



Doğal puzolan özelliklerinin macun dolgunun dayanım ve duraylılığına etkisi

The effect of natural pozzolan properties on the strength and stability of paste backfill

**BAYRAM ERÇIKDI, FERDİ CİHANGİR, AYHAN KESİMAL,
HACI DEVECİ, İBRAHİM ALP**

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 61080, TRABZON

Geliş (received) : 22 Şubat (February) 2008

Kabul (accepted) : 26 Mart (March) 2008

ÖZ

Çevresel açıdan zararlı cevher zenginleştirme atıklarının (sülfürlü vb.) tamamının yeraltı üretim boşluklarında depolanmasını sağlayan ve böylece yerüstü atık depolama ve rehabilitasyon maliyetlerini önemli oranda azaltan macun dolgu teknolojisinin kullanımı son yıllarda yaygınlaşmaktadır. Bağlayıcı maliyetlerinin macun dolgu işletme giderlerinin önemli bir kısmını oluşturması ve özellikle sülfürlü atıkların kullanıldığı macun dolgu uygulamalarında Portland çimentosu gibi kalsiyumca zengin bağlayıcıların performansının düşük olması nedeniyle, puzolanik özelliğe sahip mineral katkı maddelerinin Portland çimentosu yerine belirli oranlarda bağlayıcı olarak kullanımı önem kazanmıştır. Bu çalışmada, Portland çimentosu (PÇ 42.5) yerine belirli oranlarda (ağırlıkça %30'a kadar) mineral katkı maddesi olarak kullanılan doğal puzolanların macun dolgunun dayanım ve duraylılığına etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, sülfür içeriği yüksek maden atıklarından üretilen macun dolgu örnekleri drenajlı (delikli) silindir örnek kalıplarına dökülerek 7-90 gün kür süreleri sonunda tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuştur. Elde edilen deney sonuçlarından, doğal puzolanların fiziksel, kimyasal ve puzolanik özelliklerinin macun dolgunun dayanım ve duraylılığı üzerinde önemli bir etkiye sahip oldukları anlaşılmıştır. Ayrıca, reaktif silika içeriğinin doğal puzolanların puzolanik etkinliği açısından en önemli gösterge olduğu ve puzolanik etkinlik arttıkça macun dolgunun dayanım ve duraylılığının arttığı görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Macun dolgu, doğal puzolan, basınç dayanımı, sülfat atak.

ABSTRACT

In recent years, the use of paste backfill technology has become widespread since it allows the placement of all the potentially hazardous mine tailings (e.g. sulphide tailings) to underground openings with concomitantly the significant reductions in the surface tailings disposal and rehabilitation costs. The Binder costs represent an important part of the backfill's operating costs and calcium rich binders such as Portland cement often present low strength and stability performance. Therefore, utilization of mineral admixtures having pozzolanic properties as partial replacement of Portland cement in paste backfill has gained importance. In this study, the effects of natural pozzolans as additives in place (up to 30% by weight) of Portland cement (PÇ 42.5) on the strength and stability of paste backfill samples were investigated. The experimental results have revealed that the physical, chemical and pozzolanic properties of natural pozzolans have a profound effect on the strength and stability of paste backfill. The reactive silica content of the natural pozzolan was found to be of practical importance since it could be the indication of the degree of pozzolanic activity of a natural pozzolan and the higher is the pozzolanic activity of natural pozzolan, the higher positive effect on the strength and stability of paste backfill.

Key words: Paste backfill, natural pozzolan, compressive strength, sulphate attack.

GİRİŞ

Puzolan, çok ince öğütüldüğünde bağlayıcı özelliğe sahip ürünler (C-S-H jeli) oluşturmak için normal sıcaklıklarda ve nemin varlığında kimyasal olarak kalsiyum hidroksit ile tepkimeye giren silisli veya silisli ve alüminli madde olarak tanımlanmaktadır (Kosmatka vd., 1995). Puzolanik maddeler, genellikle doğal ve yapay puzolanlar olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Tras olarak da bilinen doğal puzolanlar, genellikle volkanik kökenli kayalardır. Bilinen doğal puzolan türleri volkanik küller, tüfler (pumis gibi), kalsine olmuş killer ve şeyllerdir. Yapay puzolanlar ise, çeşitli sanayi artığı maddelerden veya bazı doğal maddelerin ısı ile maruz bırakılmaları sonucu elde edilen maddelerdir. Yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanı yaygın olarak bilinen yapay puzolanlardır.

Puzolanlar katkı maddesi olarak doğrudan çimento ile karıştırılarak kullanılabilirler gibi, belirli oranlarda Portland çimentosu (PÇ) ile birlikte öğütülerek katkı çimento üretiminde de kullanılmaktadır. Puzolanik maddelerin puzolanik etkinliği malzemenin fiziksel özelliği, kimyasal ve mineralojik bileşimi ile doğrudan ilişkilidir. Örneğin, yüksek puzolanik etkinliğe sahip puzolanların camsı faz (≥ 80) içeriği yüksek, kil minerali içeriği düşüktür (Alp vd., 2003). Benzer şekilde doğal puzolan (tras) olarak kullanılacak malzemenin kimyasal olarak $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ toplamının en az %70, fiziksel olarak ise en az 3000 cm^2/g özgül yüzey alanına sahip olması gerekmektedir (TS, 1975).

Yapay ve doğal puzolanların çimento içerikli karışımlarda (beton, harç vb.) kullanılmasının başlıca nedenleri; i) işlenebilirliği iyileştirmek, ii) poroziteyi, boşluk oranını ve geçirgenliği azaltmak, iii) çimento maliyetini/tüketimini azaltmak, iv) kısa ve uzun dönemde daha dayanıklı ürün elde etmek ve, v) sülfat etkisine karşı direnci arttırmak olarak sıralanabilir (Erdoğan, 2003; Alp vd., 2003)

Bu çalışmada, Portland çimentosu (PÇ 42.5) yerine belirli oranlarda kısmen (ağırlıkça %30'a kadar) kullanılan doğal puzolanların (A (Tras 1), B (Tras 2) ve C (Pumis)) fiziksel, kimyasal ve puzolanik özelliklerinin sülfürlü atıklardan üretilen macun dolgunun 90 günlük kür sürelerinde dolgu dayanımı ve duraylılığına etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada hedeflenen başlıca amaç, macun dolguda dayanım kaybını engelleyici doğal pu-

zolan tipini, kullanım oranını (ağırlıkça % olarak) ve hangi özelliklerinin (yüzey alanı, puzolanik etkinliği vb.) etkili olduğunu belirlemektir.

