



Macun dolgu dayanımını ve duraylılığını etkileyen faktörler

The factors affecting strength and stability of paste backfill

Erol YILMAZ, Ayhan KESİMAL, Bayram ERÇIKDI

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 61080 TRABZON

ÖZ

Macun dolgu; maden atıkları, su ve çimento karışımından oluşan yüksek yoğunluklu, akışkan, pompalanabilir ve yeraltı ocaklarındaki boşlukları doldurmak için kullanılan bir malzeme olarak tanımlanabilir. Karışımın macun oluşması için taneli malzemenin 20 mikron altı içeriğinin en azından %15 olması gerekir. Dolgu malzemesi içinde ince malzeme oranı arttıkça, macun dolgunun yoğunluğu artmakta ve geçirgenliği de azalmaktadır. Son yıllarda hidrolik ve kaya dolgusuna göre düşük işletme maliyeti ve yüksek dayanım değeriyle macun dolgu yöntemi kullanılmaya başlanmıştır. Bu uygulamanın en büyük üstünlüğü, asitli maden sularının oluşumuna neden olabilen atıkların (kükürt içeren atıklar gibi) yeraltına tahkimat amaçlı depolanarak, çevreye verilebileceği zararların en aza indirilmesi ve cevher zenginleştirme sonucu oluşan atıkların tamamının yeraltına yerleştirilmesidir. Macun dolgu yöntemi dünyada yaygınlaşarak kullanılmasına rağmen, özellikle uzun dönemde dolgu duraylılığında bazı sorunlarla karşılaşmaktadır. Macun dolgunun dayanımı ve duraylılığı, dolgu karışımını oluşturan bağlayıcı, katı malzeme ile suyun özelliklerine ve karışım içerisindeki oranlarına bağlıdır. Bu çalışmada macun dolgu dayanımı ve duraylılığına etki eden faktörler değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Bağlayıcı malzeme, macun dolgu, tek eksenli sıkışma dayanımı, sülfat etkisi, yeraltı ocakları.

ABSTRACT

Paste backfill can be defined as a pumpable, non-newtonian and high density material consisting of mine tailings, water and cement. In general, the granular material must have at least 15% by weight of its particles finer than 20 microns to form a paste. As fine particles in the filling mass increase, the greater density is achieved with reducing permeability. Due to the low operating costs involved and high strength acquisition of paste backfill when compared to the other backfilling methods, the use of paste backfill has steadily increased in recent years. A significant environmental advantage is the disposal of tailings leading to generation of acidic mine water to underground for support and minimizing the environmental effects. Although the paste backfill method is widely used, some problems have been encountered with respect to the long-term stability of the fill material. The factors affecting the strength and stability of paste backfill are the characteristics of binder, solids, and water and their mix rates in the filling mass. In this study, the factors affecting the strength and stability of paste backfill have been evaluated.

Key words: Binder material, paste backfill, uniaxial compressive strength, sulphate attack, underground mines.

GİRİŞ

Yeraltı madenciliğinde uygulanan dolgu işlemi; gerek yeraltı faaliyetlerinin güvenli bir şekilde yapılması, gerekse yüzeyde meydana gelen çökmeleri engelleme açısından büyük bir önem taşımaktadır. Dolgu, yeraltı maden ocaklarında

cevher üretimi sonucu oluşan boşlukları uygun bir malzeme kullanarak, tahkimat sağlamak ve/veya atıkları depolamak amacıyla yapılan bir işlemdir. Dolgu malzemesi olarak genellikle yan kayaç (pasa) ve/veya cevher zenginleştirme atıkları kullanılmaktadır (Grice, 1998; Yılmaz vd., 2003). Bu malzemeler bazen gerekli dolgu

gereksinimini karşılamamakta ve dışarıdan malzeme temini zorunlu olmaktadır. Bu gibi durumlarda veya alternatif dolgu kaynağı olarak derelerden elde edilen kum ve çakıl, taşocaklarından elde edilen agrega ve metalürji tesislerinden üretilen işlem atıkları (cüruf gibi) kullanılmaktadır (Thomas vd., 1979; Arıoğlu, 1983; Brackebusch, 1994; Landriault, 2001). Yeraltı maden sahalarında yaygın olarak kullanılan dolgu tipleri (kaya dolgu, hidrolik dolgu ve macun dolgu) ve özellikleri Çizelge 1'de sunulmuştur.

Kaya dolgusu, cevheri alınmış boşlukları doldurmak için pasa ve çeşitli boyutta agregalardan oluşan bir dolgu tipidir. Hidrolik dolgu uygulaması, malzemenin suyla nakliyesi, üretilen yerin doldurulması, fazla suyun katı dolgu malzemesinden ayrıştırılması ve kalan malzemenin sertleşmesi esasına dayanır (Grice ve Fountain, 1991). Hidrolik dolgu yönteminde, dolgunun nakliyesi için iri tane boyu miktarı ve yerleştirme işlemi sonrası suyun ayrışması için de ince malzeme miktarı önem arz etmektedir (Landriault, 2001). Macun dolgu ise, sınıflandırılmamış tesis atıkları, su ve bağlayıcı (yalnızca çimento ve/veya belli oranda çimento+diğer tras, silis dumanı, cüruf ve uçucu kül gibi puzolanik malzemeler)

karışımından üretilir. Karışım, "macun" özelliğinden dolayı kolayca pompalanabilir ve malzeme Newton dışı davranış gösterir (Brackebusch, 1994; Amaratunga ve Yaschshyn, 1997).

Son yıllarda hidrolik ve kaya dolgusuna göre düşük işletme maliyeti ve yüksek dayanımlı macun dolgu yönteminin yaygınlaşmasında büyük rol oynamıştır (Edwards, 1992; Landriault, 2001; Bloss ve Revell, 2001; Jung ve Biswas, 2002). Cevher zenginleştirme atıklarının tamamının yeraltında depolanabilir olması ve böylece atık depolama ve iyileştirme maliyetlerinin önemli ölçüde azalması macun dolgu yönteminin en önemli avantajlarından. Özellikle kükürt içeren atıkların atmosferik koşullarda depolanması sonucu ortaya çıkacak çevresel sorunlar (asitli maden suyu oluşumu gibi) atıkların yeraltında daha güvenli biçimde depolanmasıyla büyük ölçüde önlenmektedir (Archibald, 1999; Yılmaz vd., 2003).

Macun dolgu yöntemi ülkemizde Çayeli Bakır İşletmelerinde (ÇBİ) 1999 yılından bu yana başarılı bir şekilde uygulanmaktadır (Yumlu, 2001). Dünyada macun dolgu uygulamasının yaygınlaşmasına rağmen, kısa ve uzun dönem-

Çizelge 1. Başlıca dolgu tipleri ve özellikleri, (Hassani vd., 1994; Henderson vd., 1997; Landriault, 2001'den değiştirilerek alınmıştır).

Table 1. Principal backfilling methods and their properties (modified after Hassani et al., 1994; Henderson et al., 1997; Landriault, 2001).

Özellikler	Kaya Dolgu	Hidrolik Dolgu	Macun Dolgu
Katı oranı	% 100	% 60-75	% 75-85
Bağlayıcı	Çimentolu veya çimentosuz	Çimentolu veya çimentosuz	Yalnızca çimentolu
Su/çimento oranı	Su/çimento oranı düşük, bağlayıcı dayanımı yüksek	Su/çimento oranı yüksek, bağlayıcı dayanımı düşük	Su/çimento oranı düşük, bağlayıcı dayanımı yüksek
Sertlik	Yüksek	Düşük	Yüksek ve/ veya düşük
Dayanım	Yüksek	Düşük	Orta
Barikat	Gerekli değil	Pahalı	Ucuz
Nakliye	Nakliye kuyusu ve mobil ekipmanlar	Sondaj kuyusu ve boru hattı	Sondaj kuyusu ve Boru hattı
Tane boyu	> 20 cm	> 20 µm (≥ %90)	< 20 µm (≥ %15)
Yerleştirme hızı	100-400 ton/saat	100-200 ton/saat	50-200 ton/saat
İlk yatırım giderleri	Yüksek	Düşük	Yüksek
İşletme giderleri	Yüksek	Orta	Düşük
Avantajları	Yüksek dayanım, Malzeme temini kolay, Su problemi yok	Malzeme temini ve hazırlanması kolay, Sınıflandırılmış atıklar kullanılır, Kullanımı	Daha az çimento tüketimi, Tüm yaygın atıklar kullanılır, Dolguda çok az su, Uygulanması kolay
Dezavantajları	Yüksek nakliye giderleri, boşlukların yapısı, Tesis atıkları kullanılamaz	Fazlalık suyun üretim yerinden uzaklaştırılması, Yüksek çimento tüketimine karşılık düşük dayanım	İleri teknoloji gerektirir, Pompalama ve susuzlandırma işlemleri nispeten pahalı

de dolgu dayanımı ve duraylılığında bazı sorunlarla karşılaşmaktadır (Ouellet ve Hassani, 2002). Macun dolgunun dayanımı ve duraylılığı; dolgu karışımını oluşturan bağlayıcı, katı malzeme (atık) ve suyun özelliklerine ve karışımdaki oranlarına bağlıdır. Bu çalışmada, macun dolgu yönteminin esasları tartışılmış ve özellikle uzun dönemde dolgu dayanımına ve duraylılığına etki eden mekanik faktörler değerlendirilmiştir.

