

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KASTAMONU KÜRE BAKIR MADENİNDEKİ CEVHER ZENGİNLEŞTİRME
ATIKLARININ MACUN DOLGU MALZEMESİ OLARAK
KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Maden Mühendisi Muhammet İZKİ

**TEMMUZ 2013
TRABZON**

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KASTAMONU KÜRE BAKIR MADENİNDEKİ CEVHER ZENGİNLEŞTİRME
ATIKLARININ MACUN DOLGU MALZEMESİ OLARAK
KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

Maden Mühendisi Muhammet İZKİ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
“MADEN YÜKSEK MÜHENDİSİ”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 01.07.2013
Tezin Savunma Tarihi : 25.07.2013

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Bayram ERÇIKDI

Trabzon 2013

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Maden Mühendisliği Anabilim Dalında

Muhammet İZKİ tarafından hazırlanan

**KASTAMONU KÜRE BAKIR MADENİNDEKİ CEVHER ZENGİNLEŞTİRME
ATIKLARININ MACUN DOLGU MALZEMESİ OLARAK
KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 09 / 07 / 2013 gün ve 1513 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

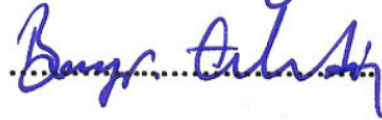
Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Ayhan KESİMAL

Üye : Doç. Dr. Emel ABDİOĞLU

Üye : Yrd. Doç. Dr. Bayram ERÇIKDI


.....

.....

.....

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

“Kastamonu Küre Bakır Madenindeki Cevher Zenginleştirme Atıklarının Macun Dolgu Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi” isimli bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Yüksek lisans tez konusunun belirlenmesinden çalışmaların yürütülmesi ve sonuçlandırılmasına kadar her aşamasında bilgi, deneyim, destek ve görüşlerinden yararlandığım danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Bayram ERÇIKDI’ya minnet ve şükran borçluyum.

Çalışmam boyunca beni yönlendiren ve tezin çeşitli aşamalarında gösterdiği yardımlarından dolayı Prof. Dr. Ayhan KESİMAL’e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Değerli vaktini bana ayırmış olan jüri üyesi Doç. Dr. Emel ABDİOĞLU’na teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Çalışmamın gerçekleştirilmesindeki katkısı ve desteği nedeniyle Eti Bakır A.Ş. Genel Müdürü Sayın Ahmet TEZCAN’a, laboratuvar çalışmalarının organizasyonu ve planlanmasındaki değerli katkıları nedeniyle Sayın Kazım KÜÇÜKATEŞ ve Fatih ENİSOĞLU’na ve maden atıklarının temini ve organizasyonu nedeniyle Sayın Vakkas KARAOĞLU’na sonsuz teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmaları aşamasında bilgi ve deneyimini benden esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Ferdi CİHANGİR’e, çalışma boyunca bana yardım eden ve her zaman yanımda bulunan Maden Yüksek Mühendisi Hakan BAKİ’ye, son dönemlerde hiçbir yardımdan kaçınmayan Arş. Gör. Tekin YILMAZ’a ve ayrıca bana destek olan tüm hocalarıma ve arkadaşlarıma ayrı ayrı teşekkür ederim.

Çalışmamın başından beri her türlü yardım ve desteklerini benden esirgemeyen sevgili aileme ve kız arkadaşıma çok teşekkür ederim.

Muhammet İZKİ

Trabzon 2013

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Kastamonu Küre Bakır Madenindeki Cevher Zenginleştirme Atıklarının Macun Dolgu Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Yrd. Doç. Dr. Bayram ERÇIKDI’nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, deneyleri ve analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı ve yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 01/07/2013

Muhammet İZKİ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ BEYANNAMESİ	IV
İÇİNDEKİLER	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ	XI
SEMBOLLER DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.1.1. Tezin Amacı	2
1.2. Yerleşim Düzenine Göre Atık Yönetimi	3
1.2.1. Yerüstü Atık Yönetimi	3
1.2.2. Derin Deniz Deşarjı	7
1.2.3. Yeraltı Atık Yönetimi	7
1.3. Macun Dolgu Teknolojisi	7
1.3.1. Macun Dolgu Tasarımında Önemli Faktörler	11
1.3.1.1. Dayanım ve Duraylılık	11
1.3.1.2. Macun Dolguda Reolojinin Önemi	12
1.3.1.3. Macun Dolguda Ekonomi	13
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	15
2.1. Giriş	15
2.2. Atıkların Karakterizasyonu	17
2.2.1. Tane Boyut Dağılımı	17
2.2.2. Özgül Ağırlık	19
2.2.3. Kimyasal Bileşim	20
2.2.4. Mineralojik Bileşim	20
2.3. Dolgu Karışımlarının Reolojik Özellikleri	21
2.4. Bağlayıcı	24
2.5. Macun Dolgu Testleri İçin Deneysel Çalışma	24

3.	BULGULAR VE TARTIŞMA	26
3.1.	Dayanım Sonuçları	26
3.1.1.	Bağlayıcı Oranının Etkisi	26
3.1.1.1.	Tesis Atıkları	27
3.1.1.2.	Baraj Atıkları	29
3.1.2.	Bağlayıcı Tipinin Etkisi	34
3.1.3.	Sınıflandırmanın (Şlam Uzaklaştırma) Etkisi	36
4.	SONUÇLAR	40
5.	ÖNERİLER	41
6.	KAYNAKLAR	42
7.	EKLER	45
	ÖZGEÇMİŞ	53

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

KASTAMONU KÜRE BAKIR MADENİNDEKİ CEVHER ZENGİNLEŞTİRME ATIKLARININ MACUN DOLGU MALZEMESİ OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

Muhammet İZKİ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Bayram ERÇİKDI
2013, 46 Sayfa, 8 Sayfa Ek

Bu çalışmada, bağlayıcı tipi, oranı ve sınıflandırmanın Küre bakır madeninden alınan iki farklı tesis atığı, üç farklı baraj atığı ve iki farklı sınıflandırılmış atık kullanılarak hazırlanan çimentolu macun dolgunun (CPB) kısa ve uzun dönem mekanik performansına ve reolojik özelliklerine etkisini araştırılmıştır. Atık ve bağlayıcıların detaylı olarak fiziksel, kimyasal ve mineralojik karakteristikleri incelenmiştir. 28 ve 90 günlük kür sürelerinde $\geq 1,0$ MPa dayanımı sağlayacak optimum macun dolgu karışımını belirlemek için %5,5-11,0 çimento oranlarında toplam 630 adet dolgu numunesi hazırlanmıştır. Numunelerin dayanım kazanımı atık tipinden bağımsız olarak kür süresi ve bağlayıcı oranının artmasıyla ve akışkanlığın (slamp) düşmesiyle birlikte artış göstermiştir. Bağlayıcı olarak CEM III/A 42,5N kullanıldığında 28 ve 90 günde $\geq 1,0$ MPa dayanım için bağlayıcı dozajının baraj ve tesis atıkları için sırasıyla ≥ 160 kg/m³ ve ≥ 130 kg/m³ olması gerektiği belirlenmiştir. Tesis ve sınıflandırılmış baraj atığı ile %6,5-8,5 çimento oranında hazırlanan dolguda Portland çimentosu (CEM I 42,5) kullanıldığında numunelerin 28 günde $\geq 1,0$ MPa dayanım sağladığı ve uzun dönemde duraylılığını koruduğu gözlenmiştir. Sınıflandırma işlemi; baraj atığının kısa ve uzun dönem dayanım ve duraylılığını arttırırken, pirit atığı dayanım kazanımına olumlu yönde etki yapmamıştır. Sınıflandırılmış atıkların mikserde karışımı ve yeraltına taşınması işlemi ilave testlerle değerlendirilmelidir. Ayrıca istenen dayanım ve duraylılığı elde etmek için sınıflandırılmış pirit atıkları kullanarak ilave dayanım testlerinin yapılması gereklidir.

Anahtar Kelimeler: Macun Dolgu, Sınıflandırma (Şlam Uzaklaştırma), Tesis Atıkları, Baraj Atıkları, Bağlayıcı Oranı ve Tipi

Master Thesis

SUMMARY

EVALUATION OF PASTE BACKFILL PERFORMANCE OF MILL TAILINGS IN KÜRE COPPER MINE

Muhammet İZKİ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mining Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Dr Bayram ERÇIKDI
2013, 46 Pages, 8 Pages Appendixs

In this Study, the effect of binder type and dosage and, desliming were investigated on the short- and long-term mechanical and rheological properties of cemented paste backfill (CPB) produced from two different mill tailings, three different dam tailings and two different deslimed tailings provided plant tailings from Küre Copper Mine. A total of 630 CPB samples were prepared at different binder proportions of 5.5–11.0wt% by dry weight to determine an optimum CPB mixture with a target UCS of ≥ 1.0 MPa over a curing period of 28 and 90 days. The strength development of CPB samples increased with increasing binder dosages and curing times and with reducing the consistency (slump) irrespective of the tailings types. The binder dosage required to achieve 28 and 90 day UCSs of ≥ 1.0 MPa was determined to be $\geq 130 \text{ kg/m}^3$ and $\geq 160 \text{ kg/m}^3$ for the dam and mill tailings when the CEM III/A 42.5N was used as the binder. The CPB samples of Ordinary Portland Cement (CEM I 42.5) were observed to produce a 28-day UCS of ≥ 1.0 MPa and stability for the mill and deslimed dam tailings at 6.5-8.5 wt% binder dosages. Although desliming improved the short and long term strength and stability of dam tailings, it did not produce positive effect on the strength of the pyrite tailings. Mixing and transportation of the deslimed tailings (owing to the increase in settling rate of coarse tailings) should be further evaluated. Furthermore, additional UCS tests should be performed for the deslimed pyrite tailings to achieve the desired strength and stability.

Key Words: Paste Backfill, Desliming, Mill Tailings, Dam Tailings, Binder Dosage and Type

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Madencilik işlemleri sonucu oluşan asidik maden suyu ve çevreye etkisi	1
Şekil 2.	Atık barajlarındaki yenilmelerin yıllara göre değişimi.	3
Şekil 3.	Kıtalara göre yenilme dağılımları	4
Şekil 4.	Atık barajları kazalarının nedenleri	5
Şekil 5.	Tesis Atıklarının Bertarafı.....	6
Şekil 6.	Cevher zenginleştirme işlemleri sonucu açığa çıkan atıkların atık barajına depolanması	6
Şekil 7.	Macun dolguyu oluşturan bileşenler	8
Şekil 8.	Dünyada macun dolgu teknolojisinin kullanımı.....	9
Şekil 9.	Macun dolgunun akışkan görünümü ve boru hattıyla yeraltına iletilmesi.....	10
Şekil 10.	Slamp ölçümünün gösterimi.	12
Şekil 11.	Macun dolgu karışımı katı içeriğinin slamp değeri ile ilişkisi	13
Şekil 12.	Atık barajın üç farklı noktasından alınan atıklar	17
Şekil 13.	Tesis, baraj ve sınıflandırılmış atıkların tane boyut dağılımı.	18
Şekil 14.	Bakır, pirit ve baraj (AB40 m.) atıklarından zamana bağlı su ayrılması.	23
Şekil 15.	Sınıflandırılmış pirit ve baraj atıklarının çökme karakteristikleri.	23
Şekil 16.	Macun dolgu numunelerinin hazırlanması ve testi: karıştırma (a), döküm işlemi (b), kür alma (c) ve dayanım testi (d).....	25
Şekil 17.	Bakır atık (BA) kullanılarak %5,5-6,5 çimento oranında hazırlanan numunelerin dayanımı	27
Şekil 18.	Bakır atık (BA) kullanılarak %7,0-7,5 çimento oranında hazırlanan numunelerin dayanımı	28
Şekil 19.	Pirit atık (PA) kullanılarak %5,5-6,5 çimento oranında hazırlanan numunelerin dayanımı	28
Şekil 20.	Pirit atık (PA) kullanılarak %8,5-9,0 çimento oranında hazırlanan numunelerin dayanımı.	29
Şekil 21.	Baraj atığı (AB15 m.) kullanılarak %5,5-6,5 çimento oranında hazırlanan numunelerin dayanımı.....	30
Şekil 22.	Baraj atığı (AB40 m.) kullanılarak %5,5-6,5 çimento oranında hazırlanan numunelerin dayanımı.....	30

Şekil 23. Baraj atığı (AB65 m.) kullanılarak %5,5-6,5 çimento oranında hazırlanan numunelerin dayanımı.....	31
Şekil 24. Baraj atığı (AB15 m.) kullanılarak %9,0-10,0 çimento oranında hazırlanan numunelerin dayanımı.....	33
Şekil 25. Baraj atığı (AB40 m.) kullanılarak %10,0-11,0 çimento oranında hazırlanan numunelerin dayanımı.....	33
Şekil 26. Baraj atığı (AB65 m.) kullanılarak %10,0-11,0 çimento oranında hazırlanan numunelerin dayanımı.....	34
Şekil 27. Bağlayıcı tipinin bakır atık (BA) kullanılarak %7,5-8,5 çimento oranında hazırlanan numunelerin dayanımına etkisi.....	35
Şekil 28. Bağlayıcı tipinin pirit atık (PA) kullanılarak %7,5-8,5 çimento oranında hazırlanan numunelerin dayanımına etkisi.....	35
Şekil 29. Tane boyut dağılımının sınıflandırılmış baraj atığı (S-AB) kullanılarak %6,5-8,5 çimento oranında hazırlanan numunelerin dayanımına etkisi.....	37
Şekil 30. Tane boyut dağılımının sınıflandırılmış pirit atık (S-PA) kullanılarak %6,5-8,5 çimento oranında hazırlanan numunelerin dayanımına etkisi.....	39

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Cevher zenginleştirme sonrası açığa çıkan atık miktarı.....	5
Tablo 2. Dolgu tiplerinin maliyetlerinin karşılaştırılması.....	14
Tablo 3. Macun dolgunun tesis kurulumuna bağlı ilk yatırım maliyetleri.....	14
Tablo 4. Bakır, pirit ve baraj atığı için dayanım test programı	16
Tablo 5. Çimento oranını belirlemek amacıyla bakır, pirit ve baraj atıkları için ek olarak yapılmış tek eksenli basınç dayanımı deneyleri	16
Tablo 6. Çimento tipi ve oranını belirlemek amacıyla bakır, pirit ve sınıflandırılmış pirit atık ve atık barajı için tek eksenli basınç dayanımı deneyleri	16
Tablo 7. Deneylerde kullanılan atıkların kimyasal ve fiziksel karakterizasyonu.....	19
Tablo 8. Deneylerde kullanılan atıkların mineralojik bileşimi	20
Tablo 9. Atıkların reolojik indeks testleri.	22
Tablo 10. Deneylerde kullanılan bağlayıcıların kimyasal bileşimi	24
Tablo 11. Tesis ve baraj atıklarından hazırlanan 1 m ³ CPB karışımı için gerekli bağlayıcı miktarları	32
Tablo 12. Sınıflandırılmış baraj ve pirit atıklarından (S-AB ve S-PA) hazırlanacak 1 m ³ CPB karışımı için gerekli bağlayıcı miktarları.	38
Tablo 13. İstenen akışkanlık ve dayanımı (7,5" slump ve 28-90 günde $\geq 1,0$ MPa) sağlayacak 1 m ³ CPB karışımı için gerekli bağlayıcı miktarları.	40

SEMBOLLER DİZİNİ

AB	: Atık Barajı
AMD	: Asidik Maden Suyu
ASTM	: American Standardisation for Testing and Materials
BA	: Bakır Atık
C_c	: Eğrilik Katsayısı
CEM I 42,5	: Portland Çimento
CEM II/A 42,5	: Portland Kompoze Çimento
CEM III/A 42,5	: Yüksek Fırın Cürufllu Katkılı Çimento
CH	: Portlandit
CPB	: Çimentolu Macun Dolgu
C-S-H	: Kalsiyum Silika Hidrat
C_u	: Uniformluk Katsayısı
PA	: Pirit Atık
S-AB	: Sınıflandırılmış Atık Barajı
S-PA	: Sınıflandırılmış Pirit Atık
TCMA	: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği
UCS	: Tek Eksenli Basınç Dayanımı
XRD	: X-Işınları Difraksiyonu

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Cevher hazırlama ve zenginleştirme faaliyetlerinden flotasyon gibi zenginleştirme yöntemleri, düşük tenörlü cevherlerin işletilmesine olanak sağlar ve beraberinde önemli ölçüde bertaraf edilmesi gereken tesis atığı açığa çıkar. Bu nedenle zenginleştirme işlemlerini atık yönetimi projesi olarak da değerlendirmek gerekir. Tesis atıklarının bertarafında depolanması, duraylılığı ve emniyeti, su ve toprak kalitesi üzerindeki etkileri önemli çevresel sorunları oluşturmaktadır (Erçikdi vd., 2012).

Maden işletmelerinde yer alan önemli çevresel sorunlardan birisi olan sülfürlü mineral (pirit vb.) içeren atıkların atmosferik koşullar altında depolanması, asidik maden suyu (AMD) oluşumuna ve atıkta bulunan arsenik (As), bakır (Cu) ve çinko (Zn) gibi ağır metallerin salınmasına, çevredeki su kaynaklarının ve toprağın kirlenmesine yol açabilmektedir (Şekil 1) (Akçıl ve Koldaş, 2006). Bu nedenle artan çevresel ve yasal kısıtlamalar nedeniyle bu tür tesis atıklarının emniyetli ve güvenli bir şekilde yönetilmesini zorunlu kılmaktadır (Erçikdi vd., 2012).



Şekil 1. Madencilik işlemleri sonucu oluşan asidik maden suyu ve çevreye etkisi

Günümüzde artan madencilik faaliyetleri ve cevher zenginleştirme işlemleri sonucu açığa çıkan tesis atıkları genellikle yer üstü atık barajlarında depolanmakta, derin denizlere

deşarj edilmekte veya arakatlı kazı ve kes-doldur gibi üretim yöntemlerinin uygulandığı yeraltı işletmelerinde dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır (Kesimal vd., 2005).

1.1.1. Tezin Amacı

Son yıllarda tesis atıklarının (sülfürlü vb.) bertaraf edilmesi gerekmektedir çimentolu macun dolgu (CPB) ile yeraltı üretim boşluklarına depolanarak bertaraf işlemi gerçekleştirilmektedir yani atmosferik koşullar altında depolanması durumunda çevresel problemlere yol açabilecek sülfürlü atıkların emniyetli bir şekilde depolanmasını sağlamaktadır.

Macun dolguyu oluşturan bileşenlerin (atık, bağlayıcı ve karışım suyu) fiziksel, kimyasal ve mineralojik karakteristiği dolgunun kısa ve uzun dönem performansı (dayanım, duraylılık vb.), taşınması ve yeraltı üretim boşluklarına yerleştirilmesi açısından önemli bir rol oynar. Tek eksenli basınç dayanımı (UCS) ve duraylılık (dayanım kaybının oluşmaması) çimentolu macun dolgu kalitesinin belirlenmesinde en önemli parametrelerdir. Örneğin yeraltı üretim boşluğuna yerleştirilen macun dolgunun yan stopların üretimi ve dolgu ile doldurulması işlemleri tamamlanıncaya kadar geçen sürede kendi stabilitesini sağlaması için 28 günlük kür süresinde en az 1 MPa dayanıma sahip olması ve 90 gün boyunca duraylılığını (dayanım kaybı oluşmaması) koruması gerekmektedir.

Bu nedenle tez çalışmasının başlıca amacı;

- (i) Farklı atıklardan hazırlanan karışımlar için en uygun bağlayıcı tipi ve oranını belirlemek,
- (ii) Atık, bağlayıcı ve karışım suyunun fiziksel, kimyasal, mineralojik özellikleri ile ilişkili olarak dolgunun kısa ve uzun dönem performansını etkileyen faktörleri belirlemek,
- (iii) 20 mikron altı malzeme miktarının dolgunun mekanik ve reolojik özelliklerine etkisini değerlendirmek,
- (iv) Reolojik özelliklerin dolgunun dayanım kazanımına etkisini incelemektir.

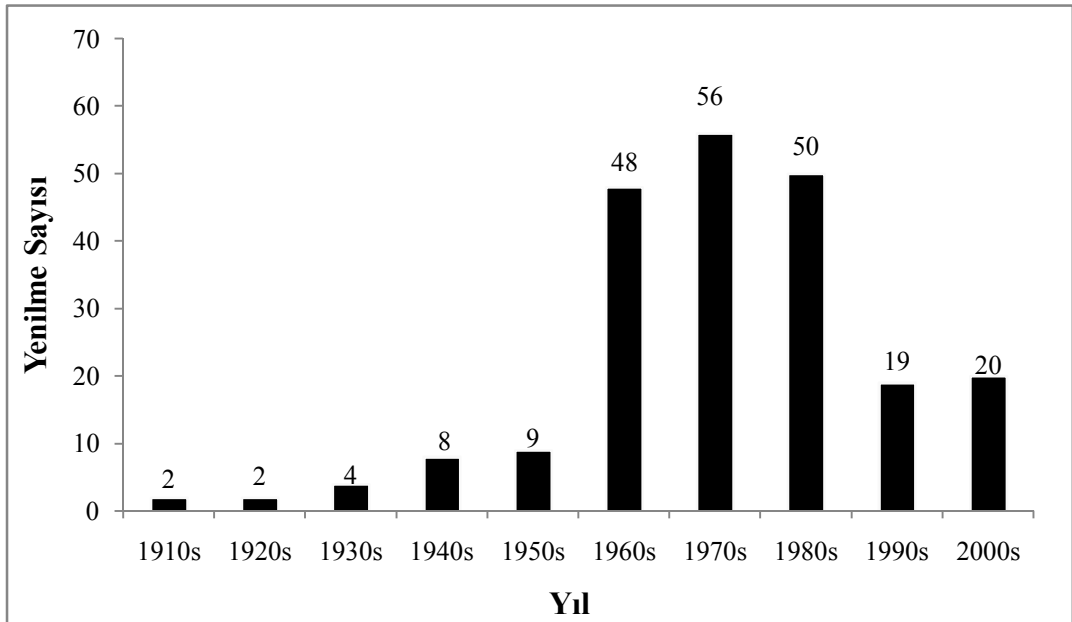
1.2. Yerleşim Düzenine Göre Atık Yönetimi

1.2.1. Yerüstü Atık Yönetimi

Setlendirilmiş baraj ve havuzlar, açık ocak çukurları, özel olarak kazılan çukurlar ve bataklık alanlarının kullanımı uygulanmakta olan başlıca yerüstü atık bertaraf yöntemleridir. En yaygın kullanılan yerüstü bertaraf yöntemi ise atık barajlarıdır (Azam ve Li, 2010).

