



# Yüksek Fırın Cürufu İkamemesinin Çimentolu Macun Dolgunun Dayanım Özelliklerine Etkisi

**Hasan EKER\***

Gümüşhane Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane  
[eker\\_hasan@hotmail.com](mailto:eker_hasan@hotmail.com), ORCID: 0000-0003-2644-4681

**Ataç BAŞÇETİN**

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul  
[atac@istanbul.edu.tr](mailto:atac@istanbul.edu.tr) ORCID: 0000-0001-7533-4599

**Serkan TÜYLÜ**

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul  
[stuyulu@istanbul.edu.tr](mailto:stuyulu@istanbul.edu.tr) ORCID: 0000-0002-8128-9840

**Deniz ADIGÜZEL**

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul  
[deniza@istanbul.edu.tr](mailto:deniza@istanbul.edu.tr) ORCID: 0000-0002-1611-1296

Geliş: 30.09.2019, Revizyon: 19.12.2019, Kabul Tarihi: 31.12.2019

## Öz

Yeraltı madencilğinde atık depolama yöntemlerinden biri olan çimentolu macun dolguda (ÇMD) üretim için gerekli olan dayanımın yakalanması ve daha da geliştirilmesi bu çalışmanın amacını oluşturmaktadır. Bu kapsamda yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılmış, kısa ve uzun vadede ÇMD dayanım özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. ÇMD numuneleri önce, % 3, 5, 7, 9 ve 11 portland çimentosu ile hazırlanmış, daha sonra ise YFC ikamesi olarak çimentonun yerine ağırlıkça % 25, % 50 ve % 75'i ile karıştırılarak numuneler oluşturulmuştur. 3, 7, 14, 28, 56 ve 90 günlük kür sürelerine göre tek eksenli basınç dayanımı (TEBD) deneyi yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre, yalnızca % 3 çimento (Ç) oranındaki % 75 YFC ikameli karışımlar macun dolgu için gerekli olan sıvılaştırma riski sınırının (0,15 MPa) altında kalmış, 28 günlük kür süresinde arakatlı kazı için istenilen dayanım sınır değeri ( $\geq 0.7$  MPa) % 7 Ç'nin % 25 YFC, % 9 Ç'nin % 25 ve % 50 YFC, % 11 Ç'nin % 25 ve %50 YFC oranlarındaki karışımlar sağlamaktadır. Ancak tahkimat amaçlı olarak YFC katkılı ÇMD kullanılmaması ya da bu konuda dayanımı geliştirebilmek için daha farklı katkı malzemelerinin de kullanılmasının gerekliliği belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Çimentolu macun dolgu, Yüksek fırın cürufu, Tek eksenli basınç dayanımı, Atık

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Çimentolu macun dolgu (ÇMD); % 75 - 85 pülpte katı oranındaki (PKO) tesis atığının (< 20 µm malzeme miktarı en az % 15 olan) % 3 - 11 bağlayıcı (çimento ve puzolan malzemeler) ve pompalanabilir kıvamda olması için yeterli su (proses suyu, şebeke ve göl suyu) ile karışımı olarak tanımlanmaktadır (Kesimal vd. 2003; Erçikdi vd. 2013; Yılmaz vd. 2017; Yılmaz ve Guresci, 2017; Başçetin vd. 2018a, 2018b, 2018c).

ÇMD'de çimento maliyeti çok önemlidir. Macun dolgu tesisinin en büyük finansal gideri çimento maliyetidir. Ağırlıkça % 1 oranında bağlayıcı içeren macun dolgu karışımının maliyetini 1 \$ / ton'dur (Naylor vd. 1997). Grice (1998) çalışmasında, macun dolgu işletme maliyetlerinin toplam maden işletme % 10 - 20'sini, De Souza vd. (2003) çalışmasında ağırlıkça % 3 çimento içeren macun dolgu karışımı maliyetinin, toplam macun dolgu işletme maliyetinin % 42'sini, Fall ve Benzaazoua (2003) çalışmasında ağırlıkça % 5 - 9 bağlayıcı içeren macun dolgu karışımında toplam macun dolgu işletme maliyetinin yaklaşık % 50 - 75'ini, Erçikdi vd. (2017) çalışmasında ise bağlayıcı tüketiminin, macun dolgu maliyetinin % 75'ini oluşturduğunu ifade etmişlerdir. Dolgu ile ilgili maliyetlerin % 15'i bağlayıcı maliyetlerinden oluşmaktadır (Belem vd. 2000). Bu nedenle, işletmedeki istenilen dayanıma göre stabiliteyi sağlamak ve işletme maliyetlerini minimumda tutmak için bağlayıcı tipi ve dozajının optimum oranda seçilmesi çok önemlidir. Portland çimentoya (PÇ) katkı olarak; kimyasal ajanların (plastikleştiriciler, sulu sodyum silikat, sodyum hidroksit) veya puzolanik minerallerin (mermer tozu, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, uçucu kül, pomza vb.) kullanımı ile bağlayıcının maliyetinin azaltılabildiğini ve ÇMD'nin stabilite performansının artırılabilirliği çeşitli çalışmalarla ortaya koyulmuştur (Benzaazoua vd. 2002; 2004; Klein ve Simon, 2006; Tariq ve Nehdi, 2007; Erçikdi vd. 2009; 2010a; 2010b; 2015; Fall vd. 2010; Cihangir, 2011; Cihangir vd. 2011; 2012; 2015; Yılmaz vd. 2017).

Yüksek fırın cürufu (YFC); demir imalatının metalik olmayan bir yan ürünüdür ve esas olarak silikatlardan ve kalsiyum alümino silikatlarından meydana gelmiştir. YFC yüksek fırında demir ile aynı anda erimiş, daha sonra camsı tanecikli parçacıklar oluşturmak için suya hızla daldırılarak suda soğutulan ve çimento inceliğinde veya daha ince malzemelere denir (Bouzoubaa ve Simon, 2005). Literatürde ÇMD'de YFC kullanımı ile ilgili çeşitli çalışmalar vardır (Nantel ve Lecuyer, 1983; Douglas vd. 1989; Uusitalo vd. 1993; Godbout vd. 2007).