MACUN DOLGU YÖNTEMİ

Macun dolgu, susuzlandırılmış tesis atıkları (ağırlıkça % 75-85 katı), su ve bağlayıcı karışımından oluşur (Şekil 1). Karışımın "macun" oluşturması için katı atıkların en az % 15'i 20 µm altı ince malzeme içermesi gerekir. İnce malzeme oranı arttıkça macun dolgu yoğunluğu artar ve geçirgenliği azalır.

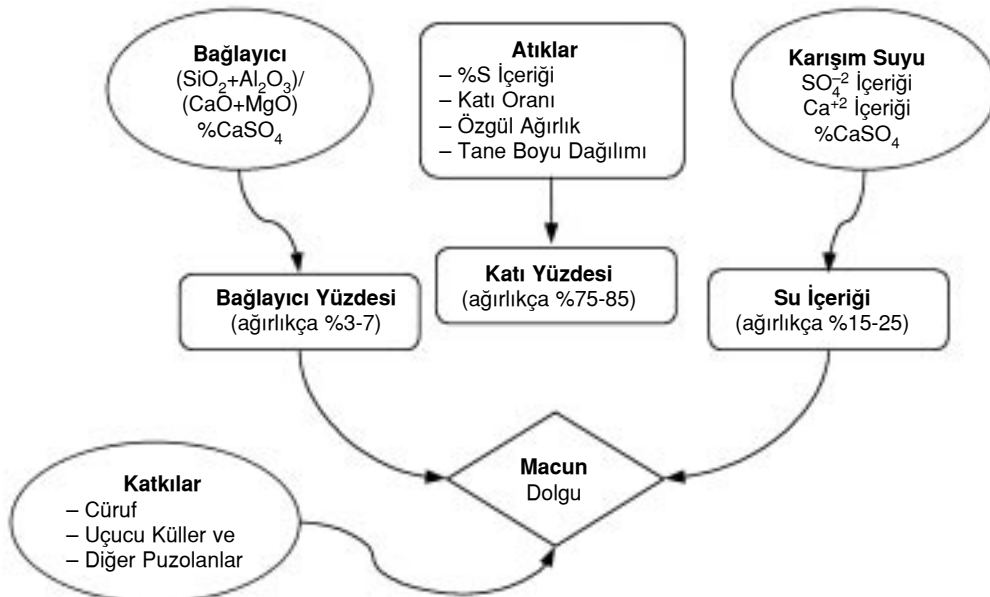
Macun dolgu, ince malzeme içeriğine bağlı olarak geçirgenliğinin çok düşük olmasından dolayı su tutma özelliğine sahip olup, dolgu bünyesinden su kaybı çok düşüktür. Bu nedenle macun dolgu yalnızca bağlayıcı (çimento) kullanılarak uygulanır. Dolgunun dağılmasını önlemek ve duraylılığını sağlamak için ağırlıkça en az % 1.5 bağlayıcı içermesi gerekir (Grice, 1998). Genellikle macun dolgu uygulamalarında dolgu dayanımını ve duraylılığını artırmak için karışıma %

3-7 oranında normal portland çimentosu ve/veya diğer katkıli bağlayıcılar (cüruf gibi puzolanik bağlayıcılar) ilave edilir.

Karışımı oluşturan bileşenlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri (bağlayıcı, atık ve karışım suyunun kimyasal bileşimi, atığın tane boyu dağılımı, özgül ağırlığı ve sülfür içeriği) macun dolgu performansını etkiler (Benzaazoua vd., 1999; Landriault, 2001; Ouellet ve Hassani, 2002; Benzaazoua vd., 2002). Ayrıca, bu bileşenlerin her birinin özellikleri ile dolgunun yeraltı maden ocağına nakliyesi ve yerleştirilmesi, macun dolgunun kısa ve uzun dönemdeki dayanımı açısından önemlidir. Şekil 2'de örnek bir macun dolgu tesisi akım şeması görülmektedir.

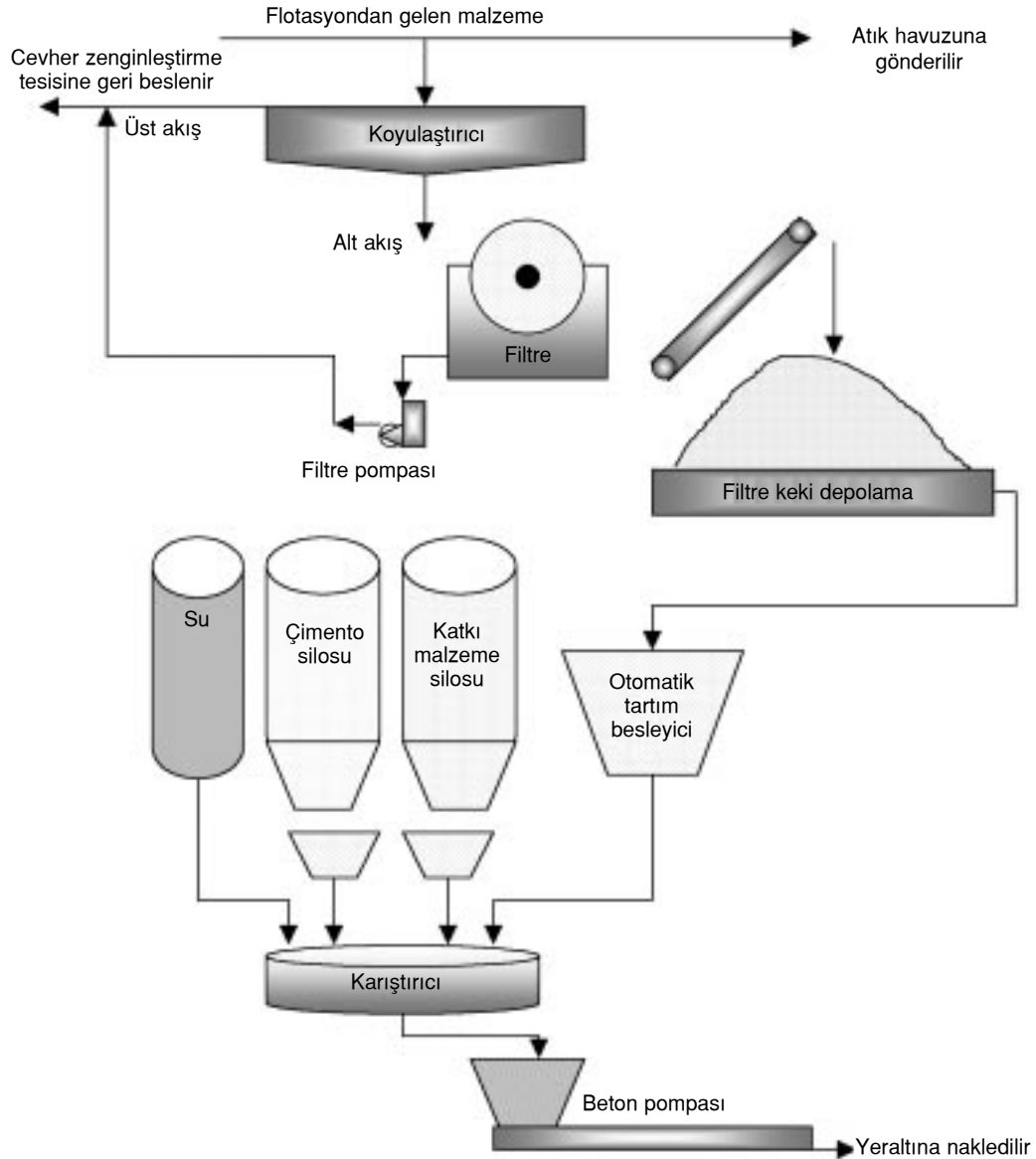
MACUN DOLGU DAYANIMINI VE DURAYLILIĞINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Macun dolgunun mekanik ve zamana bağlı özellikleri tesis atıklarının fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliklerine, kullanılan bağlayıcının tipi ve oranına bağlıdır (Benzaazoua vd., 1999; Chew, 1999; Benzaazoua vd., 2002; Ouellet ve Hassani, 2002; Kesimal vd., 2002a; Hassani vd., 2001). Geçirgenlik, tane boyu dağılımı, tane şekli, çimento/su oranı, karışım suyunun kimyasal bileşimi ve prizlenme süresi dolgu dayanımı üzerinde önemli bir rol oynar (Annor, 1999; Bromfield, 2000).



