

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ATIK TANE BOYUTUNUN SÜLFÜRLÜ ATIKLARDAN HAZIRLANAN MACUN
DOLGU PERFORMANSINA ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Maden Mühendisi Hakan BAKİ

MART 2013
TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ATIK TANE BOYUTUNUN SÜLFÜRLÜ ATIKLARDAN HAZIRLANAN MACUN
DOLGU PERFORMANSINA ETKİSİ

Maden Mühendisi Hakan BAKİ

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

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07.03.2013
Tezin Savunma Tarihi : 28.03.2013

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Bayram ERÇIKDI

Trabzon 2013

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Maden Mühendisliği Anabilim Dalında

Hakan BAKİ tarafından hazırlanan

**ATIK TANE BOYUTUNUN SÜLFÜRLÜ ATIKLARDAN HAZIRLANAN MACUN
DOLGU PERFORMANSINA ETKİSİ**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 12/03/2013 gün ve 1497 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

X. Kesimal
.....
E. Abdioğlu
.....
Bayram Erçikdi
.....

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

“Atık Tane Boyutunun Sülfürlü Atıklardan Hazırlanan Macun Dolgu Performansına Etkisi” 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 da teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Laboratuar çalışmaları aşamasında bilgi ve deneyimini benden esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Ferdi CİHANGİR’e, çalışma boyunca bana yardım eden Muhammet İZKİ’ye, son dönemlerde hiçbir yardımdan kaçınmayan Arş. Gör. Tekin YILMAZ’a ve ayrıca bana destek olan tüm hocalarıma ve arkadaşlarıma ayrı ayrı teşekkür ederim.

Bu çalışma, 2010.112.008.2 proje numaralı KTÜ Bilimsel Araştırma Projesi ve Çayeli Bakır İşletmeleri tarafından yüksek lisans tezi olarak desteklenmiştir.

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

Hakan BAKİ
Trabzon 2013

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Atık Tane Boyutunun Sülfürlü Atıklardan Hazırlanan Macun Dolgu Performansına Etkisi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Yrd. Doç. Dr. Bayram ERÇIKDI sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, deneyleri ve analizleri ilgili laboratuvarlarda 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.
07/03/2013

Hakan BAKİ

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	4
1.2. Dolgu Yöntemleri.....	5
1.3. Macun Dolgu Teknolojisi.....	6
1.3.1. Macun Dolguda Tane Boyut Dağılımının Önemi	11
1.3.2. Macun Dolguda Reolojinin Önemi	15
1.3.3. Macun Dolguda Asit ve Sülfat Etkisinin Önemi.....	20
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	24
2.1. Giriş.....	24
2.2. Atıkların Karakterizasyonu	25
2.2.1. Tane Boyut Dağılımı.....	25
2.2.2. Özgöl Ağırlık.....	26
2.2.3. Kimyasal Bileşim	27
2.2.4. Mineralojik Bileşim.....	28
2.3. Çimentosuz Dolgu Karışımlarının Reolojik Özellikleri.....	29
2.4. Bağlayıcı.....	32
2.5. Numunelerin Hazırlanması ve Dayanım Testi	32
2.6. pH ve Sülfat (SO_4^{-2}) Analizleri	34
2.7. Mikroyapı Analizleri	34
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	35
3.1. Sınıflandırmanın Dolgunun Kısa Dönem Dayanımına Etkisi.....	35
3.2. Sınıflandırmanın Dolgunun Uzun Dönem Dayanımına Etkisi.....	37

4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	44
5.	KAYNAKLAR.....	46
6.	EKLER	51
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

ATIK TANE BOYUTUNUN SÜLFÜRLÜ ATIKLARDAN HAZIRLANAN MACUN
DOLGU PERFORMANSINA ETKİSİ

Hakan BAKİ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Bayram ERÇIKDI
2013, 50 Sayfa, 4 Sayfa Ek