Bunlardan bazıları şöyledir; Belem vd. (2000) çalışmasında; cüruf içeren macun dolgu karışımlarının diğer bağlayıcılarla hazırlanan karışımlara göre dayanım parametrelerinde daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmektedir. Benzaazoua vd. (2002) yapılan çalışmada; cürufun yüksek sülfat içeren atıkların kullanıldığı macun dolguda uygun olmadığını, ağırlıkça < % 32 S içeren atıkların kullanıldığı karışımlarda kullanılabilirliğini ortaya koymuşlardır. Ouellet vd. (2007) çalışmasında ise cüruf içeren çimento ile hazırlanan macun dolgu örneklerinin, en yüksek ince gözeneklere sahip olduğu ve yüksek tek eksenli basınç dayanımı (TEBD) değerleri aldığını belirtmişlerdir. Erçikdi vd. (2009); kükürt yönünden zengin atık içeren çimentolu macun dolgu numunelerinde, endüstriyel atık ürünlerini (atık cam, uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve silis dumanı) çimento yerine kısmi ikame etmiş ve puzolanik katkı olarak kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Ayrıca; sulu sodyum silikat (LSS) ve sodyum hidroksit (SH) içeren alkali ile aktif hale getirilmiş nötr ve asitli yüksek fırın cürufların (AAS'ler), yüksek sülfatlı değirmen atıklarının ÇMD'si için portland çimentoya alternatif bağlayıcılar olarak kullanımını incelemiş ve dayanımı iyileştirici olumlu sonuçlar elde edilmiştir (Cihangir vd. 2012).

Yılmaz vd. (2017), YFC içeren ÇMD numunelerinin, erken dönemde kontrol numunelerinin basınç dayanımı değerlerinin altında kaldığını, ilerleyen kür sürelerinde (28 - 56 gün) ise kontrol numunelerinin basınç

dayanımlarını geçtiğini belirtmişlerdir. Sonuç olarak; YFC'unun çimento yerine kullanılmasının macun dolgunun mekanik ve mikroyapı özelliklerinde olumlu bir gelişme ortaya koyduğu sonucuna varmıştır. Diğer çalışmalardan farklı olarak Pirit oranı yüksek bir bakır madeninden alınan atığın kullanıldığı bu çalışmada YFC'nin etkisi ortaya konulmuştur. Bu çalışmada; ÇMD yönteminde istenilen sınır değerleri çimento miktarı azaltılarak ve çimento yerine YFC ikameli karışımlar oluşturularak sağlanması amaçlanmıştır. Çalışmada farklı çimento oranları (% 3, 5, 7, 9 ve 11) ve çimento yerine ağırlıkça % 25, 50 ve 75 oranlarında da YFC ile ikame edilmiş ÇMD karışımları hazırlanarak test edilmiştir. Ayrıca yüksek fırın cürufunun (YFC) ÇMD'nin erken dayanımdan (3. gün) ve uzun kür (90. gün) süresine kadar belirli aralıklarla dayanım özelliklerinin nasıl değiştiği araştırılmıştır.

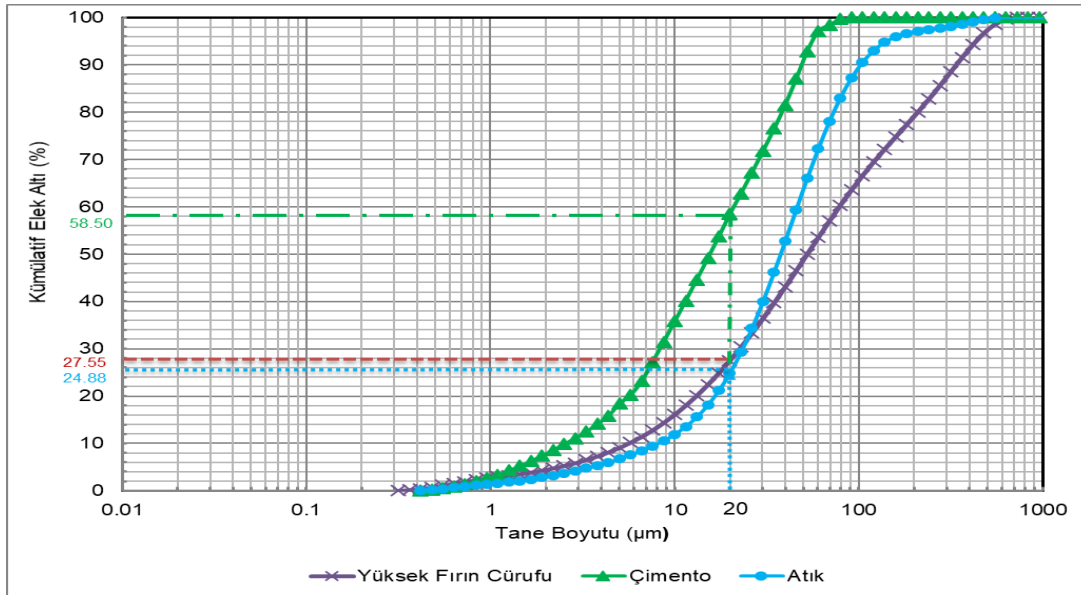
## Malzeme ve Yöntem

### Yüksek Fırın Cürufu

Bu çalışmada çimento yerine ikame olarak yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılmış ve Türkiye'nin kuzeyinde yer alan Karabük ilindeki bir demir çelik fabrikasının pasa sahasından temin edilmiştir (Şekil 1). YFC; laboratuvarında önce merdaneli kırıcıdan (- 4 mm) geçirilmiş ve daha sonra bilyalı değirmen vasıtasıyla 180 dakika öğütme süresinde kuru öğütmeye tabi tutularak - 125 µm altına getirilmiştir. YFC'nun tane boyut dağılımı analizi, Malvern Mastersizer Hydro 2000 MU cihazı ile belirlenmiştir (Şekil 2). Ayrıca YFC, X-Işını Difraktometresi (XRD) analizi yapılmıştır.



Şekil 1. Yüksek fırın cürufu.



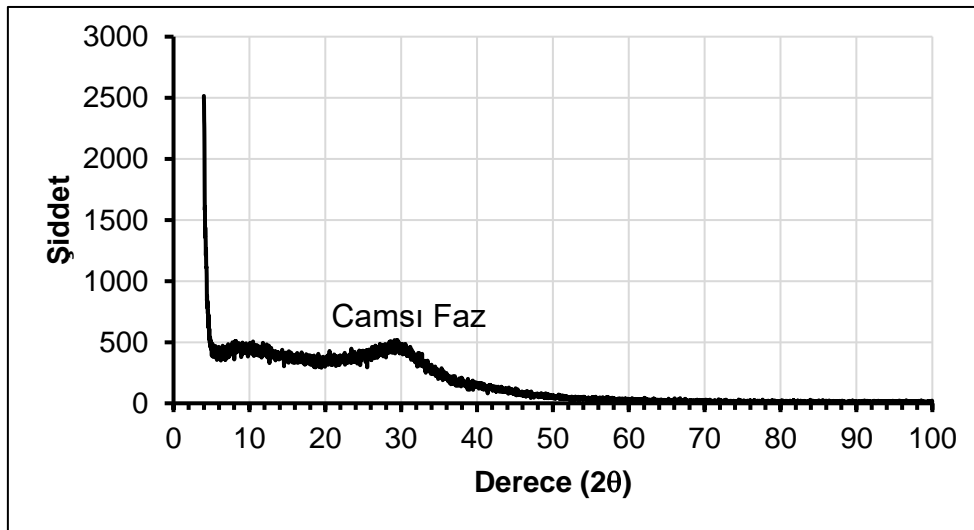
Şekil 2. Atık, bağlayıcı ve YFC tane boyut dağılımları.

