the WMs during grinding were calculated. All samples provided the desired 1.0 MPa strength in the short- and long-term, and CPB samples containing 15wt.% FA and BFS produced up to 4 times higher strength than the Control. 130.0 kg cement was used in Control mixture for 1.0 m³ CPB production, whilst reducing the binder dosage by 1.0% in the CPB mixture with WM resulted in approximately 15% cement savings. During the grinding process of WMs, 6.55-18.89 kWh/ton of electric energy was consumed; thus, 2.99₺ (FA)-8.85₺ (CDW) of money was spent. When the total cost for CPB production was evaluated, 153.4₺ was spent for the Control mixture, whereas it was foreseen that the cost of backfill mixtures of 15wt.% WM can be reduced to 133.5₺ (saving up to 12.98%). The results demonstrated that the most suitable mixture type for CPB's strength/stability performance and production cost is the CPB mixture of 15wt.% FA.

Keywords: Paste backfill, Sulphide-mine tailings, Production cost, Strength, Waste materials

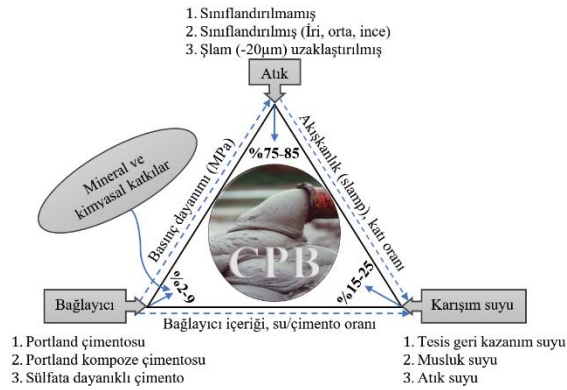
Cite as;

Yılmaz, T., Erçıkdi, B. (2022). Atık Malzemelerin Çimentolu Macun Dolgunun Dayanım-Duraylılık Performansına ve Üretim Maliyetine Etkisi, *Recep Tayyip Erdogan University Journal of Science and Engineering*, 3(1), 1-10. Doi: 10.53501/rteufemud.1083634

Orcid ID: T.Yılmaz, 0000-0003-3288-5192; B.Erçıkdi, 0000-0003-4900-5382

1. Giriş

Çimentolu macun dolgu (ÇMD) en basit haliyle cevher zenginleştirme atığı, bağlayıcı ve sudan oluşan yüksek yoğunluklu ve ayrışma özelliği bulunmayan kompozit bir malzeme karışımıdır. Tipik bir ÇMD karışımında filtrasyon işlemine tabi tutulmuş atık, karışımın %75-85'ini teşkil ederken, karışımın macun kıvamında olabilmesi ve dolgu tesisinden yeraltındaki üretim açıklıklarına kolayca iletilebilmesi için %15-25 aralığında su içermesi gerekmektedir. Ayrıca, ÇMD'nin sertleşip dayanım kazanması ve zaman içerisinde bütünlüğünü (duraylılığını) koruyabilmesi için karışım içerisinde genellikle ağırlıkça %2-9 oranında bağlayıcı kullanılmaktadır (Şekil 1) (Kesimal vd., 2002; Külekçi, 2013; Ercikdi vd., 2017; Li ve Fall, 2018; Ouattara vd., 2018; Panchal vd., 2018; Yılmaz vd., 2018; Külekçi, 2021).



Şekil 1. ÇMD'nin ana bileşenlerini gösteren şematik diyagram (Yılmaz, 2019)

Figure 1. Schematic diagram showing the main components of the CPB (Yılmaz, 2019)

Yeraltında cevheri alınmış üretim boşluklarına yerleştirilecek ÇMD'nin kısa ve uzun dönem dayanım ve duraylılık özelliklerinin detaylı bir şekilde araştırılması ve en uygun mühendislik tasarımının geliştirilmesi, ÇMD uygulamasının yürütüldüğü yeraltı maden işletmelerinde çalışan personel ve kullanılan ekipmanlar için emniyetli çalışma koşullarının tesis edilebilmesi, üretim döngüsünün sorunsuz sürdürülebilmesi ve dolgu yerleştirilmiş üretim açıklığına komşu olan bölgelerdeki cevher üretimi sırasında cevher seyrelmesinin engellenebilmesi açısından hayati önem arz etmektedir (Yılmaz, 2019; Yan ve