Bu tez çalışmasında, şlam uzaklaştırma (sınıflandırma) işleminin iki farklı cevher zenginleştirme atığından üretilen çimentolu macun dolgunun kısa ve uzun dönem dayanım, duraylılık ve reolojik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Macun dolgu performansının değerlendirilmesinde dizayn kriteri olarak, 28 günlük kür süresinde $\geq 1,0$ MPa tek eksenli basınç dayanım kazanımı ve 224 gün kür süresi boyunca duraylılığın (dayanım kaybının oluşmaması) korunması seçilmiştir. Şlam uzaklaştırma işlemi, atığın fiziksel, kimyasal, mineralojik ve reolojik özelliklerinde bazı değişikliklere yol açmıştır. Şlamı uzaklaştırılmış atıklardan hazırlanan macun dolgu karışımı istenilen akışkanlığı daha düşük su/çimento oranında elde etmiştir. Şlamı uzaklaştırılmış atıklardan hazırlanan numunelerin kısa dönem dayanımı, referans atıklardan üretilen numunelere kıyasla aynı bağlayıcı oranı ve kür süresinde %30-100 daha yüksektir. Şlamı uzaklaştırılmış atıklardan üretilen macun dolgu numuneleri uzun dönem duraylılığı nispeten daha düşük bağlayıcı oranında elde etmiştir (%5'e karşılık ≥ 6.1 referans atıklar için). Şlam uzaklaştırma işlemi, atığın karakteristik özelliklerine bağlı olarak bağlayıcı tüketiminde %13,4-23,1 oranında azalma sağlamıştır. Uzun dönemde oluşan dayanım kayıplarını anlayabilmek için, atık içerisindeki piritin oksidasyonundan kaynaklanan asit ve sülfat oluşumu kür süresine bağlı olarak takip edilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve civalı porozimetre (MIP) analizleri dolgu mikroyapısı ve ikincil mineral oluşumu (jips vb) hakkında bilgi sağlayarak şlam uzaklaştırma işleminin önemini ortaya koymuştur. Çalışma sonunda elde edilen sonuçlar, şlam uzaklaştırma işleminin sülfür içeriği yüksek atıklardan üretilen macun dolgunun kısa ve uzun dönem dayanım ve duraylılığını artırarak bağlayıcı tüketimini azalttığını ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Macun Dolgu, Şlam Uzaklaştırma (Sınıflandırma), Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Civalı Porozimetre (MIP), Piritli Atıklar, Atık Bertarafı.

Master Thesis

SUMMARY

EFFECT OF DESLIMING OF SULPHIDE RICH MILL TAILINGS ON PASTE BACKFILL PERFORMANCE

Hakan BAKİ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mining Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Dr Bayram ERÇIKDI
2013, 50 Pages, 4 Pages Appendixs

In this study, the effect of desliming on the short- and long-term strength, stability and rheological properties of cemented paste backfill (CPB) produced from two different mill tailings (spec and bornite, SP and BN) was investigated. A 28-day unconfined compressive strength (UCS) of ≥ 1.0 MPa and the maintenance of stability (i.e. no strength losses) over 224 days of curing were selected as the design criteria for the evaluation of paste backfill performance. Desliming induced some changes in the physical, chemical, mineralogical and rheological properties of the tailings. CPB mixture of the deslimed tailings achieved the required consistency at a lower water to cement ratio. The short-term UCSs of CPB samples of the deslimed tailings were found to be 30-100% higher than those samples of the reference tailings at all the binder dosages and curing times. CPB samples of the deslimed tailings achieved the long-term stability at relatively low binder dosages (e.g. 5 wt% c.f. $\geq 6.1\%$ for the reference tailings). It was also estimated that desliming could allow a 13.4-23.1% reduction in the binder consumption depending apparently on the inherent characteristics of the tailings. Over the curing period, generation of sulphate and acid by the oxidation of pyrite present in the tailings was also monitored to correlate with the strength losses observed in the long term. Scanning electron microscope (SEM) and Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) analyses provided an insight into the microstructure of CPB and the formation of secondary mineral phases (i.e. gypsum) confirming the beneficial effect of desliming. These findings have revealed that desliming can be suitably exploited for CPB of sulphide-rich mill tailings to improve the strength and stability particularly in the long term and to reduce binder consumption.