YFC'nin 20 µm altı tane boyutu % 27,55'tir (Şekil 2). Spesifik yüzey alanı ise 4428 cm<sup>2</sup>/g'dır. Ayrıca YFC ayrıntılı kimyasal.

fiziksel ve minerolojik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. YFC ait XRD kırınım desenine göre numune amorf - camsı faz özelliği göstermektedir (Şekil 3).

**Tablo 1.** Kullanılan bakır atık, çimento ve yüksek fırın cürufu kimyasal ve fiziksel özellikleri (Eker, 2019).

Özellikler	Atık (%)	CEM I 42.5 R (%)	Yüksek Fırın Cürufu (%)
<b>Kimyasal Bileşim</b>			
SiO <sub>2</sub>	12.26	19.13	41.59
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.08	4.71	11.17
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	54.28	3.28	0.84
MgO	2.33	1.29	7.11
SO <sub>3</sub>	-	3.49	0.15
CaO	1.76	64.07	34.64
Na <sub>2</sub> O	0.03	0.25	0.25
K <sub>2</sub> O	0.09	0.86	0.71
Serbest CaO	-	1.65	-
Kızdırma Kaybı	24	2.09	1.00
<b>Fiziksel Özellikler</b>			
Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	3.61	3.14	2.99
Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /g)	1801	3640	4428
<b>Minerolojik Özellikler</b>			
Kalsit	CaCO <sub>3</sub>	Atık	
Jips	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	Kamosit	(Fe <sup>2+</sup> ,Mg,Fe <sup>3+</sup> ) <sub>5</sub> Al(Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH,O) <sub>8</sub>
Manyetit	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Hematit	α-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Kuvars	SiO <sub>2</sub>	Pirit	FeS <sub>2</sub>
		Siderit	Fe <sup>2+</sup> CO <sub>3</sub>

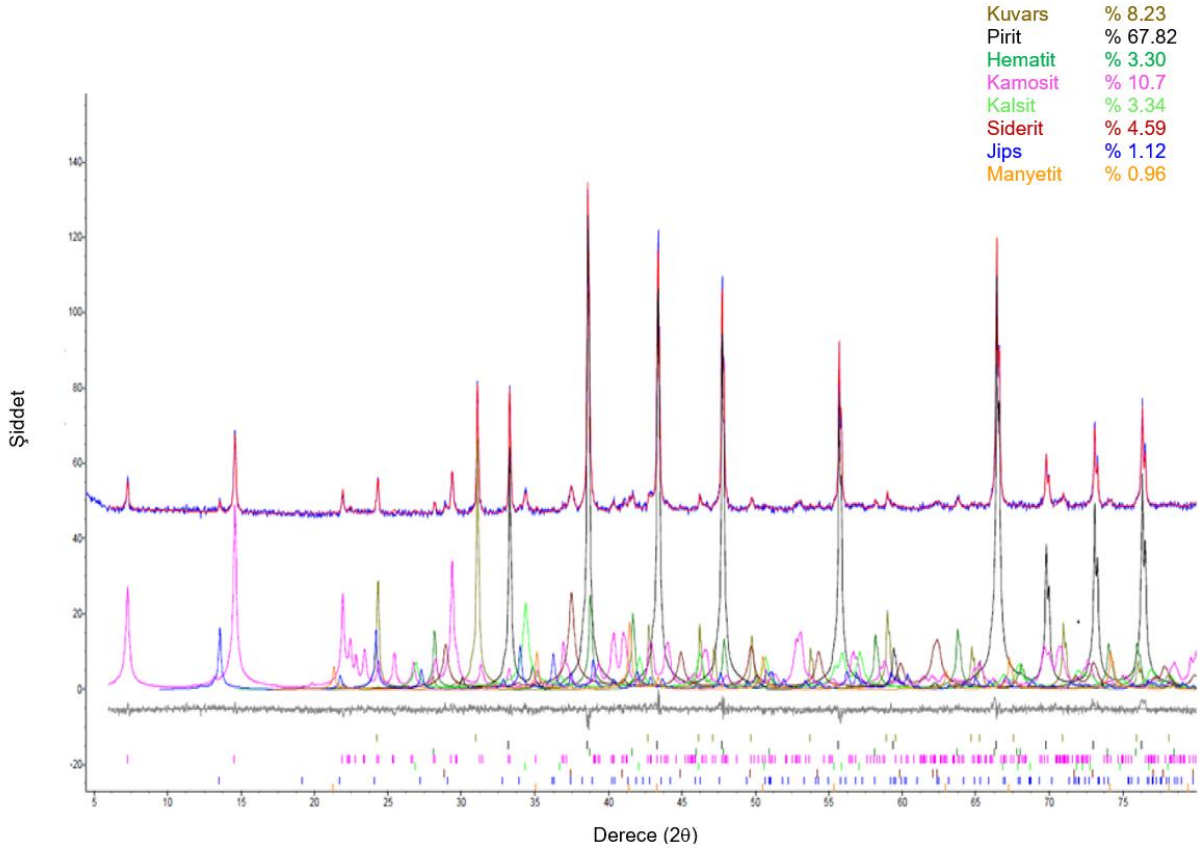


**Şekil 3.** Yüksek fırın cürufu XRD kırınım deseni.

### Atık ve Bağlayıcı

Atık malzeme; Küre’de yer alan bir bakır madeninden temin edilmiştir. 20 µm altı tane boyut değeri % 24.88’dir (Şekil 2). Ayrıntılı kimyasal, fiziksel ve mineralojik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Mineralojik analiz içeriğinde görüldüğü üzere atığın pirit içeriği

% 67.82 olarak bulunmuştur. Ayrıca % 3.3 kalsit ( $\text{CaCO}_3$ ), % 8.2 kuvars ( $\text{SiO}_2$ ) % 10.7 kamosit (Demir Silikat,  $(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Fe}^{3+})_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{O})_8$ ), % 1.1 jips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), %3.3 hematit ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), % 1.0 manyetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ve % 4.6 siderit ( $\text{Fe}^{2+}\text{CO}_3$ ) minerallerinin atığın içerisinde de yer aldıkları belirlenmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Atık mineralojik kompozisyonu.