Tasarımı, inşaatı ve denetimleri iyi yapılmış atık barajlarında atıkların emniyetli bir şekilde depolanması ve bertaraf edilmesi dünya genelinde oldukça yaygın bir uygulama alanına sahiptir (Erçikdi vd., 2012).

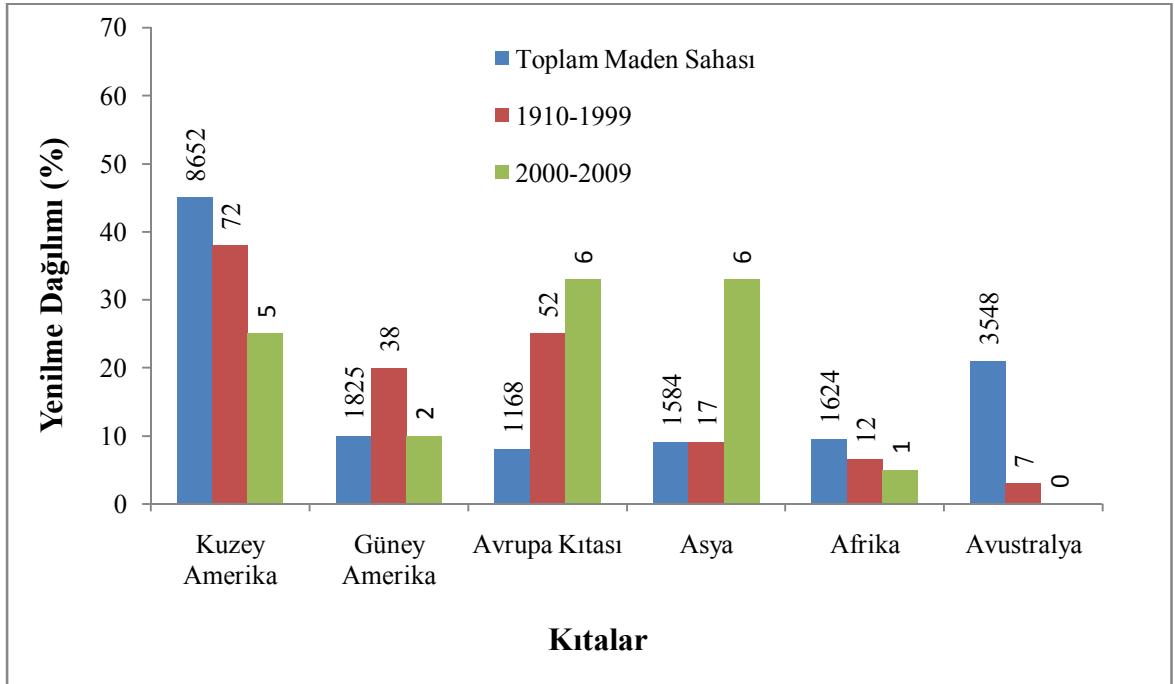
Dünya genelinde 3500'den fazla atık barajı olduğu belirtilmektedir (Chambers ve Higman, 2011). Ancak atık barajlarında özellikle 1960-1980 yılları arasında yılda ortalama 5, 1980-2011 yılları arasında yılda ortalama 2 kaza oluşumu birçok kişinin hayatını kaybetmesine, yapısal hasarlara, tarım ve orman arazilerinin zarar görmesine ve olumsuz çevresel etkilere (su kirliliği vb.) neden olmuştur (Şekil 2) (Azam ve Li, 2010).



Şekil 2. Atık barajlarındaki yenilmelerin yıllara göre değişimi (Azam ve Li, 2010).

Dünya genelinde 2000 yılı öncesi 198, 2000 yılı ve sonrası ise toplam 22 adet atık barajı kazası meydana gelmiştir. Bunun nedeni 2. Dünya savaşından sonra metal, mineral ve hammaddelere olan talebi karşılamak amacıyla artan madencilik faaliyetlerinden kaynaklanmaktadır. Kazanılan mühendislik tecrübeleri, daha sıkı emniyet tedbirlerinin alınması ve inşaat (yapı) teknolojisindeki ilerlemeler 1990 ve 2000'li yıllardaki atık barajı kazalarında azalma sağlanmıştır (2 adet/yıl) (Rico vd., 2008).

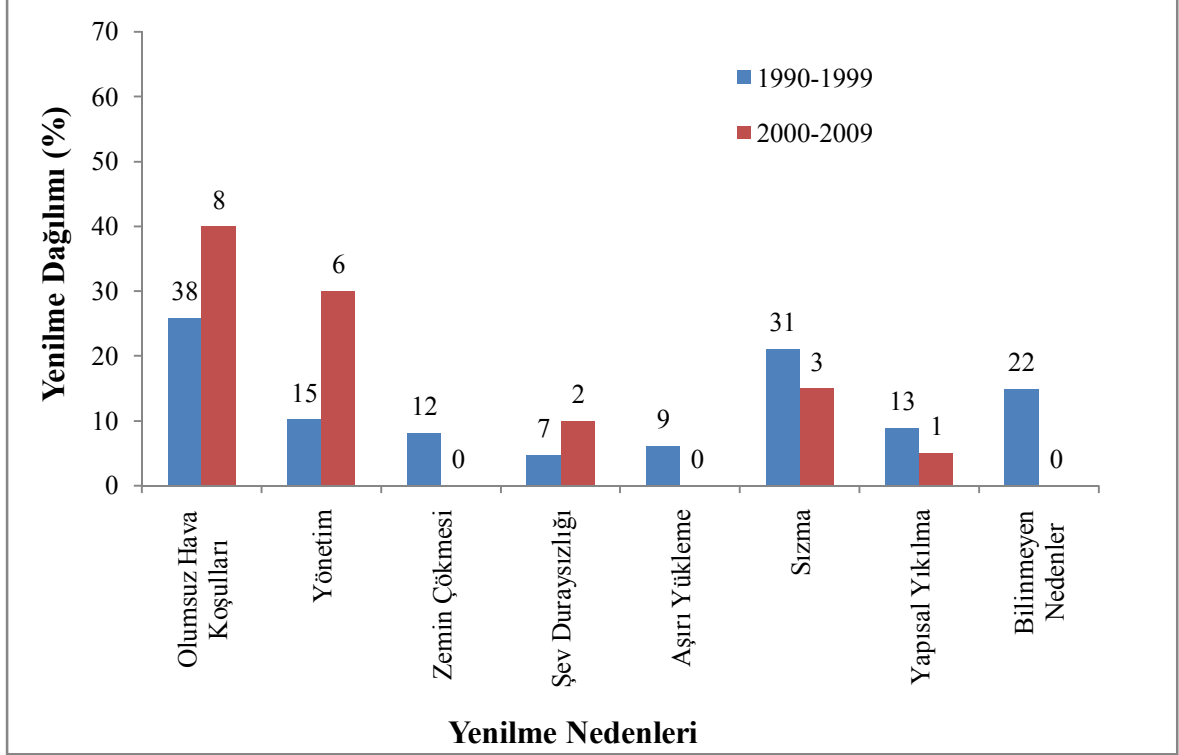
2000 yılından önceki toplam 198 atık barajı kazası daha çok Kuzey Amerika %36, Avrupa %26 ve Güney Amerika'da ise %19 meydana gelmiştir. Buna karşın 2000 yılından sonra meydana gelen 20 kazanın %60'ı (12 adet); Avrupa (6 adet) ve Asya'da (6 adet) meydana gelmiştir. Bunun nedeni; Çin ekonomisinin büyümesiyle birlikte ihtiyaç duyduğu metal ve mineralleri daha çok Avrupa ve Asya'dan ithal etmesidir. Böylece atık barajı kazaları gelişmekte olan ülkelerde daha fazla olmuştur (Şekil 3) (Azam ve Li, 2010).



Şekil 3. Kıtalarla göre yenilme dağılımları (Azam ve Li, 2010).

Atık barajlarında; uygun tasarımın yapılmaması, olumsuz iklim koşulları, yetersiz baraj yüksekliği ve aşırı atık depolama, zemin koşulları, sıvılaşma, şev duraysızlığı ve yer değiştirme, drenaj koşulları, sızıntı ve gözenek suyu basıncı gibi nedenlerden dolayı

meydana gelen kazalar (Şekil 4), atıkların bertarafı konusunda yeni teknolojilerin gelişimine katkıda bulunmuştur (Azam ve Li, 2010).



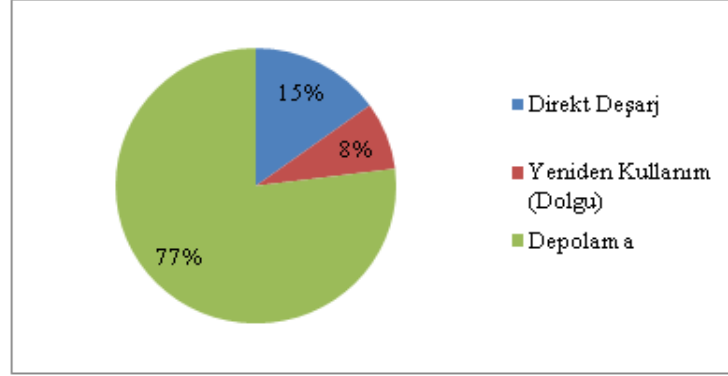
Şekil 4. Atık barajları kazalarının nedenleri (Azam ve Li., 2010).

Türkiye’de ise 2008 yılı Ekim ayı envanterine göre ülkemizde bulunan 91 adet cevher zenginleştirme tesisinde, yılda yaklaşık 26,400,000 ton tesis atığı üretilmektedir (Tablo 1) (Aka, 2011). Bu atıkların %79’u metalik madenler, %16’sı enerji hammaddeleri ve %5’i de endüstriyel hammaddelerin zenginleştirilmesi sonucu oluşmaktadır.

Tablo 1. Cevher zenginleştirme sonrası açığa çıkan atık miktarı

Atık Bertarafı	Sayı	Miktar (ton/yıl)
Direkt Deşarj	3	3.866.000
Yeniden Kullanım (Dolgu)	29	2.149.260
Depolama	59	20.322.513
Toplam	91	26.337.773

Bu atıkların yaklaşık %15'i doğrudan deşarj, %8'i dolgu malzemesi olarak kullanılmakta, %77'si ise atık barajları ve atık havuzlarında bertaraf edilmektedir (Şekil 5) (Aka, 2011).



Şekil 5. Tesis Atıklarının Bertarafı (Aka, 2011).

Örneğin; Gümüşhane Mastra Altın Madeni ve Kastamonu Küre Bakır Madeni'nde tesis atıklarının tamamı atık barajında depolanmaktadır (Şekil 6).



Şekil 6. Cevher zenginleştirme işlemleri sonucu açığa çıkan atıkların atık barajına depolanması

Çayeli Bakır İşletmeleri'nde ise tesis atıklarının yaklaşık %75'i macun dolgu malzemesi olarak yeraltı üretim boşluklarında, geri kalan %25'lik kısım ise derin deniz deşarjı ile bertaraf edilmektedir. Ülkemizde bulunan toplam 25 adet atık barajında bugüne kadar çok ciddi bir atık barajı kazası yaşanmamıştır.

1.2.2. Derin Deniz Deşarjı

Derin deniz deşarjı yönteminde atıklar, deniz veya okyanuslarda, kıyıdan uzaktaki derin zonlara yağışın çok, buharlaşmanın az, yerüstü atık bertaraf yöntemlerinin riskli olduğu bölgelerde uygulanır ve bundan dolayı uygulama alanı oldukça kısıtlıdır (Çetiner vd., 2006). Atıklar genellikle sahilden deniz dibine döşenen yüksek yoğunluklu polietilen boru hatları ile canlı yaşamının olmadığı mesafe ve derinlikte deniz tabanına bırakılmaktadır ve son zamanlarda önemi giderek artan bu yöntem asit kaya sızıntısı potansiyeli olan atıklar için de uygundur (Azam ve Li, 2010).

1.2.3. Yeraltı Atık Yönetimi

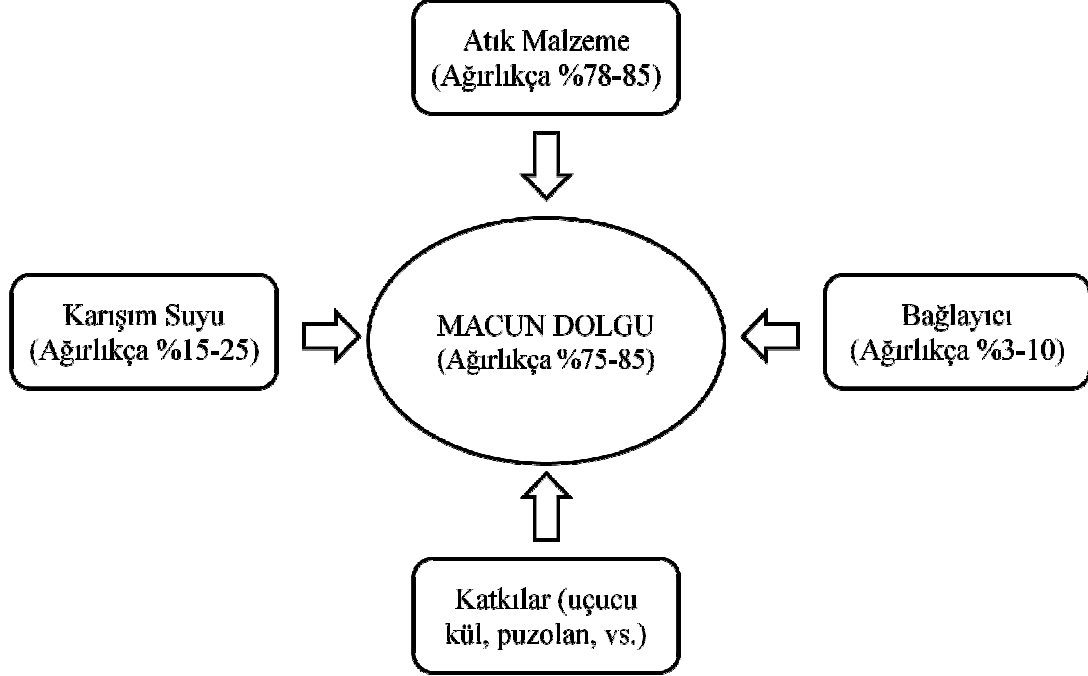
Yeraltı maden açıklıklarından, atıkların dolgu amaçlı değerlendirilmesi veya tehlikeli atıkların doğal çevreye zarar vermeden güvenli bir şekilde nihai olarak bertaraf için faydalanılabilmektedir. Yeraltı madenlerinde endüstriyel atıkların dolgu amaçlı değerlendirilmesi ile maden işletmelerinin üretim faaliyetlerinden kaynaklanan çevre ve güvenlik sorunlarının en aza indirilmesi hedeflenmektedir (Özarslan, 2005). Tehlikeli atıklar günümüzde genellikle derelere, atık baraj ve havuzlarına, denize vb. yerlere depolanmaktadır. Sülfürlü atıklar su ve oksijen varlığında oksidasyona uğrayarak asit (AMD) ve sülfat oluşumuna yol açabilir. Bu da içme sularının kirlenmesi, suda yaşayan canlıların zarar görmesi, tarımın elverişsiz hale gelmesine neden olabilir (Erçikdi vd., 2013).

Yeraltı maden açıklıklarının bu amaçlarla kullanılması atık yönetiminde bertaraf sorununun çözülmesine önemli katkılar ve işletmecilere ekonomik kazanç sağlamaktadır (Özarslan, 2005).

1.3. Macun Dolgu Teknolojisi

Macun dolgu, yüksek yoğunluklu cevher zenginleştirme tesis atığı (tane boyut dağılımı ve özgül ağırlığına bağlı olarak %75-85 katı oranında), dolgunun dayanım kazanımı ve duraylılığı için bağlayıcı madde ile dolgunun yeraltı üretim boşluklarına

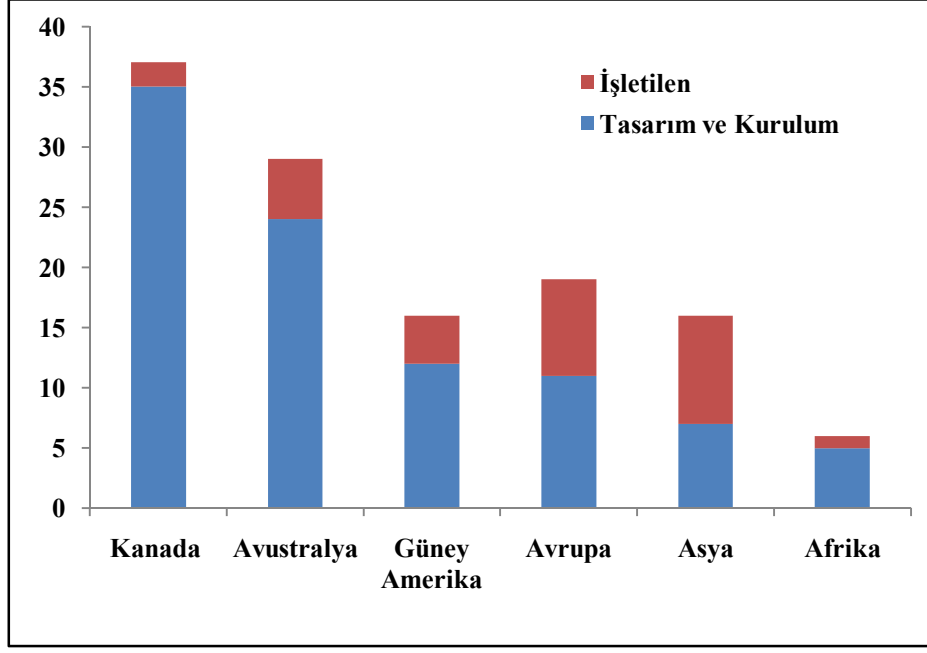
istenen kıvamda taşınması ve bağlayıcının hidratasyonunu sağlamak amacıyla ilave edilen karışım suyundan oluşmaktadır (Şekil 7) (Erçikdi vd., 2012).



Şekil 7. Macun dolguyu oluşturan bileşenler (Erçikdi vd., 2012).

İlk olarak 1980 yılında Almanya'nın Bad Grund madeninde kullanılan ve başarısından dolayı dünyada giderek yaygınlaşan “macun dolgu teknolojisi” tesis atıklarının yeraltı üretim boşluklarında emniyetli bir şekilde depolanmasına olanak sağlamaktadır (Landriault, 2006). Tesis atıklarının yeraltında depolanabilirliği ise atıkların karakterizasyonuna, atığın depolanacağı yerin çevre koşullarına, kısa ve uzun dönemli duraylılık koşullarına ve reolojik özelliklerine bağlı olarak değişmektedir.

Yeraltı madenciliğinde, madeni alınmış üretim boşluklarını doldurmak veya tahkimat sağlamak amacıyla çimentolu macun dolgu kullanımı, özellikle Kanada ve Avustralya’da oldukça yaygındır. Özellikle son 30 yılda büyük gelişme kaydetmiştir ve dünya genelinde kapasiteleri 12-200 m³/saat arasında değişen yaklaşık 100 adet macun dolgu tesisinin aktif olarak çalıştığı, 30 civarında tesisin de tasarım ve kurulum aşamasında olduğu bilinmektedir (Şekil 8) (Yumlu, 2010). Kanada yeraltı madenciliğinde kullanılan dolgu malzemesinin %64’ünün atık kaya (%36’sı çimentolu, %28’i çimentosuz), %32’sinin tesis atığı (%27’si çimentolu, % 5’i çimentosuz) ve geri kalan %4’ünün ise çimentosuz kum ve çakıldan oluştuğu bildirilmiştir (Hassani vd., 2007).



Şekil 8. Dünyada macun dolgu teknolojisinin kullanımı (Erçikdi vd., 2012).