Şekil 1. Macun dolgu bileşenlerinin şematik gösterimi (Benzaazoua vd., 2002).

Figure 1. Schematic diagram illustrating the components of paste backfill (Benzaazoua et al., 2002).



Şekil 2. Örnek bir macun dolgu tesisi akım şeması.
Figure 2. A typical paste backfill plant flowsheet.

Bağlayıcı (Çimento) Tipi ve Oranı

Macun dolgunun duraylılığını sağlamak ve tahkimat potansiyelini artırmak için çeşitli bağlayıcı malzemeler kullanılmaktadır. Normal portland çimento yaygın olarak kullanılan bağlayıcı türüdür.

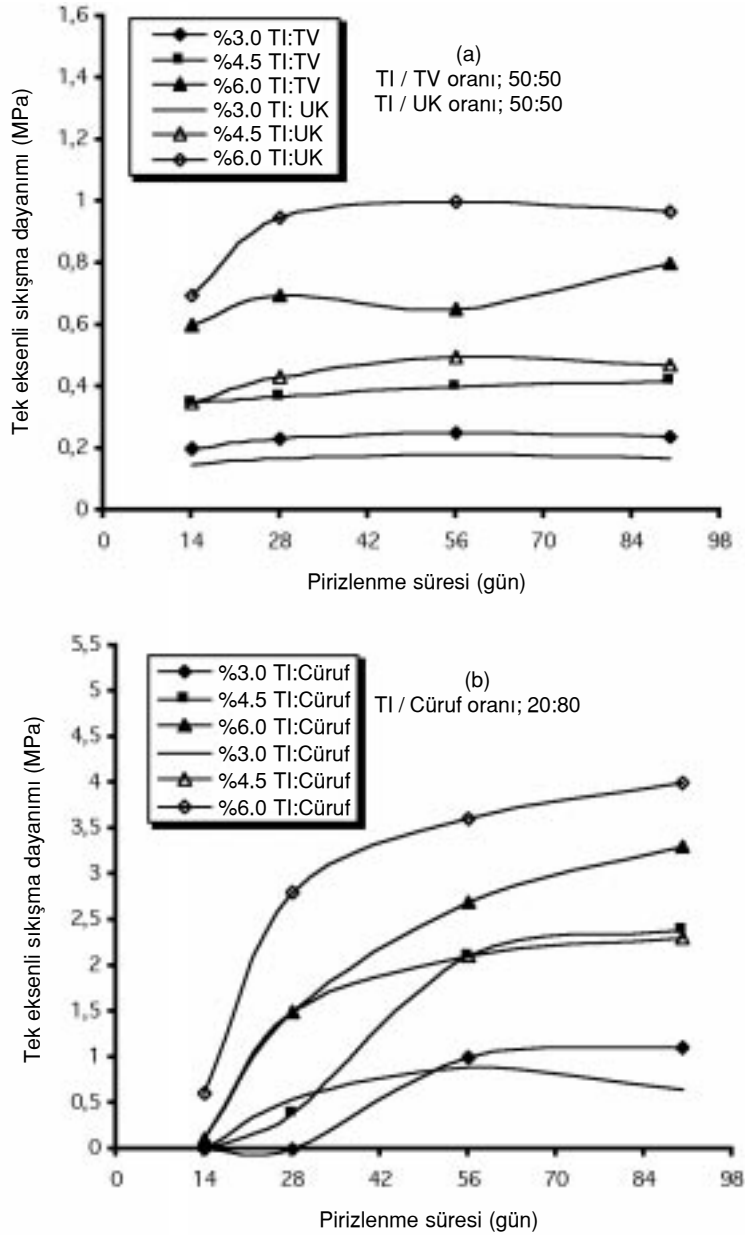
Dolgu malzemesinin dayanımı, prizlenme süresi ve matriks içindeki bağlayıcı miktarına ve türüne bağlıdır. Karışımdaki çimento oranı arttıkça genellikle dolgu dayanımı artar. Macun dolgu uy-

gulamalarında bağlayıcı oranı dolgunun istenilen mekanik özelliklerine bağlı olarak belirlenir. Genellikle % 2-4 normal portland çimento içeren uygulamalarda 0.7-2 MPa'lık tek eksenli sıkışma dayanımına sahip macun dolgu üretilebilir (Brackebusch, 1994).

Bir dolgu tesisinde çimento giderleri genellikle işletme giderlerinin önemli bir kısmını oluşturur (Grice, 1998). Çimento tüketimini azaltmak için cüruf ve uçucu kül gibi puzolanik malzemeler, genellikle belli oranlarda portland çimento ile karıştırılarak kullanılabilir (Grice, 1998; Hassani

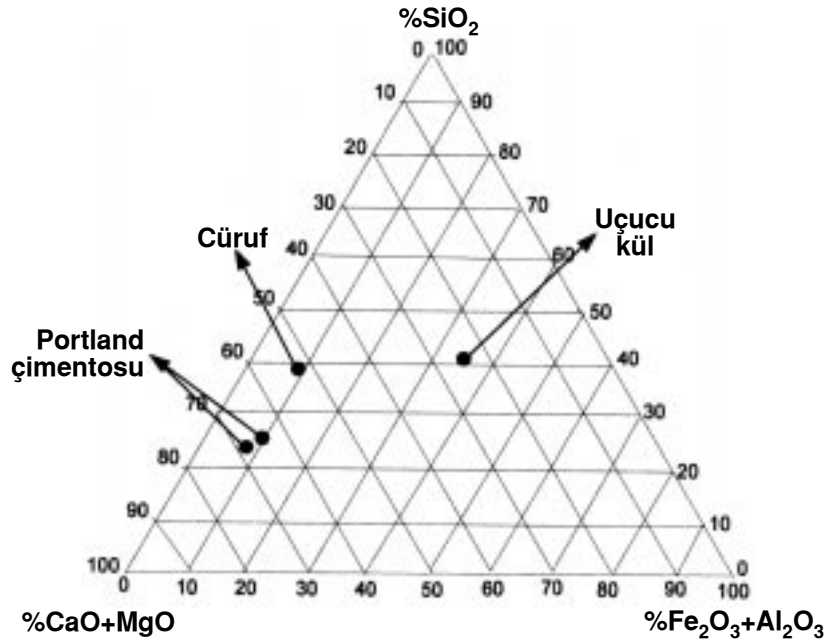
vd., 2001; Ouellet ve Hassani, 2002). Ancak bağlayıcı türü dolgu performansını etkileyen önemli parametrelerden biridir (Şekil 3). Şekil 3'de görüldüğü gibi, kullanılan bağlayıcı türüne bağlı olarak dolgu dayanımlarında farklılıklar gözlenmektedir. Bu farklılıklar; bağlayıcının kimyasal bileşimine (SiO_2 , $\text{CaO}+\text{MgO}$ ve $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{Al}_2\text{O}_3$ içeriğine, Şekil 4) bağlı olarak hidrasyon

özelliğine, atığın mineralojik bileşimine ve sülfür içeriğiyle ilişkilendirilebilir. Normal portland çimentosu ile karşılaştırıldığında, puzolanik özelliğe sahip uçucu kül ve cüruf gibi bağlayıcıların hidrasyon hızı yavaşlamaktadır (Hassani vd., 2001; Çolak, 2002). Ayrıca, puzolanik (katkılı) bağlayıcılar kullanıldığında, hidrasyonu sağlamak için ortamda yeterli miktarda kireç bulun-



Şekil 3. Değişik bağlayıcı türü ve malzeme oranı ile hazırlanan macun dolgu örneklerinin tek eksenli sıkışma dayanımı (TI: Normal portland çimento; TV: Sülfata dirençli çimento; UK: Uçucu kül) (Benzaazoua vd., 2002).