Key Words: Paste Backfill, Desliming, Scanning Electron Microscope (SEM), Mercury Intrusion Porosimetry (MIP), Sulphide Tailings, Waste Disposal.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Madencilik faaliyetlerinin farklı aşamalarında ortaya çıkan maden atık türleri.....	1
Şekil 2.	Madencilik işlemleri sonucu oluşan asidik maden suyu ve çevreye etkisi.....	2
Şekil 3.	Atık barajı yıkılması sonucu oluşan görüntü (Gümüşköy gümüş madeni)	3
Şekil 4.	Cevher zenginleştirme işlemleri sonucu açığa çıkan atıkların depolanması	4
Şekil 5.	Macun dolguyu oluşturan bileşenler.....	7
Şekil 6.	Bağlayıcı tipi (a) ve oranının (b) macun dolgu dayanımına etkisi	8
Şekil 7.	Macun dolgu karışımının akışkan görünümü	9
Şekil 8.	Su/çimento oranının macun dolgu dayanımına etkisi.....	9
Şekil 9.	İri taneli (a), iri ve ince taneli (b) atıklardan oluşan macun.....	13
Şekil 10.	20 µm altı malzeme miktarının macun dolgu dayanımına etkisi.....	14
Şekil 11.	Atık tane boyutunun porozite ve boşluk oranı üzerine etkisi	14
Şekil 12.	20 µm altı malzeme miktarıyla su/çimento (a) ve katı oranı (b) arasındaki ilişki	15
Şekil 13.	Slamp ölçümünün gösterimi	16
Şekil 14.	Macun dolgu karışımı katı içeriğinin slamp değeri ile ilişkisi	16
Şekil 15.	Su bırakma (a) ve su tutmanın (b) zamana bağlı grafiği	17
Şekil 16.	Dolgu ulaşım sisteminde termal etkileşimin gösterimi	18
Şekil 17.	Yeraltı sistem arızalarının nedenleri	19
Şekil 18.	Etrenjit oluşumuyla betonda oluşan çatlamlar	21
Şekil 19.	pH değerine göre etrenjit kristallerinin boy değişimi	21
Şekil 20.	Macun dolgu örneklerinde sülfürlü minerallerin oksidasyonu	22
Şekil 21.	pH'nın zamana ve bağlayıcı miktarına göre değişimi	23
Şekil 22.	Macun dolgu karışımında kür süresine bağlı olarak sülfat miktarındaki değişim.....	23
Şekil 23.	Deneylerde kullanılan atıkların tane boyut dağılımı	26
Şekil 24.	Spek (SP) ve bornit (BN) atıklarından zamana bağlı su ayrılması	30
Şekil 25.	Referans ve sınıflandırılmış atıkların oturma karakteristikleri.....	31
Şekil 26.	Macun dolgu numunelerinin hazırlanması ve testi: karıştırma (a), döküm işlemi (b), kür alma (c) ve dayanım testi (d)	33

Şekil 27.	Referans ve sınıflandırılmış SP atıklarından hazırlanan numunelerin kısa dönem dayanımı	35
Şekil 28.	Referans ve sınıflandırılmış BN atıklarından hazırlanan numunelerin kısa dönem dayanımı	36
Şekil 29.	Referans ve sınıflandırılmış SP atıklarından %5 çimento oranında hazırlanan numunelerin uzun dönem dayanımı	38
Şekil 30.	Referans ve sınıflandırılmış atıklardan %5 çimento oranında hazırlanan numunelerin kür süresine bağlı pH ve SO_4^{-2} konsantrasyonu	38
Şekil 31.	28 günde $\geq 1,0$ MPa dayanım veren numunelerin uzun dönem performansı	39
Şekil 32.	28 günde $\geq 1,0$ MPa dayanım veren numunelerin kür süresine bağlı pH ve SO_4^{-2} konsantrasyonu	40
Şekil 33.	%5 çimento oranında (a) ve 28 günde $\geq 1,0$ MPa dayanım üreten çimento oranlarında (b) hazırlanan numunelerin kür süresine bağlı porozite değişimi	41
Şekil 34.	Sınıflandırılmış (a) ve referans (b) atıklar kullanılarak %5 çimento oranında hazırlanan numunelerin mikro-yapısı	42
Şekil 35.	28 günlük kür süresinde $\geq 1,0$ MPa dayanım üreten numunelerin (%6,7 ve 10,4 çimento oranında hazırlanan) mikro-yapısı	42
Şekil 36.	%5 (a) ve %10,4 (b) çimento oranında hazırlanan numunelerde 224 gün kür süresi sonunda ikincil alçıtaşı oluşumu	43

TABLÖLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. AMD potansiyeline sahip sülfür mineralleri	2
Tablo 2. Dolgu tiplerinin operasyon maliyetlerinin karşılaştırılması	7
Tablo 3. Macun dolgu karışımının boyuta göre sınıflandırılması.....	11
Tablo 4. Dolguda kullanılan 20 µm altı malzeme miktarları	11
Tablo 5. Kısa dönem (14 ve 28 gün) tek eksenli basınç dayanımı test programı	25
Tablo 6. Uzun dönem (28-224 gün) tek eksenli basınç dayanımı test programı	25
Tablo 7. Deneylerde kullanılan atıkların kimyasal ve fiziksel karakterizasyonu	27
Tablo 8. Deneylerde kullanılan atıkların mineralojik bileşimi	28
Tablo 9. Çimentosuz SP atıklarının reolojik indeks testleri.....	30
Tablo 10. Çimentosuz BN atıklarının reolojik indeks testleri	31
Tablo 11. Deneysel çalışmalarda kullanılan bağlayıcının kimyasal bileşimi	32
Tablo 12. İstenen dayanım ve duraylılığı sağlayan 1 m ³ CPB karışımı için gerekli bağlayıcı miktarları	39