Ülkemiz yeraltı madenciliğinde uygulanan dolgu sistemlerine yönelik detaylı bir çalışma bulunmamasına karşın, genellikle kaya dolgu sisteminden faydalanılmaktadır. Ülkemizde macun dolgu teknolojisi ise ilk defa 1999 yılında Çayeli Bakır İşletmeleri’nde uygulanmaya başlanmış olup, başarılı bir şekilde halen devam etmektedir. Çayeli macun dolgu tesisi, ağırlıkça %82 katı oranına sahip ve saatte 45m³’lük macun üretme kapasitesine sahiptir. Yılda yeraltı üretim boşluklarına yerleştirilen yaklaşık 250.000 m³ dolgunun %75’i macun dolgu yöntemi, geri kalan % 25’lik kısım ise çimentolu/çimentosuz pasa dolgu ile gerçekleştirilmektedir. Kastamonu–Küre’de yer alan yeraltı bakır işletmesi tesis atıkları yer üstü atık barajında depolanmakta, yeraltı üretim boşluklarının tahkimatı çimentolu kaya dolgu yöntemi ile sağlanmaktadır. 2012 yılında hem zenginleştirme tesisinden çıkan hem de atık barajında biriken atıkları yeraltı üretim boşluklarında depolamak ve açıklıkların tahkimatını sağlamak amacıyla macun dolgu tesisinin kurulumuna yönelik altyapı çalışmalarına başlanmıştır. İzmir – Efemçukuru Altın Madeni’nde de tesis atıklarının % 50’lik kısmının, susuzlandırıldıktan (yaklaşık %10 nem içeriğinde) sonra yer üstünde depolanması, geri kalan kısmının ise macun dolgu yöntemi ile yeraltı üretim açıklıklarının tahkimatında kullanılması planlanmaktadır (Erçikdi vd., 2012).

Yeraltı üretim boşluklarına depolanabilecek atık miktarı, macun dolgunun akışkanlığına ve yoğunluğuna bağlıdır. Tesis atığının macun dolgu malzemesi olarak

kullanılabilmesi için 20 μm altı malzeme içeriğinin ağırlıkça $\geq\%15$ olması gerekmektedir. İnce tanelerin kolloidal su tutma özelliği dolgunun akışkan bir yapıda boru hattı ile yeraltına taşınmasına yardımcı olmaktadır (Şekil 9) (Erçikdi, 2009).



Şekil 9. Macun dolgunun akışkan görünümü ve boru hattıyla yeraltına iletilmesi

Macun dolgu tasarımında dikkat edilmesi gereken en önemli faktörler dolgu dayanım ve durabilitesi, reolojik özellikleri ve işletme maliyetleridir. Üretim yöntemi olarak arakatlı kazı ve kes-doldur yönteminin uygulandığı yeraltı madenlerinde, cevheri alınmış bölgeye yerleştirilen macun dolgunun yan odanın üretimi ve sonrasında macun dolgu ile dolduruluncaya kadar geçen sürede kendi stabilitesini sağlaması gerekmektedir (Brackebusch, 1994). Yerleştirilen macun dolgunun 28 günlük kür süresi sonunda en az 1,0 MPa dayanım kazanması ve 180 günlük kür süresi boyunca durabilitesini koruması gerekmektedir (Yumlu, 2001).

Macun dolgu teknolojisinin bazı önemli avantajları şunlardır (Erçikdi vd., 2012):

- Tesis atıklarının büyük bir kısmının yeraltında depolanmasını sağlar. Böylece çevresel sorunları önleyerek rehabilitasyon maliyetlerini azaltır.
- Kaya ve hidrolik dolguya kıyasla macun dolgunun taşınması ve yerleştirilmesi esnasında ayrışmanın oluşmaması, yeraltı üretim boşluklarının tamamının doldurulmasına imkân sağlamakta (porozite ve boşluk oluşumu engellenmekte) ve böylece tavan oturmalarının önüne geçilerek emniyetli çalışma koşulları oluşturulmaktadır.
- Zenginleştirme işlemleri sırasında çeşitli kimyasallar ilave edilen proses suyunun yaklaşık %90'ı tikiyer ve filtreleme işlemleri esnasında geri kazanılmaktadır. Ayrıca macun dolgunun geçirimsizliğinin düşük, doygunluk derecesinin yüksek olması hem dolgu içerisindeki suyun dışarıya sızmasını, hem de yeraltı suyunun dolgu içerisinden geçişini

engellemektedir. Ayrıca oksijenin dolgu içerisine difüzyonu ve ortamdaki sülfürlü minerallerin oksidasyonu sonucu asit maden drenajı (AMD) oluşum riski azalmaktadır.

- Boru hattı ile yeraltına taşınması, klasik taşıma sistemlerinin (konveyör ve mobil ekipmanlar) yol açtığı problemleri (tahkimatın zarar görmesi, trafik problemi vb.) azaltmaktadır.

- Dolgu işleminin hızlı olması ve aynı çimento oranında hidrolik dolguya kıyasla daha yüksek dayanım kazanımı sağlaması madencilik işlemlerinin (ocağın döngü süresi) kısılmasını sağlar.

- Dolguya ilave edilen çimento dayanım kazanımının yanında dolgunun geçirimsizliğini ve nötralizasyon potansiyelini artırarak AMD oluşumunu azaltmaktadır.

- Topukların kazanımını sağlayarak verimliliği artırır, tahkimat işlevi görür, çalışanlar ve ekipmanlar için çalışma platformu oluşturur.

1.3.1. Macun Dolgu Tasarımında Önemli Faktörler

Macun dolgu sistemlerinin tasarımında, dolgunun hazırlanması, yeraltına taşınması, barikat dizaynı, dolgunun yerleştirilmesi, dolgunun dayanım ve duraylılığı, reolojik özellikleri, su kalitesine etkisi ve maliyeti gibi birçok faktör etkindir (Belem ve Benzaazoua, 2008). Macun dolgu sistemlerinin tasarımındaki yanlışlıklar sonucu yeraltında meydana gelebilecek göçükler ve barikat yenilmeleri, çevresel problemlere, iş gücü kaybına ve üretimin azalmasına (hatta durmasına) neden olabilir. Bu nedenle macun dolgu tesisi kurulmadan önce/sonra mutlaka dolgunun su kalitesine etkisinin, reolojik özelliklerinin, kısa ve uzun dönemde dayanım ve duraylılığının detaylı olarak incelenmesi ve optimizasyonu gerekir (Tariq ve Nehdi, 2007).

1.3.1.1. Dayanım ve Duraylılık

Macun dolgunun pratikte dayanımı, düşük maliyeti ve maden işletmelerinde rutin olarak kullanılmasından dolayı, tek eksenli basınç dayanım testi ile belirlenmektedir (Erçikdi vd., 2012).

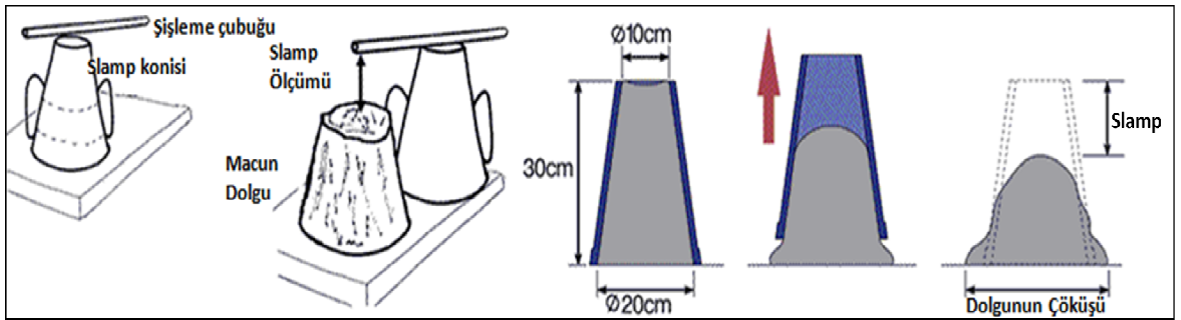
Kes-doldur ve arakatlı kazı üretim yöntemlerinin uygulandığı yeraltı madenlerinde, birincil üretim boşluğuna (stope) yerleştirilen macun dolgunun, yan stopeler'in üretimi ve

dolgu ile doldurulması işlemleri tamamlanıncaya kadar geçen sürede kendi stabilitesini sağlaması gerekmektedir. Uygulamada bu amaçla yerleştirilen dolgunun 28 günlük kür süresi sonunda 1 MPa dayanım kazanması ve 180 gün boyunca dayanımını koruması istenmektedir (Erçikdi vd., 2010b). Tavan tahkimatı sağlaması amacıyla yerleştirilen dolgunun ise minimum 4 MPa dayanıma sahip olması beklenir (Erçikdi vd., 2010a).

Dolgunun dayanım ve duraylılığı, atık, bağlayıcı ve kullanılan suyun fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri ile yakından ilişkilidir (Yılmaz vd., 2013). Ayrıca yeraltı kür koşulları (nem ve sıcaklık), barikatın sağlamlığı, dolgu yerleştirme şekli, yanal basınçlar ve patlatma kaynaklı titreşimler de dolgunun mekanik özelliklerini etkilemektedir (Cihangir vd., 2012).

1.3.1.2. Macun Dolguda Reolojinin Önemi

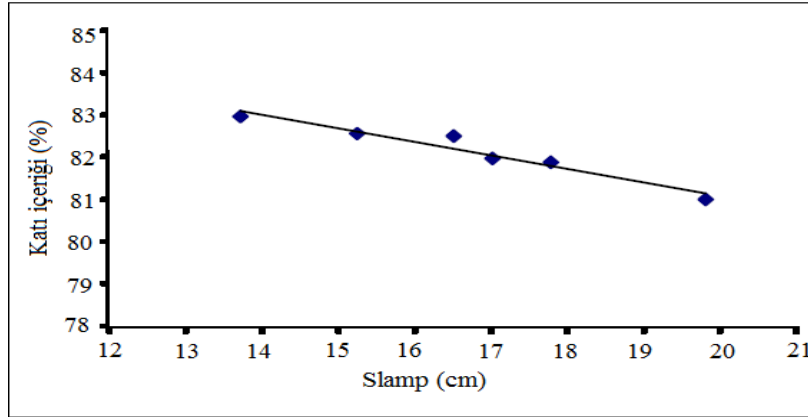
Dolgunun yer üstü macun dolgu tesisinde hazırlanıp yeraltı üretim boşluklarına boru hattı ile taşınabilmesi için yeterli miktarda su içermesi ve belirli bir akışkanlığa sahip olması gerekmektedir. Boru hattı ile taşınan bu atık malzemenin bünyesinde su tutabilmesi için atığın ağırlıkça %15'i kadar 20 μm altı ince malzeme bulundurması gereklidir (Kesimal vd., 2003). Dolgunun reolojik davranışının önceden belirlenmesi, pompa bakım ve enerji maliyetlerini azaltarak boru hattında meydana gelecek aşınma ve tıkanmaları engelleyecektir. Macun dolgunun reolojik özellikleri, genellikle kıvam (slamp) testi ile ölçülebilir (Şekil 10) (Benzaazoua vd., 2002; Clark vd., 1995).



Şekil 10. Slamp ölçümünün gösterimi

Kıvam ölçümünün yanı sıra akma gerilmesi (yield stres) ve viskozite ölçümlerinin de yapılması dolgunun reolojik davranışını anlamada ve taşıma sistemlerinin tasarımında

faydalı olacaktır. Dolguyu oluşturan bileşenlerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliklerine bağlı olarak macun dolgunun kıvamı genellikle 6-10 inç arasında, akma gerilmesi değeri ise 100 - 700 Pa arasında değişmektedir ve katı oranı arttıkça slump değeri düşmektedir (Şekil 11) (Kesimal vd., 2004).



Şekil 11. Macun dolgu karışımı katı içeriğinin slump değeri ile ilişkisi (Kesimal vd., 2004).

1.3.1.3. Macun Dolguda Ekonomi

Uygun bir atık yönetimi yöntemi olan macun dolgu, kaya ve hidrolik dolguya kıyasla günümüzde avantajlı kılan en önemli özellikleri, işletme maliyetlerinin düşük olması, cevher zenginleştirme işlemleri sonucu açığa çıkan tesis atıklarının büyük bir kısmının yeraltında depolanabilmesine imkan sağlaması ve böylece yer üstü atık depolama ve rehabilitasyon maliyetlerini azaltmaktadır (Erçıkı vd., 2012).

Macun dolgunun işletme maliyetleri kaya ve hidrolik dolguya kıyasla daha düşüktür (Tablo 2) ve tesis atıklarının %65-70'inin yeraltında depolanmasına imkân sağlamaktadır (Yılmaz vd., 2004).

Tesis kurulum kapasitesi ve yeraltı nakliye sistemine bağlı olarak macun dolgunun ilk yatırım maliyeti 5-7 milyon USD arasında değişmektedir (Tablo 3) (Golder PasteTec, 2012). Macun dolgu uygulamasında işletme maliyetlerinin en önemli kısmını (yaklaşık %50-75) çimento sarfiyatı oluşturmaktadır. Dolgunun dayanım ve duraylılığını artırmak için karışıma ilave edilecek %1'lik bağlayıcı artışı işletme maliyetlerini olumsuz yönde etkileyecektir (yaklaşık 1 USD/ton maliyet artışı). Bu nedenle son yıllarda Portland çimentosu yerine belirli oranlarda puzolanik özelliğe sahip mineral ve akışkanlaştırıcı

özelliğe sahip kimyasal katkıları kullanılarak işletme maliyetleri azaltılmaya çalışılmaktadır (Benzaazoua vd., 2002; Tariq ve Nehdi, 2007; Erçikdi vd., 2009b).

Tablo 2. Dolgu tiplerinin maliyetlerinin karşılaştırılması (Yılmaz vd., 2004).

Operasyon Maliyetleri (USD-\$/ton)	Hidrolik Dolgu	Kaya Dolgu	Macun Dolgu
Çimento	2,3	2	1,5
Dolgunun hazırlanması	1,31	1,2	2,2
Dağıtım	0,92	3,5	0,9
Barikat	1,28	-	0,6
Temizleme	0,98	-	-
Pompalama	0,91	-	-
Diğer	0,21	0,21	0,21
Toplam maliyet	7,91	6,91	5,41

Tablo 3. Macun dolgunun tesis kurulumuna bağlı ilk yatırım maliyetleri (Golder PasteTec, 2012).

İşletme Adı / Yer	İşlem / Kurulum	İlk Yatırım Maliyeti (USD)
Greens Creek gümüş madeni, Juneau, Alaska, ABD	Tesis kurulumu (84 ton/saat kapasiteli) ve nakliye sistemi	6×10^6
Zinkgruvan çinko - kurşun - gümüş madeni, Zinkgruvan, İsveç	Tesis kurulumu (90 ton/saat kapasiteli) ve nakliye sistemi	6×10^6
Red Lake altın madeni, Ontario, Kanada	Tesis kurulumu (50 ton/saat kapasiteli) ve nakliye sistemi	5×10^6
Bulyanhulu altın madeni, Tanzanya, Afrika	Tesis kurulumu (180 ton/saat kapasiteli) ve nakliye sistemi	7×10^6
Campbell altın madeni, Red Lake, Ontario, Kanada	Tesis kurulumu (60 ton/saat kapasiteli) ve nakliye sistemi	7×10^6
Çayeli bakır işletmeleri, Rize, Türkiye	Tesis kurulumu (90 ton/saat kapasiteli) ve nakliye sistemi	6×10^6
Cannington kurşun - çinko madeni, Queensland, Avustralya	Tesis kurulumu (175 ton/saat kapasiteli) ve nakliye sistemi	7×10^6

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Su-çimento oranı, farklı bağlayıcı tipi, oranı ve tane boyut dağılımı gibi parametrelerin macun dolgu dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmak için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda 2 farklı cevher hazırlama tesisi atığı (bakır atık ve pirit atık, BA ve PA), atık barajının farklı noktalarından alınan 3 farklı atık (AB15 m., AB40 m., AB65 m.) ve 2 farklı sınıflandırılmış atık (sınıflandırılmış pirit atık S-PA ve sınıflandırılmış baraj atığı S-AB) malzeme ile 3 farklı çimento (Portland çimento, CEM I 42,5; Yüksek fırın cürufu katkı çimento, CEM III A 42,5N; Portland kompoze çimento, CEM II/A 42,5) kullanılmıştır.

Bu tezin başlıca amacı;

- (i) Farklı atıklardan hazırlanan karışımlar için en uygun bağlayıcı tipi ve oranını belirlemek,
- (ii) Atık, bağlayıcı ve karışım suyunun fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri ile ilişkili olarak dolgunun kısa ve uzun dönem performansını etkileyen faktörleri belirlemek,
- (iii) 20 mikron altı malzeme miktarının dolgunun mekanik ve reolojik özelliklerine etkisini değerlendirmek,
- (iv) Reolojik özelliklerin (7,0" ve 7,5" slamp) dolgunun dayanım kazanımına etkisini incelemektir.

Yukarıda belirtilen amaçlara ulaşmak için bu tez çalışması üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, çimentolu macun dolgu karışımlarının hazırlanmasında kullanılan atık ve bağlayıcıların detaylı fiziksel, kimyasal ve mineralojik karakterizasyonu yapılmıştır. Macun dolgu karışımlarının reolojik özelliklerini belirlemek amacıyla su bırakma/tutma ve slamp testlerinden oluşan bir dizi reolojik indeks testler gerçekleştirilmiştir. Üçüncü aşamada ise, bağlayıcı tipi, oranı ve tane boyut dağılımının (sınıflandırma işlemi) 7-14-28-90 günlük kür süresi aralığında macun dolgunun tek eksenli basınç dayanımına (UCS) etkisi incelenmiştir (Tablo 4, 5 ve 6).

Tablo 4. Bakır, pirit ve baraj atığı için dayanım test programı

Atık Tipi Toplam 270 numune	Çimento Tipi	Slump (İnç)	Küre süresi (Gün)	Çimento Oranı (Ağırlıkça %)
Bakır atık (BA) Toplam 54 numune	CEM III A 42,5N	7,0" 7,5"	7, 14, 28	5,5, 6,0, 6,5
Pirit atık (PA) Toplam 54 numune				
Atık barajı (AB15 m.) Toplam 54 numune				
Atık barajı (AB40 m.) Toplam 54 numune				
Atık barajı (AB65 m.) Toplam 54 numune				
Atık barajı (AB65 m.) Toplam 54 numune				

Tablo 5. Çimento oranını belirlemek amacıyla bakır, pirit ve baraj atıkları için ek olarak yapılmış tek eksenli basınç dayanımı deneyleri

Atık Tipi Toplam 90 numune	Çimento Tipi	Slump (İnç)	Küre süresi (Gün)	Çimento Oranı (Ağırlıkça %)
Bakır atık (BA) Toplam 18 numune	CEM III A 42.5N	7,5"	14, 28, 90	7,0, 7,5
Pirit atık (PA) Toplam 18 numune				8,5, 9,0
Atık barajı (AB15 m.) Toplam 18 numune				9,0, 10,0
Atık barajı (AB 40 m.) Toplam 18 numune				10,0, 11,0
Atık barajı (AB 65 m.) Toplam 18 numune				10,0, 11,0
Atık barajı (AB 65 m.) Toplam 18 numune				10,0, 11,0

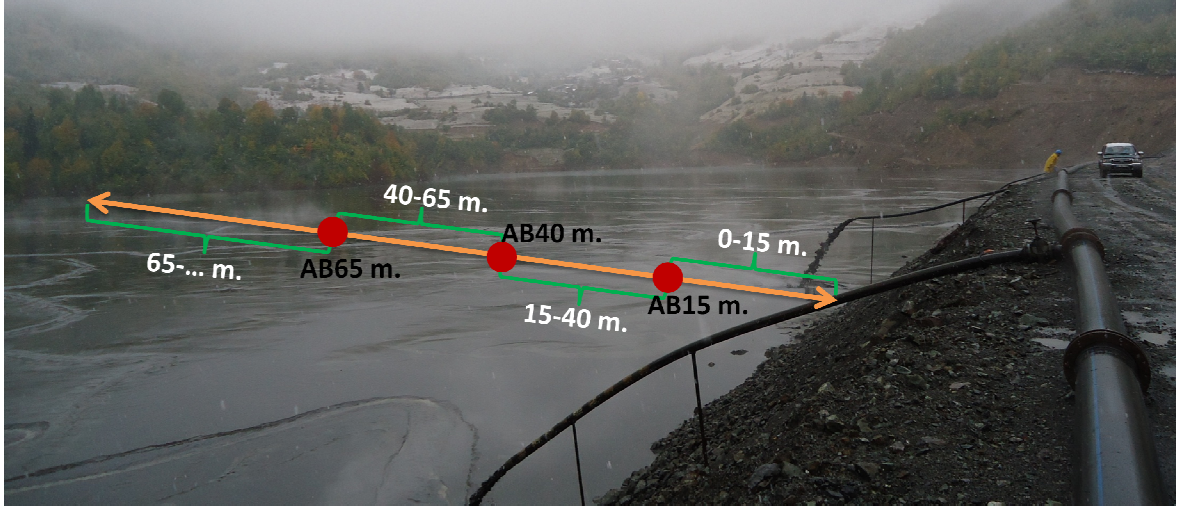
Tablo 6. Çimento tipi ve oranını belirlemek amacıyla bakır, pirit ve sınıflandırılmış pirit atık ve atık barajı için tek eksenli basınç dayanımı deneyleri

Atık Tipi Toplam 270 numune	Çimento Tipi	Slump (İnç)	Küre süresi (Gün)	Çimento Oranı (Ağırlıkça %)
Bakır atık (BA) Toplam 54 numune	CEM I 42,5 (Ankara)	7,5"	14, 28, 90	7,5, 8,5
Pirit atık (PA) Toplam 54 numune				7,5, 8,5
Sınıflandırılmış Pirit atık (S-PA) Toplam 81 numune	CEM II/A 42,5 (Bolu)			6,5, 7,5, 8,5
Sınıflandırılmış Atık barajı (S-AB) Toplam 81 numune	CEM III A 42,5N (Karçimsa)			6,5, 7,5, 8,5

CEM I 42.5: Portland çimento; CEM II A 42.5: Portland kompoze çimento CEM III A 42.5N: Yüksek fırın cürufu katkı çimento.

