

DRENAJ KOŞULLARININ MACUN DOLGU DAYANIMINA ETKİSİ

Effect of Drainage Conditions on the Strength of Paste Backfill

Geliş (received) 04 Şubat (February) 2008; Kabul (accepted) 12 Mart (March) 2008

Bayram ERÇIKDI (*)
Ferdî CİHANGİR (**)
Ayhan KESİMAL (***)
Hacı DEVECİ (****)
İbrahim ALP (*****)

ÖZET

Yeraltı üretim boşluklarına yerleştirilen macun dolgunun dayanımı (in-situ) ile yeraltına benzer kür, sıcaklık ve nem koşulları altında laboratuvarında hazırlanan macun dolgu numunelerinin dayanımı çoğu kez farklılık arz etmektedir. Bu durum, muhtemelen dolgunun kendi ağırlığı ile oluşan konsolidasyon etkisi, drenaj koşulları ve sıkıştırma basıncından kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada, drenaj koşullarının macun dolgunun kısa ve uzun dönem dayanım ve durabilitesine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, sülfür içeriği yüksek maden atıklarından üretilen macun dolgu numuneleri drenajlı (delikli) ve drenajsız (deliksiz) silindir numune kalıplarına dökülerek 7-360 gün kür süreleri sonunda tek eksenli basınç testine tabi tutulmuştur. Elde edilen deney sonuçlarından drenajlı macun dolgu numunelerinin dayanımının drenajsız numunelere göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca, atık, bağlayıcı (Portland Çimento, PC 42,5; ve Yüksek Fırın Cürufu, YFC) ve karışım suyunun fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri detaylı olarak incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Drenaj, Macun Dolgu, Pozolan, Basma Dayanımı

ABSTRACT

The mechanical strength of paste backfill placed in underground openings (i.e. mine stopes) is often different from the one predicted in laboratory studies even under similar curing conditions of temperature and humidity. This observation is probably due to the specific self weight-consolidation of backfill, drainage conditions and confinement pressure encountered in the backfilled stopes. In this study, the effect of drainage conditions on the short-and-long term strength and stability of paste backfill was investigated. For this reason, paste backfill samples produced from mine tailings with relatively high sulphide content were placed into normal non-perforated cylinders and bottom perforated plastic cylinders providing drainage conditions and then unconfined compressive strength tests were performed on these samples after 7-to-360 days of curing periods. From the results of experiments, it has been observed that the unconfined compressive strength values of drained paste backfill samples are higher than normal ones. The physical, chemical and mineralogical characteristics of the tailings, binders (Portland Cement, PC 42,5 and Blast Furnace Slag, BFS) and mixing water used were also examined in detail.

Keywords: Drainage, Cemented Paste Backfill, Pozzolan, Compressive Strength

(*) Öğr. Gör. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Müh. Fak., Maden Müh. Bölümü, TRABZON, bercikdi@ktu.edu.tr

(**) Araş. Gör. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Müh. Fak., Maden Müh. Bölümü, TRABZON,

(***) Prof. Dr. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Müh. Fak., Maden Müh. Bölümü, TRABZON,

(****) Doç. Dr. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Müh. Fak., Maden Müh. Bölümü, TRABZON,

(*****)Yard. Doç. Dr. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Müh. Fak., Maden Müh. Bölümü, TRABZON,

1. GİRİŞ

Son yıllarda özellikle çevresel açıdan zararlı maden atıklarının (sülfürlü, vb.) yeraltında madeni alınmış boşluklara güvenli bir şekilde depolanması; emniyetli çalışma koşullarının oluşturulması, topukların kazanılması, tavan tahkimatının sağlanması ve yüzeydeki muhtemel oturumların engellenmesi bakımından önem arz etmektedir (Landriault, 1995; Grice, 2001; Benzaazoua vd, 2002; Kesimal vd, 2005). Sülfürlü atıkların atmosferik koşullarda depolanması sonucu ortaya çıkacak çevresel sorunlar (asidik maden suyu oluşumu, ağır ve toksik metallerin yeraltı/içme sularına karışma riski, suda yaşayan canlıların zarar görmesi ve tarım arazilerinin elverişsiz duruma gelmesi gibi) atıkların yeraltında daha güvenli biçimde depolanmasıyla büyük ölçüde önlenmektedir (Brackebusch, 1994; Strömberg, 1997; Hassani ve Archibald, 1998; Bussiere vd, 2004; Kesimal vd, 2004; Fall vd, 2008). Yeraltı maden sahalarında yaygın olarak kaya dolgu, hidrolik dolgu ve macun dolgu yöntemleri kullanılmaktadır. Madencilik endüstrisinde macun dolgu yöntemi oldukça yeni bir teknolojidir. İlk olarak 1980 yılında Almanya'da Grund Madeninde kullanılmış ve başarısından dolayı dünyada en geniş şekilde uygulanan dolgu yöntemlerinden bir tanesi olmuştur. Kullanımı özellikle Kanada ve Avustralya yeraltı madenciliğinde çok yaygın olan macun dolgu teknolojisi, son yıllarda hem hidrolik ve kaya dolgusuna kıyasla düşük işletme maliyeti ve hem de cevher zenginleştirme atıklarının tamamının yeraltında depolanabilir olması ve böylece atık depolama ve rehabilitasyon maliyetlerinin önemli ölçüde azalması nedeni ile günümüzde diğer ülkeler tarafından da tercih edilmeye başlanmış ve ülkemizde kullanımı henüz yeni olup 2000 yılında Çayeli Bakır İşletmesi'nde uygulanmaya başlanmıştır (Yumlu, 2001; Landriault, 2006; Sivakugan vd, 2006).

Macun dolgu, oldukça kompleks bir malzeme olup yüksek yoğunluklu tesis atıkları (tane boyut dağılımı ve özgül ağırlığa bağlı olarak %75–85 katı oranında), dolgunun stabilitesini sağlamak için bağlayıcı ve hidratasyon işlemi ve yeraltı üretim boşluklarına istenen kıvamda taşınmasını sağlamak için ilave edilen karışım suyundan oluşmaktadır (Brackebusch, 1994; Landriault, 1995). Macun dolguyu oluşturan atık, bağlayıcı ve karışım suyunun fiziksel, kimyasal ve mineralojik karakteristikleri dolgunun hem

kısa ve uzun dönemdeki dayanım, durabilite ve deformasyon özelliklerini belirlemekte ve hem de yeraltına taşınmasında etkin rol oynamaktadır (Benzaazoua, 1999; Kesimal vd, 2002; Kesimal vd, 2003).