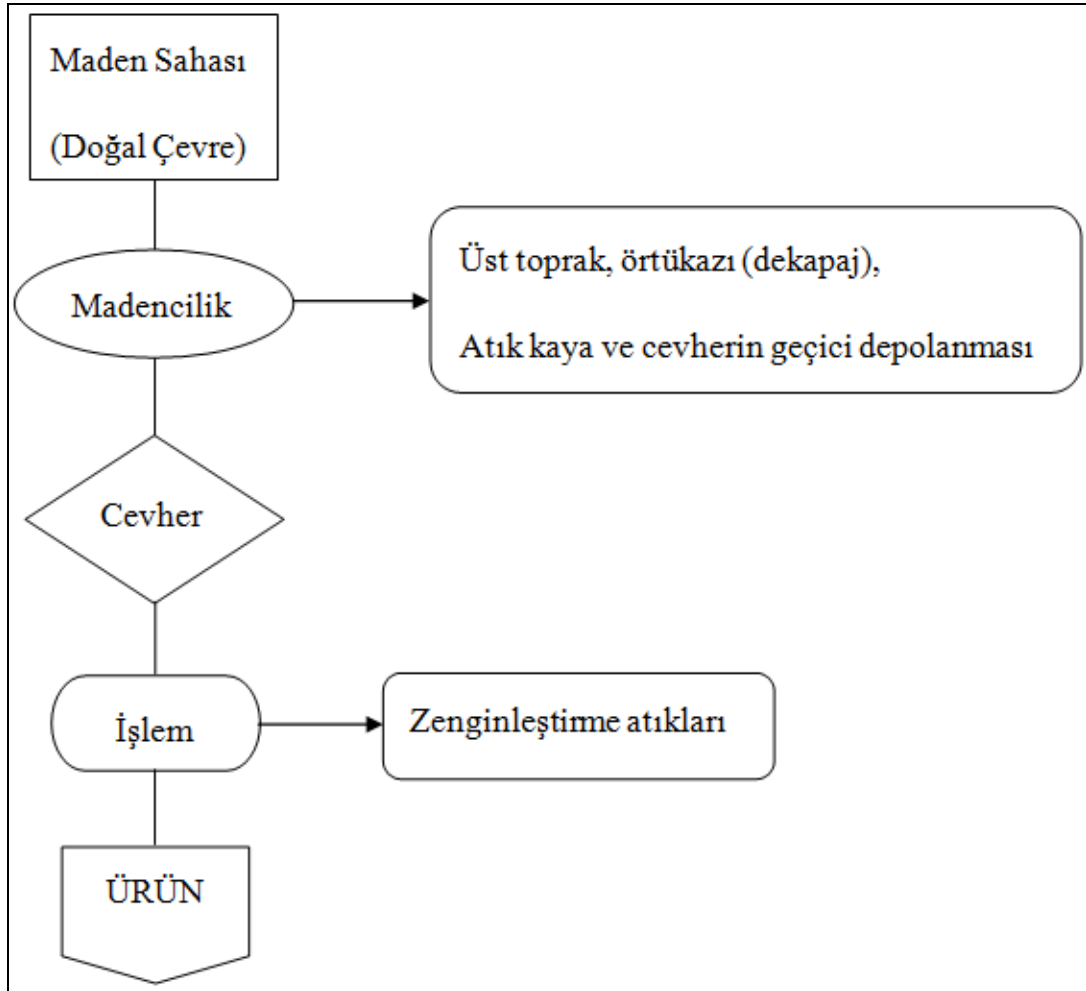
SEMBOLLER DİZİNİ

AKD	: Asit Kaya Drenajı
AMD	: Asidik Maden Suyu
ASTM	: American Standardisation for Testing and Materials
BN	: Bornit Cevher Atığı
C_c	: Eğrilik Katsayısı
CEM II 42.5 R	: Portland Kompoze Çimento
CH	: Portlandit
C-S-H	: Kalsiyum Silika Hidrat
C_u	: Uniformluk Katsayısı
ÇBI	: Çayeli Bakır İşletmeleri
MIP	: Civalı Porozimetre
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SP	: Spek Cevher Atığı
TCMA	: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği
UCS	: Tek Eksenli Basınç Dayanımı
XRD	: X-Işınları Difraksiyonu

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Madencilik faaliyetleri sonucu önemli miktarda atık malzeme açığa çıkmaktadır. Bu atık malzemeler; üst toprak, örtükazı (dekapaj), atık kaya ve zenginleştirme atıklarından oluşmakta ve özelliklerine bağlı olarak çevreye zarar verebilmektedirler. Madencilik faaliyetlerinin farklı aşamalarında ortaya çıkan atık türleri Şekil 1’de gösterilmektedir (Çetiner vd., 2006).