Yılmaz, 2020). En uygun dolgu tasarımı için araştırılması gereken birincil faktör olan ÇMD'nin kısa ve uzun dönem dayanım ve duraylılığı, iç (yapısal) ve dış etkenlerden oluşan birçok parametre tarafından etkilenmektedir. Bunların başında iç etkenler kategorisinde bulunan bağlayıcı tipi ve oranı gelmektedir. ÇMD'nin istenen dayanımı sağlaması ve bu dayanımı uzun dönemde muhafaza etmesi için uygun bir bağlayıcı tipi seçilmeli ve seçilen bağlayıcının yeteri miktarda kullanılması gerekmektedir. Bağlayıcı tipi hususu incelendiğinde, Dünya genelinde yeraltı maden işletmelerinde yürütülen ÇMD uygulamalarında yaygın olarak Portland çimentosunun (PÇ) kullanıldığı görülmüştür (Yılmaz, 2019). Fakat, PÇ'nin sülfür içeriği yüksek tesis atıklarından üretilen ÇMD bünyesinde özellikle uzun dönemde meydana gelen asit-sülfat oluşumunun önlenmesi/azaltılması konusunda dirençsiz olduğu birçok çalışmada ortaya konmuştur (Tariq ve Nehdi, 2007; Cihangir vd., 2012; Ercikdi vd., 2015; Yin vd., 2018). Bundan dolayı bazı araştırmalarda, PÇ'ye ikame veya tamamen yerine olmak üzere Portland kompozite çimentosu veya sülfata dayanıklı çimento (SDÇ) kullanılmıştır (Benzaazoua vd., 2002; Fall ve Benzaazoua, 2005; Tariq ve Nehdi, 2007; Ercikdi vd., 2009a; Erçikdi, 2009). Bu noktada ise özellikle SDÇ tek başına veya PÇ ile belirli oranlarda karıştırılarak kullanıldığında uzun dönemde ÇMD'deki muhtemel dayanım kaybını engellediği, buna karşın, kısa dönemde (28 gün) istenen kritik dayanımı sağlayamadığı ve SDÇ diğer çimentolara kıyasla daha pahalı olduğundan dolayı bağlayıcı maliyetlerini arttırdığı bildirilmiştir (Erçikdi, 2009). Asit-sülfat oluşumunun önlenmesi/azaltılması konusunda başka bir seçenek olarak kullanılan bağlayıcı miktarının artırılması ise dolgu bünyesindeki çatlakların oluşumunu ve dayanım kaybını engelleyemediği, sadece dayanım kaybı başlama süresini geciktirdiği ortaya konmuştur (Zheng vd., 2018). Bunlara ek olarak, ÇMD tesisi giderleri içerisinde en yüksek maliyet kalemini kullanan bağlayıcının oluşturduğu (ÇMD tesisi işletme giderlerinin %75'ine kadar) bilinmektedir. Hatta, Çayeli Bakır İşletmelerinde uygulanan ÇMD

karışımlarında (belirli bir reçete için) kullanılan çimentonun tek başına maliyetinin ve ÇMD tesisi maliyetinin toplam işletme giderlerinin sırasıyla yaklaşık %10'unu ve %12-16'sını kapsadığı hesaplanmıştır (Ercikdi vd., 2017; Yılmaz ve Yumlu, 2017).

ÇMD karışımlarında tek başına farklı çimento tipleri ve oranları kullanıldığında istenen dayanım değerleri elde edilmesine rağmen hem uzun dönemde daha duraylı kalabilecek dolgu tasarımları geliştirebilmek hem de ÇMD tesis giderlerini azaltabilmek için çimentoya veya atık malzemeye belirli oranlarda ikame/ilave olarak puzolanik (mineral katkı) ve/veya kalsiyumca zengin malzemelerin (yüksek fırın cürufu, perlit, mermer atığı, uçucu kül, kireçtaşı, tras, silis dumanı, inşaat-yıkıntı atığı, pomza) kullanımına yönelik çok sayıda çalışma yapılmıştır (Benzaazoua vd., 2002; Fall vd., 2007; Ouellet vd., 2007; Ercikdi vd., 2009b; Ercikdi vd., 2010; Fall ve Pokharel, 2010; Cihangir vd., 2012; Ercikdi vd., 2015; Külekçi vd., 2016; Külekçi ve Yılmaz, 2018; Yılmaz vd., 2017; Cihangir ve Akyol, 2018; Li ve Fall, 2018; Başçetin ve Eker, 2018; Yılmaz vd., 2018; Yılmaz, 2019; Yılmaz vd., 2019; Erçikdi ve Yılmaz, 2019; Yılmaz vd., 2020).

Bu çalışmalarda kullanılan mineral katkı veya kalsiyumca zengin malzemelerin genellikle boyut küçültme (kıırma, öğütme, vb.) işlemlerine tabi tutulmaları gerekmektedir (Kulekci vd., 2021). Fakat ÇMD tesisi işletme maliyetleri açısından önemli bir parametre olan ikame malzemelerinin boyut küçültme (kıırma-öğütme) maliyetleri devreye girdiğinde, üretilen dolgunun ekonomik olup olmadığı tartışma konusu olmaktadır. Ayrıca, özellikle öğütme giderlerinin cevher hazırlama-zenginleştirme tesisi maliyetlerinin önemli bir kısmını kapsadığı bilinmektedir. Dolayısıyla, bu malzemelerin ÇMD tesisi giderlerine ek yük getirebileceği aşıkardır. Fakat, ÇMD karışımlarında bağlayıcıya veya atık malzemeye ikame veya ilave olarak kullanılan malzemelerin dolgu üretim maliyetine olası etkilerinin araştırıldığı bir çalışma bulunmamaktadır.

Bu çalışmada, %7,5-8,5 bağlayıcı oranında hazırlanan ÇMD karışımlarında sülfürlü-maden atığı (S-MA) yerine %15 oranında ikame edilen 4 farklı atık malzemenin (inşaat-yıkıntı atığı (İYA), kireçtaşı (KT), uçucu kül (UK) ve yüksek fırın cürufu (YFC)) ÇMD'nin mekanik özelliklerine ve üretim maliyetlerine etkileri araştırılmış ve elde edilen sonuçlar ışığında dayanım/duraylılık performansı ve üretim maliyeti açısından en faydalı karışım tipinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. Deneysel Çalışmalar