Sertleşmiş macun dolguda en önemli kalite kriteri dolgunun mekanik özelliğidir. Yeraltı üretim boşluklarına yerleştirilen macun dolgunun duraylılığı, yan odaların üretimi esnasında çalışanların emniyeti ve cevher seyrilmesini önleme bakımından büyük önem arz etmektedir. Çünkü, yeraltında meydana gelecek göçükler çevresel problemlere (tasman vb.), iş gücü kaybına ve üretim veriminin azalmasına neden olacaktır. Belli bir kür süresi sonunda sertleşmiş veya sertleşmekte olan macun dolgunun dayanımı, uygulamasının ucuz ve madenlerde rutin olarak kullanılmasından dolayı pratikte tek eksenli basınç testi ile değerlendirilmektedir (Mitchell vd, 1982; Fall vd, 2005). Yeraltı üretim boşluklarına yerleştirilen macun dolgunun işlevine göre istenen tek eksenli basınç dayanım değerleri farklılık arz etmektedir. Örneğin, erken kür sürelerinde macun dolgunun sıvılaştırma (liquefaction) riskini azaltmak ve macun dolgu barikatlarının zarar görmesini engellemek için 24 saatlik kür süresi sonunda yeraltına yerleştirilen macun dolgunun en az 0,15 MPa dayanım kazanması gereklidir (Bloss, 2002; Been vd, 2002; Roux vd, 2004). Kes-doldur madenciliğinde ise macun dolgunun yeraltında kendi stabilitesini sağlayabilmesi için 28 günlük kür süresi sonucunda en az 0,7 MPa'lık basınca sahip olması istenmektedir (Brackebusch, 1994; Landriault, 1995).

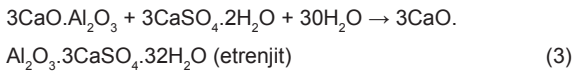
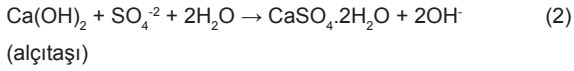
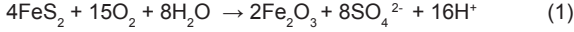
Bu çalışmada, yeraltı drenaj koşullarının macun dolgu dayanımına etkisini değerlendirmek amacıyla laboratuvar koşullarında hazırlanan macun dolgu karışımı, drenajlı ve drenajsız (çoğu uygulamada olduğu gibi) silindir kalıplara dökülerek belli kür süreleri sonunda dayanım testleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır.

2. MACUN DOLGU DAYANIMINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Macun dolgunun dayanımını birçok faktör etkilemekte ve bu faktörler iç ve dış etkenler olmak üzere başlıca iki sınıf altında toplanmaktadır (Benzaazoua vd, 2004). İç etkenler dolguyu

oluşturan her bir bileşenin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri ile ilgilidir (Brackebusch, 1994; Landriault, 1995; Benzaazoua vd, 2002). Dış etkenler ise macun dolgu ile doldurulan yeraltı üretim boşluğunun yan kayaç ile etkileşimi (yanal basınçlar vb.), konsolidasyon etkisi, drenaj koşulları, patlatma kaynaklı titreşimler ve kür koşulları (sıcaklık, nem) ile ilgilidir (Erçikdi vd, 2003; Fall ve Samb, 2006; Yılmaz vd, 2006).

İç etkenlerin en önemlisi atık malzemenin mineralojik yapısıdır. Atık içerisinde bulunan sülfürlü mineraller (özellikle pirit gibi) su ve oksijen varlığında oksitlenerek (Eşitlik 1) asit ve sülfat oluşumuna neden olmaktadır. Açığa çıkan sülfat, hidrasyon sonucu açığa çıkan kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2 , portlandit) ile reaksiyona girerek genleşme özelliğine sahip alçıtaşı (Eşitlik 2) ve etrenjit (Eşitlik 3) oluşturmaktadır (Annor, 1999; Santhanam vd, 2001; Yılmaz vd, 2003). Genleşme özelliğine sahip alçıtaşı ve etrenjit, dolgu içinde çatlakların oluşumuna yol açarak macun dolgunun dayanım kaybetmesine ve yapısal bütünlüğünün bozulmasına neden olmaktadır (Landriault, 1995; Bakharev vd, 2002).



Bir diğer önemli iç etken dolguya ilave edilen çimento miktarıdır. Bilindiği gibi ilave edilen çimento miktarı arttıkça macun dolgu dayanım ve duraylılığı artmaktadır. Ancak, Portland çimento gibi kalsiyumca zengin bağlayıcılar sülfat atağa karşı dayanıksızdır (Neville, 2000). Ayrıca, bağlayıcı maliyetleri (kullanılan çimento miktarına bağlı olarak yaklaşık 1- 5 US \$ / 1 ton macun dolgu) dolgu işletim maliyetlerinin önemli bir kısmını teşkil etmektedir (Grice, 1998; Benzaazoua vd, 2005). Hem bağlayıcı maliyetlerini azaltmak hem de sülfat atağa karşı daha duraylı macun dolgu üretmek amacıyla karışıma uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi puzolanik özelliğe sahip mineral katkı maddeleri ilave edilmektedir.