Figure 3. Uniaxial compressive strength of the paste backfill samples prepared with different binder types and ratio (TI: Ordinary portland cement, TV: Sulphate-resistant cement, UK: Fly ash) (Benzaazoua et al., 2002).



Şekil 4. Bağlayıcı türlerinin kimyasal bileşimi.
Figure 4. Chemical composition of binder types.

ması gerekir (Lamos ve Clark, 1989; Jiang vd., 1997; Hassani vd., 2001).

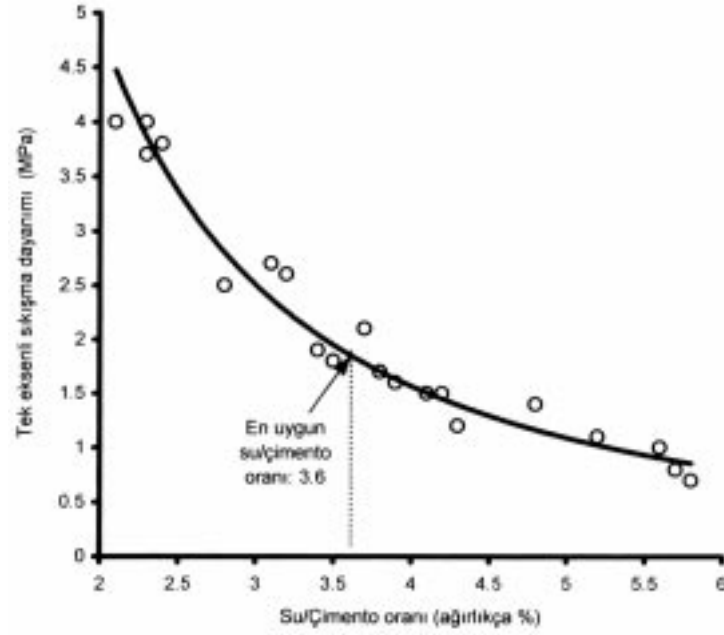
Kükürtlü mineral içeren atıkların kullanıldığı dolgu işlemlerinde puzolanik bağlayıcılar asit ve sülfat etkisine daha dayanıklı olmalarından dolayı tercih edilmektedirler (Benzaazoua vd., 1999; Ouellet ve Hassani, 2002; Benzaazoua vd., 2002). Puzolanlı çimentolar, karışım içinde bulunan serbest kireç ile reaksiyona girerek kalsiyum silikatlar halinde karışımın boşluklarını doldururlar ve macun dolgunun geçirgenliğini azaltıcı etki yaparlar. Bunun sonucu olarak, başta sülfat korozyonu ve klorür iyonları sızmasını olmak üzere, macun dolgunun kimyasal etkilerine olan dayanıklılığını arttırmaktadırlar.

Su/Çimento Oranı

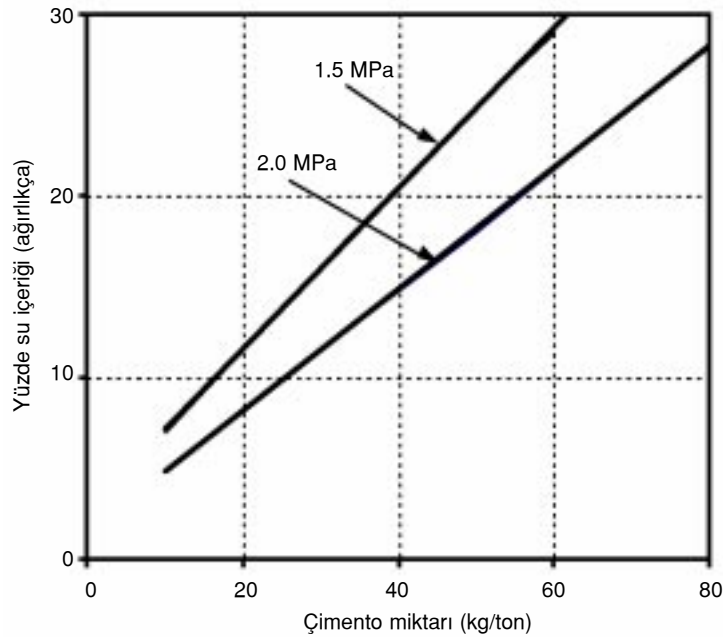
Karışımındaki su/çimento oranı, dolgu dayanımını etkileyen önemli bir parametredir. Dolgu içinde su/çimento oranı arttıkça dayanım azalır (Şekil 5). Dolgu malzemesinin nakliye esnasında su gereksinimine bağlı olarak, portland çimento ile üretilen macun dolgu için en uygun su/çimento oranı yaklaşık 3.6 olarak belirtilmektedir (Annor, 1999). Su içeriğinin artmasına bağlı olarak dayanımın düşmesinin nedeni, yüksek su miktarlarında hidratasyona uğramış çimentonun, düşük su/çimento oranında oluşan çimentodan

daha zayıf çimento jelleri (peltekleri) oluşturmazdır (Thomas vd., 1979). Ayrıca, kullanılan bağlayıcının hidratasyon hızı ve kür esnasında su/çimento oranının azalması (dolgunun su kaybı) optimum su/çimento oranını etkileyebilir (Lamos ve Clark, 1989). Su içeriği düşük (yoğunluğu yüksek) bir dolgu, aynı dayanım için yüksek su içeriğine sahip bir dolgudan daha az çimento gereksinimine ihtiyaç duyar (Şekil 6). Slamp değeri arttıkça, malzeme içindeki su oranı artar ve dayanım azalır (Şekil 7). Slamp, bir karışım malzemesinin konik şeklindeki bir kaygan kalıptan serbest bırakıldığında maruz kaldığı boydaki çökmenin (oturmanın) bir ölçüsüdür. Slamp'ı belirleyerek bir malzemenin taşınabilirliği ile ilgili kıvamını karakterize etme şekli sağlanmaktadır.

Herhangi bir slamp kıvamını elde etmek için gerek duyulan su miktarı, tanelerin koloidal özelliklerine bağlıdır. Bu özellikler macun içindeki ince tanelerin zeta potansiyel şarjının bir ölçüsüdür. Zeta potansiyel şarjı, tanecik ortamında macuna su tutma özelliğini vererek, su moleküllerinin ince taneciklere bağlanmasına yol açar. Zeta potansiyel şarjının yüksek olması, çalışılan bir slampda macun malzemesinin su tutma miktarının artmasına yol açmaktadır. İnce malzemenin içeriği arttıkça, herhangi bir slampda macunun su tutma miktarı da artacaktır (Kesimal



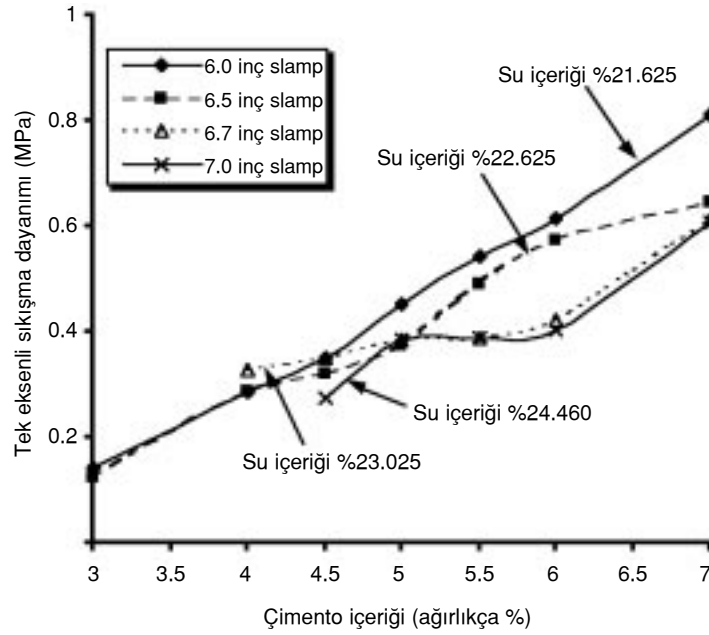
Şekil 5. Su/çimento oranının macun dolgu dayanıma etkisi (Annor, 1999).
Figure 5. The effect of water/cement ratio on the strength of paste backfill (Annor, 1999).