MACUN DOLGU TEKNOLOJİSİ

Macun dolgu, susuzlandırılmış tesis atıkları (ağırlıkça %70-85 katı oranında), su ve bağlayıcı (ağırlıkça %3-7 oranında) karışımından oluşmaktadır (Brackebusch, 1994; Landriault, 1995). Macun dolgunun dayanım ve duraylılığını etkileyen faktörler, iç ve dış etkenler olarak iki gruba ayrılmaktadır (bkz. Çizelge 1). İç ve dış etkenler dolgunun hem kısa ve uzun dönemdeki dayanım, duraylılık ve deformasyon özelliklerini belirlemede, hem de yeraltına taşınmasında etkin rol oynamaktadır (Benzaazoua vd., 2002; Erçikdi vd., 2003; Yılmaz vd., 2003 ve 2006; Fall ve Samb, 2006; Ouellet, 2006). Ancak sülfür içeriği yüksek olan atıkların macun dolgu malzemesi olarak kullanılması durumunda uzun dönemde duraylılık açısından bazı sorunlarla karşılaşıldığı belirtilmektedir. Bunun nedeni, sülfürlü minerallerin oksitlenmesine bağlı olarak oluşan sülfat ve asitin bağlayıcı hidrasyon ürünleri ile etkileşmesidir. Bu etkileşimler sonucu oluşan genleşme özelliğine sahip ikincil minerallerin (etrenjit ve jips), dolgunun duraylılığını yitirmesine ve sonuçta göçüklere yol açmak suretiyle istenmeyen işgücü kayıplarına ve üretimin durmasına neden olduğu öne sürülmektedir (Benzaazoua vd., 1999; Santhanam vd., 2001; Hassani vd., 2001; Kesimal vd., 2004; Yılmaz vd., 2004; Kesimal vd., 2005).

Macun dolgu teknolojisinin oldukça yeni bir teknoloji olmasından dolayı, özellikle sülfür içeriği yüksek atıklardan üretilen dolgunun uzun dönemde duraylılığının bozulmasının nedenleri (ikincil mineral oluşumu vb.) halen araştırılmakta ve bunu engelleyici çözümler aranmaktadır. Beton endüstrisinde sülfat atak olarak adlandırılan bu sorunun çözümünde en etkili yöntemin puzolanik özelliğe sahip mineral katkı malzemelerinin (yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı vb.) kullanımı olduğu belirtilmektedir (Taylor, 1990; Neville, 2000; Erdoğan, 2003). Bağlayıcı maliyetlerinin macun dolgu işletme giderlerinin ortalama %42'sini (%3 çimento oranı için) oluşturduğu göz önüne alındığında (De Souza vd., 2003), bağlayıcı niteliğe sahip puzolanik katkı maddelerinin macun dolguda kullanımı, sülfat atak olarak adlandırılan sorunun çözül-

Çizelge 1. Macun dolgu dayanımını ve duraylılığını etkileyen faktörler (Benzaazoua vd., 2002 ve Ouellet, 2006'dan değiştirilerek alınmıştır).

Table 1. Factors affecting the strength and stability of paste backfill (modified after Benzaazoua et al., 2002 and Ouellet, 2006).

| İÇ ETKENLER | DIŞ ETKENLER |
|--|---|
| <u>Atık malzeme</u> | <u>Yerinde koşullar</u> |
| Tane boyu dağılımı | Sıcaklık (C°) |
| Özgül ağırlık | Nem (%) |
| Sülfür içeriği (%) | Konsolidasyon |
| <u>Bağlayıcı</u> | Drenaj koşulları |
| Çimento tipi | Sıvılaşma (liquefaction) riski |
| % C ₃ A ve CaSO ₄ .2H ₂ O oranı | Yeraltısuyu koşulları |
| Katkı malzeme tipi (mineral, kimyasal) ve % oranı | Havalandırma (oksijen miktarı) |
| Katkıların (mineral) puzolanik etkinliği | Sülfat atak (oksidasyon, ikincil mineral oluşumu, genleşme) |
| <u>Karışım suyu</u> | Yan kayaçla etkileşim (yanal basınç, çatlak vb.) |
| SO ₄ ²⁻ konsantrasyonu (mg/lt) | Patlatma kaynaklı titreşimler |
| pH | Dolgu yerleştirme şekli (kademeli, dolgu barikatının zarar görmesi vb.) |
| <u>Karışım özellikleri</u> | |
| Su: çimento oranı | |
| % Çimento miktarı | |
| % Katı oranı | |
| Gözeneklilik ve boşluk oranı | |

münde etkin rol oynaması ve aynı zamanda çimento tüketimini ve tesis işletme giderlerini önemli ölçüde azaltması mümkün olabilir.

Bu amaçla, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi yapay puzolanların Portland çimentosu yerine belirli oranlarda kısmen kullanımının macun dolgu dayanım, duraylılık ve deformasyon özelliklerine etkisi ile ilgili araştırmalar oldukça yaygındır (Archibald vd., 1999; Hassani vd., 2001; Fall ve Benzaazoua, 2005; Petrolito vd., 2005; Klein ve Simon, 2006; Sargeant vd., 2007). Ancak, doğal puzolanların Portland çimentosu yerine belirli oranlarda kısmen kullanımının macun dolgu özelliklerine etkisi ile ilgili günümüze değin herhangi bir çalışma gerçekleştirilmemiştir. Ayrıca ülkemizin doğal puzolan kaynakları bakımından oldukça zengin olduğu birçok çalışmada da belirtilmektedir (Türkmenoğlu ve Tankut, 2002; Çavdar ve Yetgin, 2007).

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, bir zenginleştirme tesisinden temin edilen sülfürlü atıklar, herhangi bir sınıflandırmaya tabi tutulmadan kullanılmıştır. Bütün deneylerde %5 çimento oranı ve %77 katı oranında (17.78 cm slump) hazırlanan macun dol-

gu karışımları, drenajlı silindir örnek kalıplarına doldurulmuş ve 90 gün boyunca belli kür sürelerinde tek eksenli basınç dayanım deneyine tabi tutulmuştur.