Macun dolgunun dayanımını etkileyen dış

etkenlerin en önemlisi drenaj ve dolgunun kendi ağırlığı ile oluşan konsolidasyon etkisidir (Wickland ve Wilson, 2005; Belem vd, 2006). Yeraltı üretim boşluğuna yerleştirilen dolgu, drenaj koşullarının iyi olmaması durumunda yüksek porozite ve boşluk oranına sahip olacağından daha düşük dayanım ve durabilite üretmektedir (Benzaazoua vd, 2004). Dolgu karışımının, içerisinde bulunan fazla suyu dışarıya drene edebilme yeteneği aynı zamanda malzemenin tane boyut dağılımı ile de ilgilidir. İri taneli atıklardan (malzemenin ağırlıkça %15-35'i < 20 μm) hazırlanan macun dolgu karışımları ince taneli atıklardan (malzemenin ağırlıkça %60-90'ı < 20 μm) hazırlanan karışımlara nazaran drenaj yoluyla daha fazla su bırakmaktadırlar (Fall vd, 2005). Yeraltına yerleştirilecek macun dolgunun belli bir kür süresi sonunda mekanik açıdan yeterli dayanım kriterini sağladığını tespit etmek amacıyla drenajsız silindir numune kalıpları kullanılarak laboratuvarda yapılan deneysel çalışmaların daha düşük dayanım değerleri ürettiği ve yeraltı koşullarında kür alan macun dolgunun dayanımını tam olarak yansıtmadığı belirtilmektedir (Belem vd, 2002; Roux vd, 2005; Revell, 2004). Ayrıca, araştırmacılar yapmış oldukları deneysel çalışmalarda, yeraltından alınan macun dolgu numunelerinin tek eksenli basınç dayanımının laboratuvarda hazırlanan benzer şartlardaki dolgu numunelerinin dayanımına göre 2 ile 4 kat daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir (Revell, 2004; Belem vd, 2002; Belem vd, 2004; Roux vd, 2005; Ouellet vd, 1998; Cayouette, 1998). Çoğu macun dolgu tesisinde ise yeraltı üretim odalarına yerleştirilen macun dolgunun dayanımını tahmin etmek için daha çok drenajsız kalıplar kullanılarak dayanım testleri gerçekleştirilmektedir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Laboratuvar koşullarında katı oranına göre %5 çimento oranı ve 17,78 cm slump'ta hazırlanan macun dolgu karışımı drenajlı ve drenajsız silindir numune kalıplarına doldurulmuş, 7 ile 360 gün kür süresi sonunda dayanım testleri gerçekleştirilmiştir.

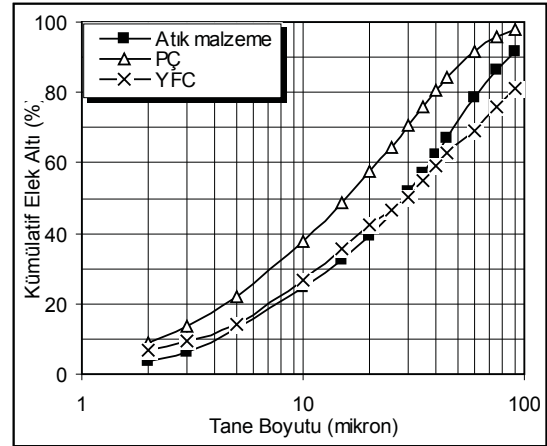
3.1. Atık Malzeme

Toplam 10 ton atık malzemesi macun dolgu tesisi disk filtre çıkışındaki bant konveyör üzerinden alınmış, 500 kg kapasiteli varillere doldurularak

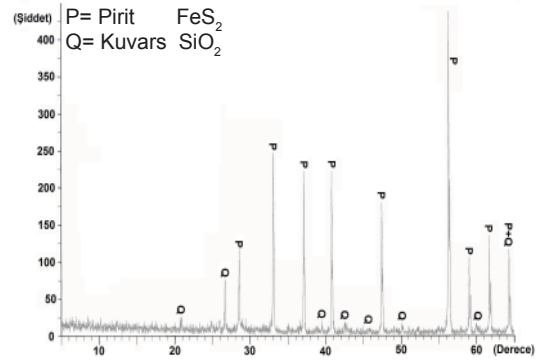
laboratuar ortamına getirilmiş ve herhangi bir sınıflandırmaya tabi tutulmadan deneysel çalışmalarda kullanılmıştır.

Macun dolgunun yeraltına borularla belli bir akışkan kıvamda taşınabilmesi ve sürtünme nedeniyle oluşabilecek aşınma problemlerini önlemek için ortamda koloidal su tutmayı sağlayacak 20 µm altı en az ağırlıkça %15 malzeme olması gerekmektedir. Malvern Mastersizer ile atıklar üzerinde gerçekleştirilen tane boyut dağılımı analizi grafiğinden (Şekil 1) 20 µm altı malzeme miktarının ağırlıkça %40 olduğu görülmektedir. Atık malzeme bu haliyle orta boyutlu macun dolgu malzemesi (malzemenin ağırlıkça %35-60'ı < 20 µm) sınıfına girmekte olup, bu tür atıklar ince ve iri boyutlu atıklara göre nispeten iyi dayanımlı dolgu üretmektedir (Landriault, 1995; Annor, 1999; Kesimal vd, 2003; Erçikdi vd, 2003; Fall vd, 2005). Atık malzemenin özgül ağırlığı ise piknometre kullanılarak 4,087 gr/cm³ olarak belirlenmiştir.

Atık malzemenin kimyasal bileşiminden (Çizelge 1), atığın baskın olarak demir oksit (FeO), sülfür (S) ve silisyum dioksit içerdiği görülmektedir. Ayrıca X-ışınları difraktometre ile yapılan mineralojik analizden (Şekil 2) atığın yüksek oranda pirit ve çok az miktarda kuvars minerali içerdiği saptanmıştır. Pirit içeriğinin yüksek olması yukarıda bahsedilen kimyasal tepkimeler sonucu genişleme özelliğine sahip etrenjit ve alçıtaşı oluşumuna yol açarak dayanım kaybına neden olabilir.



Şekil 1. Deneysel atık malzeme ve bağlayıcıların tane boyut dağılımı.



Şekil 2. Atık malzeme örneğinin XRD profili.