Macun dolgu tesislerinin çimento maliyetlerini azaltmak için çimento yerine ikame edilen mineral katkı maddesinin macun dolgu karışımlarındaki etkisini görmek için normal Portland çimentosu tercih edilmiştir. Kullanılan çimentonun kimyasal analiz sonuçları Tablo 1’de verilmiştir. Ayrıca karışımlarda şebeke suyu kullanılmıştır.

### Çimentolu Macun Dolgu Numunelerinin Hazırlanması ve TEBD deneyi

Çimentolu macun dolgu (ÇMD) numuneleri; bakır atığı, çimento, yüksek fırın cürufu (YFC) ve şebeke suyunun homojen olarak karıştırılmasıyla hazırlanmıştır. İlk önce atığın, ağırlıkça % 3-5-7-9-11 oranlarında

çimento ve şebeke suyu ile karıştırılmasıyla referans numuneleri ve daha sonra kullanılan çimento miktarlarının (% 3 – 5 – 7 - 9 - 11) her biri için % 25, % 50 ve % 75 oranlarında YFC ikamesi içeren çimentolu macun dolgu numuneleri oluşturulmuştur. Macun dolgunun homojen bir karışım oluşturması için mikser vasıtasıyla 10 dk karıştırılmıştır. Hazırlanan macun dolgu karışımları 18 cm çökme (slump) ve % 81 katı oranı değerine göre hazırlanmıştır. ÇMD uygulamalarında, slump değeri 15.24-25.4 cm arasındadır ve en çok tercih edilen slump değeri 18 cm olması nedeniyle bu değer kullanılmıştır (Fall vd. 2009).

Macun dolgu karışımları 5 cm çapında ve 10 cm yüksekliğindeki drenajlı (alt kısmında 4 adet delik bulunan) silindirik numune kalıplarına dökülmüş ve en az % 80 nem oranında ve 25 ° C sıcaklığa ayarlanan kür kabiniinde belirlenen kür sürelerinde (3, 7, 14, 28, 56 ve 90 gün) bekletilmiştir.

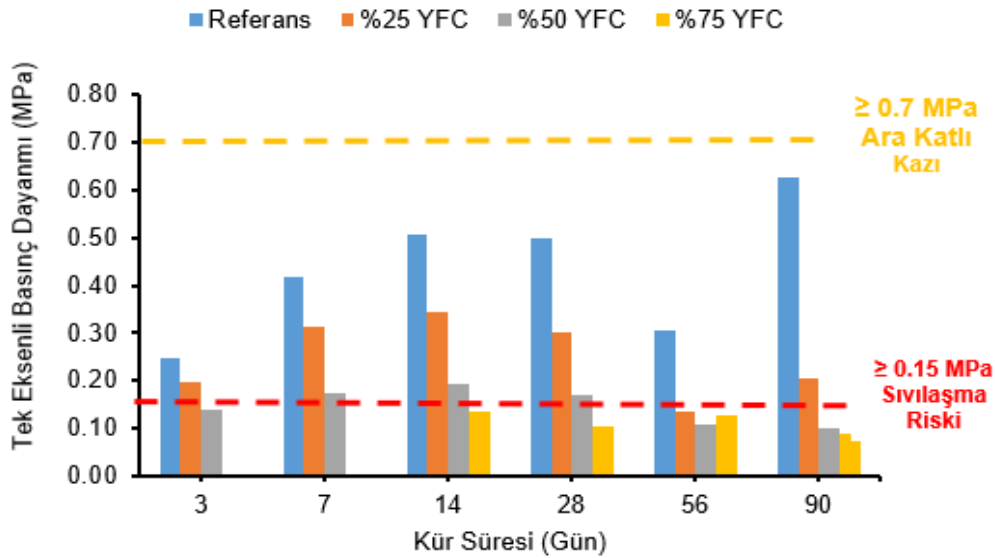
Macun dolgunun; TEBD deneyi 50×100 mm boyutlarında hazırlanan silindirik numuneler üzerinde ASTM C 39 standardına uygun olarak yapılmıştır.

Belirlenen kür sürelerine ulaşan % 3 - 5 - 7 - 9 - 11 çimento oranları ve YFC ağırlıkça % 25, % 50 ve % 75 oranlarında çimento yerine kullanılmasıyla elde edilen numuneler 50 kN yükleme kapasitesine sahip 1 mm/dk sabit yükleme hızında otomatik kontrollü preste kırılarak dayanım değerleri 3, 7, 14, 28, 56 ve 90 gün günlük kür süreleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Silindirik macun dolgu numunelerinin boy/çap oranı en az 2 olup, numunelerin alt ve üst yüzeyleri deney öncesi düzeltilmiştir. Her bir kür süresi için 3 adet

numune deneyde test edilmiş olup, elde edilen değerlerin ortalaması sonuç olarak alınmıştır. Macun dolgu karışımlarının kalitesini tespit etmek için sıvılaşma riski sınır değeri olarak 0.15 MPa (Been vd. 2002; Roux vd. 2004), ara katlı kazı için  $\geq 0.7$  MPa (Brackebusch 1994; Landriault 1995) ve Grice (1998) çalışmasında belirttiği tavan tahkimatı olarak  $\geq 4$  MPa değerleri belirlenmiştir.

## BULGULAR

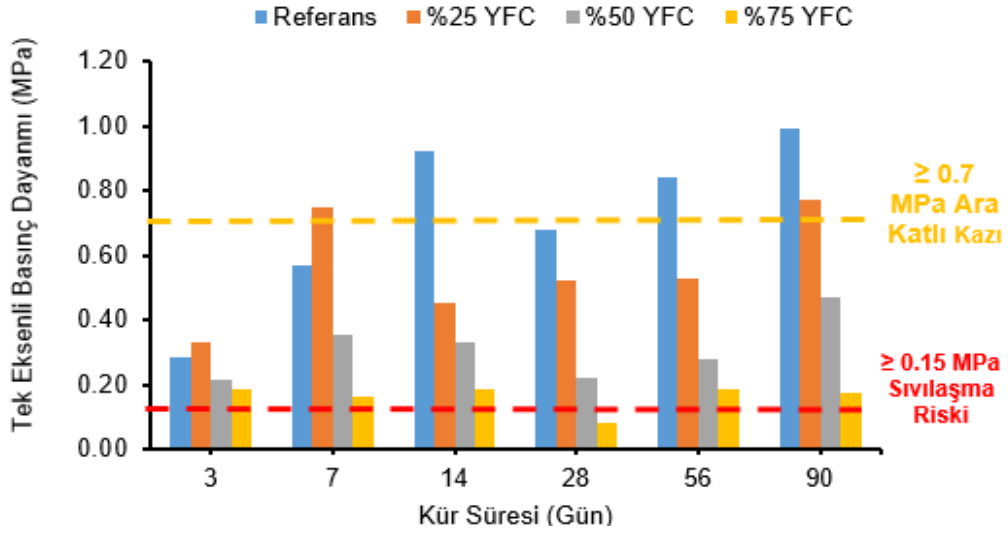
% 3, % 5, % 7, % 9 ve % 11 oranlarında (ağırlıkça) CEM I 42,5 R çimento ve çimento yerine ikame olarak yüksek fırın cürufu (YFC), çimento oranının % 25, % 50 ve % 75 oranlarında birlikte kullanılmasıyla sabit kıvamda (18 cm/7.09 inç) macun dolgu numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 25 °C ve en az % 80 nem içeren koşullarda kür kabiniinde bekletilmiş ve günü gelen kür süreleri sonunda elde edilen tek eksenli basınç dayanımı (TEBD) sonuçları Şekil 5 - 9'da gösterilmiştir.