2.1. Atık ve Bağlayıcı

ÇMD karışımında kullanılan S-MA, Etibakır (Kastamonu-Küre) İşletmesi'nden, bağlayıcı olarak tercih edilen Portland çimentosu (PÇ: CEMI 42,5R) ise Aşkale Çimento (Trabzon) Fabrikası'ndan getirilmiştir. S-MA ve PÇ'nin fiziksel karakterizasyon testlerinde piknometre, tane boyutu ölçer (Malvern Mastersizer) ve yüzey alanı ölçer (Atom-CM-BL 101) cihazları kullanılmış ve malzemelerin özgül ağırlık (ÖA), tane boyut dağılımı (TBD) ve özgül yüzey alanı (ÖYA) sonuçları Tablo 1'de sunulmuştur. Ayrıca, S-MA'nın şlam (<20 µm) malzeme miktarı, %48,4 olarak ölçülmüştür. Malzemelerin XRF ve gravimetrik yöntem aracılığıyla belirlen kimyasal özellikleri, S-MA'nın daha çok Fe₂O₃ ve SiO₂ içerdiğini, PÇ'nin ise baskın olarak CaO mineralinden oluştuğunu göstermiştir. Malzemelerin kimyasal özellikleri ile uyumlu olarak, gerçekleştirilen mineralojik karakterizasyon testleri (XRD) sonucunda S-MA'nın sırasıyla %29,7 ve %15,8 oranında pirit minerali ve sülfür (S⁻²) içerdiği tespit edilmiştir (Tablo 1).

2.2. Atık Malzemeler

Macun dolgu karışımlarında S-MA yerine %15 oranında ikame olarak İYA, KT, UK ve YFC kullanılmıştır. Malzemeler sırasıyla Trabzon-Esentepede yıkılan yapılardan (İYA), Araklı-Taşönü hammadde ocağından (KT) (Aşkale Çimento A.Ş.), Afşin-Elbistan termik santralinden (UK) (Kahramanmaraş) ve Kardemir

Tablo 1. S-MA ve PÇ'nin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri
Table 1. Physical, chemical and mineralogical properties of S-MT and PC.

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	-

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	-	-

demir-çelik fabrikasından (YFC) (Karabük) temin edilmiştir. Laboratuvara getirilen malzemeler S-MA'nın tane boyutuna eşdeğer olacak şekilde boyut küçültme işlemlerine tabi tutulmuştur. Kırma öğütme işlemleri öncesi İYA, KT ve YFC 50 °C sıcaklığa ayarlanan etüvde 36 saat boyunca kurutulmuştur. Ardından İYA ve KT çeneli kırıcı vasıtasıyla ayrı bir şekilde kırılarak -2 mm boyutlu malzemeler elde edilmiştir. Çeneli kırıcıdan çıkan malzemeler (İYA ve KT) ve kırma işlemi gerektirmeyen malzemeler (UK ve YFC) bilyalı değirmen (dönme hızı= 82 devir/dakika) kullanılarak ayrı ayrı kuru öğütmeye tabi tutulmuştur.

Gerçekleştirilen fiziksel karakterizasyon testleri sonucunda dolgu karışımlarında ikame olarak kullanılan atık malzemelerin tane boyutu, ÖA ve ÖYA değerleri Tablo 2'de gösterilmiştir. S-MA yerine ikame olarak kullanılan malzemelerin kimyasal özelliklerinin belirlenmesi için ICP-AES cihazı kullanılmış ve Tablo 2'den görüleceği üzere KT haricindeki malzemelerin daha çok SiO₂ ve Al₂O₃ minerallerini içerdiği saptanmıştır. Ayrıca, İYA dışında tüm malzemelerin CaO içeriğinin yüksek seviyede olduğu belirlenmiştir. TÇMB laboratuvarlarında yaptırılan XRD analizi sonuçları değerlendirildiğinde, YFC'nin camsı fazdan oluştuğu, diğer malzemelerin ise baskın olarak kalsit minerali içerdiği görülmüştür (Tablo 2).

2.3. ÇMD Karışımlarının Hazırlanması

S-MA, PÇ, atık malzemeler ve karışım suyundan oluşan ÇMD karışımlarının hazırlanması sürecinde kontrol ÇMD karışımları için %8,5 PÇ oranı kullanılırken, S-MA yerine %15 oranında

İYA, KT, UK ve YFC'nin ikame edildiği dolgu karışımlarında atık malzeme ikamesiyle çimento sarfiyatında azaltma yapılarak üretilen dolgunun kontrol ÇMD'ye kıyasla nasıl bir mekanik performans göstereceğinin ve bunun dolgu üretim maliyetine etkilerinin değerlendirilebilmesi amacıyla %7,5 PÇ oranı kullanılmıştır. PÇ ve S-MA yerine ikame edilen malzemelerin miktarları 19,05 cm akışkanlık değerine bağlı olarak belirlenen katı oranı değerlerine göre hesaplanarak karışıma eklenmiştir (Tablo 3).

Hazırlanan dolgu karışımlarının homojen bir hale getirilmesi amacıyla 20,8 lt hacimli bir mikser (Univex SRMF 20) kullanılmış ve karıştırma işlemi yapılırken mikserin karıştırma hızı ve süresi sırasıyla 105 devir/dk ve 7 dakika olarak tercih edilmiştir. Daha sonra, ÇMD karışımları alttan drenaj özellikli silindirik kalıplara (5x10 cm: çap x boy) yerleştirilmiş ve drenaj masaları kullanılarak 24 saat boyunca ÇMD karışımlarının bünyesindeki fazlalık suyu drene edilmiştir. Son olarak ÇMD numuneleri seçilen kür süreleri (7-28-90-180-360 gün) sonuna kadar ~%85 nem ve 20 °C sıcaklık şartlarına sahip kür dolabında bekletilmiştir.

2.4. Basınç Dayanımı Testi

Hazırlanan 75 adet macun dolgu numunesi, basınç dayanım testleri öncesinde kalıplarından çıkarılmış, yüzeylerinin paralel olması amacıyla alt ve üst yüzeyleri düzeltilmiş ve hemen ardından numunelerin basınç dayanımı testleri bilgisayar kontrollü basınç/deformasyon ünitesinde (yük kapasitesi= 50 kN ve yükleme hızı= 1,0 mm/dk) gerçekleştirilmiştir (ASTM C 39, 2016).