Atık Malzeme

Macun dolgunun yeraltına borularla belli bir akışkan kıvamında taşınabilmesi ve sürtünme nedeniyle oluşabilecek aşınma sorununu önlemek için ortamda kolloidal, su tutmayı sağlayacak 20 µm altı en az ağırlıkça %15 malzeme olması gerekmektedir (Landriault, 1995). Malvern Mastersizer ile atıklar üzerinde gerçekleştirilen tane boyu dağılımı analizi sonuçlarından (bkz. Çizelge 2), 20 µm altı malzeme miktarının ağırlıkça %40 olduğu ve orta boyutlu atık malzeme sınıfına girdiği görülmektedir (Landriault, 2001).

İyi bir tane boyu dağılımına sahip malzemenin her boyuttan yeterli miktarda tane içermesi ve uniformluk katsayısının (C_u) 4-6, eğrilik katsayısının (C_e) ise 1-3 arasında olması istenir (Landriault, 2001; Kesimal vd., 2003). Bu çalışmada kullanılan atık malzemenin tane boyu dağılımı grafiğinden, C_u değerinin 9.4, C_e değerinin ise 1.52 olduğu ve bu bakımdan atık malzemenin iyi bir tane boyu dağılımına sahip olduğu görülmektedir.

Çizelge 2. Atık malzemenin kimyasal, fiziksel ve mineralojik bileşimi.

Table 2. Chemical, physical and mineralogical composition of the tailings material.

| Kimyasal bileşim (%) | | | | | | | |
|---|-------|----------------------|-------|----------------------|---|----------------------|--------|
| MgO | 1.19 | CaO | 0.95 | K ₂ O | 0.23 | SO ₃ | 2.83 |
| Al ₂ O ₃ | 3.27 | FeO | 22.92 | Na ₂ O | 0.17 | Cl ⁻ | 0.003 |
| SiO ₂ | 11.39 | S | 26.22 | TiO ₂ | <0.01 | Kızdırma kaybı | 29.02 |
| | | | | | | Toplam | 98.203 |
| Fiziksel özellikler | | | | | | | |
| D ₁₀ (µm) | 4.0 | D ₃₀ (µm) | 15.0 | D ₆₀ (µm) | 37.0 | D ₈₀ (µm) | 62.0 |
| D ₂₀ (µm) | 7.8 | D ₅₀ (µm) | 28.0 | D ₇₀ (µm) | 49.0 | D ₉₀ (µm) | 83.0 |
| C _u [Cu = (D ₆₀) / (D ₁₀)] | | | | 9.3 | C _c [Cc = (D ₆₀) ² / (D ₁₀)*(D ₆₀)] | | 1.52 |
| Özgül yüzey alanı (cm ² /g) | | | | 3584 | Özgül ağırlık (gr/cm ³) | | 4.09 |
| Mineralojik bileşim: Pirit, kuvars | | | | | | | |

D₁₀: Malzemenin %10'unun elek altına geçtiği tane boyutu; C_u: Uniformluk katsayısı; C_c: Eğrilik katsayısı

Atık malzemenin kimyasal ve mineralojik analizi sonuçları (bkz. Çizelge 2), atığın yüksek oranda pirit minerali (FeS₂) içerdiğini göstermiştir. Pirit mineralinin, suyun ve oksijenin varlığında oksidasyona uğraması asitlik (H⁺) ve sülfat (SO₄²⁻) oluşumuna yol açabilir ve devamındaki kimyasal tepkimelerin macun dolgunun dayanımını ve duraylılığını olumsuz yönde etkilemesi söz konusu olabilir (Santhanam vd., 2001; Bakharev vd., 2002; Benzaazoua vd., 2002; Yılmaz vd., 2003; Kesimal vd., 2005).

Bağlayıcı Malzeme

Macun dolgu uygulamalarında, bağlayıcı olarak genellikle Portland çimentosu kullanılmaktadır. Portland çimentosunun maliyetinin yüksek ve sülfat atağa karşı dayanıksız olması nedeniyle puzolanlar ile birlikte kullanımı oldukça yaygındır (Neville, 2000). Puzolanların kullanılabilirliğini belirleyen en önemli etken, dolgu tesisine yakın mesafelerde yeterli miktarda bulunması ve ekonomik bir şekilde temin edilebilmesidir. Bu çalışmada, macun dolgu örneklerinin tamamı %5 çimento oranında hazırlanmıştır. Bağlayıcı olarak; Portland çimentosu (PÇ 42,5), Ordu yöresinden temin edilen iki farklı tras (A ve B) ve Kayseri yöresinden temin edilen pumis (C) kullanılmıştır. A, B ve C bağlayıcı fazı içinde PÇ 42,5 yerine kısmen ağırlıkça %10, 20 ve 30 (örneğin, A: PÇ; 10:90; 20:80; 30:70) oranlarında kullanılmıştır. A, B ve C laboratuvarında önce merdaneli kırıcıdan (-4 mm) geçirilmiş ve daha sonra bilyalı değirmende A ve B 90 dakika, C ise 45 dakika kuru öğütmeye tabi tutularak inceliği minimum 3000 cm²/g'ye getirilmiştir. Öğütme işleminden sonra TS EN 196-2 ve TS EN 196-6'ya TS (2002) göre malzemelerin fi-

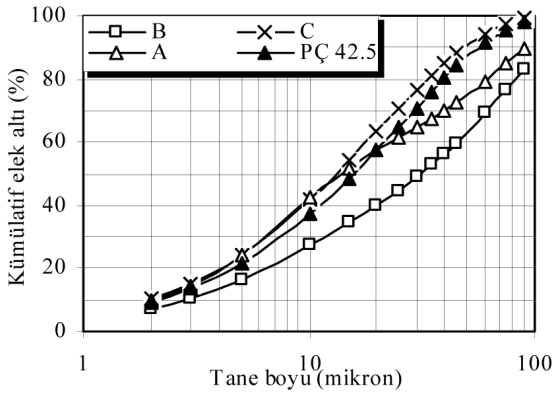
ziksel, kimyasal ve mineralojik karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir (bkz. Şekil 1 ve Çizelge 3). Doğal puzolanların reaktif silika miktarları ise TS EN 197-1'e (TS, 2002) göre belirlenmiştir.

Puzolanik Etkinlik Deneyleri

Puzolanik etkinlik, ince olarak öğütülmüş puzolanların nem varlığında sönmüş kireçle tepkimeye girerek bağlayıcı özelliğe sahip ürün (C-S-H) oluşturmasıdır. Puzolanik etkinlik deneyleri TS 25'e göre, TS EN 196-1'de tanımlanan standart kum kullanılarak yapılmıştır (bkz. Çizelge 4). Standart kalıplar içerisine dökülerek hazırlanan örneklerin 7 günlük kür süresi sonunda basınç ve çekme dayanımları belirlenmiştir.