2.2. Atıkların Karakterizasyonu

Etibakır A.Ş. işletmelerinden atıkları temsil edecek şekilde iki farklı tesis atığı (BA ve PA), üç farklı baraj atığı (AB15 m., AB40 m. ve AB65 m.) (Şekil 12) ve iki farklı sınıflandırılmış atık (S-PA ve S-AB) alınmıştır. Atıkların özellikleri KTÜ (Kaya Mekaniği ve Macun Dolgu Laboratuvarı), Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TCMA) ve ACME laboratuvarlarında belirlenmiştir. Laboratuvar deneylerinden önce atıklar dekantasyona tabi tutularak homojenleştirilmiştir. Atıkların tane boyut dağılımı, özgül ağırlığı, mineralojik bileşimi, kimyasal bileşimi ve reolojik özellikleri belirlenmiştir.



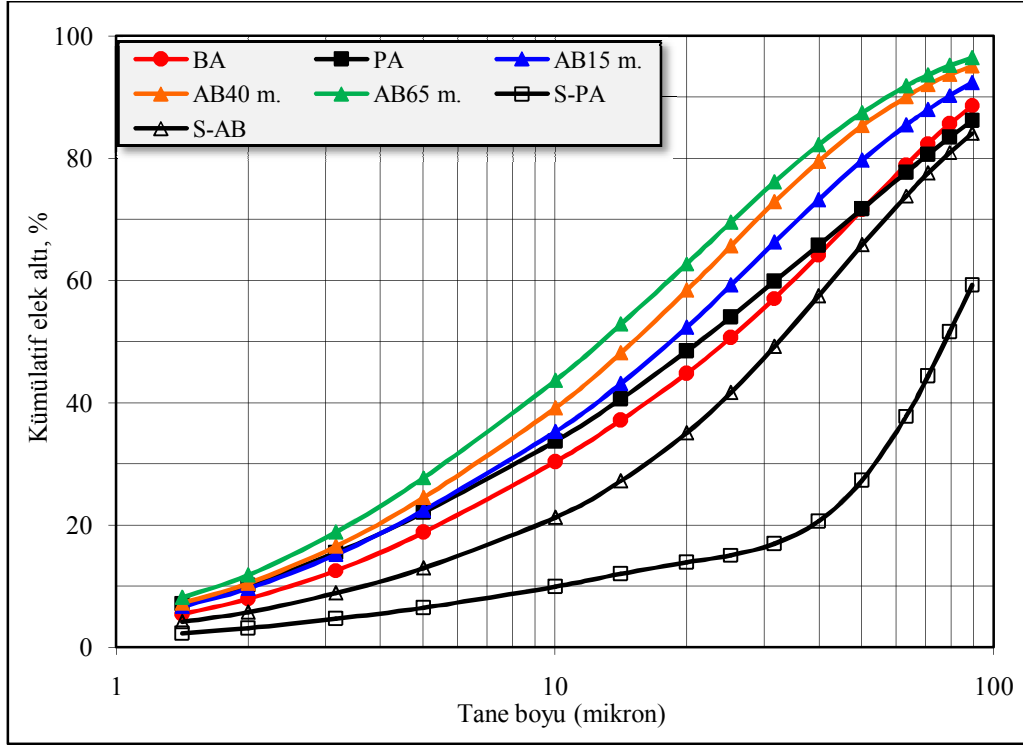
Şekil 12. Atık barajın üç farklı noktasından alınan atıklar

2.2.1. Tane Boyut Dağılımı

Atıkların tane boyut dağılımları (Şekil 13) Malvern Mastersizer (Version 2.15, Malvern Instruments Ltd, UK) cihazı ile belirlenmiştir.

Atıkların 20 mikron altı malzeme miktarı ağırlıkça %13,9-62,7 arasında olup, macun oluşturmak için gerekli limit değerden (ağırlıkça %15) daha yüksektir. BA ve PA atık malzemelerinin tane boyut dağılımları birbirine benzerdir. BA ve PA'nin (mevcut durumdaki) 20 mikron altı malzeme miktarı sırasıyla ağırlıkça %44,8 ve %48,4'tür. Tesis atıkları bu haliyle Landriault (2001)'e göre orta boyutlu macun dolgu malzemesi sınıfına girmektedir. Baraj atıkları tesis atıklarına göre nispeten daha fazla ince malzeme (20 μ m

altı malzeme miktarı ağırlıkça %52,4-62,7 arasında) içermektedir. Sadece baraj atığı (AB65 m.) ince boyutlu macun dolgu malzemesi sınıfına girmektedir (Landriault, 2001).



Şekil 13. Tesis, baraj ve sınıflandırılmış atıkların tane boyut dağılımı

Sınıflandırma işleminden (şlam uzaklaştırma) sonra, baraj atığının 20 mikron altı malzeme miktarı ağırlıkça %35'e, pirit atığının ise %13,9'a düşmüştür. Sınıflandırılmış baraj atığı (S-AB) ve sınıflandırılmış pirit atık (S-PA) sırasıyla orta ve iri boyutlu macun dolgu malzemesi sınıfına girmektedir. İyi bir tane boyut dağılımına sahip dolgu/zemin malzemesi için üniformluk (C_u) ve eğrilik (C_c) katsayıları sırasıyla 4-6 ve 1-3 arasında değişmektedir (Terzaghi ve Peck, 1967). Bu anlamda, mevcut pirit (PA) ve baraj (AB65 m.) atıklarının C_u değerleri sırasıyla 16,0 ve 10,0, sınıflandırılmış pirit (S-PA) ve baraj (S-AB) atıklarının ise 8,96 ve 10,84 olarak hesaplanmıştır (Tablo 7). Benzer olarak C_c değerleri mevcut atıklar (PA ve AB65 m.) için 1,0 ve 0,95, sınıflandırılmış atıklar (S-PA ve S-AB) için sırasıyla 3,23 ve 1,74 olarak belirlenmiştir (Tablo 7). Üniformluk ve eğrilik katsayılarına göre sınıflandırma işleminin atıkların tane boyut dağılımını iyileştirdiği anlaşılmaktadır.

2.2.2. Özgül Ağırlık

Atıkların özgül ağırlığı (SG) piknometre kullanılarak ASTM C 128-97 (2002) standardına göre belirlenmiştir. Tesis atıklarının özgül ağırlığı 3,37-3,87, baraj atıklarının 3,57-3,66, sınıflandırılmış atıkların ise 2,92-3,81 arasında değiştiği belirlenmiştir (Tablo 7). Sınıflandırılmış atıkların özgül ağırlıklarının daha yüksek olması şlam uzaklaştırma işlemi sonrası ince boyutlu kil minerallerinin uzaklaşması ve karışım içerisinde sülfürlü mineral içeriğinin artmasıyla ilişkilendirilebilir. Ancak, sınıflandırma işlemi pirit atık içerisindeki kil minerallerinin artmasına ve sülfür içeriğinin azalmasına neden olarak özgül ağırlığının düşmesine yol açmıştır. Özgül yüzey alanı ölçümleri atık içerisindeki ince tane miktarının artmasıyla birlikte yüzey alanının arttığını göstermiştir.

Tablo 7. Deneylerde kullanılan atıkların kimyasal ve fiziksel karakterizasyonu

Özellikler	Bakır Atık (BA) (%)	Pirit Atık (PA) (%)	Atık Barajı			Sınıflandırılmış	
			(AB15m.) (%)	(AB40m.) (%)	(AB65m.) (%)	Pirit Atık (S-PA) (%)	Atık Barajı (S-AB) (%)
<i>Kimyasal bileşim</i>							
SiO ²	19,83	31,68	26,42	25,8	24,97	49,44	21,21
Al ² O ³	5,59	9,13	6,99	6,68	6,92	13,38	5,42
Fe ² O ³	45,43	33,06	38,91	39,83	39,7	17,61	45,43
MgO	2,30	3,99	2,04	2,14	2,19	5,09	2,21
CaO	2,20	3,50	2,51	2,79	3,09	3,95	1,64
Na ² O	0,36	0,79	0,35	0,35	0,39	0,57	0,24
K ² O	0,29	0,38	0,66	0,42	0,55	0,81	0,31
TiO ²	0,39	0,67	0,44	0,43	0,44	0,95	0,38
P ² O ⁵	0,03	0,01	0,01	0,03	0,01	0,1	0,03
MnO	0,07	0,08	0,06	0,06	0,05	0,1	0,05
Cr ² O ³	0,023	0,035	0,016	0,02	0,016	0,032	0,017
Kızdırmakaybı (LOI)	22,7	16,0	20,7	20,6	20,9	7,5	21,9
Toplam	99,21	99,33	99,11	99,15	99,23	99,53	98,84
Sülfür içeriği (S ²)	29,12	16,88	22,83	23,18	22,10	1,68	27,82
Pirit içeriği (FeS ²)	54,6	31,65	42,81	43,47	41,44	3,15	52,16
<i>Fiziksel özellikler</i>							
Özgül ağırlık (g/cm ³)	3,87	3,37	3,57	3,66	3,61	2,92	3,81
Özgül yüzey alanı (cm ² /g)	3110	4440	4160	4630	5310	1710	1810
Eğrilik katsayısı (C _c)	1,14	1,00	1,01	0,99	0,95	3,23	1,74
Uniformluk katsayısı (C _u)	14,0	16,0	12,33	11,00	10,00	8,96	10,84

2.2.3. Kimyasal Bileşim

Atıkların kimyasal bileşimi XRF ve yaş kimyasal analiz sonrası ICP AES (Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectroscopy) cihazı kullanılarak yapılmıştır (Tablo 7). Sülfür içeriği gravimetrik analizle belirlenmiştir. Tesis ve baraj atıklarının sülfür içeriği oldukça yüksektir (%16,88-29,12 S). Sınıflandırma işlemi sonucu ince fraksiyondaki silikat minerallerinin uzaklaşmasıyla baraj atıklarının $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ içeriği azalmış ve sülfür içeriği artmıştır (%27,82). Örneğin, atık içerisindeki ince malzeme miktarının azalmasıyla baraj atığının (AB40 m.) $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ içeriği %32,48'den %26,63'e düşmüştür.

2.2.4. Mineralojik Bileşim

X-ışınları difraktometre (XRD) cihazı kullanılarak belirlenen atıkların mineralojik bileşimi Tablo 8'de verilmiştir. Atıklar (S-PA hariç) içerisindeki baskın (major) mineral pirit mineralidir. Mevcut ve sınıflandırılmış atıklar içerisinde ayrıca kuvars, kalsit, albit, klorit ve muskovit mineralleri bulunmaktadır. Ayrıca bazı atıklar basanit ve ankerit minerallerini ihtiva etmektedir (Tablo 8).

Tablo 8. Deneylerde kullanılan atıkların mineralojik bileşimi

Atıklar	Mineral	Bileşik
Bakır atık (BA)	Pirit	FeS_2
	Kuvars	SiO_2
	Muskovit	$(\text{K}, \text{Na})\text{Al}_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
	Albit	$(\text{Na}, \text{Ca})\text{Al}(\text{Si}, \text{Al})_3\text{O}_8$
	Klorit	$(\text{Mg}, \text{Al}, \text{Fe})_6(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
	Kalsit	CaCO_3
Pirit atık (PA)	Pirit	FeS_2
	Kuvars	SiO_2
	Albit	$(\text{Na}, \text{Ca})\text{Al}(\text{Si}, \text{Al})_3\text{O}_8$
	Klorit	$(\text{Mg}, \text{Al}, \text{Fe})_6(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
	Kalsit	CaCO_3
Atık Barajı 15. metre (AB15 m.)	Pirit	FeS_2
	Kuvars	SiO_2
	Albit	$(\text{Na}, \text{Ca})\text{Al}(\text{Si}, \text{Al})_3\text{O}_8$
	Kalsit	CaCO_3
	Klorit	$(\text{Mg}, \text{Al}, \text{Fe})_6(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$

Tablo 8'in devamı

Atıklar	Mineral	Bileşik
Atık Barajı 40. Metre (AB40 m.)	Pirit	FeS ₂
	Kuvars	SiO ₂
	Kalsit	CaCO ₃
	Albit	(Na,Ca)Al(Si,Al) ₃ O ₈
	Muskovit	(K,Na)Al ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂
	Klorit	(Mg,Al,Fe) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈
Atık Barajı 65. Metre (AB65 m.)	Pirit	FeS ₂
	Kuvars	SiO ₂
	Albit	(Na,Ca)Al(Si,Al) ₃ O ₈
	Kalsit	CaCO ₃
	Klorit	(Mg,Al,Fe) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈
Sınıflandırılmış Pirit Atık (S-PA)	Kuvars	SiO ₂
	Albit	(Na,Ca)Al(Si,Al) ₃ O ₈
	Muskovit	(K,Na)Al ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂
	Klorit	(Mg,Al,Fe) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈
	Hematit	(Fe ₂ O ₃)
	Bazanit	(CaSO ₄ .0.5H ₂ O)
Sınıflandırılmış Atık Barajı (S-AB)	Pirit	FeS ₂
	Kuvars	SiO ₂
	Ankerit	Ca(Fe, Mg)(CO ₃) ₂
	Kalsit	CaCO ₃
	Klorit	(Mg,Al,Fe) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈

Bilindiği üzere pirit minerali su ve oksijen varlığında oksidasyona uğrayarak asit ve sülfat oluşturmaktadır. Oksidasyon ürünleri portlandit gibi hidratasyon ürünleriyle rekasyona girerek genleşme özelliğine sahip alçıtaşı ve etrenjit minerali oluşumuna ve dolgunun yapısal bütünlüğünün bozulmasına neden olmaktadır (Kesimal vd., 2005; Tariq ve Nehdi, 2007; Ercikdi vd., 2009a,b).

Alçıtaşı ve etrenjit 2,2 ve 2,8 kata kadar genleşme özelliği göstererek dolgu içerisinde 70-200 MPa'lık bir gerilme oluşturabilmektedir. Ayrıca pH'ın 9'un altına düşmesi hidratasyon ürünlerinin bağlayıcı özelliklerini yitirmesine ve dolgunun duraylılığını kaybetmesine yol açmaktadır (Ercikdi vd., 2010a,b; Cihangir vd., 2012).

2.3. Dolgu Karışımlarının Reolojik Özellikleri

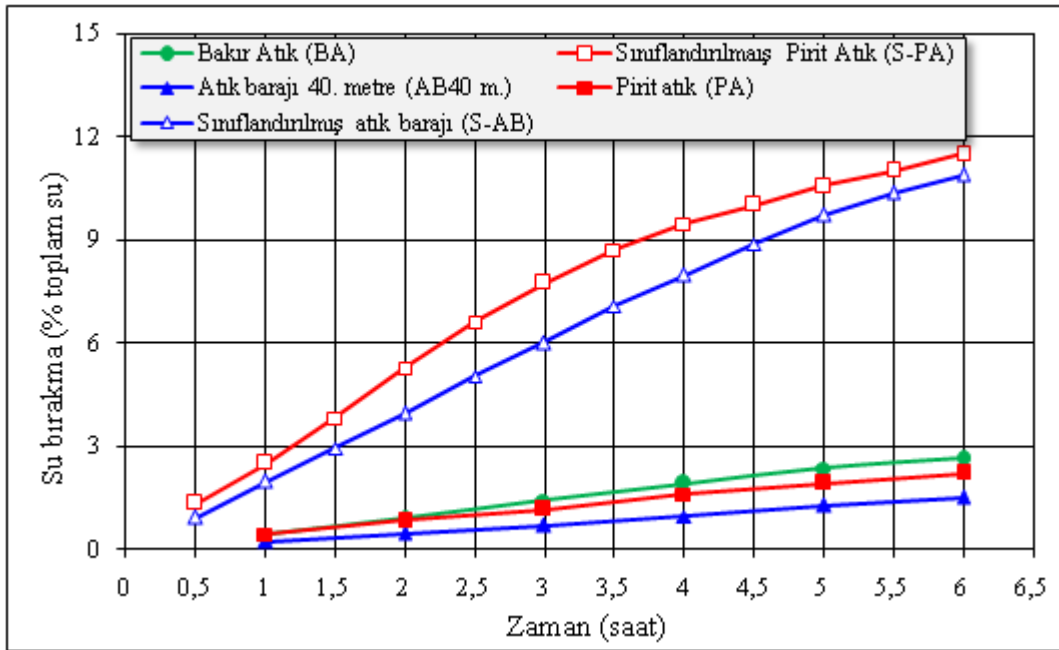
Dolgunun yerüstü macun dolgu tesisinden yeraltı üretim boşluklarına nakledilebilmesi ve dolayısıyla istenen akışkanlığa sahip olabilmesi için belirli miktarda su içermesi gerekmektedir. Genel olarak macun dolgunun borularla yeraltına belli bir akışkan kıvamda taşınabilmesini sağlamak için ortamda kolloidal, su tutmayı sağlayacak 20 µm altı

ağırlıkça en az %15 malzeme olması gerekmektedir. İndeks testleri çimentosuz malzemenin koloidal özelliklerini belirlemek için dizayn edilmiş standart slamp koni testi ve su bırakma testini içermektedir. Atıkların su tutma/bırakma özelliklerini belirlemek için ASTM C 143'e göre 12 inç yüksekliğindeki standart beton konik test aleti kullanılarak 7,5 inç slamp akışkanlıkta çimento içermeyen numuneler hazırlanmıştır. 6 saat süresince numuneden ayrılan su miktarı toplanarak ağırlığı ölçülmüştür. İndeks testlerden elde edilen sonuçlar Şekil 14 ve Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 9. Atıkların reolojik indeks testleri

Atık tipi	Zaman (saat)	Katı içeriği (%)	Bırakılan su ağırlığı (gr)	Bırakılan su (% toplam su)
Sınıflandırılmış Pirit atık (7,5" slamp)	0,5	74,38	10,74	1,31
	1,0		20,41	2,48
	1,5		31,26	3,80
	2,0		43,17	5,25
	2,5		54,24	6,60
	3,0		63,48	7,72
	3,5		71,57	8,70
	4,0		77,79	9,46
	4,5		82,31	10,01
	5,0		86,78	10,55
	5,5		90,33	10,99
	6,0		94,39	11,48
Sınıflandırılmış Atık barajı (7,5" slamp)	0,5	80,17	7,23	0,92
	1,0		15,38	1,95
	1,5		23,05	2,93
	2,0		31,11	3,95
	2,5		39,54	5,02
	3,0		47,18	6,00
	3,5		55,62	7,07
	4,0		62,72	7,97
	4,5		69,82	8,87
	5,0		76,37	9,71
	5,5		81,45	10,35
	6,0		85,63	10,88
Bakır atık (7,5" slamp)	1,0	76,97	3,51	0,41
	2,0		7,43	0,87
	3,0		12,0	1,40
	4,0		16,24	1,90
	5,0		20,12	2,35
	6,0		22,42	2,62
Pirit atık (7,5" slamp)	1,0	73,85	3,2	0,42
	2,0		7,13	0,81
	3,0		10,08	1,14
	4,0		13,93	1,58
	5,0		16,78	1,90
	6,0		19,22	2,18
Atık barajı 40. metre (7,5" slamp)	1,0	71,85	2,01	0,22
	2,0		4,16	0,45
	3,0		6,35	0,68
	4,0		8,92	0,95
	5,0		11,65	1,25
	6,0		13,87	1,48

Sınıflandırılmış atıkların (şlamı uzaklaştırılmış) istenen akışkanlığı daha yüksek katı oranında elde ettiği açıkça anlaşılmaktadır. Reolojik indeks testleri ayrıca mevcut atıkların su tutma kapasitelerinin sınıflandırılmış atıklara kıyasla daha yüksek olduğunu göstermiştir. Sınıflandırılmış atıklar daha fazla oturma özelliği göstermiştir (Şekil 15). Fall vd. (2004) iri taneli atıklardan hazırlanan macun dolgu karışımlarının iri ve orta taneli atıklardan hazırlanan karışımlara kıyasla drenaj yoluyla daha fazla su bıraktığını belirtmişlerdir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar Fall vd. (2004) ile uyumludur.



Şekil 14. Bakır, pirit ve baraj (AB40 m.) atıklarından zamana bağlı su ayrılması



Şekil 15. Sınıflandırılmış pirit ve baraj atıklarının çökme karakteristikleri

2.4. Bağlayıcı

Dolguya yaygın olarak normal Portland çimentosu ve diğer çimentolu malzemeler ilave edilmektedir. Ön ve ilave deneysel çalışmalarda ana bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufu çimento (CEM III/A 42,5 N) kullanılmıştır. Bağlayıcı tipinin ve sınıflandırma işleminin (şlam uzaklaştırma) çimentolu macun dolgu dayanımına etkisini belirlemek için yapılan deneysel çalışmalarda CEM I 42,5, CEM II/A 42,5 ve CEM III/A 42,5 N kullanılmıştır. CEM I 42,5, CEM II/A 42,5 and CEM III/A 42,5 N tipi çimentolar sırasıyla Ankara, Bolu ve Karabük (Karçimsa) çimento fabrikalarından temin edilmiştir. Bağlayıcıların kimyasal bileşimleri ve katkı içerikleri Tablo 10'da verilmiştir. CEM III/A 42,5 N ve CEM II/A 42,5 tipi çimentolar dayanım ve duraylılığı artırmak ve bağlayıcı maliyetlerini azaltmak için sırasıyla %32-35 oranında öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve %20 oranında puzolanik malzeme içermektedir.