Şekil 6. 1.5 ve 2.0 MPa'lık tek eksenli sıkışma dayanımı için gerekli çimento üzerinde su içeriğinin etkisi (Edwards, 1992).
Figure 6. Influence of water content on cement requirement for given uniaxial compressive strength of 1.5 and 2.0 MPa (Edwards, 1992).

vd., 2002a). Yumuşak kayalar, genellikle boyutlarına bakılmaksızın, 7 inç ve 10 inç slamp kıvamında yüksek miktarda su içerirler. Bu durum; esas itibariyle yüksek kalsit, kil veya benzeri

yüksek derecede kolloidal, yüksek su tutan mineralleri içeren mineralojik yapıdan kaynaklanmaktadır. Bu atıklar, mineral bileşimi ve ince malzeme içeriğine bağlı olarak, 7 inç slamp kı-



Şekil 7. Çimento içeriklerinin, farklı slump değerlerinde üretilen macun dolgu örneklerine karşı değişimi (Kesimal vd., 2002a).

Figure 7. Cement contents versus the strength of paste backfill samples produced from different size slump (Kesimal et al., 2002a).

vamında ağırlıkça % 30-50 arasında değişen katı dağılımına sahiptir.

Dolgu karışımının zamana bağlı olarak değişen özellikleri, dolgunun nakliyesi açısından önemli bir parametredir. Verilen bir kıvam değeri için macunun yoğunluğu (su içeriği), tane boyu dağılımına bağlıdır. Malzemenin tane boyu küçüldükçe, yüzey alanı artar ve dolgunun su tutma özelliği artar (Kesimal vd., 2002a). Macun dolgunun ağırlıkça su içeriği genellikle %10 ile %25 arasında değişmektedir.

Karışım Suyu

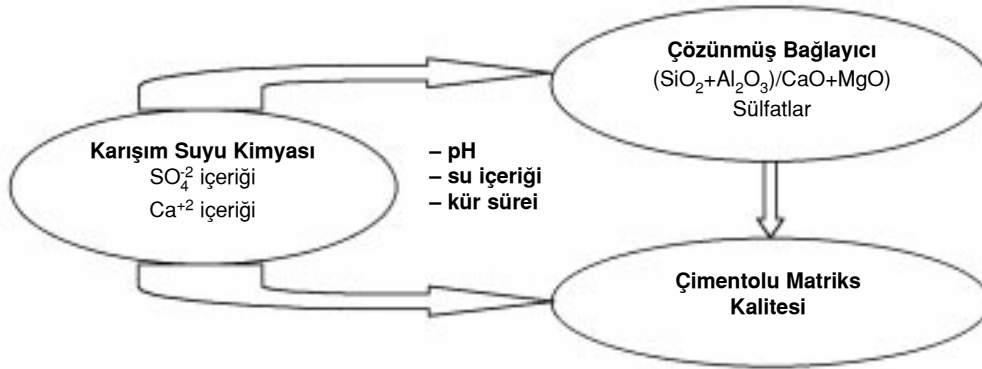
Karışım suyu, macun dolgu kalitesine etki eden önemli bir parametre olup, kimyasal bileşimine bağlı olarak hidrasyon işlemini etkileyebilir (Farzam vd., 1998; Benzaazoua vd., 2002; Wang vd., 2002). Karışım suyu, macun dolgu kalitesine iki önemli nedenden dolayı etki etmektedir. Bunlar; dayanım artışına etki eden su/çimento oranı ve çimento kimyasına müdahale ederek hidrasyon işlemini değiştiren su kimyasıdır.

Macun dolgu uygulamalarında karışım suyu olarak şehir suyu, göl suyu ve tesis suyu kullanılır.

maktadır. Genellikle, dolgu karışımında tesis suyunun kullanılması, çevresel yönden daha güvenilir ve uygundur. Ancak karışım suyunun kimyasal bileşimi (pH, Ca^{+2} , özellikle SO_4^{-2} içeriği) önemlidir (Steinour, 1960; Clark vd., 1995). Şekil 8 hidrasyon işlemi süresince karışım suyu ve bağlayıcı arasındaki kompleks kimyasal etkileşimi göstermektedir.

Benzauaza vd. (2002) tarafından yapılan deneylerde çeşitli karışım suyu kullanılarak hazırlanan macun dolgu örneklerinde farklı dayanımlar elde edilmiştir (Şekil 9). Bu farklılıklar, büyük olasılıkla, kullanılan suyun kimyasal bileşimi ve bağlayıcının hidrasyon özelliğinden kaynaklanmaktadır.

Genellikle maden operatörleri dolgu işlemi tasarımında su ve atıklar kimyasını ihmal ederler. Karışım suyunun sülfat içeriği bağlayıcı türü ve prizlenme süresine bağlı olarak hidrasyon işlemini etkilemektedir. Karışım suyu kimyası ile bağlayıcının kimyası, macun dolgunun dayanım artışı esnasında hidrasyon oluşumunu etkileyerek dolgunun dayanımını düşürmektedir. Böylece dolgu dayanımında bazen beklenmeyen düşüşler ile karşılaşılması mümkün olmaktadır.

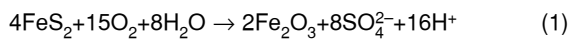


Şekil 8. Hidratasyon işlemi esnasında karışım suyu ve bağlayıcı arasındaki etkileşim.
Figure 8. Interaction between mixing water and binder during hydration processes.

Atık Mineralojisi ve Sülfat Etkisi

Macun dolgu uygulamalarında atık malzemenin mineralojik bileşimi son derece önemlidir. Sülfat ve asitlerin beton dayanımını ve duraylılığını olumsuz yönde etkilediği bilinmektedir (Rendell ve Jauberthie, 1999; Zivica ve Bajza, 2001; Santhanam vd., 2001; McGregor ve Blowes, 2002). Macun dolguda kullanılan tesis atıkları, bağlayıcı reaksiyonunu etkileyebilecek mineral içerikleri (çinko, kurşun ve bazı piritler) bakımından analiz edilmelidirler. Belirli mineraller dayanım geciktirici, azaltıcı ve uzun dönemde bozucu olarak davranabilirler. Yeraltında macun dolgunun kullanımından önce, kısa ve uzun dönem bağlayıcı dayanımının laboratuvar deneyleri yapılmalıdır. Kısa dönemli dayanım deneyleri, bağlayıcının hidratasyon işlemi sonucunda dolgu dayanımındaki artışı, uzun dönemde ise, dolgunun mineralojik bileşimine (özellikle sülfürlü atıklar) ve bağlayıcı ile birlikte karışım suyunun kimyasına bağlı olarak dolguda olabilecek kimyasal reaksiyonlar sonucunda (sülfat etkisi, vb.) dayanımda muhtemel düşmeleri vermektedir.

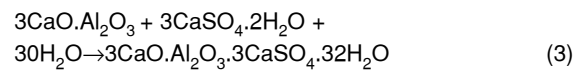
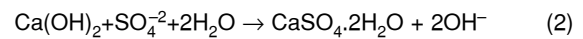
Sülfürlü mineraller (özellikle pirit gibi) suyun ve oksijenin varlığında oksitlenerek, aşağıda verilen kimyasal reaksiyondan görüleceği gibi, asit ve sülfat oluşumuna neden olabilir (Ninteman, 1978; Archibald vd., 1999).