Çizelge 1. Deneysel Kullanılan Atık Malzeme ve Bağlayıcıların Kimyasal Bileşimi (%) ve Fiziksel Özelliği

Element	Atık malzeme	Portland Çimento (PÇ 42.5)	Yüksek Fırın Cürufu)
MgO	1,19	1,15	7,28
Al ₂ O ₃	3,27	5,93	12,60
SiO ₂	11,39	20,31	38,25
CaO	0,95	61,02	37,60
Fe ₂ O ₃	22,92	2,82	0,84
S ⁼	26,22	-	-
K ₂ O	0,23	1,14	0,80
Na ₂ O	0,17	0,32	0,52
SO ₃	2,83	2,95	0,15
Kızdırma kaybı	29,02	3,78	0,12
Toplam	98,19	99,42	97,36
Fiziksel özellikler			
Özgül ağırlık (g/cm ³)	4,09	3,22	2,87
Blaine yüzey alanı(cm ² /g)	3584	4345	3128

3.2. Bağlayıcı Malzeme

Bağlayıcı maliyetleri macun dolgu tesisi işletme maliyetlerinde önemli bir yer teşkil etmektedir. Bu yüzden bağlayıcı maliyetlerini azaltmak ve sülfat atak nedeniyle dayanım ve durabilite kaybını engellemek için mineral ve kimyasal katkı maddeleri kullanılmaktadır. Yapılan deneylerde Portland Çimento (PÇ 42,5) ile Kardemir'den temin edilen Yüksek Fırın Cürufu (YFC) kullanılmıştır. YFC, bağlayıcı fazı içinde PÇ 42,5 yerine ikame olarak %20, 40 ve 60 (YFC: PÇ; 20:80; 40:60; 60:40) oranlarında kullanılmıştır. YFC laboratuvarında önce merdaneli kırıcıdan (-4 mm) geçirilmiş ve daha sonra bilyalı değirmende 3 saat kuru öğütmeye tabi tutularak inceliği $3128 \text{ cm}^2/\text{g}'ye$ getirilmiştir. Öğütme işleminden sonra TS EN 196-2 ve TS EN 196-6 standartlarına göre malzemenin fiziksel ve kimyasal karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir (Şekil 1 ve Çizelge 1).

3.3. Macun Dolgu Numunelerinin Hazırlanması

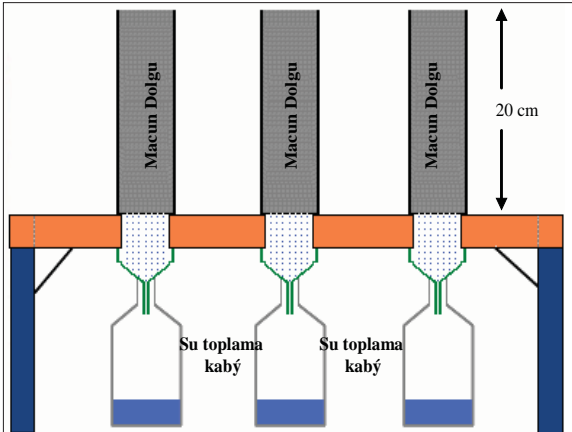
%82 katı oranına sahip cevher atığı, bağlayıcı malzeme ve karışım suyu kullanılarak 17,78 cm slapta ve ağırlıkça %5 çimento oranında 96 adet drenajlı ve 96 adet drenajsız olmak üzere toplam 192 adet macun dolgu numunesi hazırlanmıştır. Bağlayıcı malzeme, karışıma malzemenin 17,78 cm slump çökmeye karşılık gelen katı oranına (%77) göre hesaplanarak ilave edilmiştir. Atığın kendi bünyesinde bulunan su ve katı oranını %77'ye getirmek için ilave edilen musluk suyunun karışımından oluşan nihai durumdaki macun dolgu karışım suyunun pH'ı 7,93 ve SO_4^{-2} konsantrasyonu 1283 mg/L dir. Macun dolgu karışım suyu, SO_4^{-2}

konsantrasyonu göz önüne alınarak etki derecesi yüksek, agresif su sınıfına (DIN 4030) girmekte olup bu tür SO_4^{-2} içeriği yüksek olan sular macun dolgunun dayanım ve durabilitesini olumsuz yönde etkilemektedir (Benzaazoua vd, 2004; Fall ve Benzaazoua, 2005). Karışımın homojen bir şekilde hazırlanması için 20,8 litre kapasiteli mikser kullanılmıştır (Şekil 3). Karıştırma işlemi 2. devirde 7 dakika süreyle yapılmıştır. Hazırlanan macun dolgu karışımı 10 cm çapında ve 20 cm yüksekliğindeki drenajlı ve drenajsız silindir kalıplara dökülmüştür.



Şekil 3. Deneylerde kullanılan mikser ve karıştırma işlemi.

Hazırlanan macun dolgu numuneleri daha sonra madendeki yeraltı nem koşullarını yansıtacak şekilde %80 rutubetli kapalı ortamda 7, 14, 28, 56, 90, 180, 270 ve 360 gün kür sürelerinde bekletilmiştir (Şekil 4). Drenaj koşullarının macun dolgu dayanımına etkisini belirlemek amacıyla hazırlanan numuneler bünyelerindeki fazla suyu dışarıya drene etmeleri için önceden tasarlanan düzenek üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Drenaj düzenek sistemi ve numunelerin kür alması.

3.4. Tek Eksenli Basınç Dayanım Testleri

Toplam 192 adet macun dolgu numunesi, 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 tek eksenli basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. Macun dolgu numunelerinin boy/çap oranı 2 olup, numunelerin alt ve üst yüzeyleri test öncesi düzeltilmiştir. Her bir kür süresi için 3 adet numune test edilmiş olup, sonuçlar bu 3 numuneden elde edilen değerlerin ortalaması olarak alınmıştır.

3.4.1. Kısa Dönem Macun Dolgu Dayanım Test Sonuçları

Şekil 5, ağırlıkça %5 PÇ 42,5 kullanılarak hazırlanan drenajlı ve drenajsız macun dolgu numunelerinin 7, 14, 28 ve 56 gün kür süresi sonunda yapılan tek eksenli basınç dayanımı test sonuçlarını göstermektedir. Şekil 5'den; drenajlı numunelerin drenajsız numunelerden 7 günlük kür süresi sonunda %12,5, 28 günlük kür süresi sonunda ise yaklaşık %10,5 daha yüksek dayanım değerleri ürettiği görülmektedir. 28 günlük kür süresi sonunda drenajlı numuneler 0,713 MPa dayanım değeri üreterek macun dolgunun kendi stabilitesini sağlaması için gerekli limit değerinde dayanım üretmiştir. 56 günlük kür süresi dikkate alındığında ise kür süresi ile birlikte dayanımın sürekli olarak arttığı görülmektedir. 28 günlük kür süresinden 56 güne kadar geçen sürede dayanım değeri drenajlı numunelerde % 16,8, drenajsız numunelerde ise %19,8 oranında artış göstermiştir.