Tablo 2. Atık malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri**Table 2.** Physical, chemical and mineralogical properties of WMs

Malzemeler	Fiziksel Özellikler				Özgül ağırlık (g/cm ³)	Özgül yüzey alanı (cm ² /g)	Öğütme süresi (dk)
	Tane boyutu (µm)						
	D ₁₀	D ₃₀	D ₅₀	D ₈₀			
İYA	1,5	4,6	13,8	52,0	2,60	6600	240
KT	1,4	4,2	9,4	36,0	2,63	5665	90
UK	2,0	7,5	18,5	50,0	2,42	6360	105
YFC	1,6	6,4	17,9	53,0	2,91	4640	240

Malzemeler	Kimyasal Özellikler (%)				Mineralojik Özellikler
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	
İYA	54,19	11,67	5,44	3,08	Kalsit, Kuvars, Albit, Mika
KT	0,86	0,23	0,06	0,22	Kalsit
UK	34,96	13,92	6,42	2,32	Kuvars, Portlandit, Anhidrat, Kalsit
YFC	39,85	10,58	1,21	6,26	Camsı faz

Tablo 3. ÇMD numunelerinin deneysel çalışma koşulları**Table 3.** Experimental conditions of CPB samples

Karışım tipi	İkame oranı (%)	Bağlayıcı oranı (%)	Katı oranı (%)	Su/çimento oranı	Slamp (cm)
Kontrol	-	8,5	73,7	4,2	
İYA			74,1	4,7	
KT	15	7,5-	73,6	4,8	19,05
UK			73,7	4,8	
YFC			74,2	4,6	

2.5. Dolgu Üretim Maliyeti

Bu bölüm, 4 farklı atık malzemenin (İYA, KT, UK ve YFC) S-MA yerine %15 oranında ikame edilmesinin ÇMD üretim maliyetlerine etkisinin değerlendirilmesini içermektedir. Bu kapsamda, %8,5 bağlayıcı oranında hazırlanan kontrol (%100 S-MA) ÇMD karışımı ile %7,5 bağlayıcı oranında ve S-MA yerine %15 ikame oranı kullanılarak hazırlanan diğer ÇMD karışımlarının (İYA, KT, UK ve YFC) üretim maliyetleri karşılaştırılmıştır. Bu doğrultuda ilk olarak dolgu üretiminde kullanılan atık malzemelerin sırasıyla öğütme öncesi ve sonrasında tane boyutu analizleri yapılarak malzemelerin F₈₀ (besleme) ve P₈₀ (nihai ürün) tane boyutu değerleri belirlenmiştir. Daha sonra, malzemelerin literatürde yapılan çalışmalardan yararlanılarak Bond iş indeksi (W_i) değerleri belirlenmiş (URL-1) ve aşağıda verilmiş eşitlik kullanılarak malzemelerin öğütme sırasında harcadıkları enerji (elektrik) miktarları hesaplanmıştır.

$$E = 10 \times W_i \times \left(\frac{1}{\sqrt{D_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) \quad (1)$$

Burada;

- E = Enerji tüketimi (kW-saat/ton)
- W_i = Bond iş indeksi (W_i; kW-saat/ton)
- F₈₀ = Besleme tane boyutu (µm)
- D₈₀ = Nihai ürün tane boyutu (µm)

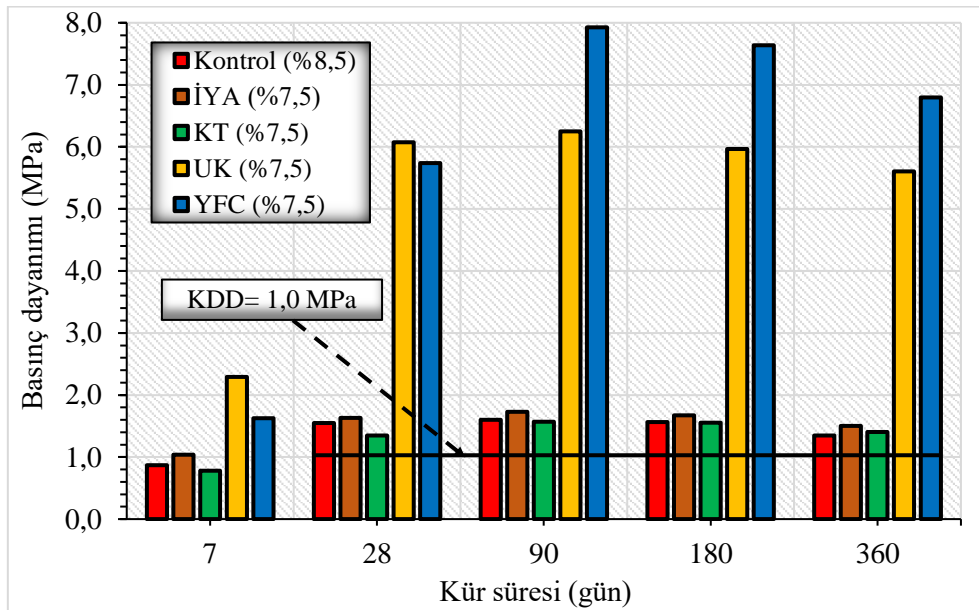
İYA, KT, UK ve YFC'nin öğütülmesi sırasında harcanan enerji (elektrik) tüketim miktarları belirlendikten sonra 2022 yılı mart ayında sanayii kuruluşları (Orta gerilim sanayi elektrik tarifesini) için Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından belirlenen elektrik birim fiyatı (KDV ve tüm ek ücretler dahil 2,047 ₺/kW-saat) (URL-2) kullanılarak her bir karışım tipinde hazırlanan 1,0 m³ ÇMD karışımı üretiminde atık malzemelerden kaynaklı ortaya çıkan enerji tüketim maliyetleri hesaplanmıştır. Ayrıca, ÇMD tesisi işletme maliyetlerinin en önemli gider kalemini oluşturan bağlayıcı (PÇ: CEMI 42,5R) için Aşkale Çimento A.Ş. Trabzon Çimento Fabrikası ürün satış sorumlusu ile görüşülerek 2022 yılı mart ayı itibarıyla PÇ birim fiyatının yaklaşık 1180 ₺/ton (KDV dahil) olduğu bilgisi alınmıştır (Tütüneken, 2022). Çalışma kapsamında kullanılan bağlayıcı malzemenin nakliye giderleri ile atık malzemelerin temin (satın alma vb.) ve nakliye giderleri maliyet değerlendirmesinde göz ardı edilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Dayanım ve Duraylılık Performansı