Şekil 5. % 3 çimentolu ve YFC ikameli macun dolgu numunelerinin TEBD sonuçları.

% 3 çimento içeren macun dolgu karışımına farklı oranlarda YFC eklenmesi basınç dayanımını artırmamıştır. Ayrıca 28 günlük kür süresinde istenilen  $\geq 0.7$  MPa dayanım sınır değerini aşan karışım oranı da

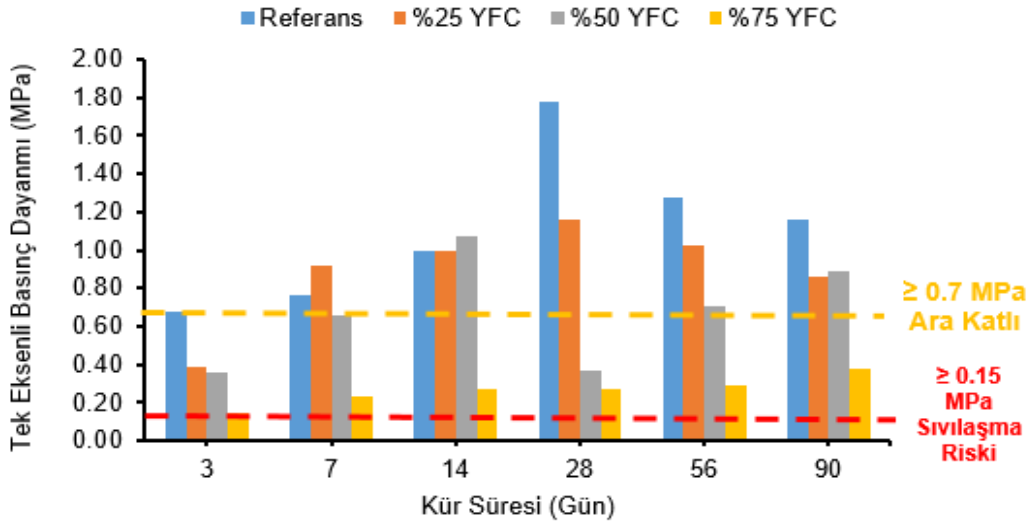
bulunmamaktadır. Sıvılaşma riski sınırı olan  $\geq 0.15$  MPa değerini % 25 ve % 50 karışım oranlarında aşıldığı görülmektedir. Bu karışım oranlarının TEBD sonuçları sırasıyla 0.30 ve 0.17 MPa'dır (Şekil 5).



**Şekil 6.** % 5 çimentolu ve YFC ikameli macun dolgu numunelerinin TEBD sonuçları.

Şekil 6'da görüldüğü üzere % 5 çimento içeren macun dolgu karışımında YFC eklenmesi basınç dayanımını artırmış. Ama referans numunenin dayanımını geçememiştir. 3. ve 7. kür süresinde referansa (0.28 ve 0.57 MPa) göre % 25 (0.33 ve 0.75 MPa) ve % 50 (0.21 ve 0.35 MPa) oranlarında YFC içeren numuneler daha fazla dayanım kazanmıştır. 28 günlük kür süresinde istenilen

$\geq 0.7$  MPa dayanım sınır değerini ise geçen karışım bulunmamaktadır. Tavan tahkimatı olarak istenilen  $\geq 4$  MPa sınır değerini geçen karışım oranı bulunmamaktadır. Ayrıca sıvılaşma riski sınırı olan  $\geq 0.15$  MPa değerini % 25 ve % 50 karışım oranlarında sağlanmaktadır. Bu karışım oranlarının TEBD sonuçları sırasıyla 0.52 MPa ve 0.22 MPa'dır.

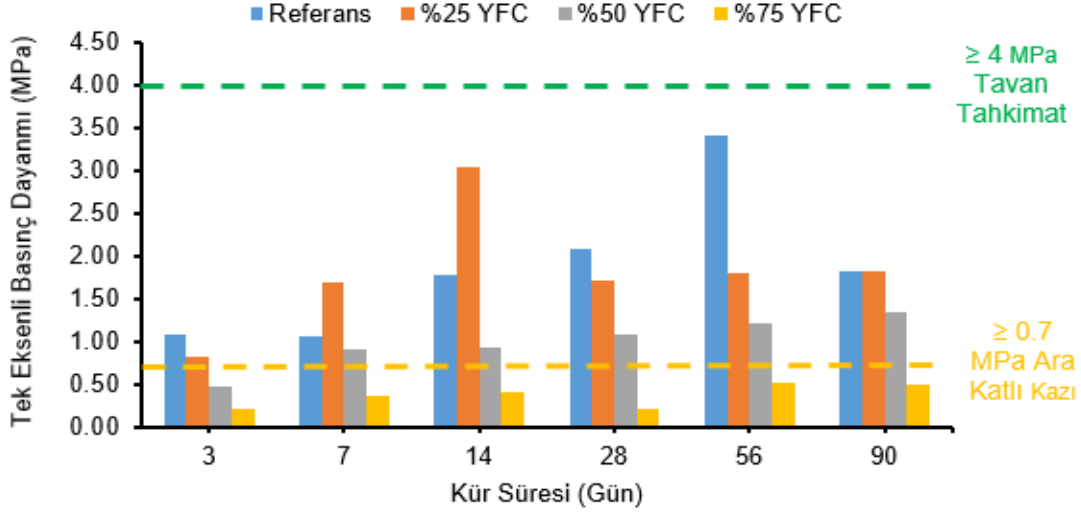


**Şekil 7.** % 7 çimentolu ve YFC ikameli macun dolgu numunelerinin TEBD sonuçları.

Şekil 7'de % 7 çimento içeren macun dolgu karışımında YFC eklenmesi basınç dayanımını artırmıştır. Ama referans numunenin dayanımını geçememiştir. 28

günlük kür süresinde istenilen  $\geq 0.7$  MPa dayanım sınır değerini % 25 karışım oranında 1.16 MPa değer olarak geçmiştir. Tavan tahkimatı olarak istenilen  $\geq 4$  MPa sınır