Macun dolguda kullanılan atıkların genellikle ince boyutlu (≥ 15 'i -20 μm ; yüksek yüzey alanı) olması ve kür işlemlerinin yeraltında nemli or-

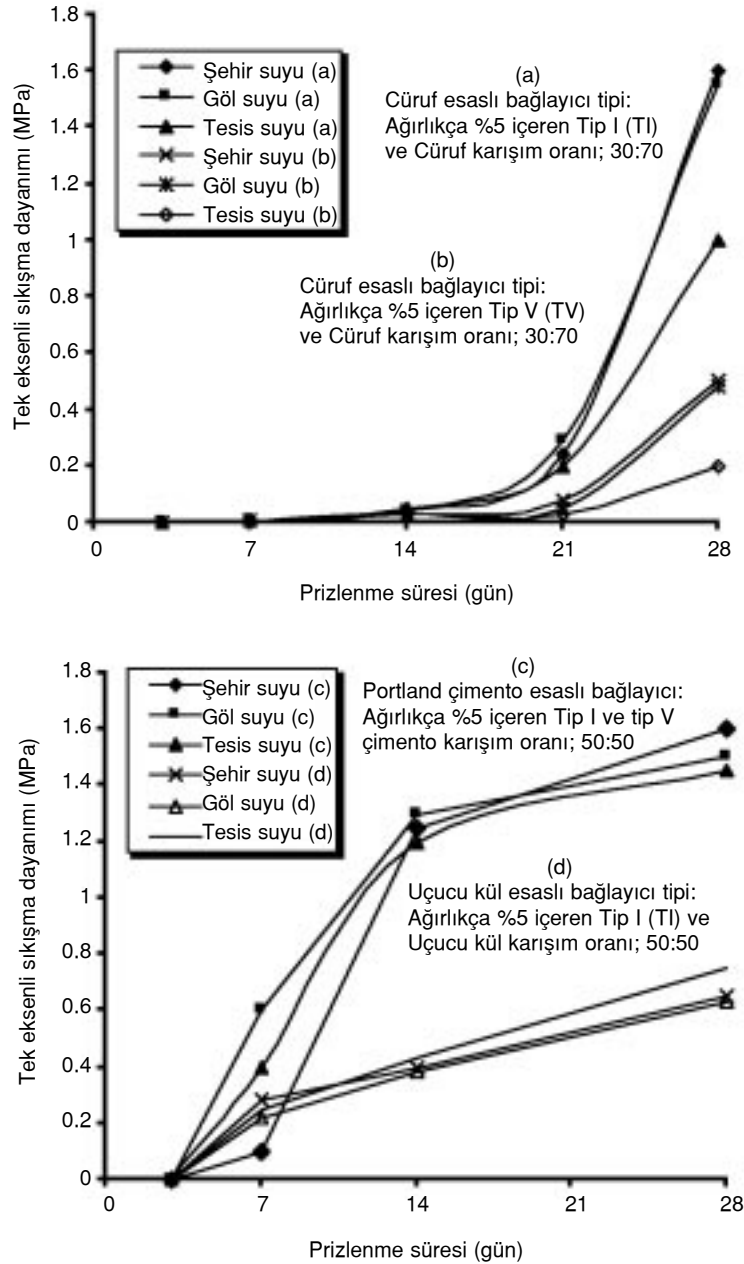
taamlarda gerçekleşmesi durumunda sülfürlü minerallerin oksidasyonu hızlanır.

Macun dolgu içinde bulunan piritin bozunması sonucu oluşan asit ortamda bağlayıcı olarak görev yapan hidratasyon ürünleriyle (C-S-H, tobermorit jeli ve CH, portlandit) reaksiyona girerek nötralize olur (Santhanam vd., 2001; Irassar vd., 2003). Bütün hidratasyon ürünleri pH 9'un altında bozunur (Benzaazoua vd., 1999). Benzer şekilde, sülfat bileşikleri macun dolgu içindeki kalsiyum hidroksit [$\text{Ca}(\text{OH})_2$; simgesi CH] ve trikal-siyum alüminat [$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$; C_3A] reaksiyona girerek alçıtaşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ve etrenjit ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) oluşur (Ninteman, 1978; Annor, 1999; Santhanam vd., 2001; Benzaazoua vd., 2002).



Ortamın pH'ı, alçı taşı (pH <10.5) ve etrenjit oluşumunu ($\geq \text{pH } 10.5$) kontrol eden önemli bir faktördür (Casanova vd., 1996; Archibald, 1999). Genleşme özelliğine sahip alçıtaşı ve etrenjit (Şekil 10) dolgu içinde çatlakların oluşumuna neden olarak dolgu dayanımı ve duraylılığını düşürür (Casanova vd., 1996; Hassani vd., 2001; Benzaazoua vd., 2002; Ouellet ve Hassani, 2002).

Asit ve sülfatların kısa ve uzun dönemde dolgu dayanımına ve duraylılığına etkisi; dolgunun geçirgenliğine, atığın sülfürlü mineral içeriğine (asit

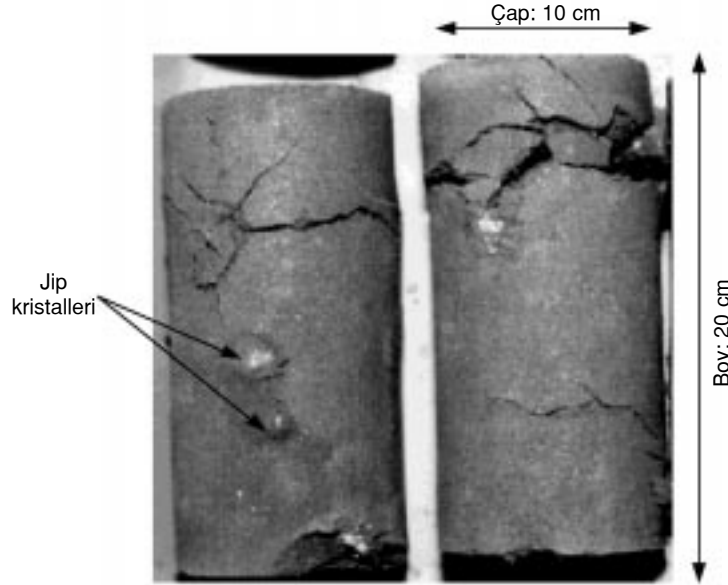


Şekil 9. Karışım suyunun macun dolgu dayanımına etkisi (Benzaazoua vd., 2002).
Figure 9. Effect of mixing water on the strength of paste backfill (Benzaazoua et al., 2002).

ve sülfat üretim potansiyeline), sülfat iyonlarının türüne (Na, Mg, Fe-Sülfat) ve kullanılan bağlayıcı tipine (C_3A , CH, SO_3 içeriğine) bağlıdır (Rendell ve Jaubertie, 1999; Zivica ve Bajza, 2001; McGregor ve Blowes, 2002). Sülfat etkisi, düşük geçirgenliğe sahip dolgu üretilerek veya sülfat etkisine dayanıklı bağlayıcılar kullanılarak kontrol edilebilir (Benzaazoua vd., 2002; Chew, 1999). Puzolanik bağlayıcılar (özellikle cüruf esaslılar) sülfat etkisine dayanıklı dolgu üreti-

minde kullanılabilir (Chew, 1999; Hassani vd., 2001; Ouellet ve Hassani, 2002).

Macun dolgu tasarımında, yeraltında çalışan işçilerin sağlık ve emniyeti yönünden gerekli önlemlerin alınması gerekir. Cevher işleme tesisinden gelen atıklar, sağlık açısından tehlikeli maddeleri (siyanür, arsenik, vb.) içerebilir. Bu yüzden yeraltı macun dolgusu, genellikle kirleticiler veya bulaşıcılar bakımından gözden geçiri-



Şekil 10. Uzun dönemde sülfat etkisine (kristal büyümesi ve yapı oluşumu) maruz kalan macun dolgu örneklerinin görünümü (Archibald vd., 1999).

Figure 10. View showing paste backfill specimens subjected to sulphate attack (crystal growth and fracture formation) in the long term (Archibald et al., 1999).

lerek emniyet ve sağlık standartları sağlanmalıdır.

Macun dolgu olarak piritik atıklar kullanıldığında, dışarıya ısı verme özelliği de (ekzotermik reaksiyon) incelenmelidir. Pirotit ve piritin bazı şekilleri kimyasal olarak uygun yeraltı nem ve oksijen şartları altında reaksiyon gösterebilirler. Bu reaksiyonlar sonucu dahili ısı, malzemenin sülfür içeriğini tutuşturabilecek sıcaklıklara çıkarabilir ve zehirli sülfid gazlarını üreten kendi kendini destekleyen yeraltı yangını ile sonuçlanabilir.