Macun Dolgu Örneklerinin Hazırlanması

%82 katı oranına sahip cevher atığı, bağlayıcı malzeme ve karışım suyu kullanılarak %5 çimento oranında toplam 150 adet macun dolgu örneği hazırlanmıştır. Bağlayıcı malzeme (ağırlıkça %5) karışıma, %77 katı oranına göre hesaplanarak ilave edilmiştir. %82 katı oranındaki atığı %77 katı oranına getirmek için musluk suyu ilave edilmiştir. Karışımın (atık malzeme, bağlayıcı ve su) homojen bir şekilde hazırlanması için 20.8 litre kapasiteli mikser kullanılmıştır. Karıştırma işlemi 2. devirde 7 dakika süreyle yapılmıştır. Hazırlanan macun dolgu karışımı 10 cm çapında ve 20 cm yüksekliğindeki drenajlı silindir örnek kalıplarına dökülmüştür. Hazırlanan macun dolgu örnekleri daha sonra, %80 nemli ve 20 C° sıcaklık ortamında 7, 28, 56 ve 90 gün kür sürelerinde bekletilmiştir (bkz. Şekil 2).



Şekil 1. Bağlayıcıların tane boyu dağılımı.
Figure 1. Particle size distribution of the binders.

Tek Eksenli Basınç Dayanımı

Macun dolgu örneklerinin tek eksenli basınç dayanımı, önceden belirlenen kür süreleri sonunda yük kapasitesi 50 kN ve 0.5 mm/dk lık bir yükleme hızına sahip bilgisayar kontrollü basınç ve deformasyon ünitesinde ASTM (2002) tarafından önerilmiş yöntemle belirlenmiştir. Macun dolgu örneklerinin boy/çap oranı 2 olup, örneklerin alt ve üst yüzeyleri deney öncesi düzeltilmiştir. Her bir kür süresi için 3 adet örnek deney edilmiş olup, sonuçlar bu 3 örnekten elde edilen değerlerin ortalaması olarak alınmıştır. Yeraltına yerleştirilen macun dolgunun kendi duraylılığını sağlayabilmesi için 28 günlük kür süresi sonunda en az 0.7 MPa dayanım kazan-

Çizelge 3. Bağlayıcıların kimyasal, fiziksel ve mineralojik özellikleri.
Table 3. Chemical, physical and mineralogical properties of the binders.

| Karakteristik | PÇ 42.5 (%) | A (%) | B (%) | C (%) |
|---------------------------------------|---------------------------|-----------|----------------|-----------|
| Kimyasal bileşim | | | | |
| SiO ₂ | 20.31 | 57.28 | 55.82 | 62.81 |
| Reaktif SiO ₂ | - | 25.94 | 35.00 | 55.88 |
| Al ₂ O ₃ | 5.93 | 18.60 | 16.13 | 16.19 |
| Fe ₂ O ₃ | 2.82 | 4.70 | 6.86 | 3.75 |
| CaO | 61.02 | 5.72 | 8.57 | 2.86 |
| MgO | 1.15 | 1.47 | 3.97 | 0.83 |
| SO ₃ | 2.95 | 0.16 | 0.15 | 0.13 |
| Na ₂ O | 0.32 | 2.84 | 2.20 | 2.90 |
| K ₂ O | 1.14 | 4.07 | 2.20 | 2.45 |
| TiO ₂ | - | 0.77 | 0.54 | 0.69 |
| Serbest CaO | 1.14 | - | - | - |
| Kalıntı | 1.18 | - | - | - |
| Kızdırma kaybı | 3.78 | 3.65 | 3.12 | 6.75 |
| Toplam | 99.43 | 99.35 | 99.57 | 99.36 |
| Fiziksel özellikler | | | | |
| Özgül ağırlık (g/cm ³) | 3.010 | 2.580 | 2.645 | 2.406 |
| Özgül yüzey alan (cm ² /g) | 4345 | 6975 | 4940 | 7710 |
| Öğütme süresi (dakika) | - | 90 | 90 | 45 |
| Mineralojik bileşim | | | | |
| | C ₃ S = %37.10 | Feldispat | Feldispat | Camsı faz |
| | C ₂ S = %30.30 | Kuvars | Kuvars | |
| | C ₃ A = %10.95 | İllit | Ferroaktinolit | |
| | C ₄ AF = %8.57 | | | |

Çizelge 4. Pozzolanik etkinliğin belirlenmesi için harçların hazırlanmasında kullanılan karışım oranları (TS, 1975).
Table 4. Admixture proportions in the mortars prepared to determine the pozzolanic activity (TS, 1975).

| Malzeme | Miktar (g) |
|----------------------------|--|
| Kireç-Ca(OH) ₂ | 150 |
| Tras | $T = 2 \cdot 150 \cdot (\delta_{DP}) / (\delta_{Kireç})$ |
| Standart kum (TS-EN 196-1) | 1350 |
| Su | $0,5 \cdot (150 + T)$ |

ması gerektiğinden, çalışmada dayanım eşik değeri olarak 0.7 MPa esas alınmıştır.

DEĞERLENDİRME ve TARTIŞMA

Doğal Puzolanların Karakterizasyonu

Doğal puzolanlar, çimento veya betonda katkı maddesi olarak kullanılabilmesi için belirli fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olmalıdırlar. TS 25 (TS, 1975)'e göre, $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ (S+A+F) toplamı en az %70 olmalıdır. Ayrıca, sönmüş kireç ve doğal puzolanik madde karışımıyla hazırlanan örneklerin 7 günlük çekme dayanımlarının en az 1 MPa ve tek eksenli basınç dayanımlarının en az 4 MPa olması gerekmektedir (TS, 1975). Doğal puzolanların kimyasal bileşimi (S+A+F) ve puzolanik deney sonuçları TS 25 (TS, 1975) ile karşılaştırılmalı olarak Çizelge 5'de verilmiştir. Çizelge 3 ve 5 incelendiğinde, doğal puzolanların gerekli fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklere sahip oldukları ve PÇ 42.5 yerine kısmen mineral katkı maddesi olarak kullanılabileceği anlaşılmaktadır. C kullanılarak hazırlanan harç örneklerinin 7 günlük çekme ve tek eksenli basınç dayanımları TS 25 (TS, 1975)'de belirtilen sınır (eşik) değerlere göre sırasıyla 2.6 ve 3.3 kat daha yüksektir. A ve B kullanılarak hazırlanan harç örneklerinin 7 günlük çekme ve tek eksenli basınç dayanımları C ile üretilen harç örneklerinden daha düşüktür (bkz. Çizelge 5). C'nin A ve B'den daha yüksek puzolanik etkinlik göstermesi; C'nin sahip olduğu yüksek özgül yüzey alanı ($7710 \text{ cm}^2/\text{g}$), reaktif SiO_2 (55.88) miktarı ve camsı faz yapıda olmasıyla