Şekil 1. Madencilik faaliyetlerinin farklı aşamalarında ortaya çıkan maden atık türleri (Çetiner vd., 2006).

Zenginleştirme atıkları; çeşitli tekniklerle çıkartılan cevherin zenginleştirilmesi sonucu açığa çıkan değersiz kısım olarak tanımlanabilir. Zenginleştirme işlemleri esnasında atıklara birçok kimyasal madde ilave edilmekte ve atıkların çevreye olan olumsuz etkilerini çok yönlü hale getirmektedir (Çetiner vd., 2006).

Zenginleştirme işlemleri sonucunda ortaya çıkan atıkların nereye depolanacağı büyük sorun oluşturmasıyla beraber bu atıkların duraylılığı (emniyeti), su ve toprak kalitesi üzerindeki etkileri diğer önemli problemlerdir. Örneğin, sülfürlü mineral (pirit vb.) içeren atıkların atmosferik koşullar altında depolanması asidik maden suyu (AMD) oluşumuna neden olmakta ve bu asidik maden suyu çevredeki su kaynaklarının ve toprağın kirlenmesine yol açabilmektedir (Şekil 2) (Akçıl ve Koldaş, 2006).



Şekil 2. Madencilik işlemleri sonucu oluşan asidik maden suyu ve çevreye etkisi

Asidik maden suyu (AMD), cevher veya yan kaya içerisindeki sülfür minerallerinin oksidasyonu sonucunda meydana gelmektedir. Bu olay maden ocağında olursa Asit Maden Drenajı (AMD), maden ocağı dışında yan kayada olursa Asit Kaya Drenajı (AKD) olarak adlandırılmaktadır. AMD potansiyeline sahip olan mineraller Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. AMD potansiyeline sahip sülfür mineralleri (Topçu, 2012).

Mineral adı	Kimyasal formülü	Mineral adı	Kimyasal formülü
Arsenopirit	FeAsS	Bornit	Cu_3FeS_4
Enarjit	Cu_3AsS_4	Galen	PbS
Kalkopirit	CuFeS_2	Kalkozin	Cu_2S
Kobaltit	CoAsS	Kovellin	CuS
Realgar	AsS	Sfalerit	ZnS
Milerit	NiS	Zinober	HgS
Subanit	CuFe_2S_3	Stibnit	Sb_2S_3

Yığınlar halinde veya atık barajlarında depolanan atıkların fiziksel duraylılığı da AMD oluşumu kadar önemlidir. İnce taneli maden atıkları fiziksel özellikleri açısından suya doygun olduğundan ve basınca maruz kaldığında hasar verici özellikte çamur akışlarına neden olabilirler (Şekil 3).



Şekil 3. Atık barajı yıkılması sonucu oluşan görüntü (Gümüşköy gümüş madeni)

Günümüzdeki yasal değişiklikler bu tür tesis atıklarının güvenli ve emniyetli bir şekilde yönetilmesini yani bertaraf edilmesini zorunlu kılmaktadır. Madencilikte kullanılan atık bertaraf yöntemlerini; atığın türü, uygulanan yöntemin yeri, yerleşimi ve su deşarjı durumuna göre değişik sınıflara ayırmak mümkündür. Setlendirilmiş baraj ve havuzlar (Şekil 4), doğaya geri kazandırılan kuru atık depoları, işlenmiş liç yığınları, açık ocak çukurları, özel olarak kazılan çukurlar başlıca yerüstü atık bertaraf yöntemleridir. Kazı-dolgu ve oda-topuk gibi yeraltı maden işletme yöntemlerinde gerekli olan dolgu malzemesinin atıklardan sağlanması yeraltı atık bertaraf yöntemidir. Genellikle suyunu kolay bırakan iri veya kumsu atık kullanılırken son zamanlarda gelişen teknolojiye paralel olarak basınçlı filtre ile suyu iyice alınmış çimento katkılı karışımlar hem tahkimat hem de atık bertarafını aynı anda sağladığı için başarıyla kullanılmaktadır (Çetiner vd., 2006).