Tane Boyu Dağılımı ve Şekli

Dolgu işleminde kullanılan katı malzemenin tane boyu dağılımı dolgu performansını etkiler (Amaratunga ve Hein, 1997; Bernier vd, 1999; Annor, 1999). Macun dolgu yapımında kullanılacak maden atıkları iri, orta ve ince atıklar olarak

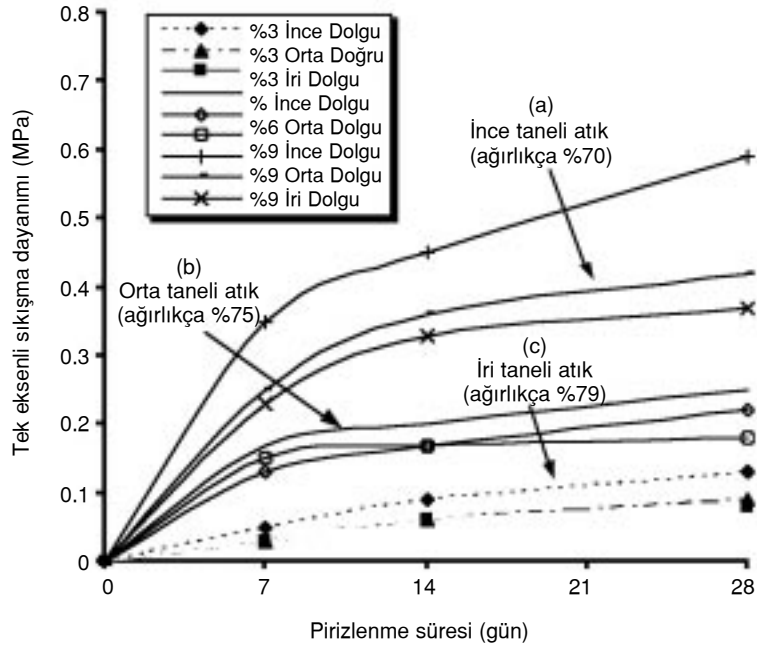
sınıflandırılabilir (Kesimal vd., 2002b) (Çizelge 2). İyi bir tane boyu dağılımına sahip olmayan dolgu karışımında daha fazla bağlayıcıya ihtiyaç duyulmaktadır. Diğer taraftan uygun bir tane boyu dağılımına sahip atıklardan üretilen dolguda ise, ince taneler iri taneler arasındaki boşlukları doldurularak düşük çimento içeriklerinde yüksek dayanım elde edilmektedir (Şekil 11). Boyut küçüldükçe yüzey alanı artmakta ve çimento ile iyi bir etkileşim sağlamaktadır (Thomas vd., 1979; Thomas, 1981; Boldt vd., 1993).

Dolgu malzemesinin yük altındaki davranışı, dolgunun uygunluğunu belirleyen en önemli parametredir. Dolgu malzemesinin az sıkışan ve kolay nakledilebilen özellikte olması istenir. Bu ise, malzemenin düşük yığın boşluk oranına sahip ve tanelerin yük altında kırılmaya karşı sağlam olmasını gerektirir. Boşluk oranı ve tanelerin yığın halde yük taşıması özellikleri birbirine

Çizelge 2. Macun dolgu karışımının boyuta göre sınıflandırılması (Kesimal vd., 2002b).

Table 2. Size distribution classification of paste backfill mix design (Kesimal et al., 2002b).

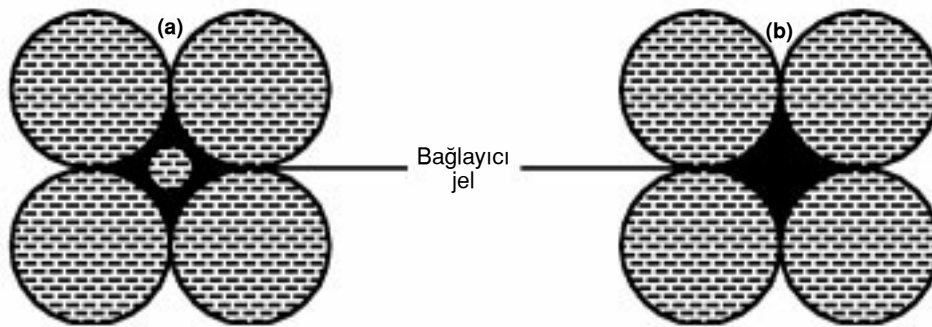
Atık Grubu	20 µm altı miktar (ağırlıkça %)	7 inç çökmedeki katı oranı (ağırlıkça %)	Açıklama (su/çimento oranına göre)
İri atıklar	15-35	78-85	Yüksek dayanımlı dolgu
Orta boyutlu atıklar	35-60	70-78	Nispeten dayanımlı dolgu
İnce atıklar	60-90	55-70	Düşük dayanımlı dolgu



Şekil 11. Üç dolgu sınıfı (iri, orta ve ince) için 28 güne kadar prizlenme eğrileri deneyleri ve Portland çimentosu katkı seviyelerinin dağılımı (Thomas, 1981).
 Figure 11. Tests-curing curves to 28 days for three fill grades (coarse, medium, and fine) and range of Portland cement addition levels (Thomas, 1981).

bağlı olmaktadır. Düşük boşluk oranı, iyi bir tane dağılımı ile sağlanabilir. Tanelerin yük taşıması, yığın haldeki malzemenin taneler özelliklerine bağlı olmaktadır (Şekil 12). Taneyle ilgili faktörlerin başında şekil faktörü gelmektedir. Küresel şekilli tanelerin şekil faktörü değeri bir olarak alınmakta ve küresellikten köşeli (düzensiz) şekilli tanelere doğru gidildikçe bu değer azalmaktadır. Bir karışımda, şekil faktörünün yüksek olması halinde çok sayıda tane birbirleriyle temas

etmektedir. Temas halindeki taneler birbiriyle bir yapı oluşturarak, yük iletimini sağlarlar. Böylelikle bu kütlelerin yük altında kırılması güçleşir ve sıkışmaya karşı dirençleri artar (Cengiz, 2002). Macun dolgu uygulamalarında genellikle sınıflandırılmamış tesis atıklarının tamamı kullanılmasına rağmen, dayanım değerini arttırmak için, ince tane boyutu ($-20 \mu\text{m}$) yüzdesi hidrosiklonla ayarlanarak elde edilen malzeme dolgu yapımında kullanılmaktadır. Macun dolgu içeri-



Şekil 12. İyi bir tane boyu dağılımına sahip olan (a) ve olmayan (b) malzemenin üretilen dolgu (Thomas vd., 1979).

Figure 12. Backfilling produced from the material of a good particle size distribution (a), and a poor particle size distribution (b) (Thomas et al., 1979).

sinde ince tane (-20 µm) yüzdesinin fazla olması (% 40-50) durumunda, mevcut karışımda uygun bir tane boyu dağılımı sağlanamadığından, dolguda düşük dayanım değerleri elde edilmektedir (Kesimal vd., 2003).

SONUÇLAR

Macun dolgu, en azından % 15'i 20 µm altı ince malzeme içeren susuzlandırılmış tesis atıkları, su ve bağlayıcı karışımından oluşan akışkan ve pompalanabilir bir malzemedir. Kısa ve uzun dönemde macun dolgunun dayanımı; karışımı oluşturan atık, bağlayıcı ve suyun özelliklerine, karışımdaki oranlarına ve aralarındaki kimyasal etkileşimlere bağlıdır.

Su/çimento oranının artmasına bağlı olarak dayanım düşer. Ancak dolgu karışımının kolaylıkla nakliyesi için gerekli su miktarı, su/çimento oranı belirleyen en önemli faktördür. Yerleştirildikten sonra dolgunun su içeriği (su tutması) atık malzemenin tane boyu dağılımına bağlıdır. Ayrıca atık malzemenin uygun bir tane boyu dağılımına sahip olması çimento tüketimi ve dolgu dayanımı açısından önemlidir.

Bağlayıcı tipi ve oranı, dolgu dayanımını belirler. Puzolanik bağlayıcılar, gerek çimento tüketimini azaltmaları, gerekse sülfat etkisine karşı dayanıklı olmaları nedeniyle tercih edilebilir.

Atıkların sülfürlü mineral içeriği ve karışım suyunun kimyasal bileşimi kısa ve uzun dönemde dolgu dayanımını ve duraylılığını etkiler. Sülfürlü minerallerin (pirit gibi) su ve oksijen varlığında oksitlenmesi sonucu oluşan asit ve sülfat hidrasyon ürünleriyle reaksiyona girerek bağlayıcı özelliği olmayan ancak genişleme özelliğine sahip ikincil mineral oluşumuna neden olabilirler. Bu tip kimyasal etkileşimler dolgu yapısının bozulmasına ve dağılmasına yol açabilir.

Sonuç olarak; macun dolgu üretiminde kullanılması düşünülen atık, karışım suyu ve bağlayıcıların, fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliklerinin önceden ayrıntılı bir şekilde incelenmesi gerekir. Kısa ve uzun dönemde istenilen macun dolgu dayanımı ve duraylılığını sağlamak için atığın kimyasal bileşimi ile kullanılacak bağlayıcıların uyumlu olması gerekir.