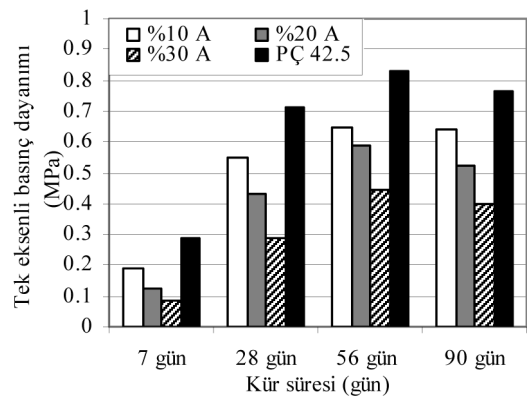


Şekil 2. Macun dolgu örnekleri.
Figure 2. Paste backfill samples.

ilişkilendirilebilir. Çünkü, SiO_2 miktarının artmasıyla puzolanik etkinliğin yükseldiği, Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO ve K_2O miktarının artmasıyla ise azaldığı, reaktif SiO_2 miktarı ve özgül yüzey alanı ile puzolanik etkinlik arasında doğru orantılı bir ilişkinin olduğu belirtilmektedir (Çavdar ve Yetgin, 2007; Papadakis vd., 2002).

Doğal Puzolanların Macun Dolgunun Dayanım ve Duraylılığına Etkisi

Bağlayıcı tipi ve miktarı, macun dolgunun dayanım ve duraylılığı üzerinde önemli rol oynamaktadır. Şekil 3, %5 çimento oranında ve sabit bir kıvamda (17.78 cm slump) PÇ 42.5 ve PÇ 42.5 yerine belirli oranlarda (ağırlıkça %30'a kadar) A kullanılarak hazırlanan macun dolgu örneklerinin 7, 28, 56 ve 90 günlük dayanım sonuçlarını göstermektedir. PÇ 42.5 kullanılarak hazırlanan örneklerin dayanımı, 28 günlük kür süresi sonunda 0.716 MPa olup, sınır (eşik) değeri (0.7 MPa) hemen üstündedir. 56 günlük kür süresi sonunda ise, dayanımın 0.833 MPa'ya ulaştığı, ancak 90 günlük kür süresi sonunda %8'lik bir dayanım kaybının olduğu görülmektedir (bkz. Şekil 3). PÇ 42.5 yerine kısmen %10 A içeren macun dolgu örneklerinin 56-90 günlük kür aralığındaki dayanım kaybı %0.8 iken, PÇ 42.5 yerine kısmen %20 ve %30 A içeren macun dolgu örneklerinin aynı kür aralığındaki dayanım kaybının %11 olduğu görülmüştür (bkz. Şekil 3).



Şekil 3. PÇ 42.5 yerine kısmen (ağırlıkça %10-30) A kullanılarak %5 çimento oranında hazırlanan macun dolgu örneklerinin tek eksenli basınç dayanımı.

Figure 3. Unconfined compressive strength of paste backfill samples produced from the tailings sample using PC 42.5 and A as mineral additive (up to 30 wt%) at 5 wt% binder dosage.

Çizelge 5. Doğal puzolanların kimyasal ve puzolanik etkinlik deney sonuçlarının TS 25 (TS, 1975) ile karşılaştırılması.

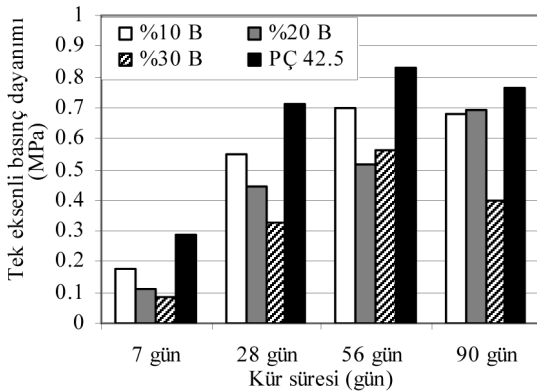
Table 5. Chemical and pozzolanic activity test results of the natural pozzolans compared with TS 25 (TS, 1975).

| TS 25 | SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ | MgO | SO ₃ | Kızdırma kaybı | Reaktif SiO ₂ | 7 günlük çekme dayanımı | 7 günlük tek eksenli basınç dayanımı |
|-------|--|-------|-----------------|----------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| | (%) | (%) | (%) | (%) | | (MPa) | (MPa) |
| TS 25 | >70.00 | <5.00 | <3.00 | <10.00 | - | >1.00 | >4.0 |
| A | 80.58 | 1.47 | 0.16 | 3.65 | 25.94 | 1.2 | 6.4 |
| B | 78.81 | 3.97 | 0.15 | 3.12 | 35.00 | 1.6 | 8.1 |
| C | 82.75 | 0.83 | 0.13 | 6.75 | 55.88 | 2.6 | 13.3 |

PÇ 42.5 yerine kısmen (%10, 20 ve 30) A ve B kullanılarak hazırlanan macun dolgu örneklerinin dayanım kazanımı benzerlik göstermektedir (bkz. Şekil 3 ve 4). Ancak bu örneklerin dayanımı, PÇ 42.5 kullanılarak hazırlanan örneklerin dayanımından tüm kür sürelerinde daha düşüktür. PÇ 42.5 yerine belirli oranlarda kısmen %10, 20 ve 30 B kullanılarak hazırlanan örneklerin A'ya göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. 56-90 günlük kür süresi aralığında en fazla dayanım kaybının %28.5 ile PÇ 42.5 yerine kısmen %30 B içeren macun dolgu örneklerinde olduğu görülmektedir (bkz. Şekil 4). PÇ 42.5 yerine kısmen (%10, 20 ve 30) A ve B kullanılarak hazırlanan macun dolgu örneklerinin dayanım sonuçlarından (bkz. Şekil 3 ve 4); PÇ 42.5 yerine kısmen %10 A ve %10-20 B kullanımının 56 günlük kür süresi sonunda gözlemlenen