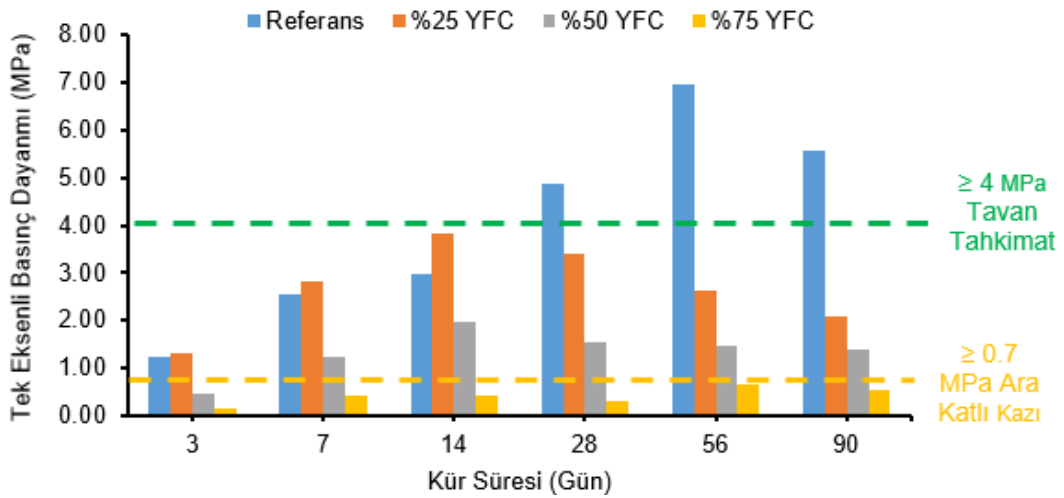
değerini geçen karışım oranı ve 75 karışım oranlarının TEBD sonuçları bulunmamaktadır. Ayrıca sivilaşma riski sınırı olan  $\geq 0.15$  MPa değerini bütün karışım oranlarında sağlanmaktadır. % 7 Ç - % 25, 50



**Şekil 8.** % 9 çimentolu ve YFC ikameli macun dolgu numunelerinin TEBD sonuçları.

Şekil 8’de görüldüğü üzere % 9 çimento içeren macun dolgu karışımında YFC eklenmesi basınç dayanımını artırmıştır. Ama referans numunenin dayanımını geçememiştir. 7. ve 14. kür süresinde referansa (1.05 ve 1.77 MPa) göre % 25 (1.70 ve 3.03 MPa) oranında YFC içeren numuneler daha fazla dayanım kazanmıştır. Sivilaşma riski sınırı olan  $\geq 0.15$  MPa değerini bütün

karışım oranlarında (1.72, 1.07 ve 0.21 MPa) sağlanmaktadır. 28 günlük kür süresinde istenilen  $\geq 0.7$  MPa dayanım sınır değerini % 25 ve % 50 karışım oranlarında sağlanmaktadır. Bu karışım oranlarının TEBD sonuçları sırasıyla 1.72 MPa ve 1.07 MPa’dır. Ayrıca tavan tahkimatı olarak istenilen  $\geq 4$  MPa sınır değerini geçen karışım oranı bulunmamaktadır.



**Şekil 9.** % 11 çimentolu ve YFC ikameli macun dolgu numunelerinin TEBD sonuçları.



Şekil 9'da görüldüğü üzere % 11 çimento içeren macun dolgu karışımında YFC eklenmesi basınç dayanımını artırmıştır. Ama referans numunenin dayanımını geçememiştir. 7. ve 14. kür süresinde referansa (2.54 ve 2.97 MPa) göre % 25 oranında YFC içeren numuneler (2.83 ve 3.81 MPa) daha fazla dayanım kazanmıştır. Sıvılaşma riski sınırı olan  $\geq 0.15$  MPa değerini bütün karışım oranlarında sağlamaktadır. 28

## Tartışma

% 25, 50 ve 75 oranlarında ikame edilen YFC; % 5, 7, 9 ve 11 çimento oranlarındaki karışımlarda Belem vd. (2000), Benzaazoua vd. (2002), Ouellet vd. (2007); Erçıkı vd. (2009), Cihangir vd. (2012), Yılmaz vd. (2017) çalışmalarında olduğu gibi macun dolgu karışımlarının basınç dayanımını artırmıştır. Bu çalışmalarda macun dolgu karışımlarının aldığı TEBD değerleri sırasıyla; 0,41 – 2,3 MPa, 0 – 4 MPa, 0,8 - 1,8 MPa, 0,07 – 0,8 MPa, 1,54 – 4.74 MPa, 0,5 – 1,4 MPa'dır.

28 günlük kür süresinde istenilen dayanım sınır değerini % 7 çimento - % 25 YFC, % 9 çimento - % 25 ve 50 YFC, % 11 çimento - % 25 - 50 YFC oranlarındaki karışımlarda sağlamaktadır. Ayrıca tavan tahkimatı olarak kullanılması için gerekli olan sınır değerini ( $\geq 4$  MPa) sadece % 11 çimento - % 25 YFC ikameli karışım sağlamaktadır. Yılmaz vd. (2017) çalışmasında ilerleyen kür sürelerinde (28 -56 gün) YFC'unun etkili olduğunu belirtse de bu çalışmada olduğu gibi YFC ikamesinin erken dayanımda da (28. güne kadar) etkili olduğu ve referans numune dayanımlarını bu dönemde geçtiği görülmektedir. Ayrıca Benzaazoua vd. (2002) yapılan çalışmada; cürufun yüksek sülfat içeren atıkların kullanıldığı macun dolgu karışımları için uygun olmadığını belirttiği çalışmasının aksine  $> \% 32$  S (kükürt içeren) atıkların kullandığı karışımlarda da kullanılabildiği ortaya konulmuştur. Dayanım da meydana gelen düşüşlerin YFC tane boyutunun kullanılan atık gibi iri boyutlu olması nedeniyle macun dolgu karışımı

günlük kür süresinde istenilen  $\geq 0.7$  MPa dayanım sınır değerini % 25 ve % 50 karışım oranlarında geçilmiştir. Bu karışım oranlarının TEBD sonuçları sırasıyla 3.41 MPa ve 1.56 MPa'dır. Ayrıca tavan tahkimatı olarak kullanılması için gerekli olan sınır değerini ( $\geq 4$  MPa) geçen karışım oranı bulunmamaktadır.

bünyesinde çimento ile boşluklu yapı oluşturmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

## Sonuçlar

Bu çalışmada % 3, 5, 7, 9 ve 11 portland çimentosu ile hazırlanmış ÇMD numuneleri ve çimento yerine ağırlıkça % 25, % 50 ve % 75 oranlarında YFC ile ikame edilmiş ÇMD karışımlar incelenmiştir.