Tablo 10. Deneylerde kullanılan bağlayıcıların kimyasal bileşimi

Karakteristik	CEM III/A 42,5 N (Karçimsa) (%)	CEM I 42,5 (Ankara) (%)	CEM II/A 42,5 (Bolu) (%)	CEM III/A 42,5 N* (Karçimsa) (%)
Kimyasal bileşim				
SiO ₂	27,58	20,61	23,06	25,94
Al ₂ O ₃	7,04	5,59	5,68	6,69
Fe ₂ O ₃	2,37	3,20	3,85	2,62
MgO	3,91	1,90	1,28	3,41
CaO	52,75	63,50	57,91	54,36
Na ₂ O	0,25	0,49	0,55	0,35
K ₂ O	1,06	1,01	0,75	0,93
TiO ₂	0,40	0,26	0,29	0,69
P ₂ O ₅	0,03	0,07	0,11	0,08
MnO	1,00	0,04	0,09	0,99
Cr ₂ O ₃	0,015	0,036	0,042	0,040
Kızdırma kaybı (LOI)	2,8	3,1	6,2	3,2
Toplam	99,21	99,81	99,81	99,30
Katkı (cüruf, uçucu kül vb.)	35,08	-	19,56	32,23
Özgül ağırlık	3,08	3,24	3,15	3,08

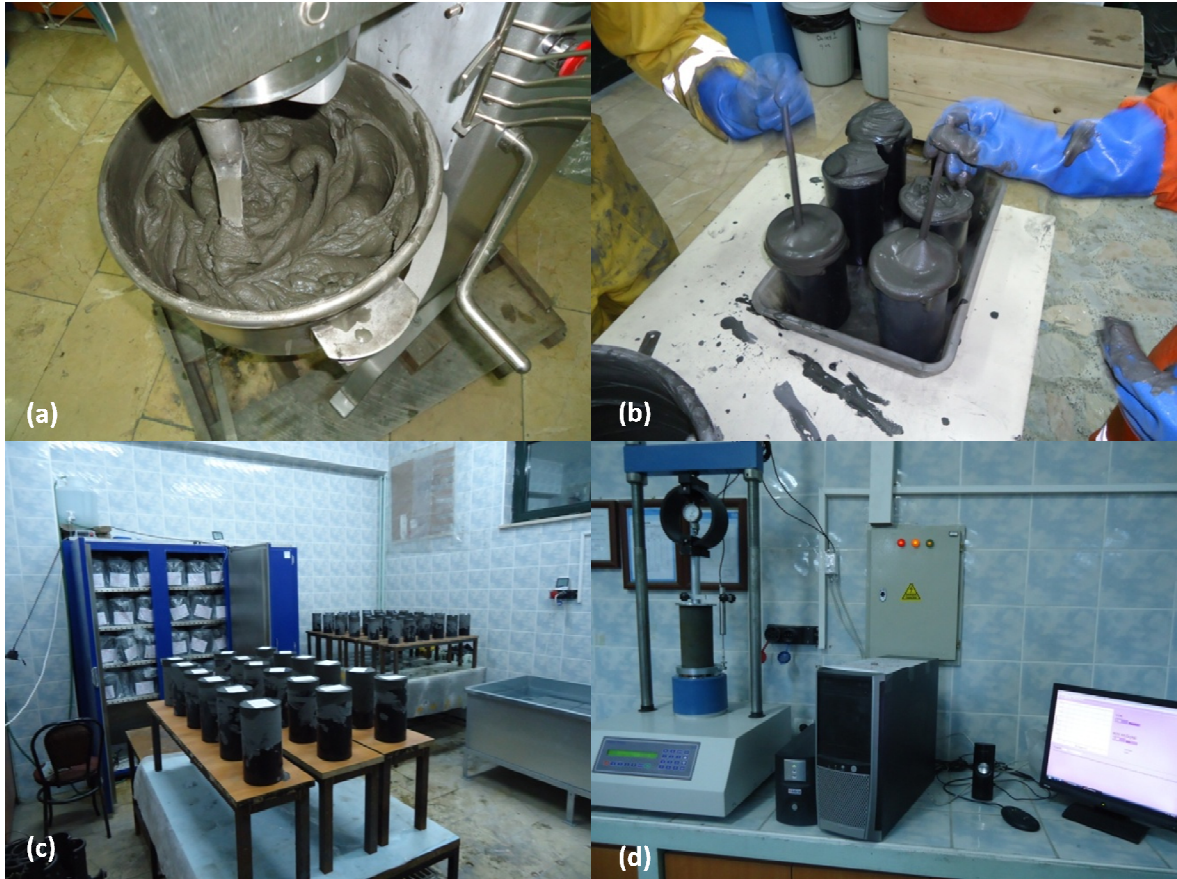
* sadece bağlayıcı tipinin dayanıma etkisinin belirlenmesi deneylerinde kullanılmıştır.

2.5. Macun Dolgu Testleri İçin Deneysel Çalışma

Çimentolu macun dolgu karışımı oluşturmak için gerekli bileşenlerin (atık, bağlayıcı ve su) miktarı önceden belirlenen dizayna göre ölçülmüştür. İstenen oranda atık, bağlayıcı

ve musluk suyu tartılarak 14,2 litre kapasiteli kovaya yerleştirilmiştir. Daha sonra karışımı homojenleştirmek ve istenen akışkanlığa getirmek için Univex SRMF 20 model mikserde 7 dakika süreyle karışım işlemi gerçekleştirilmiştir.

Tek eksenli basınç dayanımı (UCS) testleri için 4" çapında ve 8" yüksekliğinde plastik silindir numune kapları kullanılmıştır (Şekil 16). Karışım içerisindeki fazla suyun drene olması için silindir kapların tabanında 7 adet 2 mm çapında delikler mevcuttur. Öncelikle silindir kabın 1/3'lük hacmi istenen akışkanlıktaki dolgu karışımı ile doldurulmuştur. Her bir kısmın doldurulmasından sonra ince bir çubuk ile 25 defa sıkılama yapılmıştır (Şekil 16). 7,0" ve 7,5" slampa karşılık atıkların katı oranı %71,85-80,17 arasındadır. Numuneler hazırlandıktan sonra plastik poşetle kapatılmış ve 7-90 günlük kür süresi aralığında yeraltı kür koşullarını yansıtacak şekilde %80 nem ve 25°C'de küre tabi tutulmuştur.



Şekil 16. Macun dolgu numunelerinin hazırlanması ve testi: karıştırma (a), döküm işlemi (b), kür alma (c) ve dayanım testi (d)

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Dayanım Sonuçları

Bu tez kapsamında toplam 630 adet numune hazırlanmış ve test edilmiştir. Macun dolgu numuneleri üzerinde dayanım testleri 7, 14, 28 ve 90 günlük kür sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Bakır atık (BA), pirit atık (PA), baraj atıkları (AB15 m., AB40 m. ve AB65 m.) ve sınıflandırılmış pirit atık (S-PA) ve baraj atıkları (S-AB) katı miktarına göre ağırlıkça %5,5-11,0 çimento oranlarında ve akışkanlığı 7,0" ve 7,5" slump olan numuneler hazırlanmıştır (Ek Tablolar 1-8).

Macun dolgu karışımları genellikle 28 günde 0,7-2,0 MPa dayanım üretecek şekilde dizayn edilmektedir (Brackebusch, 1994). Bu tez çalışmasında, numunelerin 28 günde $\geq 1,0$ MPa dayanım üretmesi ve 90 gün boyunca dayanımlarını koruması (duraylılık) kriter olarak baz alınmıştır.

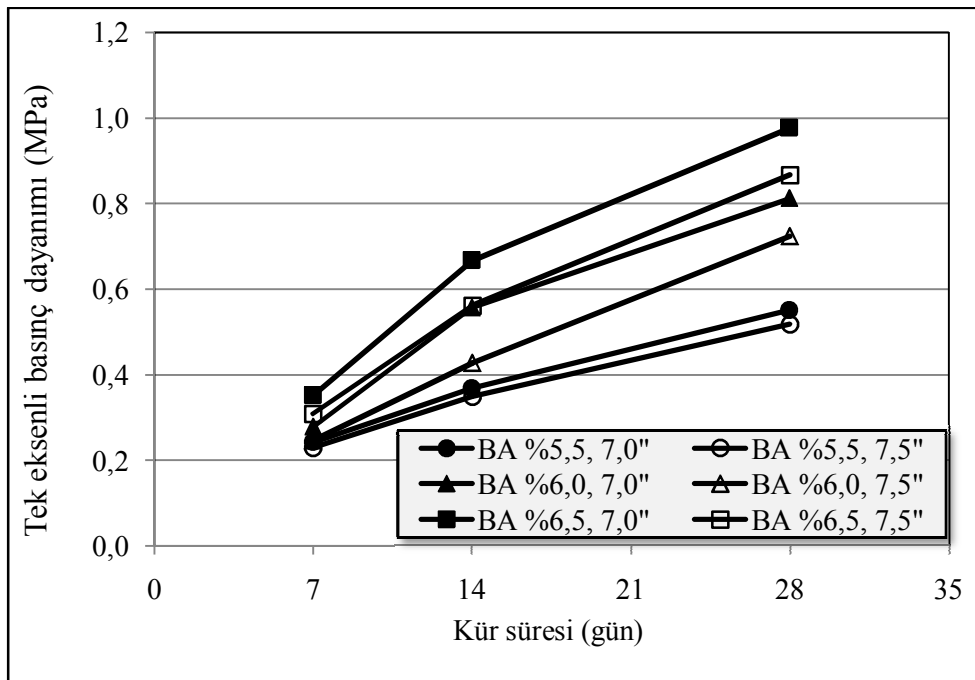
3.1.1. Bağlayıcı Oranının Etkisi

Bağlayıcı tipi ve oranı çimentolu macun dolgunun kısa ve uzun dönem performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bağlayıcı, dolgunun dayanım kazanımı (28 günde 0,7-2,0 MPa) ve duraylılığını (uzun dönemde dayanım kaybının oluşmaması) sağlamaktadır (Brackebusch, 1994). Macun dolgu uygulamalarında işletme maliyetlerinin büyük bir kısmını (%70'e kadar) bağlayıcı maliyetleri (%1'lik çimento artışı yaklaşık 1 USD/ton'luk maliyet artışına neden olmaktadır) oluşturmaktadır. Bu nedenle, optimum bağlayıcı oranının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

Bağlayıcı oranının dayanım ve duraylılık üzerine etkisini incelemek amacıyla tesis (BA ve PA) ve baraj atıkları (AB15 m., AB40 m. ve AB65 m.) kullanılarak düşük (ağırlıkça %5,5-6,5) ve yüksek (ağırlıkça 7,0-11,0) çimento oranlarında hazırlanan numuneler 90 günlük kür süresi periyodunda dayanım testine tabi tutulmuştur (Ek Tablolar 1-5).

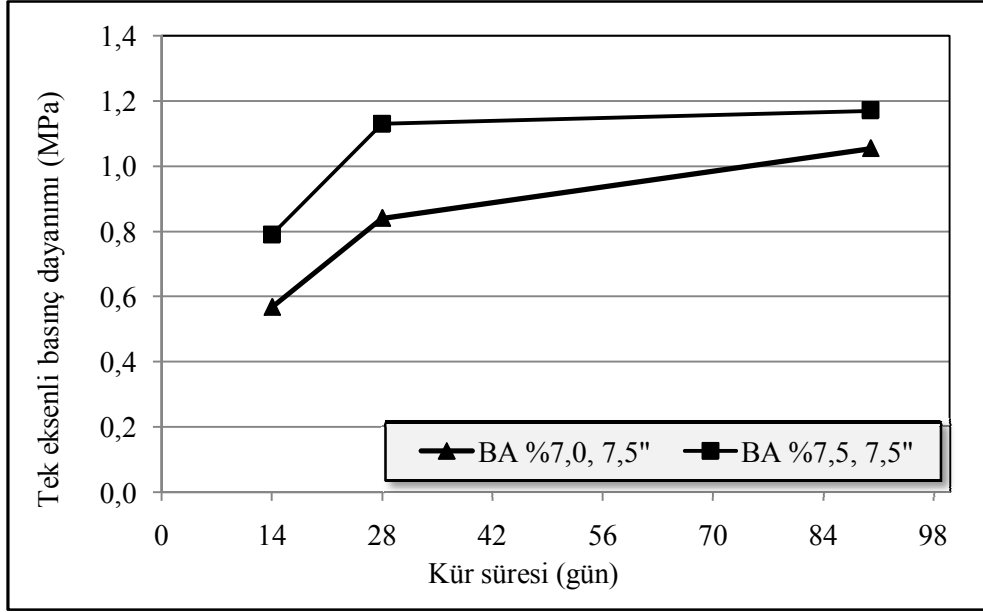
3.1.1.1. Tesis Atıkları

Şekil 17'de yüksek fırın cürufu çimento (CEM III/A 42,5 N) kullanılarak farklı akışkanlık (7,0" ve 7,5" slump) ve çimento oranlarında (ağırlıkça %5,5-6,5) hazırlanan macun dolgu numunelerinin dayanım kazanımını göstermektedir. Akışkanlık (slamp) azaldıkça ve bağlayıcı oranı arttıkça dolgu dayanımının lineer olarak arttığı görülmüştür. Ancak macun dolgu numuneleri 28 günlük kür süresi sonunda istenen $\geq 1,0$ MPa dayanım kazanımını sağlayamamıştır.



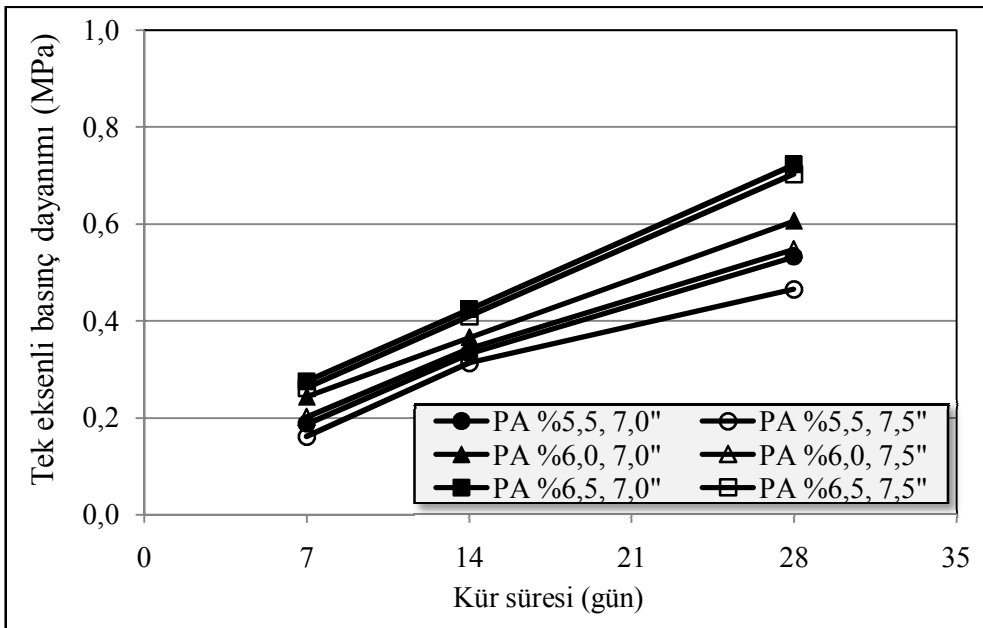
Şekil 17. Bakır atık (BA) kullanılarak %5,5-6,5 çimento oranında hazırlanan numunelerin dayanımı

28 günde $\geq 1,0$ MPa dayanım kazanımını sağlamak amacıyla bakır atık (BA) ve CEM III/A 42,5 N tipi çimento kullanarak %7,0-7,5 çimento oranında ve 7,5" slump akışkanlıkta ilave numuneler hazırlanmıştır. Yapılan bu ek çalışmada tek eksenli basınç dayanımı testlerine göre 28 günde istenilen dayanım değerini ($\geq 1,0$ MPa) sağlayan bağlayıcı oranı ağırlıkça %7,5 olduğu görülmektedir (Şekil 18).



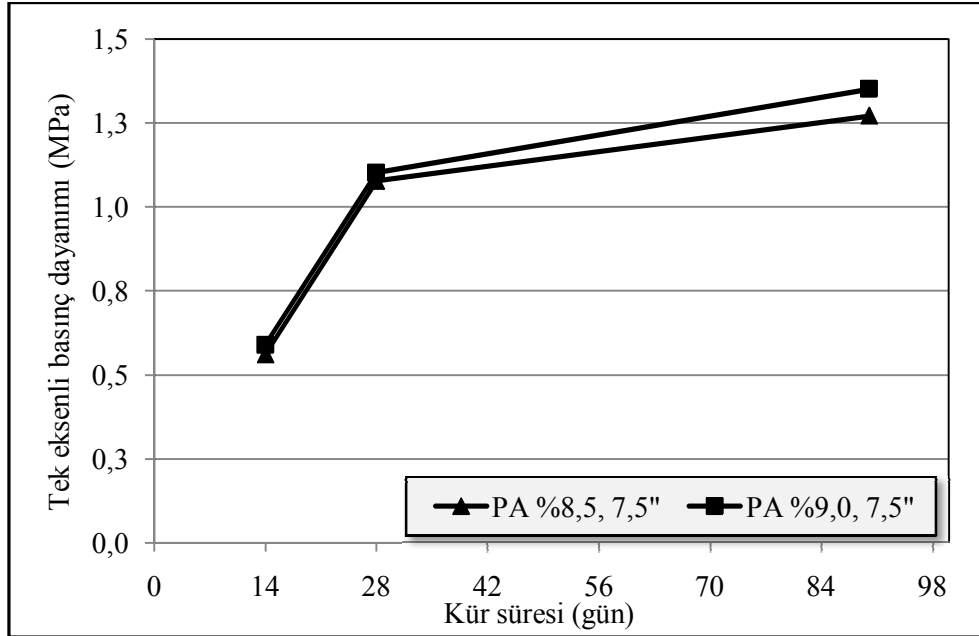
Şekil 18. Bakır atık (BA) kullanılarak %7,0-7,5 çimento oranında hazırlanan numunelerin dayanımı

Pirit atık kullanılarak hazırlanan numunelerin dayanım kazanımı bakır atıkla benzer karakterdedir (Şekil 17 ve 19). PA, BA'ya kıyasla nispeten daha düşük dayanımlar elde edilmiştir.



Şekil 19. Pirit atık (PA) kullanılarak %5,5-6,5 çimento oranında hazırlanan numunelerin dayanımı

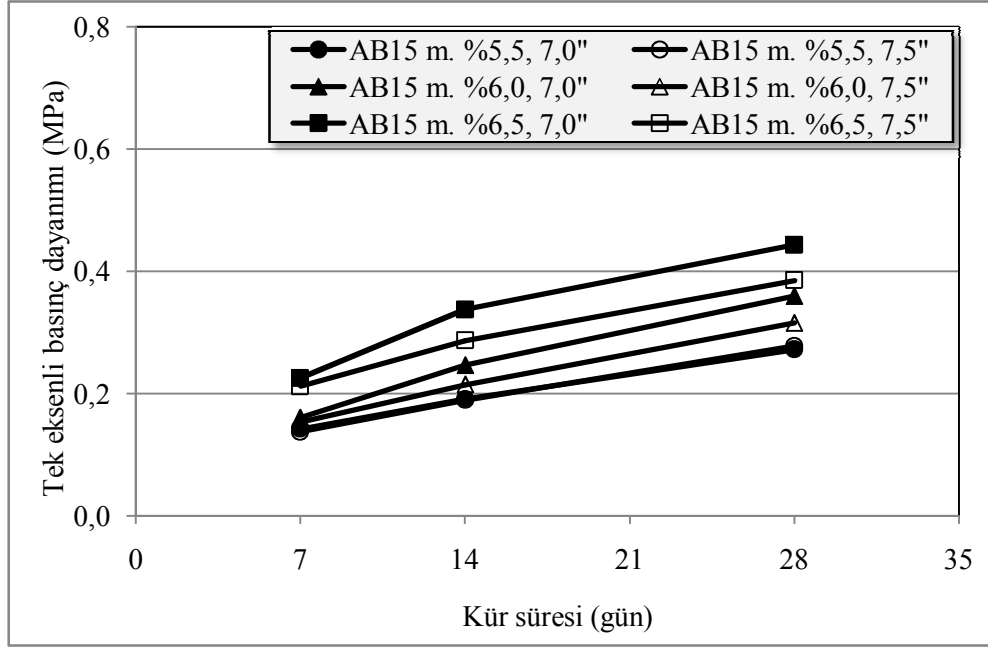
Bakır atığa kıyasla daha düşük dayanım üretmesi nedeniyle 28 günde istenen $\geq 1,0$ MPa dayanım kazanımını sağlayamamıştır. İstenen dayanım kazanımını %8,5-9,0 bağlayıcı oranında ve 7,5" slapta hazırlanan numuneler sağlamıştır (Şekil 20).