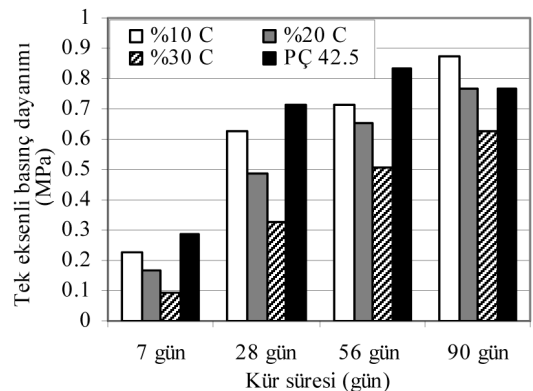
dayanım kaybını nispeten engellediği, ancak yeterli dayanım kazanımının (28 günlük kür süresinde en az 0.7 MPa) elde edilmesi için ağırlıkça %5'den daha fazla çimento içermeleri gerektiği anlaşılmaktadır.

Şekil 5, PÇ 42.5 yerine kısmen %10, 20 ve 30 oranında C kullanılarak hazırlanan macun dolgu örneklerinin 7-90 günlük kür süreleri sonundaki dayanım sonuçlarını göstermektedir. Şekil 5 incelendiğinde, PÇ 42.5 yerine kısmen kullanılan C miktarı (%10-30) arttıkça, A ve B ile hazırlanan örneklerde olduğu gibi macun dolgu örneklerinin dayanım kazanımı azalma eğilimi göstermektedir. Örneğin, PÇ 42.5 yerine kısmen %10 C kullanılarak hazırlanan örneklerin 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı (0.624 MPa), %30 C kullanılarak hazırlanan örneklerin tek eksenli



Şekil 4. PÇ 42.5 yerine kısmen (ağırlıkça %10-30) B kullanılarak %5 çimento oranında hazırlanan macun dolgu örneklerinin tek eksenli basınç dayanımı.

Figure 4. Unconfined compressive strength of paste backfill samples produced from the tailings sample using PC 42.5 and B as mineral additive (up to 30 wt%) at 5 wt % binder dosage.



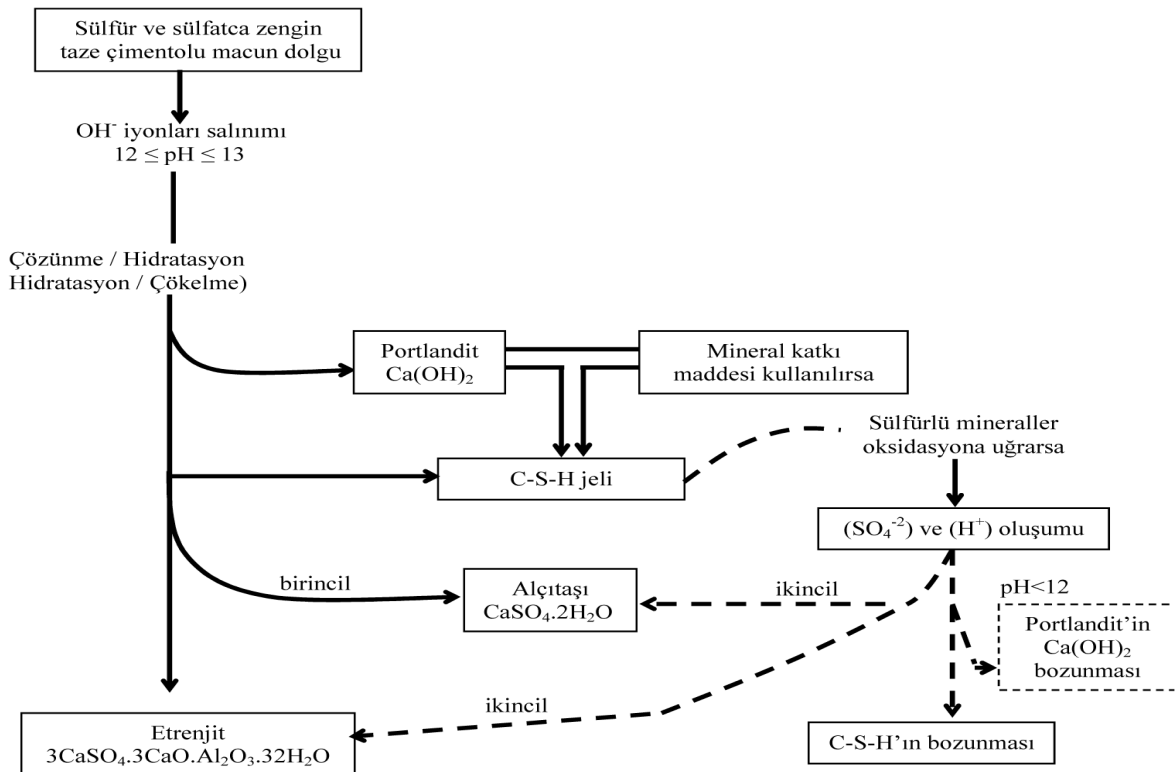
Şekil 5. PÇ 42.5 yerine kısmen (ağırlıkça %10-30) C kullanılarak %5 çimento oranında hazırlanan macun dolgu örneklerinin tek eksenli basınç dayanımı.

Figure 5. Unconfined compressive strength of paste backfill samples produced from the tailings sample using PC 42.5 and C as mineral additive (up to 30 wt%) at 5 wt % binder dosage.

basınç dayanımından (0.324 MPa) yaklaşık 2 kat daha yüksektir. Ancak, PÇ 42.5 yerine kısmen %10-30 oranlarında C kullanılarak hazırlanan macun dolgu örneklerinde, 90 günlük kür süresi sonunda hiçbir dayanım kaybı olmadığı ve en yüksek dayanımın 90 günlük kür süresi sonunda PÇ 42.5 yerine kısmen %10 C içeren örneklerde (0.873 MPa) olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan PÇ 42.5 yerine belirli oranlarda mineral katkı maddesi olarak kısmen (%10-30) C kullanımının, A ve B kullanımına göre daha uygun olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum, C'nin özgül yüzey alanının (7710 cm²/g), SiO₂+Al₂O₃ (%79) ve reaktif SiO₂ (55.88 ~ %89) içeriğinin yüksek ve camsı faz yapıda olması nedeniyle yüksek puzolanik etkinliğe sahip olmasıyla açıklanabilir (bkz. Çizelge 3 ve 5).