ÇMD üretim maliyetlerinin değerlendirilmesine konu olan kontrol (%100 S-MA ve %8,5 PÇ) numunelerinin ve atık malzemelerin (İYA, KT, UK ve YFC) S-MA yerine %15 ikame edilmesiyle %7,5 PÇ oranında hazırlanan ÇMD numunelerinin 7-360 günlük dayanım ve duraylılık sonuçları Şekil 2’de sunulmuştur. Tüm ÇMD numunelerinin basınç dayanımları 90 günlük kür süresine kadar artmış, sonrasında (90-360 gün aralığında) ise düşüş eğilimi göstermiştir (Şekil 2). Daha düşük çimento içeriğinde (%7,5) hazırlanan ÇMD karışımları içerisinde İYA, KT, UK ve YFC’nin S-MA yerine %15 oranında ikame edilmesinin basınç dayanımı gelişimi üzerindeki etkisi değerlendirildiğinde, KT numuneleri 360 gün haricinde kontrol numunelerine kıyasla daha düşük dayanım üretirken, İYA ikameli numunelerin basınç

dayanımı değerlerinin tüm kür sürelerinde kontrol ÇMD numunelerine göre kısmen daha yüksek olduğu belirlenmiştir. UK ve YFC ikameli numuneler ise tüm kür sürelerinde kontrol numunelerine kıyasla oldukça yüksek dayanım üretmekle birlikte dayanım değerleri farkı özellikle 28-360 gün boyunca (%403,7’ye kadar daha yüksek dayanım) keskin bir şekilde belirginleşmiştir. Daha düşük bağlayıcı oranına (%7,5) ve daha yüksek su/çimento oranına (Tablo 3) sahip olan UK ve YFC ikameli numunelerin basınç dayanımında gözle görülür derecede iyileşme meydana gelmesinin sebepleri olarak i) UK ve YFC’nin puzolanik özellik göstermelerinin yanısıra ilave bağlayıcılık özelliğine sahip olmaları (Fall vd., 2009; Erçikdi ve Yılmaz, 2019; Yılmaz vd., 2020) ve ii) daha yüksek ÖYA değerlerine sahip olan UK ve YFC’nin iri boyutlu S-MA taneleri arasını doldurmasıyla sonuçlanan daha fazla miktarda ince boyutlu tane içermesi gösterilebilir (Tablo 1 ve 2) (Memon vd., 2002; Shaikh ve Supit, 2015; Erçikdi ve Yılmaz, 2019).



Şekil 2. ÇMD numunelerinin dayanım/duraylılık sonuçları

Figure 2. Strength/stability results of CPB samples

Yeraltı maden işletmelerinde ÇMD uygulaması yapılmış üretim açıklıklarına komşu olan bölgelerde cevher üretiminin sorunsuz devam etmesi ve emniyetli çalışma şartlarının sağlanması için kısa (≤ 28 gün) ve uzun dönemde (>90 gün) istenen kritik dayanım değerini ($KDD \geq 1,0$ MPa)

(Yumlu, 2001) tüm ÇMD numunelerinin sağladığı tespit edilmiştir (Şekil 2).

3.2. Dolgu Üretim Maliyeti

İYA, KT, UK ve YFC’nin ÇMD üretim maliyeti üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi için

gerçekleştirilen öğütme öncesi (F_{80} : besleme tane boyutu) ve sonrasına (D_{80} : nihai ürün tane boyutu) ait tane boyutu analizleri ve Bond iş indeksi (W_i) değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Atık malzemelerin F_{80} değerleri 850-1190 μm arasında değişirken, D_{80} değerleri 36-53 μm arasında ölçülmüştür. Tablo 4 incelendiğinde, iş indeksi değeri en düşük olan malzeme UK (6,51 kW-

saat/ton) iken, en yüksek malzemeler YFC (17,34 kW-saat/ton) ve İYA (17,65 kW-saat/ton) olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde Eşitlik 1 vasıtasıyla hesaplanan elektrik tüketim miktarları; öğütme işlemi esnasında en az enerjinin UK için, en fazla enerjinin ise YFC ve İYA için harcandığını göstermiştir (Tablo 4).