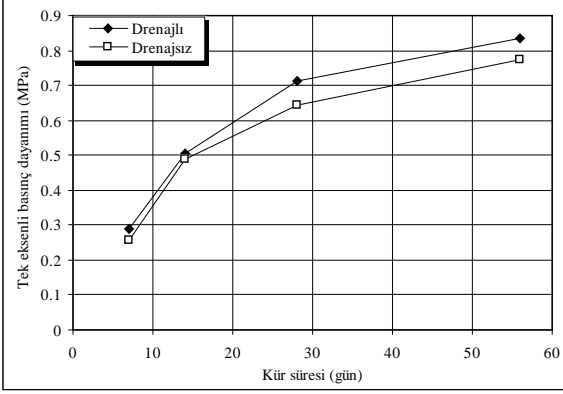
Şekil 6, PÇ 42,5 yerine %20, 40 ve 60 öğütölmüş YFC ikame ederek %5 çimento oranında hazırlanan macun dolgu numunelerinin kısa dönem (56 güne kadar) dayanım sonuçlarını göstermektedir. Şekil 6 incelendiğinde, belirli oranlarda YFC ikame edilerek hazırlanan macun dolgu numunelerinde; YFC ikame oranı arttıkça dayanım kazanımının azaldığı görülmektedir. Ayrıca, toplam bağlayıcı içerisinde YFC ikame oranı arttıkça drenajlı ve drenajsız numuneler arasındaki dayanım farkının azaldığı gözlemlenmiştir. PÇ 42,5 yerine %20 YFC ikame edilerek hazırlanan drenajlı ve drenajsız

numuneler 28 günlük kür süresi sonunda sırasıyla 0,453 ve 0,399 MPa dayanım değerleri üretmiştir. %20 YFC ikameli numuneler ancak 56 günlük kür süresi sonunda 0,7 MPa üzerinde dayanım değeri üretmişlerdir (0,719 MPa). PÇ 42,5 yerine %40 YFC ikame edilerek hazırlanan macun dolgu numuneleri ise 56 günlük kür süresi sonunda 0,380 MPa (drenajlı) ve 0,347 MPa (drenajsız) dayanım üretmiştir. Bu değerler macun dolgunun yeraltında kendi stabilitesini sağlayabilmesi için öngörülen minimum 0,7 MPa değerinden oldukça düşüktür. PÇ 42,5 yerine %60 YFC ikame edilerek hazırlanan drenajlı ve drenajsız macun dolgu numunelerine bakıldığında ise 28 günlük kür süresi sonunda 0,104 ve 0,099 MPa lık bir dayanım ürettiği görülmektedir. Bu şekilde hazırlanarak (%5 çimento oranında ve PÇ 42,5 yerine %60 YFC ikame edilerek) yeraltına yerleştirilecek bir karışımın üretim amacıyla yapılan patlatmaların açığa çıkaracağı titreşimler nedeniyle sıvılaşma (liquefaction) potansiyeline maruz kalması söz konusu olacaktır (Bloss, 2002; Been vd, 2002; Roux vd, 2004). PÇ 42,5 yerine %40 ve 60 YFC ikameli macun dolgu numunelerindeki dayanım kazanımının azalması ortamdaki klinker miktarının azalmasına bağlanabilir. Bilindiği gibi puzolanlar, çok ince öğütöldüklerinde bağlayıcı özelliğe sahip ürünler (C-S-H) oluşturmak için normal sıcaklıklarda ve nem varlığında kimyasal olarak $Ca(OH)_2$ ile reaksiyona giren silisli veya silisli ve alüminli maddeler olarak tanımlanmaktadır (Neville, 1995; Taylor, 1997). Buradaki $Ca(OH)_2$, klinkerin hidratasyonu sonucu açığa çıkmaktadır. Dolayısıyla YFC miktarının artmasıyla ortamda klinker miktarı azalmış ve buna bağlı olarak hidratasyon sonucu ortamda yeterli miktarda kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$) oluşmadığından YFC puzolanik etkinliğini tam olarak gösterememiştir.

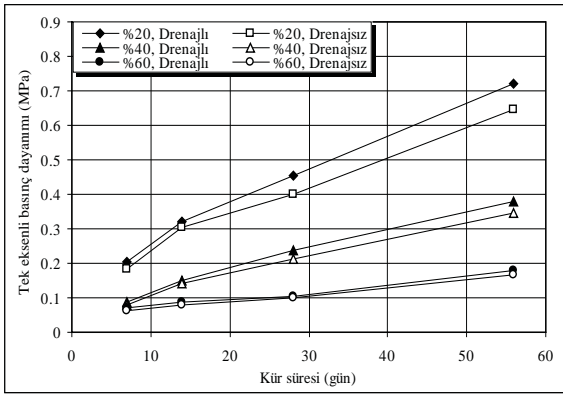
3.4.2. Uzun Dönem Macun Dolgu Dayanım Test Sonuçları

Şekil 7, PÇ 42,5 kullanılarak hazırlanan drenajlı ve drenajsız macun dolgu numunelerinin uzun dönem dayanım sonuçlarını göstermektedir. Şekil 7'den, drenajlı ve drenajsız olarak hazırlanan numunelerin dayanımlarının 56 günlük kür süresinden sonra düşmeye başladığı ve drenajlı ve drenajsız numuneler arasındaki dayanım farkının kür süresi ilerledikçe arttığı görülmektedir. 56-360 günlük kür süresi aralığındaki dayanım

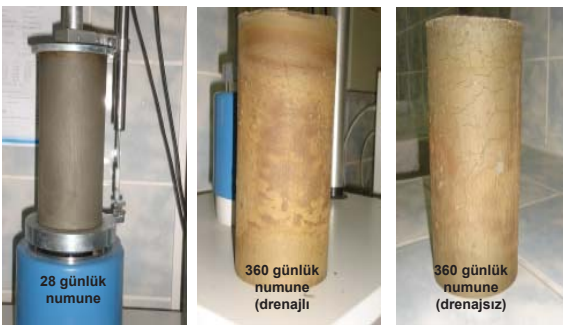
farkı drenajlı numunelerde %24,6, drenajsız numunelerde ise %44,5 dir. Drenajlı ve drenajsız olarak hazırlanan macun dolgu numunelerindeki dayanım kaybı, muhtemelen dolgu malzemesi içerisindeki sülfürlü minerallerin varlığı (pirit) ve karışım suyunun SO_4^{-2} konsantrasyonunun yüksek olmasıdır.