Şekil 4. Cevher zenginleştirme işlemleri sonucu açığa çıkan atıkların depolanması

1.1.1. Tezin Amacı

Sülfürlü atıkların macun dolgu malzemesi olarak yeraltında güvenli bir şekilde depolanması, yerüstü atık depolama ve rehabilitasyon maliyetlerinin azalması ve çevresel açıdan zararlı asidik maden suyu oluşumunun engellenmesi bakımından büyük öneme sahiptir. Ancak, sülfür içeriği yüksek atıklardan hazırlanan macun dolgu uygulamalarında asit ve sülfat etkisi nedeniyle özellikle uzun dönemde birtakım durabilite kaybı (dayanım kaybı) söz konusu olmaktadır. Yeraltına yerleştirilen dolgunun bileşimindeki piritin bozunmasına bağlı olarak oluşan asit ve sülfat etkisi nedeniyle zamanla dayanımını kaybetmesi göçüklere neden olmak suretiyle istenmeyen işgücü kayıplarına ve üretimin durmasına neden olabilmektedir. Bu tür uygulamalarda, istenen dayanım ve durabiliteyi sağlamak için daha fazla çimento kullanımı tercih edilmektedir. Bağlayıcı oranı arttıkça macun dolgu dayanım ve durabilitesi artmakta, ancak dolgu işletme maliyetini de önemli oranda artırmaktadır. Sülfür içeriği yüksek atıklardan hazırlanan macun dolguda asit ve sülfat etkisi nedeniyle oluşan dayanım ve durabilite kaybını azaltmanın en etkili yöntemlerinden birisi geçirgenliği düşük dolgu üretmek ve oksijenin dolgu içerisine difüzyonunu engellemektedir. Geçirimliliği düşük dolgu üretmek için macun dolgu malzemesi olarak kullanılan atıkların optimum tane boyut dağılımına sahip olması en önemli faktördür. Ancak, macun dolgu uygulamalarında dolgu malzemesi olarak kullanılan atıkların tane boyut dağılımları genellikle göz ardı edilmekte ve atıklar herhangi bir sınıflandırmaya tabi tutulmaksızın dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Atık tane boyut dağılımındaki optimizasyonun geçirimsizliği düşük bir dolgu üretimi sağlayacağı, mikro yapıyı iyileştirerek piritin oksidasyonunu azaltacağı/engelleyeceği, dolgunun uzun dönemde asit ve sülfat etkisine karşı direncini arttıracığı, düşük çimento oranında daha yüksek dayanım ve durabilitenin elde edilmesine imkân sağlayacağı ve böylece macun dolgu işletme maliyetlerini azaltacağı düşünülmektedir. Bu nedenle tez çalışmasının başlıca amacı;

- Dolgunun hazırlanmasında kullanılan atığın tane boyut dağılımının, macun dolgunun kısa ve uzun dönem dayanım, durabilite, reoloji ve işletme maliyetlerine etkisinin incelenmesidir.

1.2. Dolgu Yöntemleri

Madencilikte, yeraltından cevherin çıkarılmasıyla doldurulması gereken büyük boşluklar oluşmaktadır. Dolgu, çalışma ortamını güvenli halde tutmak için yeraltında açılan boşlukları uygun bir malzeme kullanarak tahkimat sağlaması amacıyla yapılan doldurma işlemidir. Dolgunun madeni alınmış bölgelere yerleştirilmesi genel olarak karışımın içerisine belli oranda bağlayıcı ve karışım suyu ilave edilerek gerçekleştirilmektedir. Mevcut dolgu çeşitleri arasında geçmişten günümüze birçok isimle adlandırılan dolgular olmasına karşın temelde hidrolik dolgu, kaya dolgu ve son yıllarda giderek yaygınlaşan macun dolgu kullanılmaktadır (Çavuşoğlu, 2008; Erçikdi, 2009).

Bazen klasik dolgu veya kum dolgusu olarak da adlandırılan hidrolik dolgunun temel prensibi, ince (kum) boyuttaki katı taneciklerin su ve bağlayıcı ile karıştırılarak hidrolik güç ünitesiyle çalışan ekipmanlarla yeraltına nakliyesidir. Nakliye sonucunda yeraltına yerleştirilen dolgunun içindeki fazlalık su, drenaj yoluyla uzaklaştırılmaktadır ve bu işlem dolgunun içerisine yerleştirilen gözenekli borudan oluşan drenaj sistemiyle sağlanmaktadır. Karışım, katıların özgül ağırlığına bağlı olarak ağırlıkça %60-75 oranında katı içermektedir (Dorricott ve Grice, 2002; Çavuşoğlu, 2008).

Kaya dolgu, hidrolik dolgunun mevcut olmadığı durumlarda kullanılan bir yeraltı dolgu yöntemidir. Kaya dolgu sisteminin uygulanması, zenginleştirme tesisinin madenden çok uzak olması veya proste öğütmenin çok ince olması sonucu olabilir (Karapınar, 2009). Bu yeraltı dolgu yöntemi madeni alınmış boşlukları doldurmak için pasa olarak adlandırılan yan kayaç ve farklı boyutta agregalardan oluşan bir dolgudur. Bu yöntemde

kullanılacak malzeme taşocağı vb. yerlerden temin edilmesi durumunda maliyet artacaktır (Yılmaz, 2003; Kuganathan, 2005).