Tablo 4. Atık malzemelerin Bond iş indeksi ve enerji tüketimi değerleri

Table 4. Bond work index and energy consumption values of WMs

Malzemeler	F_{80} Tane Boyutu (μm)	D_{80} Tane Boyutu (μm)	Bond İş İndeksi (W_i ; kW-saat/ton)	Enerji Tüketimi (E; kW-saat/ton)
İYA	1000	52	17,65	18,89
KT	1190	36	12,77	17,43
UK	600	50	6,51	6,55
YFC	850	53	17,34	18,04

Öğütme için harcanan enerji tüketim miktarları belirlendikten sonra her bir karışıma ait 1,0 m^3 ÇMD üretiminde Tablo 3'te verilen parametreler kullanılmış ve sırasıyla kullanılan bağlayıcı ve ikame malzeme miktarları hesaplanmıştır (Tablo 5). Buna göre, 1,0 m^3 ÇMD üretimi için %8,5 PÇ oranına sahip kontrol karışımında 130,0 kg çimento kullanılırken, %7,5 PÇ oranında ve S-MA'ya %15 oranında İYA, KT, UK ve YFC ikame edilen karışımlarda 110,4-114,4 kg çimento sarf edilmiştir. Ayrıca %15 ikameli ÇMD karışımlarında 220,9-228,8 kg arasında atık malzeme kullanıldığı hesaplanmıştır (Tablo 5).

1,0 m^3 ÇMD üretimi için harcanan bağlayıcı (PÇ) miktarları ve Aşkale Çimento A.Ş Trabzon Çimento fabrikasından alınan Portland Çimentosu (PÇ) birim satış fiyatı (1180 $\text{₺}/\text{ton}$) (Tütüneken, 2022) dikkate alınarak yapılan hesaplamalar sonucunda kontrol ÇMD karışımı üretiminde 153,4 ₺ bağlayıcı maliyeti ortaya çıkarken, bağlayıcı oranı %7,5'e düşürülerek %15 oranında

İYA, KT, UK ve YFC ikame edildiğinde bağlayıcı giderleri 130,3-135,0 ₺ arasında değişen değerlere düşmüştür (Tablo 5). Karışım içerisinde kullanılan çimentonun %1,0 oranında azaltılmasıyla 1,0 m^3 ÇMD üretimi için tek başına çimento sarfiyatında/maliyetinde gerçekleşen tasarruf oranı %15,1'e ulaşmıştır. ÇMD karışımlarında S-MA yerine kullanılan %15 ikame oranına karşılık gelen atık malzeme miktarının öğütme maliyetleri değerlendirildiğinde, öğütme maliyeti en düşük atık malzemenin UK (2,99 ₺) olduğu, buna karşın diğer malzemelerin öğütme maliyetlerinin 7,88-8,85 ₺ arasında değiştiği belirlenmiştir (Tablo 5). 1,0 m^3 ÇMD üretimi için gerekli olan bağlayıcı giderleri ile atık malzemelerin öğütme enerji maliyetlerinin toplanmasıyla ortaya çıkan toplam maliyet değerleri incelendiğinde, 1,0 m^3 kontrol ÇMD karışımı üretiminde 153,4 ₺ gider oluşurken, İYA, KT, UK ve YFC malzemelerinin kullanıldığı durumda ÇMD üretim maliyeti 133,49-143,85 ₺ arasında gerçekleşmiştir.

Tablo 5. 1,0 m^3 ÇMD karışımının içeriği ve üretim maliyetleri

Table 5. Mixture content and production costs of 1.0 m^3 CPB

Karışım	BHA	BO (%)	$B_{\text{MİK}}$ (kg/m^3)	İO (%)	İM (kg/m^3)	B_{MAL} (₺)	ÖEM (₺)	TM ($\text{₺}/\text{m}^3$)	TO (%)
Kontrol	2,07	8,5	130,0	-	-	153,4	-	153,40	-
İYA	2,06		114,4		228,8	135,0	8,85	143,85	6,23
KT	2,00	7,5	110,4	15	220,9	130,3	7,88	138,18	9,92
UK	2,02		110,6		223,2	130,5	2,99	133,49	12,98
YFC	2,05		114,1		228,3	134,6	8,43	143,03	6,76

BHA: Birim hacim ağırlık, **BO:** Bağlayıcı oranı, **$B_{\text{MİK}}$:** Bağlayıcı miktarı, **İO:** İkame oranı, **İM:** İkame miktarı, **B_{MAL} :** Bağlayıcı maliyeti, **ÖEM:** Öğütme enerji maliyeti, **TM:** Toplam maliyet, **TO:** Tasarruf oranı