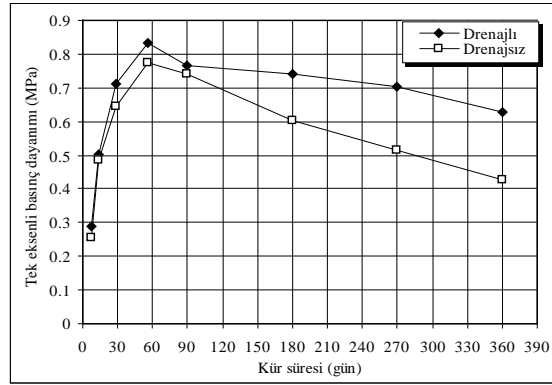
Şekil 5. Portland Çimento kullanılarak hazırlanan drenajlı ve drenajsız numunelerin kısa dönem (56 gün) tek eksenli basınç dayanımı.



Şekil 6. Yüksek Fırın Cürufu kullanılarak hazırlanan drenajlı ve drenajsız numunelerin kısa dönem (56 gün) tek eksenli basınç dayanımı.

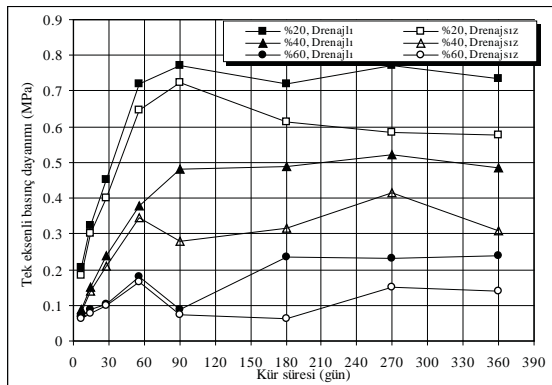


Şekil 8. 28 ve 360 gün küresi sonundaki Portland Çimento kullanılarak hazırlanan drenajlı ve drenajsız macun dolgu numuneleri.



Şekil 7. Portland Çimento kullanılarak hazırlanan drenajlı ve drenajsız numunelerin uzun dönem (360 gün) tek eksenli basınç dayanımı.

Çünkü, piritin su ve oksijen varlığında oksidasyona uğrayarak ortamda asit ve SO_4^{-2} oluşturması ve devamındaki kimyasal reaksiyonlar (Eşitlik 1, 2 ve 3) genleşme özelliğine sahip etrenjit ve alçıtaş gibi ikincil minerallerin oluşmasına neden olmaktadır. Sülfat atak olarak da adlandırılan bu kimyasal reaksiyonlar macun dolgu numunelerinde çatlak oluşumuna ve duraylılık kaybına neden olmuştur. PÇ 42,5 kullanılarak hazırlanan numunelerde 28 gün kür süresi sonunda herhangi bir çatlak gelişmediği, ancak 360 günlük kür süresi sonunda drenajlı numunelerde nispeten daha az, drenajsız numunelerde ise ciddi çatlakların oluştuğu görülmektedir (Şekil 8). Drenajlı numunelerdeki dayanım kaybının drenajsız numunelere göre daha az olması ortamdaki fazla suyun drenaj yoluyla uzaklaştırılması ve böylece daha düşük porozite ve boşluk oranına sahip dolgunun oluşması ve çimento taneleri ile atık taneleri arasındaki daha iyi etkileşime bağlanabilir. Ayrıca fazla suyun drene edilmesi ortamdaki alüminat (C_3A) ve kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$) ile reaksiyona girecek sülfat (SO_4^{-2}) konsantrasyonunda da azalma sağlamıştır.



Şekil 9. Yüksek Fırın Cürufu kullanılarak hazırlanan drenajlı ve drenajsız numunelerin uzun dönem tek eksenli basınç dayanımı.

Şekil 9, PÇ 42,5 yerine %20, 40 ve 60 oranında öğütülmüş YFC ikamesiyle hazırlanan macun dolgu numunelerinin uzun dönem dayanım sonuçlarını göstermektedir. PÇ 42,5 ile hazırlanan numunelerde olduğu gibi PÇ 42,5 yerine belli oranlarda YFC ikame edilerek hazırlanan drenajlı ve drenajsız numunelerde de dayanım farkının uzun dönemde arttığı görülmektedir. YFC'nun puzolanik özelliği nedeniyle dayanım kazanımının %20 cüruf ikameli numunelerde 90 güne kadar, %40 cüruf ikameli numunelerde 270 güne kadar, %60 cüruf ikameli numunelerde ise 180 güne kadar devam ettiği ve duraylılıklarını nispeten korudukları görülmektedir. Yapılan deneysel çalışmalardan % 5 çimento oranı ile dayanım kazanımının oldukça düşük olması nedeniyle öğütülmüş YFC'nun PÇ 42,5 yerine %40 ve üzeri YFC ikamesinin sülfür içeriği yüksek atıklar için uygun olmadığı anlaşılmıştır. %20 YFC ikameli macun dolgu numuneleri 90 ve 360 günlük kür süreleri sonunda sırasıyla 0,772 ve 0,736 MPa dayanım değeri elde etmiş, dayanım kaybının ise sadece %4,7 olduğu görülmüştür. Aynı kür süreleri sonunda drenajsız numunelerdeki dayanım kaybı ise %20 civarında olmuştur. YFC puzolanik özelliği nedeniyle PÇ 42,5'in hidratasyonu sonucu oluşan kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek bağlayıcılık özelliğe sahip C-S-H jeli oluşturduğu ve çimento ile atık taneleri arasında daha iyi etkileşim sağladığı anlaşılmaktadır.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Drenaj koşullarının macun dolgu dayanımına etkisini araştırmak amacıyla %5 çimento oranı ve %77 katı oranında (17,78 cm slamp) bağlayıcı olarak PÇ 42,5 ve PÇ 42,5 yerine belli oranlarda YFC kullanarak hazırlanan drenajlı ve drenajsız macun dolgu numunelerinin kısa ve uzun dönem basınç dayanımı testlerinden aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Deneyselerde kullanılan atık malzemenin pirit içeriğinin ve karışım suyu sülfat konsantrasyonunun yüksek olması zamanla piritin oksidasyonuna yol açmış ve sülfat atak nedeniyle PÇ 42,5 kullanılarak hazırlanan numunelerde uzun dönemde dayanım kaybı olmuştur.