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 hidrasyonunu sağlamak amacıyla ilave edilen karışım suyundan oluşmaktadır (Brackebusch, 1994). Uygun bir atık yönetimi yöntemi olan macun dolguyu 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 maliyetlerinin azaltılmasıdır (Erçikdi vd., 2012).

1.3. Macun Dolgu Teknolojisi

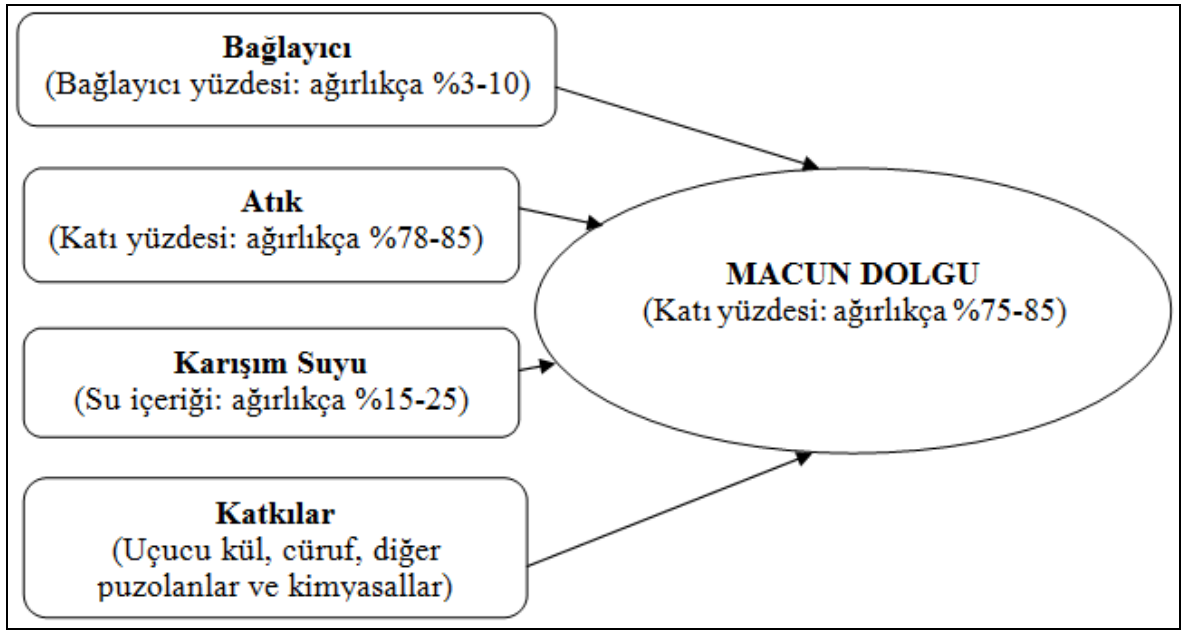
Madencilik sektöründe son yıllarda giderek yaygınlaşmakta olan macun dolgu teknolojisi dünyada ilk olarak Almanya’da bulunan Grund Madeninde kullanılmış ve başarısından dolayı adını dolgu yöntemleri arasına yazdırmıştır. Ülkemizde şu an Çayeli Bakır İşletmesi ve Efemçukuru Altın Madeni’nde macun dolgu metodu uygulanırken bazı maden işletmelerinde (Kastamonu Küre Bakır, Efemçukuru Altın Madeni) de altyapı çalışmaları devam etmektedir.

Macun dolgu malzemesi; maden atıkları, bağlayıcılar (çimento, baca külü, yüksek fırın cürufu vb.) ve suyun başarılı bir karışımıdır (Şekil 5). Bağlayıcıların fonksiyonu, macun dolgunun dayanımını arttırmaktır. Önceki çalışmalar çimentolu macun dolgunun mekanik ve reolojik özelliklerinin cevher zenginleştirme atıklarının fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliklerine, su bileşimi, bağlayıcı tipi ve bunların oranlarına bağlı olduğunu göstermiştir (Benzaazoua vd., 2002; Kesimal vd., 2002, 2003). Macun dolgunun istenilen uygulama için, gerekli dayanımı sağlayacak şekilde düzenlenmesi mümkündür. Dayanım, çimento ilavesi artırılarak ve nem içeriği azaltılarak artırılabilir.