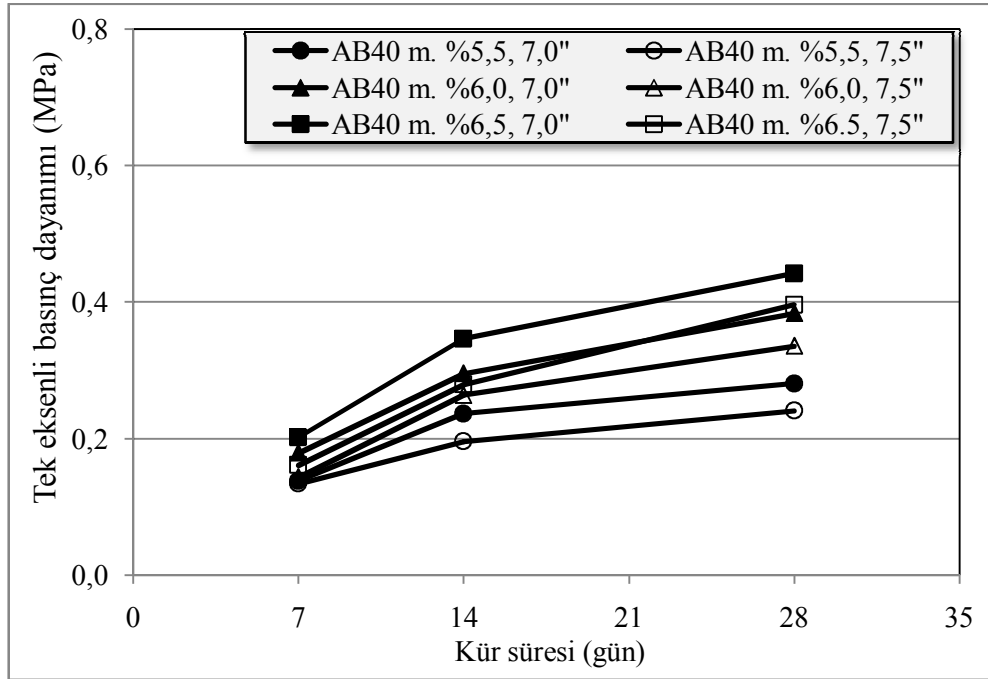
Şekil 20. Pirit atık (PA) kullanılarak %8,5-9,0 çimento oranında hazırlanan numunelerin dayanımı

3.1.1.2. Baraj Atıkları

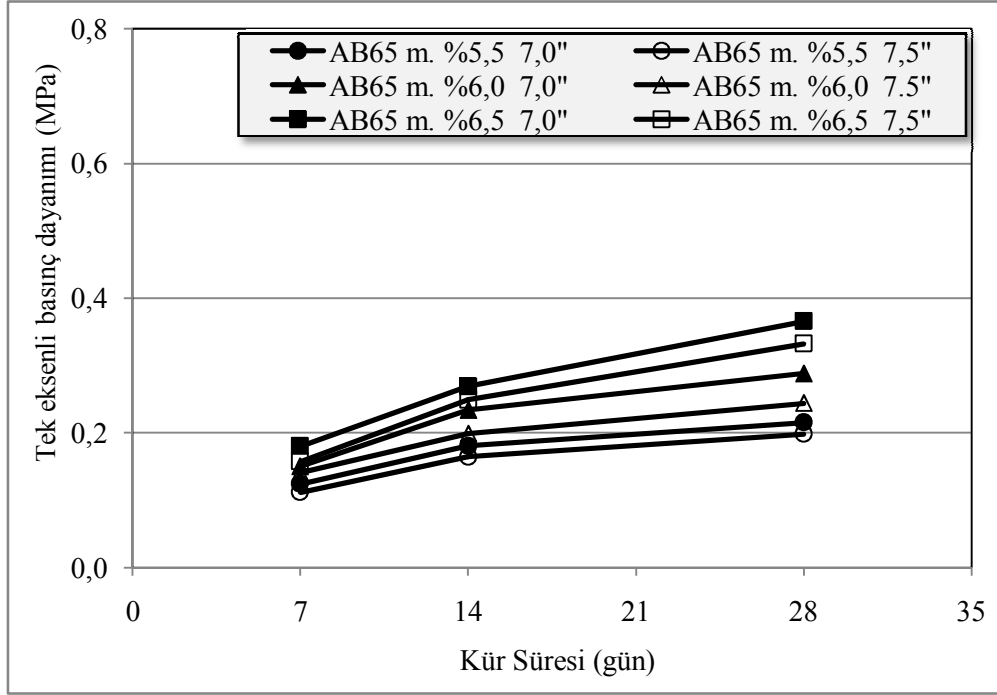
Baraj atıkları (AB15 m., AB40 m. ve AB65 m.) ve CEM III/A 42,5 N kullanılarak düşük (%5,5-6,5) ve yüksek (%9,0-11,0) çimento oranlarında hazırlanan macun dolgu numunelerinin kısa ve uzun dönem dayanım kazanımlarını göstermektedir (Şekil 21-26). Düşük çimento oranlarında baraj atığı numunelerinin dayanım kazanım karakteristiği tesis atıkları (BA ve PA) ile benzerlik göstermektedir (Şekil 21, 22 ve 23). Baraj atıklarının dayanım kazanımı kullanılan bağlayıcı oranı ile paralellik arz etmiştir. Atık boşaltım noktasından uzaklaştıkça macun dolgu numunelerinin dayanımı azalmıştır.



Şekil 21. Baraj atığı (AB15 m.) kullanılarak %5,5-6,5 çimento oranında hazırlanan numunelerin dayanımı



Şekil 22. Baraj atığı (AB40 m.) kullanılarak %5,5-6,5 çimento oranında hazırlanan numunelerin dayanımı



Şekil 23. Baraj atığı (AB65 m.) kullanılarak %5,5-6,5 çimento oranında hazırlanan numunelerin dayanımı

Tesis atıklarına (BA ve PA) benzer olarak baraj atıkları da 28 günde istenen $\geq 1,0$ MPa dayanımı üretmemiştir. Bakır atık (BA) kullanılarak hazırlanan numuneler pirit atık (PA) ve baraj atığı kullanılarak hazırlanan numunelere kıyasla daha yüksek dayanım üretmiştir. Bunun nedeni bakır atığının (BA) katı oranının yüksek olması nedeniyle aynı çimento oranında daha fazla çimento kullanılmasından kaynaklanmaktadır (Tablo 11).

Tablo 11'den görüldüğü üzere, pirit atık (PA) ve baraj atığı kullanılarak %6,5 çimento oranında hazırlanacak 1 m³ dolgu karışımı bakır atığa (BA) kıyasla %12,8 ve %19,3 daha az çimento içermektedir. Bakır atığa kıyasla pirit ve baraj atığı kullanılarak hazırlanan numunelerin sürekli daha düşük dayanım üretmesi ayrıca bu atıkların mineralojik, kimyasal ve fiziksel analizlerde görüldüğü üzere daha fazla silis (%31,9-40,8'e karşılık % 25,42) ve ince tane (%48,4-62,74'e karşılık %44,8) içermesi nedeniyle su tutma kapasitelerinin fazla olmasıyla ilişkilidir (Şekil 13-14 ve Tablo 7).

Tablo 11. Tesis ve baraj atıklarından hazırlanan 1 m³ CPB karışımı için gerekli bağlayıcı miktarları

Karakteristik	Tesis Atıkları		Baraj Atıkları		
	(BA)	(PA)	(AB15 m.)	(AB40 m.)	(AB65 m.)
Katı oranı (%)	76,97	73,85	74,06	71,85	71,94
Yoğunluk (ton/m ³)	2,314	2,074	2,132	2,082	2,075
Bağlayıcı oranı kg, (6,5 wt.%) – Dayanım, UCS (MPa)	115,8 kg (0,87 MPa)	99,57 kg (0,70 MPa)	102,64 kg (0,38 MPa)	97,23 kg (0,40 MPa)	97,10 kg (0,33 MPa)
7,5" slamp'da 1 MPa dayanım için bağlayıcı oranı (ağırlıkça, %)	%7,5	%8,5	%10,0	%10,0	%11,0
Bağlayıcı oranı (kg) – Dayanım, UCS (MPa)	132 kg (1,14 MPa)	127 kg (1,08 MPa)	160 kg (0,99 MPa)	159 kg (1,21 MPa)	162 kg (1,04 MPa)

Not: CEM III/A 42,5'in özgül ağırlığı 3.08'dir.

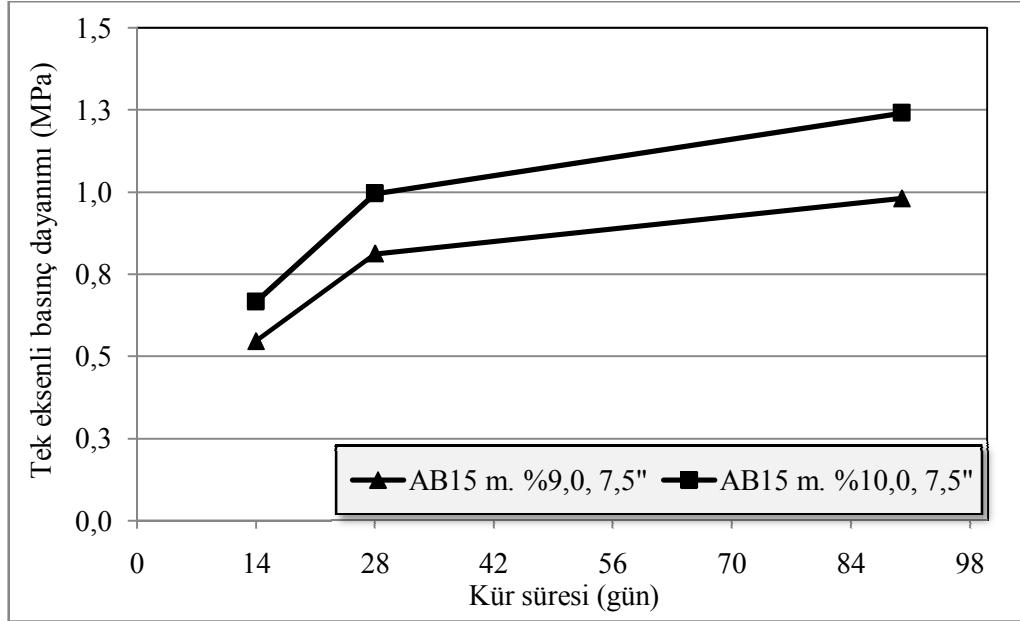
$$\text{Katı Oranı} : \frac{100 \times (M_{\text{kuru-atık}} + M_{\text{kuru-bağlayıcı}})}{(M_{\text{kuru-atık}} + M_{\text{kuru-bağlayıcı}} + M_{\text{su}})} \quad (1)$$

$$\text{Bağlayıcı Oranı} : \frac{100 \times (M_{\text{kuru-bağlayıcı}})}{(M_{\text{kuru-bağlayıcı}} + M_{\text{kuru-atık}})} \quad (2)$$

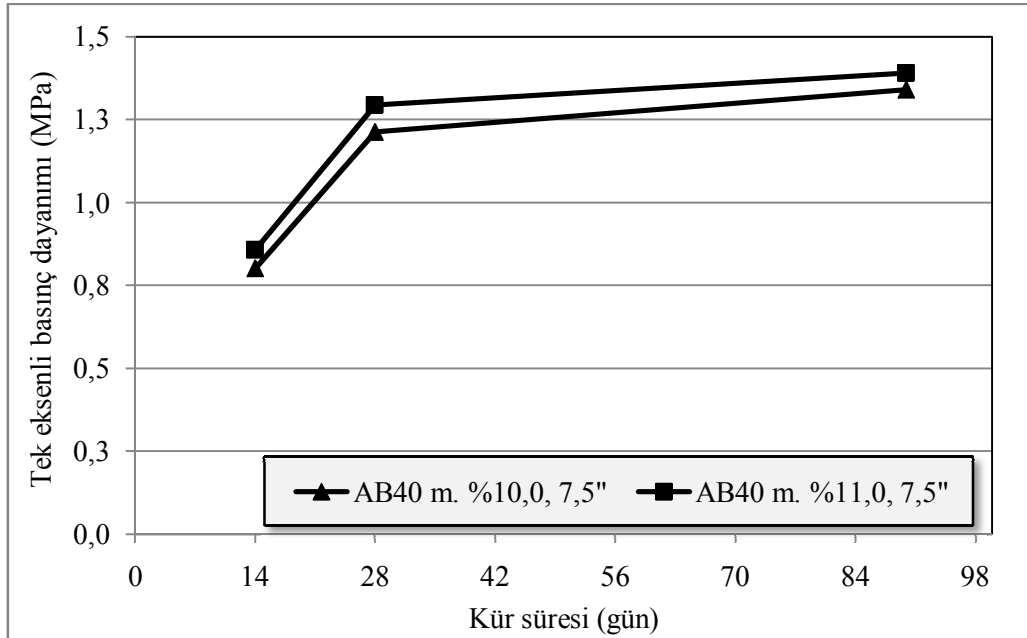
(M: Ağırlık)

28 günde istenen dayanım ($\geq 1,0$ MPa), AB15 m. ve AB40 m. baraj atığı kullanılarak hazırlanan numuneler için %10,0 çimento oranında, AB65 m. baraj atığı kullanılarak hazırlanan numuneler için ise %11,0 çimento oranında elde edilmiştir (Şekil 24, 25 ve 26). Baraj atığı kullanılarak hazırlanan dolgu karışımlarının 28 günde $\geq 1,0$ MPa dayanım kazanması için bakır ve pirit atık kullanılarak hazırlanan karışımlar kıyasla ortalama %23 daha fazla çimento içermesi gerekmektedir (Tablo 11). Bağlayıcı miktarındaki artış dolgunun uzun dönem performansını iyileştirmiş ve dayanım kaybını engellemiştir. Bağlayıcı miktarı arttıkça ortamda bağlayıcı özelliği olan hidrasyon ürünleri (CH ve C-S-H) artmaktadır. İstenen mekanik performansı (28 günde $\geq 1,0$ MPa) elde etmek için bağlayıcı oranının %7'nin üzerine çıkartılması gerekli olup, bu durum bağlayıcı maliyetlerini artıracaktır (Ercikdi, 2009). Ayrıca C-S-H jeli miktarındaki artış macun dolgu mikroyapısını iyileştirerek permeabiliteyi ve piritin oksidasyonunu azaltacak ve asit

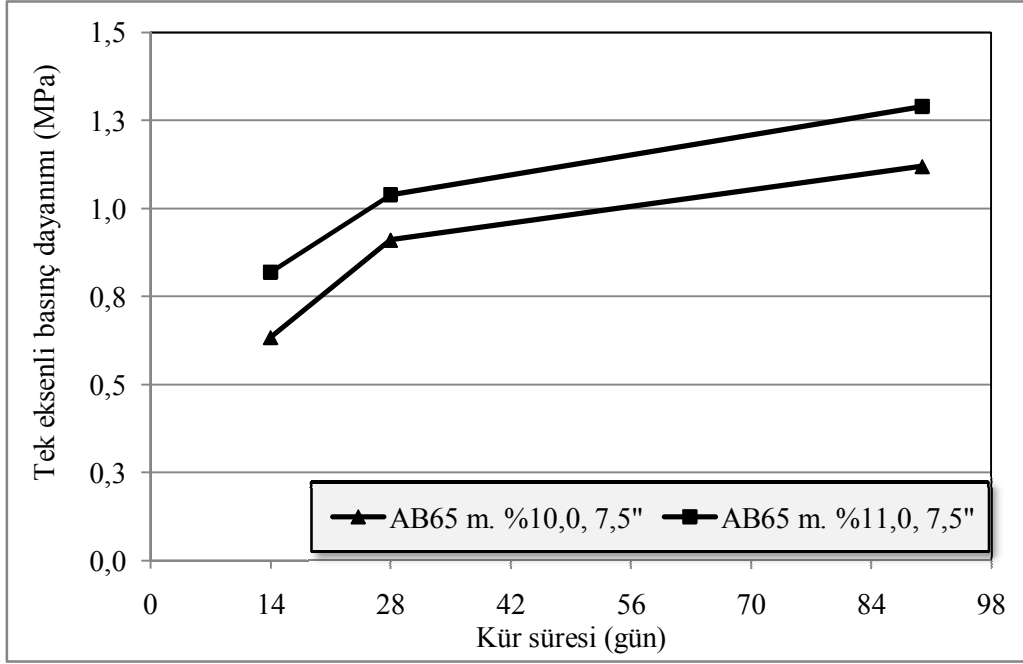
ve sülfat etkisine karşı dolgunun direncini artıracaktır. Belirtilen potansiyel faydalarına karşın bağlayıcı miktarındaki artış, dolgu işletme maliyetlerini artıracaktır.



Şekil 24. Baraj atığı (AB15 m.) kullanılarak %9,0-10,0 çimento oranında hazırlanan numunelerin dayanımı



Şekil 25. Baraj atığı (AB40 m.) kullanılarak %10,0-11,0 çimento oranında hazırlanan numunelerin dayanımı



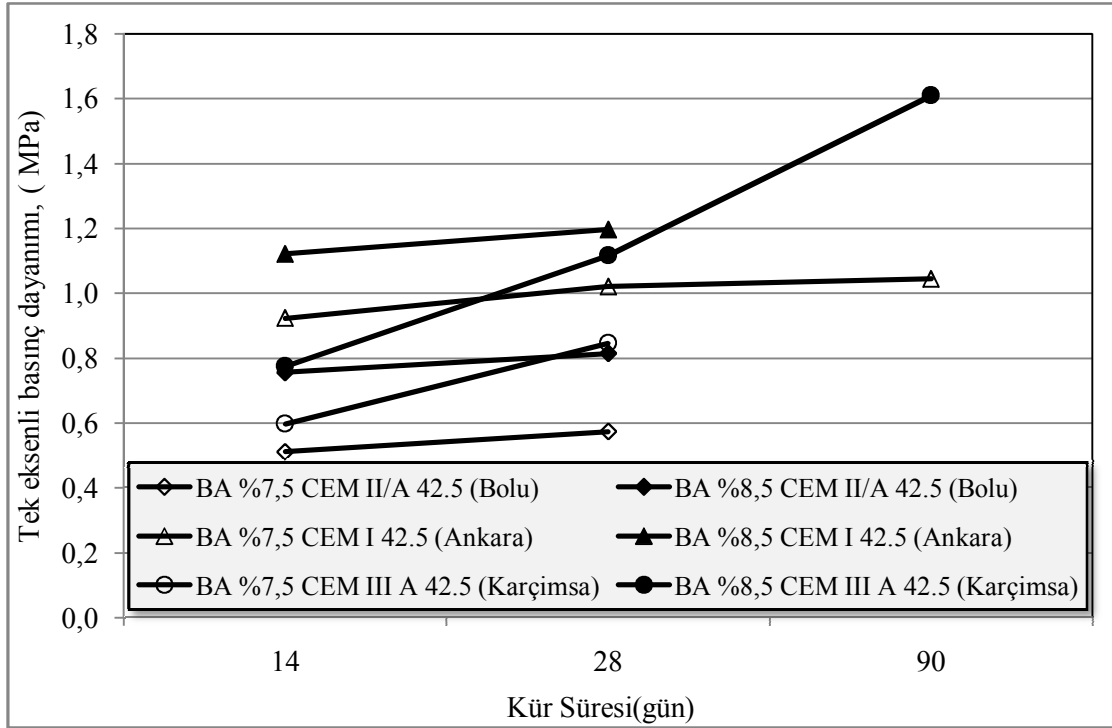
Şekil 26. Baraj atığı (AB65 m.) kullanılarak %10,0-11,0 çimento oranında hazırlanan numunelerin dayanımı

3.1.2. Bağlayıcı Tipinin Etkisi

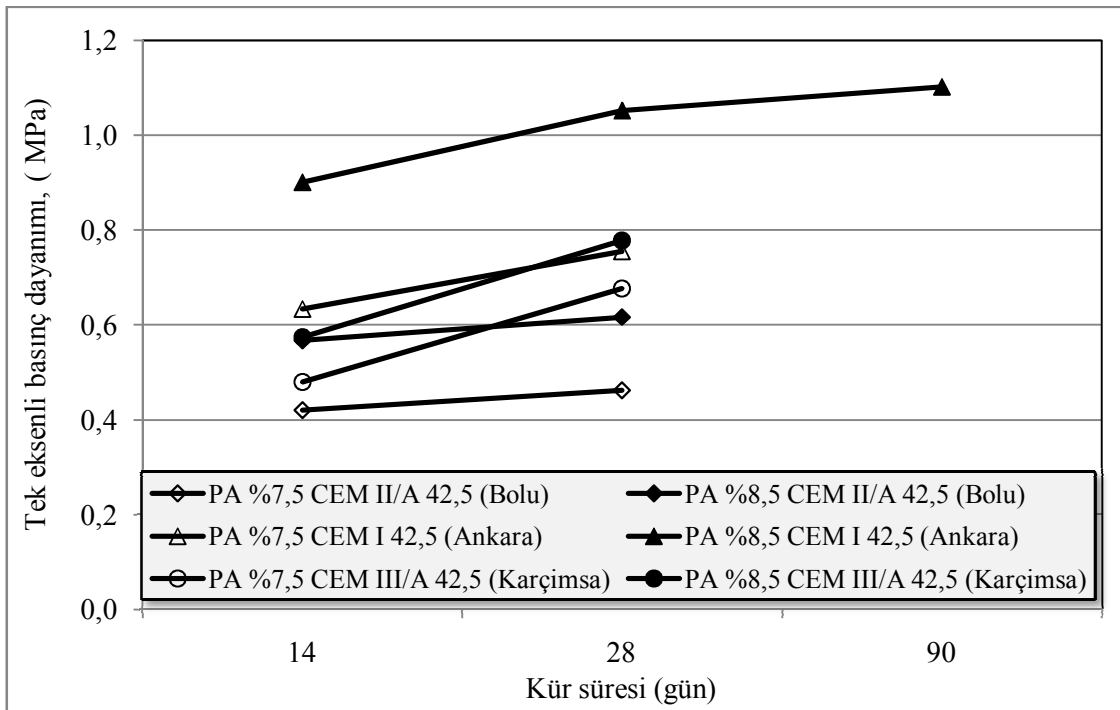
Portland çimentosu (CEM I tipi) gibi kalsiyumca zengin bağlayıcılar sülfat etkisine karşı duraysızdırlar. Sülfürlü atıklardan üretilen macun dolgu uygulamalarında (sülfat içeriği yüksek) mineral katkı maddesi (uçucu kül, cüruf, silis dumanı ve doğal puzolan vb.) içeren Portland kompoze çimento (CEM II ve CEM III tipi) veya sülfata dayanıklı çimento (CEM V) kullanılabilir.