2. PÇ 42,5 ile %5 çimento oranında drenajlı olarak hazırlanan macun dolgu numunelerinin drenajsız numunelerden 28 günlük kür süresi sonunda %10,5, 360 gün kür süresi sonunda ise %46 daha yüksek dayanım değerleri ürettiği gözlemlenmiştir.
3. Drenaj koşullarının dayanım bakımından kısa dönemde etkisinin az olduğu, uzun dönemde ise daha etkili olduğu belirlenmiştir.
4. PÇ 42,5 yerine %40 ve 60 YFC ikamesinin macun dolgunun yeraltında stabilitesini sağlaması bakımından yeterli dayanım (<0,7 MPa) vermediği, bu yüzden sülfür içeriği yüksek atıklar için %40 ve üzerinde PÇ 42,5 yerine YFC ikamesinin % 5 çimento oranında uygun olmadığı anlaşılmıştır.
5. PÇ 42,5 yerine %20 YFC ikamesinin kısa dönemde PÇ 42,5 ile hazırlanan numunelere göre 56 günlük kür süresi sonunda %16 daha düşük dayanım verdiği, buna karşın 360 günde ise %17 daha yüksek dayanım sağladığı ve puzolanik özelliği nedeniyle sülfat atağa karşı direnç gösterdiği gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak bu çalışma, yeraltına yerleştirilecek olan macun dolgunun dayanım ve durabilitesini tahmin etmek amacıyla laboratuvarında hazırlanacak macun dolgu numunelerinin yeraltı drenaj koşullarını yansıtacak şekilde kür koşullarını geçirmesi ve basınç dayanım testlerinin bu şekildeki numuneler üzerinde yapılması gerektiğini ortaya koymuştur. Aksi halde elde edilecek düşük dayanım değerleri daha fazla çimento sarfiyatına ve işletim maliyetinin artmasına neden olacaktır. Bu yüzden macun dolgu işletim tesislerinin yeraltı drenaj koşullarını göz önüne almasında yarar bulunmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, 2005.112.008.1 No'lu KTÜ Bilimsel Araştırma Projesi, 107M183 No'lu Tübitak Bilimsel Araştırma Projesi ve 2005.200.200.02 No'lu DPT Projesi tarafından desteklenmiştir. Ayrıca yazarlar, katkılarından dolayı Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU'ya teşekkür etmektedir.

KAYNAKLAR

- Annor, A.B., 1999; "A Study of the Characteristics and Behaviour of Composite Backfill Material", PhD Thesis, McGill University, Montreal, 396 s.
- Bakharev, T., Sanjayan J.G. ve Cheng, Y.B., 2002; "Sulfate Attack on Alkali-Activated Slag Concrete", *Cem. Concr. Res.* **32 (2)**, 211-216.
- Been, K., Brown, E.T. ve Hepworth, N., 2002; "Liquefaction Potential of Paste Fill at Neves Corvo Mine, Portugal", *Mining Technology: IMM Trans. Sec. A*, **111 (1)**, 47-58.
- Belem, T., Benzaazoua, M., Bussiere, B. ve Dagenais, A.M., 2002; "Effects of Settlement and Drainage on Strength Development Within Mine Paste Backfill", *Proceedings of the 9th International Conference on the Tailings and Mine Waste, Fort Collins, Colorado*, 139-148.
- Belem T., Harvey A., Simon R. ve Aubertin M., 2004; "Measurement and Prediction of Internal Stresses in an Underground Opening During its Filling with Cemented Fill", *Proc. of 5th International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction, Perth, Australia*, 619 – 630.
- Belem, T., Aatar, E.O., Bussiere, B., Benzaazoua, M., Fall, M. ve Yilmaz, E., 2006; "Characterization of Self-Weight Consolidated Paste Backfill", *Proceedings of the 9th International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Limerick, Ireland*, 333-345.
- Benzaazoua, M., Ouellet, J., Servant, S., Newman P. ve Verburg, R., 1999; "Cementitious Backfill with High Sulfur Content Physical, Chemical, and Mineralogical Characterization", *Cem. and Conc. Res.* **29 (5)**, 719-725.
- Benzaazoua, M. Belem, T. ve Bussiere, B., 2002; "Chemical Factors That Influence the Performance of Mine Sulphidic Paste Backfill", *Cem. Concr. Res.*, **32(7)**, 1133-1144.
- Benzaazoua, M., Fall, M. ve Belem, T., 2004; "A Contribution to Understanding the Hardening Process of Cemented Pastefill", *Min. Eng.* **17(2)**, 141-152.
- Bloss, M., 2002; "Below Ground Disposal (Mine Backfill)", In: Jewell, Fourie, Lord, editors, *Paste and Thickened Tailings: A Guide*, University of Western Australia, 103–26.
- Brackebusch, F.W., 1994; "Basics of Paste Backfill Systems", *Mining Engineering*, **46(10)**, 1175–1178.
- Bussiere, B., Dagenais, A.-M., Mbonimpa, M. ve Aubertin, M., 2002; "Modification of Oxygen-Consumption Testing for the Evaluation of Oxygen Barrier Performance", In: *55th Canadian Geotechnical Conference and 3rd Joint IAHC-CNC and CGS Groundwater Specialty Conferences, Niagara Falls, CD*, 139–146.
- Cayouette, J., 2003; "Optimization of the Paste Backfill Plant at Louvicourt Mine, *CIM Bulletin*, **96 (1075)**, 51-57.
- Erçikdi, B., Kesimal, A., Yılmaz, E. ve Deveci, H., 2003; "Effect of Desliming on the Strength of Paste Backfill", *Proceedings of the X Balkan Mineral Processing Congress, Mineral Processing in the 21st Century, Varna, Bulgaria*, 850-857.
- Erçikdi, B., Kesimal, A. ve Yılmaz, E., 2003; "Blasting Effect on Ore Dilution in Underground Mines", *ICESE-2003, The 3th International Conference on Earth Sciences and Electronics, Istanbul University, Avcılar, İstanbul*, 73-84.
- Fall, M. ve Benzaazoua, M., 2005; "Modeling the Effect of Sulphate on Strength Development of Paste Backfill and Binder Mixture Optimization", *Cem. Concr. Res.* **35 (2)**, 301-314.
- Fall, M., Benzaazoua, M. ve Ouellet, S., 2005; "Experimental Characterization of the Effect of Tailings Fineness and Density on the Quality of Cemented Paste Backfill", *Min. Eng.* **18(1)**, 41–44.
- Fall, M. Ve Samb, S.S. "Influence of Curing Temperature on Strength, Deformation Behaviour and Pore Structure of Cemented Paste Backfill at Early Ages", *Construction and Building Materials*, In Press, Available online 16 October 2006.
- Fall, M., Benzaazoua, M. ve Saa, E. G., 2008; "Mix Proportioning of Underground Cemented Tailings Backfill", *Tunn Undergr Sp Tech*, **23(1)**, 80-90.
- Grice, T., 1998; "Underground Mining with Backfill", *The 2nd Annual Summit on Mine Tailings Disposal Systems, Brisbane, Australia*, 5-15.
- Grice, T., 2001; "Recent Mine Developments in Australia", In: *Proceedings of the 7th International Symposium on Mining with Backfill*, 351-357.
- Hassani, F.ve Archibald, J., 1998; "Mine Backfill", *CD-ROM. CIM Bull.* 263 s.