KAYNAKLAR

- Amaratunga, L.M., and Hein, G.G., 1997. Development of a high strength total tailings paste fill using fine sulphide mill tailings. Proceedings of the 29th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors, CIM, Canada, 293-305.
- Amaratunga, L.M., and Yaschyshyn, D.N., 1997. Development of a high modulus pastefill using fine gold mill tailings. Geotechnical and Geological Engineering, 15 (3), 205-219.
- Annor, A.B., 1999. A study of the characteristics and behaviour of composite backfill material. PhD Thesis, McGill University, Montreal, 396 pp.
- Archibald, J. F., 1999. Beneficial impacts of paste tailings on environmental hazard mitigation and engineering performance improvement. International Mining and Environment Congress, Peru, 537-548.
- 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.
- Arioğlu, E., 1983. Engineering properties of cemented aggregate fill for Uludağ Tungsten Mine of Turkey. Proceedings of the International Symposium on Mining with Backfill, S.Granholm (ed.), A.A. Balkema, Lulea, 3-8.
- 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.
- Bernier, R.L., Li, M.G., and Moerman, A., 1999. Effects of tailings and binder geochemistry on the physical strength of paste backfill. Mining and Environment II, D.Goldsack (ed.), Canada, 1113-1122.
- Bloss, M.L., and Revell, M.B., 2001. Mining with paste fill at BHP Cannington. Proceedings of the 7th International Symposium of Mining Backfill, D.Stone (ed.), SME, Canada, 209-221.
- Boldt, C.M.K., Atkins, L.A., and Jones, F.M., 1993. The backfilling research being conducted by the U.S. Bureau of Mines. Proceedings of the 4th International Symposium on Mining with Backfill, MINEFILL'93, Johannesburg, 389-395.
- Brackebusch, F. W., 1994. Basics of paste backfill systems. Mining Engineering, 46 (10), 1175-1178.
- Broomfield, D.C., 2000. Liquefaction potential of paste backfill. MSc Thesis, Queen's University, Canada, 171 pp.

- Casanova, I., Agullo, L., and Aquado, A., 1996. Aggregate expansivity due to sulphide oxidation-I. recetion systems and rate model. *Cement and Concrete Research*, 26 (7), 993-998.
- Cengiz, A.K., 2002. Lavvar atıklarının hidrolik dolguda sıkışma özellikleri. *Madencilik*, 41 (3), 27-34.
- Chew, J.L., 1999. A parametric study of the factors affecting the application of post-consumer waste glass as an alternative cementing agent in paste backfill. MSc Thesis, Queen's University, Canada, 219 pp.
- Clark, C.C., Vickery, J.D., and Backer, R.R., 1995. Transport of total tailings paste backfill: results of full-scale pipe test loop pumping tests. *United States Bureau of Mines RI 9573*, 45 pp.
- Çolak, A., 2002. Characteristics of pastes from a portland cement containing different amounts of natural pozzolan. *Cement and Concrete Research*, 33 (4), 585-593.
- Edwards, F., 1992. Backfilling in underground mines. *AIME Annual Meeting*, Canada, 8 pp.
- Farzam, H., Rispin, M., and Karlson, R., 1998. The use of unique admixture technologies in mine backfill, technology description and case histories. *Proceedings of the 6th International Symposium on Mining with Backfill, MINE-FILL'98*, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series, Australia, 17-28.
- Grice, T., 1998. Underground mining with backfill. *The 2nd Annual Summit on Mine Tailings Disposal Systems*, Australia, 5-15.
- Grice, A.G., and Fountain, J.L., 1991. The fill information system. *Proceedings of the Second Australian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry*, The University of Wollongong, Australia, 68-80.
- Hassani, F.P., Hossein, M., Newman, P., and Bois, D., 1994. Comparison of surface and underground disposal of tailings waste. *CIM Bulletin*, 87 (976), 58-65.
- Hassani, F.P., Ouellet, J., and Hossein, M., 2001. Strength development in underground high-sulphate paste backfill operation. *CIM Bulletin*, 94 (1050), 57-62.
- Henderson, A., Newman, P., Landriault, D., and Antoniazzi, P., 1997. The cost advantage of using paste as a backfill. *99th CIM Annual General Meeting*, Canada, 35-48.
- Irassar, E.F., Bonavetti, V.L., and Gonzalez, M., 2003. Microstructural study of sulfate attack on ordinary and limestone portland cements at ambient temperature. *Cement and Concrete Research*, 33 (7), 31-41.
- Jiang, W., Silsbee, M. R., and Roy, D. M. 1997. Similarities and differences of microstructure and macro properties between portland and blended cement. *Cement and Concrete Research*, 27 (10), 1501-1511.
- Jung, S.J., and Biswas, K., 2002. Review of current high density paste fill and ilts technology. *Mineral Resources Engineering*, 11 (2), 165-182.
- Kesimal, A., Alp, İ., Yılmaz, E., and Ercikdi, B., 2002a. Optimization of test results obtained from different size slumps with varying cement contents for Cayeli Mine's clastic and spec ore tailings. *Karadeniz Technical University, Revolving Fund Project*, Trabzon, 40 pp.
- Kesimal, A., Yılmaz, E., Erçikdi, B., Alp, İ., Yumlu, M., ve Özdemir, B., 2002b. Çimentolu macun dolgunun laboratuar testi. *Madencilik*, 41 (4), 11-20.
- Kesimal, A., Erçikdi, B., ve Yılmaz, E., 2003. The effect of desliming by sedimentation on paste backfill performance. *Minerals Engineering*, 16 (10), 1009-1011.
- Lamos, A.W., and Clark, I.H., 1989. The influence of material composition and sample geometry on the strength of cemented backfill. *Innovations in Mining Backfill Technology*, F.Hassani (ed.), A.A. Balkema, Canada, 89-94.
- Landriault, D.A., 1995. Paste backfill mix design for canadian underground hard rock mining. *Proceedings of the 97th CIM Annual General Meeting*, Canada, 13-22.
- Landriault, D.A., 2001. *Underground Mining Methods Engineering Fundamentals and International Case Studies*. SME, United States, 717 pp.
- McGregor, R.G., and Blowes, D.W., 2002. The physical, chemical and mineralogical properties of three cemented layers within sulfide-bearing mine tailings. *Journal of Geochemical Exploration*, 76 (3), 195-207.
- Ninteman, D.J., 1978. Spontaneous oxidation and combustion of sulphide ores in underground mines. *United States Bureau of Mines RI 8775*, 92 pp.
- Rendell, F., and Jauberthie, R., 1999. The deterioration of mortar in sulphate environments. *Construction and Building Materials*, 13 (6), 321-327.
- Ouellet, J., and Hassani, F., 2002. Chemistry of paste backfill. *Proceedings of the 34th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors*, Canada, 539-559.
- Santhanam, M., Cohen, M.D., and Olek, J., 2001. Sulfate attack research whither now? *Cement and Concrete Research*, 31 (6), 845-851.
- Steinour, H.H., 1960. Concrete mix water-how impure can it be? *Journal of the PCA Research and Development Laboratories*, 2 (3), 32-50.
- Thomas, E.G., 1981. Selection and specification criteria for cut and fill mining. *Proceedings of the Application of Rock Mechanics to Cut and Fill*

- Mining, Institution of Mining and Metallurgy, UK, 93-102.
- Thomas, E.G., Nantel, J.H., and Notely, K.R., 1979. Fill Technology in Underground Metalliferous Mines. International Academic Services Limited, Canada, 293 pp.
- Yılmaz, E., Kesimal, A., Deveci, H. ve Erçıkıdı, B., 2003. Macun dolgu performansını etkileyen fiziksel, kimyasal ve mineralojik faktörler. Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar I. Kongresi, MBGAK'03, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 683-690.
- Yumlu, M., 2001. Backfill practices at Çayeli Mine. Proceedings of the 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey, E.Ünal (ed.), Kozan Publisher, Ankara, 333-339.
- Wang, C., Tannant, D.D., Padrutt, A., and Millette, D., 2002. Influence of admixtures on cemented backfill strength. Mineral Resources Engineering, 11 (3), 261-270.
- Zivica, V., and Bajza, A., 2001. Acidic attack of cement based materials - A review: Part 1. principle of acidic attack. Construction and Building Materials, 15 (8), 331-340.