Tezin bu aşamasında, sülfürce zengin tesis atıkları (Bakır (BA) ve Pirit (PA) atık) ve üç farklı çimento (CEM I 42,5, CEM II 42,5 ve CEM III/A 42,5 N) kullanılarak 7,5" slamp ve %7,5-8,5 çimento oranında hazırlanan macun dolgu numunelerinin kısa dönem (14-28 gün) performansı değerlendirilmiştir. Numunelerin uzun dönem (90 gün) performansı sadece 28 günde $\geq 1,0$ MPa dayanımı sağlayan en düşük çimento oranında test edilmiştir (Ek Tablolar 6-7).

Bakır ve pirit (BA ve PA) atık kullanılarak 7,5" slamp ve %7,5-8,5 çimento oranında hazırlanan macun dolgu numunelerinin kısa ve uzun dönem dayanım kazanımını görülmektedir (Şekil 27-28).



Şekil 27. Bağlayıcı tipinin bakır atık (BA) kullanılarak %7,5-8,5 çimento oranında hazırlanan numunelerin dayanımına etkisi



Şekil 28. Bağlayıcı tipinin pirit atık (PA) kullanılarak %7,5-8,5 çimento oranında hazırlanan numunelerin dayanımına etkisi

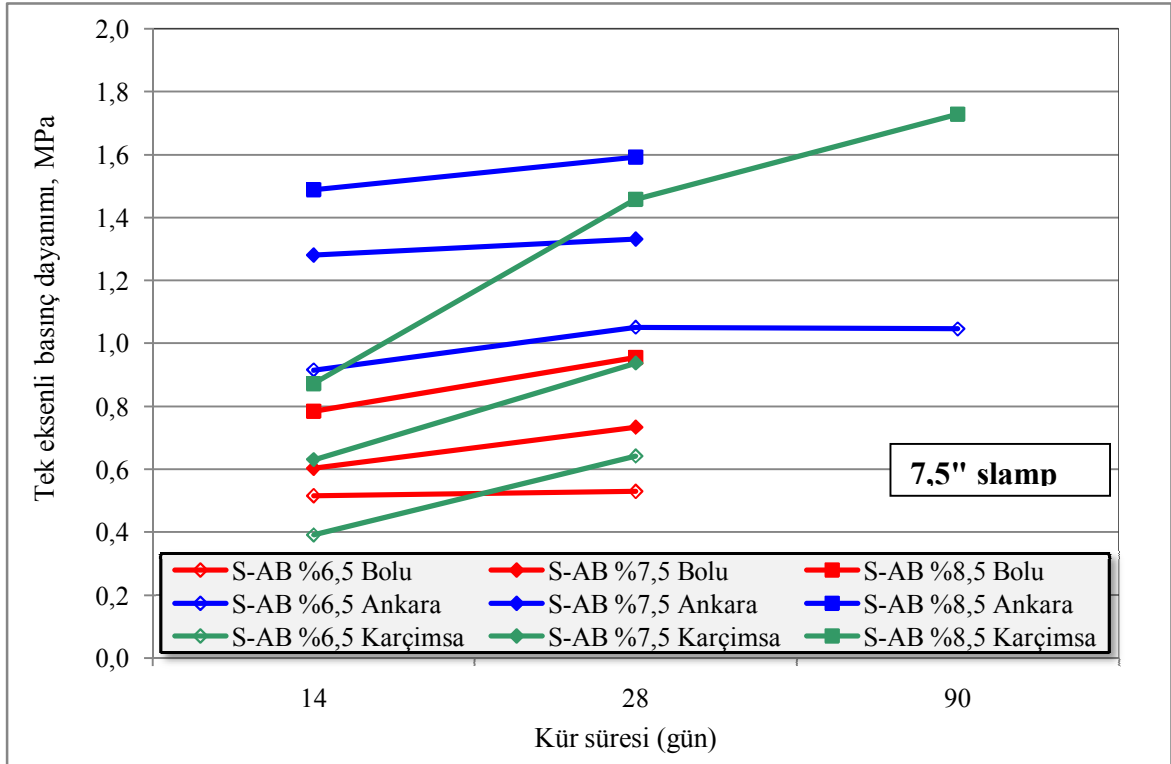
Aynı bağlayıcı oranında en yüksek dayanımı CEM I 42,5 (Ankara) kullanılarak hazırlanan numuneler (BA ve PA kullanılarak hazırlanan), en düşük dayanımı ise CEM II/A kullanılarak hazırlanan numuneler vermiştir. CEM I 42,5 (Ankara) ve CEM III A 42,5 (Karçimsa) kullanılarak hazırlanan numuneler (BA kullanılarak hazırlanan) 28 günde istenen $\geq 1,0$ MPa dayanımı sırasıyla %7,5 (133 kg/m³) ve %8,5 (150,3 kg/m³) çimento oranında elde etmiştir. PA kullanılarak hazırlanan numunelerde ise istenen dayanımı %8,5 çimento oranında (134,5 kg/m³) sadece CEM I 42,5 (Ankara) çimentosu sağlamıştır. Ayrıca 28 günde $\geq 1,0$ MPa dayanım veren numuneler uzun dönemde dayanım kaybına uğramamıştır (Şekil 27-28). Elde edilen sonuçlardan BA ve PA için en uygun bağlayıcının CEM I 42,5 (Ankara) çimentosu olduğu anlaşılmaktadır.

3.1.3. Sınıflandırmanın (Şlam Uzaklaştırma) Etkisi

Atıkların tane boyut dağılımı dolgunun dayanım ve duraylılığını etkileyebilir. Sınıflandırma işlemi (şlam uzaklaştırma işlemi) ile karışımdaki ince malzeme miktarının azaltılmasının dolgu dayanımına pozitif yönde etki ettiğini ve en yüksek dayanımı 20 mikron altı malzeme miktarı ağırlıkça %25 olan atıkların ürettiğini ifade etmiştir (Kesimal, vd., 2003). Ayrıca sınıflandırılmış atıkların referans atıklara kıyasla %12-52 oranında daha yüksek dayanım ürettiği belirtilmiştir (Kesimal, vd., 2002). Benzer şekilde, Fall ve Benzaazoua (2005) iri atıklardan (-20 μ m, ağırlıkça %25) hazırlanan macun dolgu numunelerinin ince (-20 μ m, ağırlıkça %75) atıklardan üretilen numunelere kıyasla daha yüksek (28 günde 1,37–2,42 kat) dayanım ürettiğini göstermiştir.

Şlam uzaklaştırmanın (sınıflandırma) sınıflandırılmış pirit-baraj atıkları (S-PA ve S-AB) ve farklı bağlayıcılar (CEM I 42,5, CEM II 42,5 ve CEM III/A 42,5 N) kullanılarak hazırlanan dolgunun kısa (14 ve 28 gün) ve uzun (90 gün) dönem performansına etkisi %6,5-8,5 çimento oranında incelenmiştir. Macun dolgunun uzun dönem performansı (90 gün) ise sadece 28 günde $\geq 1,0$ MPa dayanımı sağlayan çimento oranında gerçekleştirilmiştir (Ek Tablo 8).

Sınıflandırılmış baraj atıkları (S-AB) kullanılarak %6,5-8,5 çimento oranında ve 7,5" slamp akışkanlıkta hazırlanan macun dolgu numunelerinin dayanım kazanımını görülmektedir (Şekil 29).



Şekil 29. Tane boyut dağılımının sınıflandırılmış baraj atığı (S-AB) kullanılarak %6,5-8,5 çimento oranında hazırlanan numunelerin dayanımına etkisi

S-AB ve CEM I 42,5 (Ankara) tipi çimento kullanılarak hazırlanan numuneler 28 günde istenen $\geq 1,0$ MPa dayanımı en düşük çimento oranında (ağırlıkça %6,5) bile üretmiştir. Ancak S-AB kullanılarak hazırlanan numunelerin $\geq 1,0$ MPa dayanım kazanımı için bağlayıcı oranının CEM II A 42,5 (Bolu) tipi çimento kullanıldığı durumda %8,5, CEM III A 42,5 (Karçimsa) çimento kullanıldığı zaman %7,5'ten daha yüksek olması gerekmektedir (Tablo 12). Sınıflandırılmış baraj atığı (S-AB) kullanılarak hazırlanan dolguda bağlayıcı olarak CEM I 42,5 (Ankara) çimento kullanıldığı zaman $\geq 1,0$ MPa dayanım kazanımı için gerekli çimento miktarı 127 kg/m^3 'tür (Tablo 12). Ancak, CEM III A 42,5 (Karçimsa) çimento kullanıldığı zaman mevcut baraj atıkları istenen dayanımı 160 kg/m^3 bağlayıcı dozajında elde etmiştir (Tablo 11). Sınıflandırmanın (şlam uzaklaştırma) dayanım kazanımına olumlu etkisi su bırakma kapasitesindeki artış (çimento/su oranında artış vb.) ve tane boyut dağılımındaki iyileşme ile ilişkilendirilebilir.

Ortamda ince taneli malzeme miktarı arttıkça daha yüksek poroziteli dolgu yapısının oluştuğu rapor edilmiştir (Kesimal vd., 2003; Fall vd., 2004). Dolgunun mikroyapısı (toplam porozite ve boşluk oranı) karışımın drenaj özelliklerinden önemli derecede etkilenmektedir. Drene olan macun dolgu numuneleri düşük porozite ve boşluk oranına

sahiptir. Reolojik indeks testleri sınıflandırılmış atıkların mevcut atıklara kıyasla drenaj yoluyla daha fazla su bıraktığını göstermiştir. Daha yüksek su bırakma dolgunun toplam porozite ve boşluk oranının azalmasına neden olacaktır. Mikroyapıdaki iyileşmenin sınıflandırılmış atıklardan üretilen dolgunun dayanımını (UCS) arttırdığı anlaşılmıştır. Sınıflandırılmış atıklardan daha fazla suyun drene olması macun dolgunun borularla yeraltına taşınması ve mikserde karıştırılması esnasında oturmaları ve segragasyona neden olabilir. Bu nedenle sınıflandırılmış atıkların mikserde karışımı ve yeraltına taşınma karakteristiklerini incelemek için ilave testlere ihtiyaç vardır.

Tablo 12. Sınıflandırılmış baraj ve pirit atıklarından (S-AB ve S-PA) hazırlanacak 1 m³ CPB karışımı için gerekli bağlayıcı miktarları.

Atık tipi	Yoğunluk (ton/m ³)	Ankara (CEM I 42,5)	Bolu (CEM II A 42,5)	Karşımsa (CEM III-A 42,5)
Sınıflandırılmış baraj atığı – S-AB* Bağlayıcı oranı (kg, wt) – Dayanım, UCS (MPa)	2,43	127 (6,5wt%) 1,05 MPa	165 (8,5 wt%) 0,95 MPa	146 (7,5 wt%) 0,94 MPa
Sınıflandırılmış pirit atığı – S-PA* Bağlayıcı oranı (kg, wt) –Dayanım, UCS (Mpa)	1,96	124 (8,5 wt%) 0,65 Mpa	124 (8,5 wt%) 0,62 Mpa	124 (8,5 wt%) 0,78 Mpa

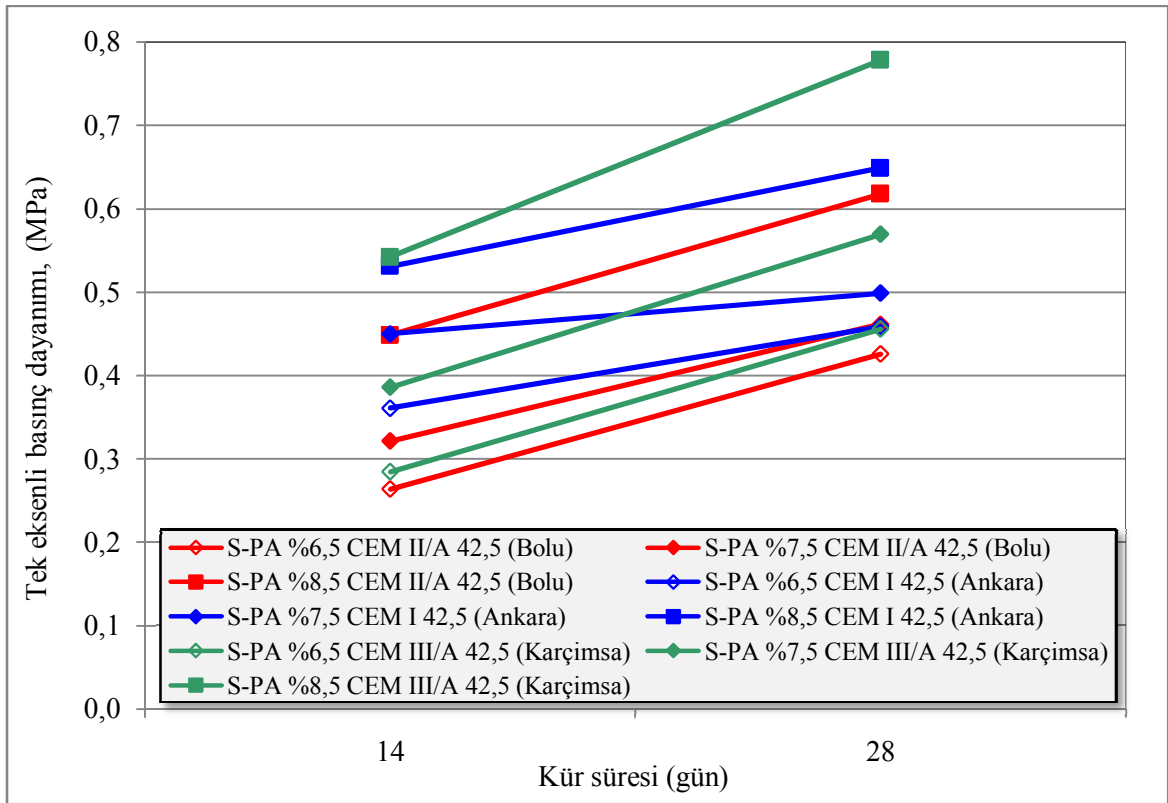
* Sınıflandırılmış baraj (S-AB) ve pirit (S-PA) atığının katı oranları sırasıyla %80,17 ve %74,38'dir.

Sınıflandırılmış baraj atıklarından (S-AB) hazırlanan numunelerin aksine, sınıflandırılmış pirit atıklardan (S-PA) üretilen numunelerin hiç birisi 28 günde istenen $\geq 1,0$ MPa dayanımı üretmemiştir (Şekil 30). Sınıflandırılmış baraj atıkları (S-AB) ile karşılaştırıldığında, sınıflandırılmış pirit atık (S-PA) kullanılarak %8,5 çimento oranında hazırlanan 1 m³ macun dolgu karışımı %33,1 daha az çimento içermektedir (Tablo 12). Üstelik sınıflandırılmış pirit atık (S-PA) kullanılarak %8,5 çimento oranında hazırlanan 1m³ dolgu karışımı bile %6,5 çimento oranında sınıflandırılmış baraj atığı (S-AB) kullanılarak hazırlanan karışıma kıyasla %2,5 oranında daha az çimento ihtiva etmektedir.

Araştırmacılar, iki farklı sınıflandırılmış atık kullanarak 20 μ m altı malzeme miktarının dolgu dayanımına etkisini incelemiştir (Kesimal, vd., 2003). Sınıflandırılmış atıkların en yüksek dayanımı 20 μ m altı malzeme miktarının ağırlıkça %25 olduğu

durumda verdiğini belirtmişlerdir. Benzer olarak Fall vd (2005) 20 μm altı malzeme miktarının dolgu dayanımına etkisini altın atığı ve farklı bağlayıcılar kullanarak 56 günlük kür süresi boyunca araştırmıştır.

Numunelerin en yüksek dayanımı 20 μm altı malzeme miktarının ağırlıkça %25-30 olduğu durumda sağladığı ve macun dolgu dizaynı için optimum aralığın %25-30 oranında olması gerektiğini ifade etmişlerdir. Bu anlamda, sınıflandırılmış pirit atık (S-PA) kullanılarak hazırlanan numunelerin nispeten düşük dayanım üretmesi düşük miktarda (ağırlıkça %13,85) ince taneli malzeme içermesinden kaynaklanabilir. Sınıflandırılmış baraj atığı (S-AB) ise ağırlıkça %35,04 oranında ince taneli malzeme içermektedir.



Şekil 30. Tane boyut dağılımının sınıflandırılmış pirit atık (S-PA) kullanılarak %6,5-8,5 çimento oranında hazırlanan numunelerin dayanımına etkisi

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, her bir atık tipi için en uygun bağlayıcı tipi ve oranını belirlemek amacıyla üç farklı çimento (CEM III/A 42,5 N - Karçimsa; CEM I 42,5 – Ankara; CEM II/A 42,5 – Bolu) kullanarak %5,0-11,0 bağlayıcı oranında ve 7,0-7,5" slamp akışkanlıkta macun dolgu numuneleri hazırlanmıştır. Bu anlamda, bağlayıcı tipi ve oranı ve sınıflandırmanın (şlam uzaklaştırma) çimentolu macun dolgunun mekanik ve reolojik davranışına etkisi değerlendirilmiştir. Atıkların macun dolgu performanslarını ilişkilendirmek için atık ve bağlayıcıların detaylı fiziksel, kimyasal ve mineralojik karakteristikleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara bağlı olarak, her bir atık tipi için 28 günde $\geq 1,0$ MPa dayanım kazanımı ve uzun dönem duraylılığı (90 günde dayanım kaybının oluşmaması) sağlayacak 1 m³ macun dolgu karışımına yönelik optimum bağlayıcı tipi ve oranı Tablo 13'te verilmiştir.

Tablo 13. İstenen akışkanlık ve dayanımı (7,5" slamp ve 28-90 günde $\geq 1,0$ MPa) sağlayacak 1 m³ CPB karışımı için gerekli bağlayıcı miktarları

Atık tipi	Kati oranı (%)	Bağlayıcı tipi		
		CEM III/A 42,5 N (Karçimsa)	CEM I 42,5 (Ankara)	CEM II/A 42,5 (Bolu)
Bakır atığı (BA)	76,97	132 kg/m ³ (7,5 wt%)	133 kg/m ³ (7,5 wt%)	-
Pirit atığı (PA)	73,85	127 kg/m ³ (8,5 wt%)	134,5 kg/m ³ (8,5 wt%)	-
Baraj atığı (AB15 m.)	74,06	160 kg/m ³ (9 wt%)	-	-
Baraj atığı (AB40 m.)	71,85	159 kg/m ³ (10 wt%)	-	-
Baraj atığı (AB65 m.)	71,94	162 kg/m ³ (11 wt%)	-	-
Sınıflandırılmış Pirit Atık (S-PA)	74,38	-	-	-
Sınıflandırılmış Baraj Atığı (S-AB)	80,17	-	127 kg/m ³ (6,5 wt%)	>165 kg/m ³

5. ÖNERİLER

Tesis atıklarından üretilen çimentolu macun dolgunun (CPB) hazırlanmasında bağlayıcı olarak genellikle normal Portland çimentosu kullanılmaktadır. Ancak sülfürlü atıkların kullanıldığı macun dolgu uygulamalarında asit ve sülfat etkisi nedeniyle Portland çimentosu uygun değildir. Macun dolgu uygulamalarında işletme maliyetlerinin büyük bir kısmını (%70'e kadar) bağlayıcı maliyetleri (%1'lik çimento artışı yaklaşık 1 USD/ton'luk maliyet artışına neden olmaktadır) oluşturmaktadır. Bu nedenle uygun ve ekonomik bağlayıcılardan faydalanılması ve bağlayıcı oranının optimizasyonu pratikte önem arz etmektedir. Sınıflandırma (şlam uzaklaştırma) işlemiyle atık özelliklerinde meydana gelecek değişiklik dolgunun karıştırılması ve yeraltına nakliyesi gibi birim operasyonları etkileyebilir. Ayrıca çimentolu macun dolgunun (CPB) yeraltı suyu kalitesine potansiyel etkileri de belirlenmelidir. Bu nedenle aşağıda belirtilen ilave çalışmaların yapılması önerilmiştir:

- ☞ Sınıflandırma işlemi (şlam uzaklaştırma) ile tane boyutundaki artış nedeniyle macun dolgunun karışımı ve yeraltına taşınması esnasında oluşabilecek potansiyel problemler değerlendirilmelidir. Boru hattı çıkışı (yeraltı boşluklarına döküldüğü nokta), mikser ve besleme noktasından macun dolgu örnekleri alınarak dayanım değişiminin araştırılması,
- ☞ Sınıflandırılmış pirit atık kullanılarak hazırlanan numunelerin düşük dayanım vermesi nedeniyle mekanik performansının daha yüksek çimento oranlarında (>%8,5) incelenmesi,
- ☞ Dolgu işletme maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle bağlayıcı tüketimini azaltmak ve asit/sülfat etkisi nedeniyle özellikle uzun dönemde görülen duraylılık kaybını engellemek amacıyla mineral/kimyasal katkı maddeleri ve alkali aktive çimentoların kullanılması,
- ☞ Macun dolgunun yeraltı suyuna etkisini belirlemek amacıyla laboratuvar (statik-kinetik testler) ve yerinde (in-situ) testlerin yapılması önerilmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Aka, M., 2011. Türkiye’de Maden Atıklarının Yönetimi. Çevre ve Orman Bakanlığı 2011 Atık Yönetimi Sempozyumu, Antalya, 17-21 Nisan, 65s.
- Akçıl, A. ve Koldaş, S., 2006. Acid mine drainage (AMD): Causes, Treatment and Case Studies, Journal of Cleaner Production, 14, 12-13, 1139-1145.
- ASTM C 128-97., 2002. Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate. Annual Book of ASTM Standards, American Society of Testing Material.
- ASTM C 143-90., 2002. Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete. Annual Book of ASTM Standards, American Society of Testing Material.
- Azam, S. ve Li, Q., 2010. Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years WasteGeotechnics, s. 50-53.
- Belem, T. ve Benzaazoua, M., 2008. Design and Application of Underground Mine Paste Backfill Technology. Geotechnical and Geological Engineering, 26, s. 147-174.
- Benzaazoua, M., Belem, T. ve Bussiere, B., 2002. Chemical Factors That Influence the Performance of Mine Sulphidic Paste Backfill, Cement and Concrete Research, 32, 7, 1133-1144.
- Brackebusch, F.W., 1994. Basics of Cemented Paste Backfill Systems, Mining Engineering, 46, 10, 1175-1178.
- Chambers, D.M. ve Higman, B., 2011. Long Term Risks of Tailings Dam Failure. Center for Science in Public Participation. Report, 34s.
- Clark, C.C., Vickery, J.D. ve Backer, R.R., 1995. Transport of Total Tailings Paste Backfill: Results of Full-Scale Pipe Test Loop Pumping Tests, USBM, RI 9573, USA.
- Cihangir, F., Ercikdi, B., Kesimal, A., Turan, A. ve Deveci, H., 2012. Utilization of Alkali-Activated Blast Furnace Slag in Paste Backfill of High-Sulphide Mill Tailings: Effect of Binder Type and Dosage, Minerals Engineering, 30, 33-43.
- Çetiner, E.G., Ünver, B. ve Hindistan, M.A., 2006. Maden Atıkları ile İlgili Mevzuat: Avrupa Birliği ve Türkiye, Madencilik, 45, 1, 23-34.