- Kesimal, A., Yılmaz, E., Erçikdi, B., Alp, İ., Yumlu, M., ve Özdemir, B., 2002; "Çimentolu Macun Dolgunun Laboratuvar Testi", Madencilik, **41 (4)**, 11-20.
- Kesimal, A., Erçikdi, B. ve Yılmaz, E., 2003; "The Effect of Desliming by Sedimentation on Paste Backfill Performance", Miner. Eng, **16(10)**, 1009–1011.
- Kesimal, A., Yılmaz, E. ve Erçikdi, B., 2004; "Evaluation of Paste Backfill Test Results Obtained from Different Size Slumps with Varying Cement Contents for Sulphure Rich Mill Tailings", Cem. Conc. Res., **34(10)**, 1817-1822.
- Kesimal, A., Yılmaz, E., Erçikdi, B., Deveci, H. ve Alp, İ., 2005; "Effect of Properties of Tailings and Binder on the Short- and Long-Term Strength and Stability of Cemented Paste Backfill", Mater. Lett., **59(28)**, 3703-3709.
- Landriault, D.A., 1995; "Paste Backfill Mix Design for Canadian Underground Hard Rock Mining", In: Proc. of the 97th Annual General Meeting of the CIM Rock Mechanics and Strata Control Session, Halifax, Nova Scotia, s. 652.
- Landriault, D.A., 2006; "They Said "It Will Never Work"— 25 Years of Paste Backfill 1981-2006" Proceedings of Ninth International Seminar on Paste and Thickened Tailings", Paste 2006, Australian Centre for Geomechanics, Limerick, Ireland, 277-292.
- Mitchell, R.J., Olsen, R.S. ve Smith J.D., 1982; "Model Studies on Cemented Tailings Used in Mine Backfill", Can. Geotech J, **19(1)**, 14–28.
- Neville, A.M., 1995; "Properties of Concrete", Longman, Essex.
- Neville, A.M., 2000; "Properties of Concrete", Prentice Hall, London, England.
- Ouellet, J., Bidwell, T.J. ve Servant, S., 1998; "Physical and Mechanical Characterization of Paste Backfill by Laboratory and In-Situ Testing", Proceedings of 6th International Symposium on Mining with Backfill. Brisbane, Australia, 249-1253.
- Revell, M.B., 2004; "Paste-How strong is it?", Proceedings of the 8th International Symposium on Mining with Backfill, Beijing, China, 286-294.
- Roux, L.K., Bawden, W.F. ve Grabinsky, M.W., 2004; "Liquefaction Analysis of Early Age Cemented Paste Backfill", Eighth International Symposia on Mining with Backfill (Minefill 2004), Beijing, pp. 233-241.
- Roux, K.A., Bawden, W.F. ve Grabinsky, M.F., 2005; "Field Properties of Cemented Paste Backfill at the Golden Giant Mine", IMM Mineral Technology, **114 (2)**, 65-86.
- Santhanam, M., Cohen, M.D. ve Olek, J., 2001; "Sulfate Attack Research Whither Now?", Cem.and Conc. Res, **31 (6)**, 845-851.
- Sivakugan, N., Rankine, R.M., Rankine, K.J. ve Rankine, K.S., 2006; "Geotechnical Considerations in Mine Backfilling in Australia", Journal of Cleaner Production, **14 (12-13)**, 1168-1175.
- Strömberg, B., 1997; "Weathering Kinetics of Sulphidic Mining Waste: An Assessment of Geomechanical Process in the Aitik Mining Waste Rock Deposits", AFR-Report159, Department of Chemistry, Inorganic Chemistry, Royal Institute of Technology, Sweden, 250 s.
- Taylor, H.F.W., 1997; "Cement Chemistry", Thomas Telford, London.
- TS EN 196-2, 2002; "Çimento Deney Metotları-Bölüm 2: Çimentonun Kimyasal Analizi", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 196-6, 2000, "Çimento Deney Metotları-Bölüm 6: İncelik Tayini", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Yılmaz, E., Kesimal, A. ve Erçikdi, B., 2003; "Macun Dolgu Dayanımını ve Duraylılığını Etkileyen Faktörler", Yerbilimleri, Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni, Hacettepe Üniversitesi, **28(2)**, 155-169.
- Yılmaz, E., El Aatar, O., Belem, T., Benzaazoua, M. ve 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, 14 s.
- Yumlu, M., 2001; "Backfill Practices at Çayeli Mine", Proceedings of the 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey, IMCET 2001, Ankara, 333-339.
- Wickland, B.E. ve Wilson, G.W., 2005; "Self-Weight Consolidation of Mixtures of Mine Waste Rock and Tailings, Can. Geotech. J., **42**, 327–339.