İYA, KT, UK ve YFC malzemelerinin S-MA'ya ikame olarak kullanılması durumunda ortaya çıkan ÇMD üretim maliyetleri kontrol ÇMD karışımının üretim maliyeti ile kıyaslandığında, karışım tipinden bağımsız olarak %6,23-12,98 arasında değişen oranlarda tasarruf yapılabileceği öngörülmüştür. ÇMD dayanım ve duraylılık performansı açısından en fazla katkıyı sağlayan malzemelerden birisi olan UK'nın yaklaşık %13 ile ÇMD üretim giderleri açısından en yüksek tasarrufu sağladığı ortaya konmuştur (Tablo 5). Diğer malzemelere göre daha zor öğütülebilen İYA ve YFC'nin tasarruf oranları doğal olarak en düşük seviyede (%6,23 ve %6,76) kalmasına rağmen kontrol karışımı kullanımından daha ekonomik oldukları Tablo 5'ten açıkça görülmektedir. Buna ek olarak, %7,5 bağlayıcı oranında hazırlanan YFC ikameli ÇMD numunelerinin oldukça yüksek mekanik performans ortaya koyması (Şekil 2) sonucu ve yeraltına yerleştirilen ÇMD'nin dayanım ve duraylılığı açısından 28-360 gün arasında 1,0 MPa dayanımın yeterli olduğu (Yumlu, 2001) göz önünde bulundurulduğunda YFC ikameli ÇMD karışımında kullanılan bağlayıcı oranının daha fazla azaltılmasıyla ÇMD üretim maliyetlerinin %75'ine kadar karşılık gelen çimento (bağlayıcı) masraflarının (Ercikdi vd., 2017; Yılmaz ve Yumlu, 2017) gözle görülür oranda düşürülmesi sağlanarak toplam dolgu üretim ve ÇMD tesisi işletme giderlerinde muazzam tasarruf sağlanabileceği anlaşılmıştır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, 4 farklı atık malzemenin (İYA, KT, UK ve YFC) S-MA yerine %15 ikame oranında kullanılmasının ÇMD'nin mekanik özellikleri ve üretim maliyetlerine etkileri araştırılmıştır. Bu kapsamda, kontrol ÇMD numuneleri %8,5 bağlayıcı oranında hazırlanırken, S-MA yerine İYA, KT, UK ve YFC'nin ikame edilmesiyle üretilen ÇMD numunelerinde %7,5 bağlayıcı oranı kullanılmıştır. Üretilen ÇMD numuneleri üzerinde 7-360 gün boyunca basınç dayanımı testleri uygulanmıştır. Dayanım ve duraylılık açısından gerekli kritik dayanımı ($\geq 1,0$ MPa) sağlayan ÇMD karışımlarının üretim maliyetleri

değerlendirilerek hem dayanım/duraylılığı en yüksek hem de üretim maliyeti en düşük olan karışım tipi belirlenmiştir. Kısa ve uzun dönemde 1,0 MPa dayanımı sağlayan tüm ÇMD numunelerinden KT ikameli numuneler haricindeki tüm numunelerin (İYA, UK ve YFC) kür süresinden bağımsız olarak kontrol numunelerine kıyasla daha yüksek basınç dayanımı ürettiği belirlenmiştir. Ayrıca, S-MA yerine %15 oranında ikame edilerek hazırlanan UK ve YFC numuneleri ile kontrol numuneleri arasındaki dayanım farkı 28-360 günlük kür süresi aralığında %404'e kadar yükselmiştir. ÇMD üretim maliyetleri değerlendirildiğinde, malzemelerin öğütme işlemlerinde en az UK için enerji (elektrik) tüketilirken, en yüksek enerji İYA ve YFC için harcanmıştır. Üretilen 1,0 m³ ÇMD karışımında 220,9-228,8 kg atık malzeme kullanılmış ve 2,99 ₺ (UK)-8,85 ₺ (İYA) arasında öğütme maliyeti ortaya çıkmıştır. Dahası, 1,0 m³ ÇMD üretimi için kontrol ÇMD karışımında 130,0 kg çimento (%8,5 bağlayıcı oranı) sarf edilirken, İYA, KT, UK ve YFC ikameli dolgu karışımlarında 110,4-114,4 kg çimento (%7,5 bağlayıcı oranı) tüketilerek yaklaşık %15 çimento tasarrufu sağlanmıştır. Toplam ÇMD üretim maliyeti incelendiğinde, kontrol ÇMD karışımının maliyeti 153,4 ₺ olurken, %15 atık malzeme ikameli dolgu karışımlarında %12,98'e kadar tasarruf sağlanarak üretim maliyetinin 133,5 ₺'ye kadar düşürülebilmesi öngörülmüştür. Sonuçlar, ÇMD'nin dayanım/duraylılık performansı ve üretim maliyeti konusunda en uygun karışım tipinin %15 UK ikameli ÇMD karışımı olduğunu göstermiştir.

Kaynaklar

- 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.
- Başçetin, A., Eker, H. (2018). Uçucu külün, çimentolu macun dolgunun mekanik dayanımına etkisi. *Kapadokya Yerbilimleri Sempozyumu*, 24-27 Ekim, Niğde, Türkiye, 218-225.
- Benzaazoua, M., Belem, T., Bussiere, B. (2002). Chemical factors that influence the performance of mine sulphidic paste backfill. *Cement and Concrete*