Deney sonuçlarına göre, yalnızca % 3 çimento (Ç) oranındaki %75 YFC ikameli karışımlar macun dolgu için gerekli olan sıvılaşma riski sınırının (0,15 MPa) altında kalmış, 28 günlük kür süresinde istenilen dayanım sınır değeri ( $\geq 0.7$  MPa) % 7 Ç'nin % 25 YFC, % 9 Ç'nin % 25 ve % 50 YFC, % 11 Ç'nun % 25 ve % 50 YFC oranlarındaki karışımlar sağlamaktadır.

YFC; çimento yerine ikame edilen çimentolu macun dolgu karışımlarında basınç dayanımını iyileştirmiştir. % 5 ve üzeri çimento içeren macun dolgu karışımlarına ikame edilen YFC, en iyi basınç dayanımı sonuçlarını % 25 ve % 50 YFC katkılı karışımlarda vermiştir. Genel olarak YFC ikamesinin erken dayanımda (28. güne kadar) daha etkili olduğu ve referans numune dayanımlarını bu dönemde geçtiği görülmektedir.

Uzun vadedeki mekanik dayanım düşüşlerini ortadan kaldırmak için öğütme süresini artırarak YFC tane boyutunun düşürülebilir ve iri boyutlu atık ile daha iyi bir karışım oluşturulması sağlanarak yeniden bu karışım oranlarında denemeler yapılabilir.

## Teşekkür

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi Tarafından Desteklenmiştir. Proje numarası: FDK-2018-24707.

## Kaynaklar

- ASTM C39 / C39M-18, (2018). Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- Başçetin, A, Eker, H, Tuylu, S, D, Adıgüzel, (2018a). Effect of substitution of Zeolite on the mechanical properties of Cemented Paste Backfill, Proceedings of the 4 th International Underground excavations symposium, 13-14 September 2018, Istanbul, p 575-581.
- Başçetin, A, Eker, H, Tüylü, S, Adıgüzel, D. (2018b). Determination of strength properties of copper mine tailings, ROCKMEC'2018-12th Regional Rock Mechanics Symposium, 3-5 October 2018, Trabzon, Turkey, s. 162-167, 2018.
- Başçetin, A, Eker, H, Tüylü, S, Adıgüzel, D, Odabas, E. (2018c). Effect of fly ash on the mechanical strength of cemented paste backfill, Cappadocia Earth Sciences Symposium, 24-26 October 2018, Niğde, Turkey.
- Been, K., Brown, E., T., ve Hepworth, N., (2002). Liquefaction potential of paste fill at Neves Corvo mine, Portugal, Mining Technology, 111:1, 47 - 58, DOI: 10.1179/mnt.2002.111.1.47.
- Belem, T., Benzaazoua, B., Bussière, B., (2000) Mechanical behaviour of cemented paste backfill. In: Proceedings of 53rd Canadian Geotechnical Conference, Montreal, Quebec, pp. 373 - 380.
- Benzaazoua, M., Belem, T., ve Bussiere, B., (2002) Chemical factors that influence the performance of mine sulphidic paste backfill, Cement and Concrete Research, 32(7), 1133 - 1144.
- Benzaazoua, M., Fall, M., ve Belem, T. (2004). A contribution to understanding the hardening process of cemented pastefill, Minerals Engineering, 17(2), 141 - 152.
- Bouzoubaa, N., Simon, F.S., (2005). Use of fly ash and slag in concrete: a best practice guide. materials technology laboratory (MTL), Public Works and Government Services, Government of Canada, 2004 - 16.
- Brackebusch, F., W., 1994, (*Basics of paste backfill systems*). Miner Eng 46(10), p. 1175 – 1178.
- Cihangir, F., 2011, Investigation of utilisation of alkali activated blast furnace slag as binder in paste backfill, Ph. D. Thesis, Karadeniz Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Trabzon, Turkey, 207p.
- Cihangir, F., Ercikdi, B., Turan, A., Kesimal, A., Deveci, H., Yazıcı, M., Karaoğlu, K., (2011) Utilisation of sodium silicate activated blast furnace slag as an alternative binder in paste backfill of high-sulphide mill tailings, In: Proceedings of the 14th international seminar on paste and thickened tailings, Perth, Australia, p 465 – 475.
- Cihangir, F, Ercikdi, B, Kesimal, A, Alp, T, 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 (2012) 33–43.
- Cihangir, F., Erçikdi, B., Kesimal, A., Deveci, H., Erdemir, F., (2015). Paste backfill of high-sulphide mill tailings using alkaliactivated blast furnace slag: effect of activator nature, concentration and slag properties, Minerals Engineering, vol. 83, pp.117 - 127, 2015.
- De Souza E., Archibald JF, Dirige APE, (2003). Economics and perspectives of underground backfill practices in Canadian mining. In: 105th annual general meeting of the Canadian institute of mining, Metallurgy and Petroleum, Montreal, Canada, 15p.
- Douglas, E. Malhotra V. M. (1989). Ground granulated blast-furnace slag for cemented mine back fill: Production and evaluation, CIM Bull. 82, 929 (1989) 27-36.
- Eker, H. (2019) Metalik proses artıklarının macun dolgu yöntemi ile depolanmasında uygun tasarım parametrelerinin belirlenmesi, İstanbul