Özellikle PÇ 42.5 kullanılarak hazırlanan örneklerde gerçekleşen dayanım kaybı; PÇ 42.5'nun C₃A içeriğinin yüksek olması nedeniyle sülfat atağa karşı dayanıksız olmasına, ortamdaki klinker miktarının azalmasına ve atık olarak kul-

lanılan malzemenin baskın olarak pirit minerali (FeS₂) içermesine bağlanabilir (Benzaazoua vd., 1999; Neville, 2000). Şekil 6, yeraltına yerleştirilen sülfür ve sülfatça zengin taze çimento lu macun dolguda gelişen hidrasyon ve zamanla bozunma süreçlerini göstermektedir (Belem ve Benzaazoua, 2007). Yerleştirilen dolgu içerisinde, öncelikle OH⁻ iyonlarının salınımı gerçekleşmekte ve açığa çıkan iyonlar ortamın pH'nının 12-13 arasında kalmasını sağlamaktadır. Hidrasyon işleminin gerçekleşmesiyle birlikte sırasıyla; birincil etrenjit, portlandit, macun dolgunun dayanım kazanmasını sağlayan C-S-H jeli ve alçıtaşı oluşumu gerçekleşmektedir. Bu çalışmada olduğu gibi, ortamdaki sülfürlü minerallerin (pirit vb.) su ve oksijen varlığında oksidasyona uğramasıyla oluşan sülfat (SO₄²⁻) ve asit (H⁺), genişleme özelliğine sahip ikincil alçıtaşı ve etrenjit minerallerinin oluşmasına, ortamdaki portlanditin (Ca(OH)₂) çözünmesine ve C-S-H jelinin bağlayıcılık özelliğini yitirmesine neden olduğu düşünülmektedir. Bunun sonucunda dolgu içerisinde meydana gelen çatlak-



Şekil 6. Macun dolguda hidrasyon ve bozunma sürecinin şematik gösterimi (Belem ve Benzaazoua, 2007'den değiştirilerek alınmıştır).

Figure 6. Schematic diagram of the hydration and decomposition process in paste backfill (modified after Belem and Benzaazoua, 2007).

lar, macun dolguda dayanım ve duraylılık kaybına yol açmaktadır.

PÇ 42.5 yerine kısmen kullanılan uygun mineral katkı maddeleri ile hidrasyon sonucu açığa çıkan portlanditin (Ca(OH)_2) puzolanik tepkimesi sonucu oluşan ilave C-S-H jelleri, daha düşük porozite ve boşluk oranına sahip macun dolgu oluşumuna katkıda bulunmaktadır. Porozite ve boşluk oranının düşük olması, dolgu içerisine nem ve oksijen girişini engellemekte ve duraylılık kaybına neden olabilecek sülfat atak oluşumunu önlemektedir.

SONUÇLAR

Doğal puzolan özelliklerinin macun dolgunun dayanım ve duraylılığına etkisini araştırmak amacıyla %5 çimento oranı ve %77 katı oranında (17,78 cm slump) bağlayıcı olarak PÇ 42,5 ve PÇ 42,5 yerine belli oranlarda (ağırlıkça %30'a kadar) A, B ve C kullanılarak hazırlanan macun dolgu örneklerinin 90 günlük tek eksenli basınç dayanımı deneylerinden aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Deneylerde kullanılan atık malzemenin pirit içeriğinin yüksek olması, zamanla piritin oksidasyonuna yol açmış ve sülfat atak nedeniyle PÇ 42,5 kullanılarak hazırlanan örneklerde 90 günlük kür süresi sonunda %8'lik bir dayanım kaybı oluşmuştur.

90 günlük kür süresi sonunda en yüksek dayanım kazanımını %10 C içeren macun dolgu örneklerinin sağladığı görülmüştür.

Portland çimentosu yerine belirli oranlarda mineral katkı maddesi olarak kullanılacak doğal puzolanik maddelerin fiziksel (özgül yüzey alan), kimyasal ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ ve reaktif SiO_2 içeriği) ve mineralojik özelliklerinin (camsı faz vb.) macun dolgunun dayanım ve duraylılığı üzerinde önemli bir etkiye sahip oldukları anlaşılmıştır.

PÇ 42.5 yerine mineral katkı maddesi olarak belirli oranlarda kısmen puzolanik özelliğe sahip doğal puzolanların (A ağırlıkça %10'a kadar; B ağırlıkça %20'ye kadar ve C ağırlıkça %30'a kadar) kullanımının macun dolgu duraylılığını artırdığı, ancak bu sonuçların uzun dönemde (360 güne kadar) yapılacak deneylerle desteklenmesi ve ekonomik açıdan maliyet analizlerinin yapılması gerektiği anlaşılmıştır.

Sülfür içeriği yüksek atıklardan hazırlanan ma-

cun dolgunun uzun dönemde sülfat atağa karşı duraylılığını yitirmemesi, hem yeraltında oluşabilecek göçükleri ve iş gücü kayıplarını önleyecek hem de çimento tüketimini azaltacak ve daha ekonomik bir dolgu uygulamasını mümkün kılacaktır. Bu çalışma da, uzun dönemde macun dolgunun duraylılığını yitirmemesi için puzolanik özelliğe sahip mineral katkı maddeleri kullanımının yararlı olduğunu ortaya koymuştur.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma, 2005.112.008.1 No'lu Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi, 107M183 No'lu TÜBİTAK Bilimsel Araştırma Projesi ve 2005.200.200.02 No'lu DPT Projesi tarafından desteklenmiştir. Ayrıca, yazarlar katkılarından dolayı Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Şakir ERDOĞDU'ya teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- Alp, İ., Deveci, H., Yılmaz, E., Yılmaz, A.O., and Kesimal, A., 2003. Investigation of the potential use of the quarry product from Taşhane-Terme as trass raw material in cement industry. Proceedings of the International Symposium on Industrial Minerals and Building Stones, Istanbul, 553-559.
- Archibald, J.F., Chew, J. L., and Lausch, P., 1999. Use of ground waste glass and normal Portland cement mixtures for improving slurry and paste backfill support performance. CIM Bulletin, 92 (1030), 74-80.
- ASTM C 39., 2002, Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens, Annual Book of American Standard of Testing Materials Standards, United States.
- Bakharev, T., Sanjayan J.G., and Cheng, Y.B., 2002. Sulfate attack on alkali-activated slag concrete. Cement and Concrete Research, 32 (2), 211-216.
- Belem, T., and Benzaazoua, M., 2007. Design and application of underground mine paste backfill technology. Geotechnical and Geological Engineering, DOI. 10.1007/s10706-007-9154-3.