- Research*, 32(7), 1133-1144.
https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00752-4
- Cihangir, F., Erçikdi, B., Kesimal, A., Turan, A., Deveci, H. (2012). Utilisation of alkali-activated blast furnace slag in paste backfill of high-sulphide mill tailings: effect of binder type and dosage. *Minerals Engineering*, 30, 33-43.
https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.01.009
- 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
- Ercikdi, B., Kesimal, A., Cihangir, F., Deveci, H., Alp, İ. (2009a). Cemented paste backfill of sulphide-rich tailings: importance of binder type and dosage. *Cement and Concrete Composites*, 31(4), 268-274.
https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.01.008
- Ercikdi, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H., Alp, İ. (2009b). 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., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H., Alp, İ. (2010). Effect of natural pozzolans as mineral admixture on the performance of cemented-paste backfill of sulphide-rich tailings. *Waste Management & Research*, 28(5), 430-435.
https://doi.org/10.1177/0734242X09351905
- Ercikdi, B., Külekçi, 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
- Ercikdi, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H. (2017). Practical importance of tailings for cemented paste backfill, In *Paste Tailings Management*, Editors: Erol Yılmaz ve Mamadou Fall, Springer International Publishing, Cham/Switzerland, pp. 7-32.
- Erçikdi, B. (2009). Mineral ve kimyasal katkı maddelerinin macun dolgu performansına etkisi. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 128s.
- Erçikdi, B., Yılmaz, T. (2019). Çimentolu macun dolgunun dayanım ve mikroyapı özellikleri; c-sınıfı uçucu külün etkisi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 21(61), 15-23.
https://doi.org/10.21205/deufmd.2019216102
- Fall, M., Benzaazoua, M. (2005). modeling the effect of sulphate on strength development of paste backfill and binder mixture optimization. *Cement and Concrete Research*, 35(2), 301-314.
https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.020
- Fall, M., Adrien, D., Célestin, J.C., Pokharel, M., 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
- Fall, M., Pokharel, M. (2010). Coupled effects of sulphate and temperature on the strength development of cemented tailings backfills: Portland cement-paste backfill. *Cement and Concrete Composites*, 32(10), 819-828.
https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.08.002
- Kesimal, A., Yılmaz, E., Erçikdi, B., Alp, İ., Yumlu, M., Özdemir, B. (2002). Çimentolu macun dolgunun laboratuvar testi. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 41(4), 11-20.
- Kesimal, A., Yılmaz, E., Erçikdi, B., Alp, İ., Deveci, H. (2005). Effect of tailings and binder on the short- and long-term strength and stability of cemented paste backfill. *Materials Letters*, 59(28), 3703-3709.
https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.06.042
- Külekçi, G. (2013). Mermer ve tuğla atıklarının macun dolguda kullanılabilirliğinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 208s.
- Külekçi, G., Erçikdi, B., Aliyazicioğlu, Ş. (2016). Effect of waste brick as mineral admixture on the mechanical performance of cemented paste backfill. *Earth and Environmental Science*, 44(4), 042039.
https://doi.org/10.1088/1755-1315/44/4/042039
- Külekçi, G., Yılmaz, A.O. (2018). İnşaat atıklarından elde edilen geri kazanılmış agreganın madencilik yöntemlerinde kullanılması. *Kapadokya yerbilimleri sempozyumu*, 24-26 Ekim, Niğde, Türkiye, 212-217.
- Külekçi, G. (2021). The statistical relationship of cure time and compressive strength in paste backfilling. 3. International Sciences and Innovation Congress, 09-12 June, 310-316.
- Kulekci, G., Yılmaz, A., Cullu, M. (2021). Experimental investigation of usability of construction waste as aggregate. *Journal of Mining and Environment*, 12(1), 63-76.
https://doi.org/10.22044/jme.2021.10309.1976
- Li, W., Fall, M. (2018). Strength and self-desiccation of slag-cemented paste backfill at early ages: link to initial sulphate concentration. *Cement and Concrete Composites*, 89, 160-168.

- <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.09.019>
- Memon, A.H., Radin, S.S., Zain, M.F.M., Trottier, J.F. (2002). Effects of mineral and chemical admixtures on high-strength concrete in seawater. *Cement and Concrete Research*, 32(3), 373-377. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00687-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00687-1)
- Ouattara, D., Belem, T., Mbonimpa, M., Yahia, A. (2018). Effect of superplasticizers on the consistency and unconfined compressive strength of cemented paste backfills. *Construction and Building Materials*, 181, 59-72. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.288>
- Ouellet, S., Bussière, B., Aubertin, M., Benzaazoua, M. (2007). Microstructural evolution of cemented paste backfill: mercury intrusion porosimetry test results. *Cement and Concrete Research*, 37(12), 1654-1665. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.016>
- Panchal, S., Deb, D., Sreenivas, T. (2018). Mill tailings based composites as paste backfill in mines of u-bearing dolomitic limestone ore. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(2), 310-322. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.08.004>
- Shaikh, F.U., Supit, S.W. (2015). Compressive strength and durability properties of high volume fly ash (HVFA) concretes containing ultrafine fly ash (UFFA). *Construction and building materials*, 82, 192-205. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.068>
- 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>
- Tütüneken H.B., (2022). Portland Çimentosu (CEMI 42,5R) için belirlenen dökme çimento fabrika teslim fiyatı, Satış Sorumlusu: Tütüneken H.B., Aşkale Çimento A.Ş Trabzon Çimento Fabrikası (Yayınlanmayan), Trabzon.
- Yan, B., Yılmaz, E. (2020). Analytical solution for stress distribution in cementitious backfills considering stope inclinations. *Recep Tayyip Erdogan University Journal of Science and Engineering*, 1(2), 26-33.
- Yılmaz, T., Erçikdi, B., Cihangir, F. (2017). Yüksek fırın çürüf ve perlit ikamesinin çimentolu macun dolgunun mekanik ve mikro yapı özelliklerine etkisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(2), 239-252. <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.358429>
- Yılmaz, T., Erçikdi, B., Devenci, 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, Türkiye, 153s.
- Yılmaz, T., Erçikdi, B., Cihangir, F. (2019). İnşaat atıklarının yeraltı madeni üretim boşluklarında dolgu malzemesi olarak kullanımı. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(4), 784-796. <https://doi.org/10.36306/konjes.654947>
- Yılmaz, T., Erçikdi, B., 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 E., Yumlu, M. (2017). Cayeli paste backfill system and operations, In Paste Tailings Management, Editors: Erol Yılmaz ve Mamadou Fall, Springer International Publishing, Cham/Switzerland, pp. 235-264.
- 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>
- Yumlu, M. (2001). Backfill practices at Cayeli mine. International Mining Conference, 19-22 June, Ankara, Turkey, 333-339.
- Zheng, J., Guo, L., Sun, X., Li, W., 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. <https://doi.org/10.1155/2018/7278014>
- URL-1, (2022). <http://cevherhazirla.blogspot.com/search/label/i%C5%9F%20endeksi>. 24 Şubat 2022
- URL-2, (2022). <https://www.enerjiatlasi.com/elektrik-fiyatları/>. 02 Mart