- Üniversitesi-Cerrahpaşa, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, 252 s. İstanbul.
- Erçikdi, B. (2009). Mineral ve kimyasal katkı maddelerinin macun dolgu performansına etkisi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Haziran 2009, Trabzon.
- Erçikdi, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H., ve Alp, I., (2009a). Utilization of industrial waste products as pozzolanic material in cemented paste backfill of high sulphide mill tailings, *Journal of Hazardous Materials*, 168, 848–856.
- Erçikdi, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H., ve Alp, I., (2010a) Effect of natural pozzolans as mineral admixture on the performance of cemented-paste backfill of sulphide-rich tailings, *Waste Management and Research*, 28, 430–435.
- Erçikdi, B. Cihangir, F. Kesimal, A. Deveci, H. Alp, İ. (2010b) Utilization of water-reducing admixtures in cemented paste backfill of sulphide-rich mill tailings, *Journal of Hazardous Materials* 179 (2010) 940–946.
- Erçikdi, B, Baki H, İzki M (2013). Effect of desliming of sulphide-rich mill tailings on the long-term strength of cemented paste backfill, *J Environ Manage* 115:5–13
- Erçikdi, 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 (2015) 573–583.
- Erçikdi, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H., (2017). Practical importance of tailings for cemented paste backfill, in: *Paste Tailings Management*, Yılmaz E., Mamadou F., Eds., Springer, London/Berlin/Switzerland, Cham, s.7-12, 2017
- Fall, M, Benzaazoua, M, (2003). Advances in predicting performance properties and cost of paste backfill, In: *Proceedings on tailings and mine waste'03*, Vail, USA, p 73–85.
- Fall, M., Adrien, D., Celestin, J. C., Pokharel, M., Touré, M., (2009). Saturated hydraulic conductivity of cemented paste backfill, *J Miner Eng* 2009;22(15):1307–17.
- Fall, M. Célestin, J.C. Pokharel, M. Touré, M. (2010). A contribution to understanding the effects of curing temperature on the mechanical properties of mine cemented tailings backfill, *Engineering Geology* 114 (2010), s. 397–413.
- Grice, T., (1998). Underground mining with backfill. In: *The second annual summit on mine tailings disposal systems*, Brisbane, Australia, p 5–15
- Godbout, J., Bussière, B., Aubertin, M., Belem, T., (2007). Evolution of cemented past backfill saturated hydraulic conductivity at early curing time, In: *Diamond Jubilee Canadian Geotechnical Conference and the 8th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference*, Ottawa, Ontario, 21 - 24 October. Canadian Geotechnical Society, Alliston, Ontario.
- Kesimal A, Ercikdi B, Yılmaz E (2003). The effect of desliming by sedimentation on paste backfill performance, *Miner Eng* 16(10):1009–1011.
- Klein, K. Simon, D. (2006). Effect of specimen composition on the strength development in cemented paste backfill, *Can. Geotech. J.* 43: 310–324 (2006) doi:10.1139/T06-005.
- Landriault, D., (1995). Paste backfill mix design for Canadian underground hard rock mining, In: *Proceedings of the 97th annual general meeting of the CIM rock mechanics and strata control session*, Nova Scotia, Canada, p 652–663.
- Nantel, J., Lecuyer, N., (1983). Assessment of slag backfill properties for the Noranda Chadbourne Project, *CIM Bull.* 849, 57 - 60.
- Naylor, J, Farmery, R, A, Tenbergen, R, A, (1997). Paste backfill at the Macassa mine with flash paste production in a paste production and storage mechanism, In: *Proceedings of the 29th annual meeting of the Canadian mineral processors*, Canada, p 408–420.
- Ouellet, S., Bussière, B., Aubertin, M., Benzaazoua, M., (2007). Microstructural evolution of cemented paste backfill: mercury intrusion porosimetry test results, *Cem. Concr. Res.* 37, 1654-1665.
- Roux, L., K, Bawden W., F., Grabinsky M., W., (2004). Liquefaction analysis of early age cemented paste backfill. In: *8th international*

- symposia on mining with backfill, Beijing, China, p 233–241.
- Tariq A, Nehdi, M, (2007). Developing durable paste backfill from sulphidic tailings, Waste Res Manage, 160(4):155–166
- Uusitalo, R., Seppanen, P., Nieminin, P., (1993). *The use of blast furnace slag as a binder*, In: Symposium Presented at the Fifth International Symposium on Mining with Backfill, pp. 169-172. Johannesburg, South Africa.
- Yılmaz, T. Erçıkdi, B. 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), ss. 239-251, Haziran 2017.
- Yılmaz, E, Guresci, M, (2017). Design and characterization of underground paste backfill, in: Paste Tailings Management, Yılmaz, E, Mamadou, F, Eds., Springer, London/Berlin/Switzerland , Cham, pp,111-144.

## Effect of Substitution of Blast Furnace Slag on Strength Properties of Cemented Paste Backfill

### Extended abstract

*The aim of this study is to capture and improve the strength required for production in cemented paste backfill (CPB), which is one of the tailings storage methods in underground mining. In this context, blast furnace slag (BFS) was used and its effect on the strength properties of CPB in the short and long term was investigated.*

*CPB; 75 % to 85 % pulp solids (PKO) of 3-11 % binder (cement and pozzolane materials) and sufficient water to be pumpable (process water, tap and lake water) It is defined as a mixture with.*

*CPB samples were first prepared with 3, 5, 7, 9 and 11 % portland cement and then mixed with 25 %, 50 % and 75 % by weight instead of cement as BFS substitute. Uniaxial compressive strength (UCS) test was performed according to curing times of 3, 7, 14, 28, 56 and 90 days.*

*25, 50 and 75% substituted YFC; 5, 7, 9 and 11% as in the work of the mixture of cement paste backfill mixture has increased compressive strength (Belem et. al 2000, Benzaazoua et. al 2002, Ouellet et. al 2007; Ercikdi et. al 2009; Cihangir et. al 2012; Yilmaz et. al 2017). In these studies, TEBD values of paste backfill mixtures were as follows; 0.41 to 2.3 MPa, 0 to 4 MPa, 0.8 to 1.8 MPa, 0.07 to 0.8 MPa, 1.54 to 4.74 MPa, 0.5 to 1.4 MPa.*

*Yilmaz et al. (2017) reported that YFC was effective in curing times (28-56 days), but YFC substitution was also effective in early strength (up to 28 days) and it exceeded the reference sample strength in this period. Also, Benzaazoua et al. (2002) in the study; contrary to the study where slag is not suitable for paste backfill mixtures using high sulphate containing wastes, it has been shown that it can also be used in mixtures using > 32% S (sulfur containing) wastes. The decreases in strength are thought to be due to the fact that the YFC grain size is coarse-sized like the waste used, resulting in the formation of hollow structure with cement in the putty filling mixture.*

*According to the test results, only 3 % cement (C) ratio of 75 % BFS substitutes were below the liquefaction risk limit (0.15 MPa) required for using paste backfill. The required strength limit value ( $\geq 0.7$  MPa) for sublevel excavation during the 28-day curing period is mixtures of 7 % - 25 % BFS, 9 % - 25 % and 50 % BFS, 11 % - 25% and 50 % BFS. However, it has been determined that there should be no use of BFS -added CPB for fortification purposes or that different additives should be used in order to improve the strength in this regard.*

**Keywords:** *Cemented paste backfill, Blast furnace slag, Uniaxial compressive strength, Tailings*