- Erçikdi, B., Kesimal, A., Cihangir, F., Deveci, H. ve Alp, İ., 2009a. Cemented Paste Backfill of Sulphide-rich Tailings: Importance of Binder Type and Dosage, Cement and Concrete Composites, 31, 4, 268-274.
- Erçikdi, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H. ve Alp, İ., 2009b. Utilization of Industrial Waste Products as Pozzolanic Material in Cemented Paste Backfill of High Sulphide Mill Tailings, Journal of Hazardous Materials, 168, 2-3, 848-856.
- Erçikdi, B., 2009. Mineral ve Kimyasal Katkı Maddelerinin Macun Dolgu Performansına Etkisi, Doktora Tezi, K.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Erçikdi, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H. ve Alp, İ., 2010a. Effect of Natural Pozzolans as Mineral Admixture on the Performance of Cemented Paste Backfill of Sulphide-Rich Tailings, Waste Management Research, 28, 5, 430-435.
- Erçikdi, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H. ve Alp, İ., 2010b. Utilization of Water-Reducing Admixtures in Cemented Paste Backfill of Sulphide-Rich Mill Tailings, Journal of Hazardous Materials, 179, 940-946.
- Erçikdi, B., Cihangir, F., Kesimal, A. ve Deveci, H., 2012. Tesis Atıklarının Yönetiminde Macun Dolgu Teknolojisi, Madencilik Türkiye, 24, 54-59.
- Erçikdi, B., Baki, H. ve İzki, M., 2013. Effect of Desliming of Sulphide-rich Mill Tailings on the Long-term Strength of Cemented Paste Backfill, Journal of Environmental Management, 115, 5-13.
- Fall, M., Benzaazoua, M. ve Ouellet, S., 2004. Effect of Tailings Properties on Paste Backfill Performance, Proceedings of The 8th International Symposium on Mining with Backfill, Beijing, China, 193-202.
- Fall M, Benzaazoua M., 2005 Modelling the effect of sulphate on strength development of paste backfill and binder mixture optimization. Cement and Concrete Research; 32(5), 301-314.
- Golder PasteTec, Golder Paste Technology Corporate Profile. http://www.golder.com/modules.php?name=Services&sp_id=1221 (23 May 2012).
- Hassani, F.P., Nokken, M.R., Annor, A., 2007. Physical and Mechanical Behaviour of Various Combinations of Minefill Materials. CIM Bulletin, 100 (1101), s. 1-6.
- Kesimal, A., Yılmaz, E., Erçikdi, B., Alp, İ., Yumlu, M. ve Özdemir, B., 2002. Macun Dolgu Laboratuar Testleri, 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.

- Kesimal, A., Yılmaz, E. ve Ercikdi, 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., Ercikdi, B., Alp, İ. ve Deveci, H., 2005. Effect of Tailings and Binder on the Short-and Long-term Strength and Stability of Cemented Paste Backfill, Materials Letters, 59, 28, 3703-3709.
- Landriault, D.A., 2001. Backfill in Underground Mining, In: Hustrulid, W.A. (ed.), Underground Mining Methods Engineering Fundamentals and International Case Studies, SME, USA, 608-609.
- Landriault, D., 2006. They Said “It Will Never Work” - 25 Years of Paste Backfill 1981-2006. Proceedings of 9th International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Limerick, Ireland, s. 277-292.
- Özarslan, A., 2005. Yeraltı Madenlerinde Atık Depolamada Teknolojik ve Yasal Düzenlemeler, Madencilik ve Çevre Sempozyumu, Ankara.
- Rico, M., Benito, G., Salgueiro, A.R., Herrero, A.D., Pereira, H.G., 2008. Reported Tailings Dam Failures: A Review of the European Incidents in the Worldwide Context. J. of Hazardous Materials, 152, s. 846-852.
- Tariq, A. ve Nehdi, M., 2007. Developing Durable Paste Backfill from Sulphidic Tailings, Waste Management Research, 160, 4, 155-166.
- Terzaghi, K., Peck, R.B., 1967. Soil Mechanism in Engineering Practice, John Wiley, New York, p. 495.
- Yılmaz, E., Kesimal, A. ve Erçikdi, B., 2004. Asit Üreten Sülfidik Maden Atıklarının Macun Dolgu Olarak Değerlendirilmesi, İstanbul Üniversitesi Yerbilimleri Dergisi, İstanbul, 17, 1, 11-19.
- Yılmaz, T., İzki, M., Erçikdi, B., 2013. Numune Boyutunu Macun Dolgu Dayanımına Etkisi, Türkiye 23. Uluslar arası Madencilik ve Kongre Sergisi, Antalya, Bildiriler kitabı: 525-535.
- Yumlu, M., 2001. Backfill Practices at Çayeli Mine, Proceedings of the 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey, IMCET 2001, Ankara, 333-339.
- Yumlu, M., 2010. Mining With Paste Fill. AusIMM Cobar Mining Seminar, 26s.

7. EKLER

Ek Tablo 1. Bakır atık (BA) kullanılarak hazırlanan numunelerin 14-90 günlük kür süresi sonunda dayanım (UCS) sonuçları
Bağlayıcı Tipi: CEM III/A 42,5 N (Karçimsa)

Numune No.	Çimento Oranı (wt%)	Kür Süresi (gün)	Slamp (inç)	Katı Oranı (wt%)	Çap (cm)	Yük (Newton)	Dayanım (MPa)
1	7	14	7,5	76,83	10,16	4778	0,59
2	7	14	7,5	76,83	10,16	4592	0,57
3	7	14	7,5	76,83	10,16	4403	0,54
						Ortalama	0,57
4	7	28	7,5	76,83	10,16	6656	0,82
5	7	28	7,5	76,83	10,16	6796	0,84
6	7	28	7,5	76,83	10,16	6965	0,86
						Ortalama	0,84
7	7	90	7,5	76,83	10,16	9000	1,11
8	7	90	7,5	76,83	10,16	7288	0,90
9	7	90	7,5	76,83	10,16	9287	1,15
						Ortalama	1,05
1	7,5	14	7,5	76,69	10,16	6341	0,78
2	7,5	14	7,5	76,69	10,16	6426	0,79
3	7,5	14	7,5	76,69	10,16	6388	0,79
						Ortalama	0,79
4	7,5	28	7,5	76,69	10,16	9007	1,11
5	7,5	28	7,5	76,69	10,16	9336	1,15
6	7,5	28	7,5	76,69	10,16	9156	1,13
						Ortalama	1,14
7	7,5	90	7,5	76,69	10,16	9596	1,18
8	7,5	90	7,5	76,69	10,16	9068	1,12
9	7,5	90	7,5	76,69	10,16	9788	1,21
						Ortalama	1,17

Ek Tablo 2. Pirit atık (PA) kullanılarak hazırlanan numunelerin 14-90 günlük kür süresi sonunda dayanım (UCS) sonuçları
Bağlayıcı Tipi: CEM III/A 42,5 N (Karçimsa)

Numune No.	Çimento Oranı (wt%)	Kür Süresi (gün)	Slamp (inç)	Katı Oranı (wt%)	Çap (cm)	Yük (Newton)	Dayanım (MPa)
1	8,5	14	7,5	74,4	10,16	4687	0,58
2	8,5	14	7,5	74,4	10,16	4391	0,54
3	8,5	14	7,5	74,4	10,16	4553	0,56
						Ortalama	0,56
4	8,5	28	7,5	74,4	10,16	8734	1,08
5	8,5	28	7,5	74,4	10,16	8622	1,06
6	8,5	28	7,5	74,4	10,16	8827	1,09
						Ortalama	1,08
7	8,5	90	7,5	74,4	10,16	10349	1,28
8	8,5	90	7,5	74,4	10,16	9770	1,21
9	8,5	90	7,5	74,4	10,16	10714	1,32
						Ortalama	1,27
1	9,0	14	7,5	74,25	10,16	4709	0,58
2	9,0	14	7,5	74,25	10,16	4916	0,61
3	9,0	14	7,5	74,25	10,16	4699	0,58
						Ortalama	0,59
4	9,0	28	7,5	74,25	10,16	8866	1,09
5	9,0	28	7,5	74,25	10,16	8916	1,10
6	9,0	28	7,5	74,25	10,16	9006	1,11
						Ortalama	1,10
7	9,0	90	7,5	74,25	10,16	10682	1,32
8	9,0	90	7,5	74,25	10,16	10866	1,34
9	9,0	90	7,5	74,25	10,16	11273	1,39
						Ortalama	1,35

Ek Tablo 3. Baraj atığı (AB15 m.) kullanılarak hazırlanan numunelerin 14-90 günlük kür süresi sonunda dayanım (UCS) sonuçları
Bağlayıcı Tipi: CEM III/A 42,5 N (Karçimsa)

Numune No.	Çimento Oranı (wt%)	Kür Süresi (gün)	Slamp (inç)	Katı Oranı (wt%)	Çap (cm)	Yük (Newton)	Dayanım (MPa)
1	9,0	14	7,5	74,85	10,16	4445	0,55
2	9,0	14	7,5	74,85	10,16	4468	0,55
3	9,0	14	7,5	74,85	10,16	4359	0,54
						Ortalama	0,55
4	9,0	28	7,5	74,85	10,16	6365	0,81
5	9,0	28	7,5	74,85	10,16	6682	0,82
6	9,0	28	7,5	74,85	10,16	6502	0,80
						Ortalama	0,81
7	9,0	90	7,5	74,85	10,16	7782	0,96
8	9,0	90	7,5	74,85	10,16	8419	1,04
9	9,0	90	7,5	74,85	10,16	7591	0,94
						Ortalama	0,98
1	10,0	14	7,5	74,69	10,16	5346	0,66
2	10,0	14	7,5	74,69	10,16	5480	0,68
3	10,0	14	7,5	74,69	10,16	5358	0,66
						Ortalama	0,67
4	10,0	28	7,5	74,69	10,16	8007	0,99
5	10,0	28	7,5	74,69	10,16	7799	0,96
6	10,0	28	7,5	74,69	10,16	8368	1,03
						Ortalama	0,99
7	10,0	90	7,5	74,69	10,16	10774	1,33
8	10,0	90	7,5	74,69	10,16	9873	1,22
9	10,0	90	7,5	74,69	10,16	9512	1,17
						Ortalama	1,24

Ek Tablo 4. Baraj atığı (AB40 m.) kullanılarak hazırlanan numunelerin 14-90 günlük kür süresi sonunda dayanım (UCS) sonuçları
Bağlayıcı Tipi: CEM III/A 42,5 N (Karçimsa)

Numune No.	Çimento Oranı (wt%)	Kür Süresi (gün)	Slamp (inç)	Katı Oranı (wt%)	Çap (cm)	Yük (Newton)	Dayanım (MPa)
1	10,0	14	7,5	74,05	10,16	6511	0,80
2	10,0	14	7,5	74,05	10,16	6347	0,78
3	10,0	14	7,5	74,05	10,16	6593	0,81
						Ortalama	0,80
4	10,0	28	7,5	74,05	10,16	9312	1,15
5	10,0	28	7,5	74,05	10,16	10458	1,29
6	10,0	28	7,5	74,05	10,16	9711	1,20
						Ortalama	1,21
7	10,0	90	7,5	74,05	10,16	10901	1,35
8	10,0	90	7,5	74,05	10,16	10719	1,32
9	10,0	90	7,5	74,05	10,16	10956	1,35
						Ortalama	1,34
1	11,0	14	7,5	73,82	10,16	6832	0,84
2	11,0	14	7,5	73,82	10,16	7060	0,87
3	11,0	14	7,5	73,82	10,16	6918	0,85
						Ortalama	0,86
4	11,0	28	7,5	73,82	10,16	9732	1,20
5	11,0	28	7,5	73,82	10,16	10949	1,35
6	11,0	28	7,5	73,82	10,16	10766	1,33
						Ortalama	1,29
7	11,0	90	7,5	73,82	10,16	11309	1,40
8	11,0	90	7,5	73,82	10,16	11326	1,40
9	11,0	90	7,5	73,82	10,16	11069	1,37
						Ortalama	1,39

Ek Tablo 5. Baraj atığı (AB65 m.) kullanılarak hazırlanan numunelerin 14-90 günlük kür süresi sonunda dayanım (UCS) sonuçları
Bağlayıcı Tipi: CEM III/A 42,5 N (Karçimsa)

Numune No.	Çimento Oranı (wt%)	Kür Süresi (gün)	Slamp (inç)	Katı Oranı (wt%)	Çap (cm)	Yük (Newton)	Dayanım (MPa)
1	10,0	14	7,5	71,90	10,16	5284	0,65
2	10,0	14	7,5	71,90	10,16	5019	0,62
3	10,0	14	7,5	71,90	10,16	5105	0,63
						Ortalama	0,63
4	10,0	28	7,5	71,90	10,16	7448	0,92
5	10,0	28	7,5	71,90	10,16	6985	0,86
6	10,0	28	7,5	71,90	10,16	7711	0,95
						Ortalama	0,91
7	10,0	90	7,5	71,90	10,16	9079	1,12
8	10,0	90	7,5	71,90	10,16	8719	1,08
9	10,0	90	7,5	71,90	10,16	9428	1,16
						Ortalama	1,12
1	11,0	14	7,5	71,60	10,16	6700	0,83
2	11,0	14	7,5	71,60	10,16	6562	0,81
3	11,0	14	7,5	71,60	10,16	6640	0,82
						Ortalama	0,82
4	11,0	28	7,5	71,60	10,16	8259	1,02
5	11,0	28	7,5	71,60	10,16	8556	1,06
6	11,0	28	7,5	71,60	10,16	8457	1,04
						Ortalama	1,04
7	11,0	90	7,5	71,60	10,16	10586	1,31
8	11,0	90	7,5	71,60	10,16	10010	1,24
9	11,0	90	7,5	71,60	10,16	10659	1,32
						Ortalama	1,29

Ek Tablo 6. Bakır Atık (BA) kullanılarak hazırlanan numunelerin 14-90 günlük kür süresi sonunda dayanım (UCS) sonuçları
Bağlayıcı Tipi: CEM I 42,5 N (Ankara)

Numune No.	Çimento Oranı (wt%)	Kür Süresi (gün)	Slamp (inç)	Katı Oranı (wt%)	Çap (cm)	Yük (Newton)	Dayanım (MPa)
1	7,5	14	7,5	76,86	10,16	7722	0,95
2	7,5	14	7,5	76,86	10,16	7071	0,87
3	7,5	14	7,5	76,86	10,16	7633	0,94
						Ortalama	0,92
4	7,5	28	7,5	76,86	10,16	8269	1,02
5	7,5	28	7,5	76,86	10,16	8691	1,07
6	7,5	28	7,5	76,86	10,16	7842	0,97
						Ortalama	1,02
7	7,5	90	7,5	76,86	10,16	8222	1,01
8	7,5	90	7,5	76,86	10,16	8522	1,05
9	7,5	90	7,5	76,86	10,16	8644	1,07
						Ortalama	1,04
1	8,5	14	7,5	76,8	10,16	9180	1,13
2	8,5	14	7,5	76,8	10,16	8760	1,08
3	8,5	14	7,5	76,8	10,16	9312	1,15
						Ortalama	1,12
4	8,5	28	7,5	76,8	10,16	9645	1,19
5	8,5	28	7,5	76,8	10,16	9306	1,15
6	8,5	28	7,5	76,8	10,16	10112	1,25
						Ortalama	1,20

Ek Tablo 7. Pirit Atık (PA) kullanılarak hazırlanan numunelerin 14-90 günlük kür süresi sonunda dayanım (UCS) sonuçları.
Bağlayıcı Tipi: CEM I 42,5 N (Ankara)

Numune No.	Çimento Oranı (wt%)	Kür Süresi (gün)	Slamp (inç)	Katı Oranı (wt%)	Çap (cm)	Yük (Newton)	Dayanım (MPa)
1	7,5	14	7,5	75,3	10,16	4699	0,58
2	7,5	14	7,5	75,3	10,16	5010	0,62
3	7,5	14	7,5	75,3	10,16	5702	0,70
						Ortalama	0,63
4	7,5	28	7,5	75,3	10,16	5876	0,73
5	7,5	28	7,5	75,3	10,16	6019	0,74
6	7,5	28	7,5	75,3	10,16	6458	0,80
						Ortalama	0,75
1	8,5	14	7,5	75,21	10,16	7118	0,88
2	8,5	14	7,5	75,21	10,16	7370	0,91
3	8,5	14	7,5	75,21	10,16	7414	0,91
						Ortalama	0,90
4	8,5	28	7,5	75,21	10,16	8975	1,11
5	8,5	28	7,5	75,21	10,16	7975	0,98
6	8,5	28	7,5	75,21	10,16	8621	1,06
						Ortalama	1,05
7	8,5	90	7,5	75,21	10,16	8778	1,08
8	8,5	90	7,5	75,21	10,16	9056	1,12
9	8,5	90	7,5	75,21	10,16	8961	1,11
						Ortalama	1,10

Ek Tablo 8. Sınıflandırılmış Atık Barajı (S-AB) kullanılarak hazırlanan numunelerin 14-90 günlük kür süresi sonunda dayanım (UCS) sonuçları
Bağlayıcı Tipi: CEM I 42,5 N (Ankara)

Numune No.	Çimento Oranı (wt%)	Kür Süresi (gün)	Slamp (inç)	Katı Oranı (wt%)	Çap (cm)	Yük (Newton)	Dayanım (MPa)
1	6,5	14	7,5	80,02	10,16	7527	0,93
2	6,5	14	7,5	80,02	10,16	6995	0,86
3	6,5	14	7,5	80,02	10,16	7737	0,95
						Ortalama	0,91
4	6,5	28	7,5	80,02	10,16	8369	1,03
5	6,5	28	7,5	80,02	10,16	8601	1,06
6	6,5	28	7,5	80,02	10,16	8559	1,06
						Ortalama	1,05
7	6,5	90	7,5	80,02	10,16	8433	1,04
8	6,5	90	7,5	80,02	10,16	8690	1,07
9	6,5	90	7,5	80,02	10,16	8296	1,02
						Ortalama	1,04
1	7,5	14	7,5	79,88	10,16	10208	1,26
2	7,5	14	7,5	79,88	10,16	10330	1,27
3	7,5	14	7,5	79,88	10,16	10605	1,31
						Ortalama	1,28
4	7,5	28	7,5	79,88	10,16	10639	1,31
5	7,5	28	7,5	79,88	10,16	10930	1,35
6	7,5	28	7,5	79,88	10,16	10805	1,33
						Ortalama	1,33

ÖZGEÇMİŞ

Muhammet İZKİ, 01.06.1987 yılında Trabzon'da doğdu. 2001 yılında Yomra Merkez İlkokulu'ndan mezun oldu. Lise öğrenimini de 2004 yılında Yomra Lisesi'nde tamamladı. 2005 yılında kazandığı Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği bölümünden 2009 yılında başarıyla mezun oldu. Bir yıl sonra Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı.

BAŞLICA YAYINLARI;

1. Erçikdi, B., Baki, H. ve **İzki, M.**, 2013. Effect of Desliming of Sulphide-rich Mill Tailings on the Long-term Strength of Cemented Paste Backfill, Journal of Environmental Management, 115, 5-13.
2. Yılmaz, T., **İzki, M.**, Erçikdi, B., 2013. Numune Boyutunu Macun Dolgu Dayanımına Etkisi, Türkiye 23. Uluslar arası Madencilik ve Kongre Sergisi, Antalya, Bildiriler kitabı: 525-535.