- Benzaazoua, M., Ouellet, J., Servant, S., Newman P., and Verburg, R., 1999. Cementitious backfill with high sulfur content: physical, chemical, and mineralogical characterization. *Cement and Concrete Research*, 29 (5), 719-725.
- Benzaazoua, M., Belem, T., and Bussiere, B., 2002. Chemical factors that influence the performance of mine sulphidic paste backfill. *Cement and Concrete Research*, 32 (7), 1133-1144.
- Brackebusch, F.W., 1994. Basics of paste backfill systems. *Mining Engineering*, 46 (10), 1175-1178.
- Çavdar, A., and Yetgin, Ş., 2007. Availability of tuffs from northeast of Turkey as natural pozzolan on cement, some chemical and mechanical relationships. *Construction and Building Materials*, 21(12), 2066-2071.
- De Souza, E., Archibald, J.F., and Dirige, A. P. E., 2003. Economics and perspectives of underground backfill practices in Canadian mining. 105th Annual General Meeting of the Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 15 p.
- Erçikdi, B., Kesimal, A., Yılmaz, E., and Devenci, H., 2003. Effect of desliming on the strength of paste backfill. *Proceedings of the 10th Balkan Mineral Processing Congress, Mineral Processing in the 21st Century, Varna, Bulgaria*, 850-857.
- Erdoğan, T.Y., 2003. *Beton*. ODTÜ Yayıncılık, Ankara.
- Fall, M., and Samb, S.S., 2006. Influence of curing temperature on strength, deformation behaviour and pore structure of cemented paste backfill at early ages. *Construction and Building Materials*, uildmat.2006.08.010.
- Fall, M., and Benzaazoua, M., 2005. Modelling the effect of sulphate on strength development of paste backfill and binder mixture optimization. *Cement and Concrete Research*, 35 (2), 301-314.
- Hassani, F. P., Ouellet, J., and Hossein, M., 2001. Strength development in underground high sulphate paste backfill operation. *CIM Bulletin*, 94 (1050), 57-62.
- Kesimal, A., Erçikdi, B., and Yılmaz, E., 2003. The effect of desliming by sedimentation on paste backfill performance. *Minerals Engineering*, 16, 1009-1011.
- Kesimal, A., Yılmaz, E., and Erçikdi, B., 2004. Evaluation of paste backfill test results obtained from different size slumps with varying cement contents for sulphure rich mill tailings. *Cement and Concrete Research*, 34 (10), 1817-1822.
- Kesimal, A., Yılmaz, E., Erçikdi, B., Devenci, H., and Alp, İ., 2005. Effect of properties of tailings and binder on the short- and long-term strength and stability of cemented paste backfill. *Materials Letters*, 59 (28), 3703-3709.
- Klein, K., and Simon, D., 2006. Effect of specimen composition on the strength development in cemented paste backfill. *Canadian Geotechnical Journal*, 43, 310-324.
- Kosmatka, S.H., Panarese, W.C., and Gissing K.D., 1995. *Design and control of concrete mixtures*. Sixth Edition Canadian Portland Cement Association.
- Landriault, D.A., 1995. Paste backfill mix design for canadian underground hard rock mining. 97th Annual General Meeting of the CIM Rock Mechanics and Strata Control Session, Halifax, Nova Scotia, 652 p.
- Landriault, D., 2001. Backfill in underground mining. In: Hustrulid, W.A. (ed.), *Underground Mining Methods Engineering Fundamentals and International Case Studies*, SME, USA, 608- 609.
- Neville, A.M., 2000. *Properties of concrete*. Prentice Hall, London, England.
- Ouellet, S., 2006. Mineralogical characterization, microstructural evolution and environmental behaviour of mine cemented paste backfills. PhD Thesis, Quebec University, Canada.
- Papadakis, V. G., Antiohos, S., and Tsimas, S., 2002. Supplementary cementing materials in concrete Part II: A fundamental estimation of the efficiency factor. *Cement and Concrete Research*, 32, 1533-1538.

- Petrolito, J., Anderson, R. M., and Pigdon, S. P., 2005. A review of binder materials used in stabilized backfills. *CIM Bulletin*, 98 (1085), 1-7.
- Santhanam, M., Cohen, M.D., and Olek, J., 2001. Sulfate attack research whither now?. *Cement and Concrete Research*, 31 (6), 845-851.
- Sargeant, A., De Souza, E., and Archibald, J., 2007. The application of post-consumer glass as a cementing agent in mine backfill. *Proceedings of the 9th International Symposium on Mining with Backfill*, Montreal, Quebec, Canada, 84-97.
- Taylor, H. F. W., 1990. *Cement chemistry*. 3rd edition, Academic Press, Harcourt Brace Jovanovich, London, England.
- TS 25, 1975. *Tras. Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS, 2002. *Çimento deney metotları*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Türkmenoğlu, A. G., and Tankut, A., 2002. Use of tuffs from central Turkey as admixture in pozzolanic cements: assesment of their petrographical properties. *Cement and Concrete Reserach*, 32 (4), 629-637.
- Yılmaz, E., Kesimal, A., ve Erçikdi, B., 2003. Macun dolgu dayanımını ve duraylılığını etkileyen faktörler. *Yerbilimleri*, 28, 155-169.
- Yılmaz, E., Kesimal, A., ve Erçikdi, B., 2004. Asit üreten sülfidik maden atıklarının macun dolgu olarak değerlendirilmesi. *İstanbul Üniversitesi Yerbilimleri Dergisi*, 17 (1), 11-19.
- Yılmaz, E., El Aatar, O., Belem, T., Benzaazoua, M., and Bussiere, B., 2006. Effect of consolidation on the performance of cemented paste backfill. *Proceedings of the 21st Annual Underground Mine Support Conference, AMQ, Val d'Or, Quebec, Canada*, 142-149.