Hidrolik ve kaya dolguya kıyasla daha düşük işletme maliyeti (Tablo 2) ve tesis atıklarının %65-70’inin yeraltında depolanmasına imkân sağlaması ve atık depolama maliyetlerinde önemli ölçüde azalma yapması nedeniyle diğer maden işletmeleri tarafından da tercih edilmeye başlanmıştır. Tesis kurulum kapasitesi ve yeraltı nakliye sistemine bağlı

olarak macun dolgunun ilk yatırım maliyeti 5-7 milyon dolar arasında değişmektedir (Golder PasteTec, 2012). Macun dolgu uygulamasında işletme maliyetlerinin en önemli kısmını (yaklaşık %50-75) çimento sarfiyatı oluşturmaktadır. Dolgunun dayanım ve duraylılığını artırmak için karışıma ek olarak ilave edilecek bağlayıcı, işletme maliyetlerini olumsuz yönde etkileyecektir. Bu nedenle son yıllarda Portland çimentosu yerine belirli oranlarda puzolanik özelliğe sahip mineral ve akışkanlaştırıcı özelliğe sahip kimyasal katkıları kullanılarak işletme maliyetleri azaltılmaya çalışılmaktadır (Erçikdi vd., 2010a).

Macun dolgu yönteminin madencilikte uygulanmaya başlamasıyla, önceden atık sahalarına, atık barajlarına, denizlere vb. gönderilen çevresel açıdan zararlı maddeler içeren tesis atıklarının yeraltında cevheri alınmış boşluklara depolanması mümkün hale gelmiştir.



Şekil 5. Macun dolguyu oluşturan bileşenler

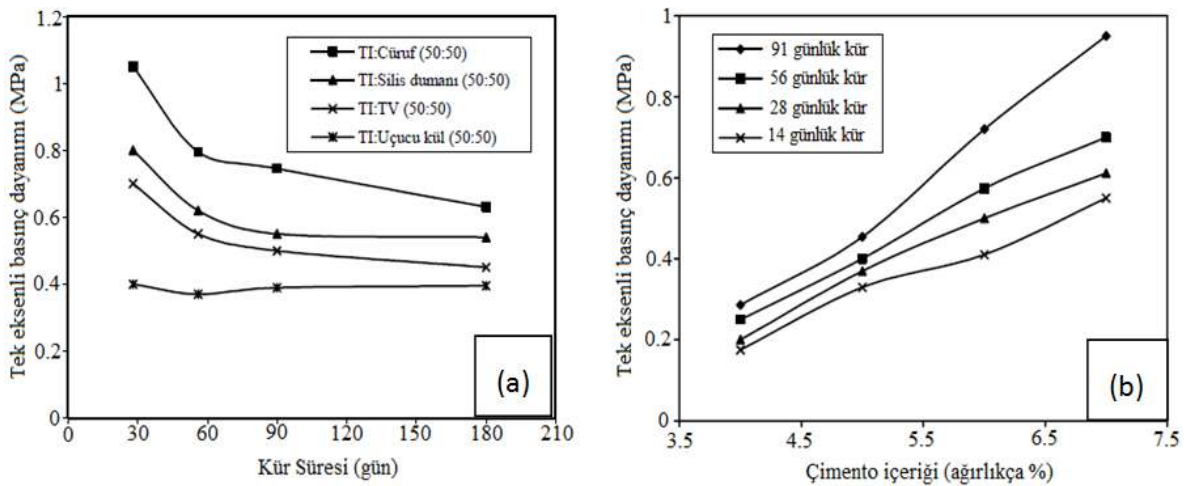
Tablo 2. Dolgu tiplerinin operasyon maliyetlerinin karşılaştırılması (Yılmaz vd., 2004).

Operasyon Maliyetleri (USD-\$/ton)	Hidrolik Dolgu	Kaya Dolgu	Macun Dolgu
Çimento	2,30	2,00	1,50
Dolgunun hazırlanması	1,31	1,20	2,20
Dağıtım	0,92	3,50	0,90
Barikat	1,28	-	0,60
Temizleme	0,98	-	-

Tablo 2'nin devamı

Operasyon Maliyetleri (USD-\$/ton)	Hidrolik Dolgu	Kaya Dolgu	Macun Dolgu
Pompalama	0,91	-	-
Diğer	0,21	0,21	0,21
Toplam maliyet	7,91	6,91	5,41

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). Dolguyu oluşturan bileşenlerin (atık, bağlayıcı ve karışım suyu) fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri dolgu dayanımını etkilemektedir. Ayrıca yeraltı üretim boşluklarına yerleştirilen dolgunun yerinde koşulları (sıcaklık, drenaj vb.) dolgu dayanımını etkileyen önemli parametrelerdir. Yılmaz vd. (2004) bağlayıcı tipi ve oranının dolgu dayanımını etkilediğini; kür süresi ve bağlayıcı oranı arttıkça dayanımın arttığını belirtmiştir (Şekil 6).



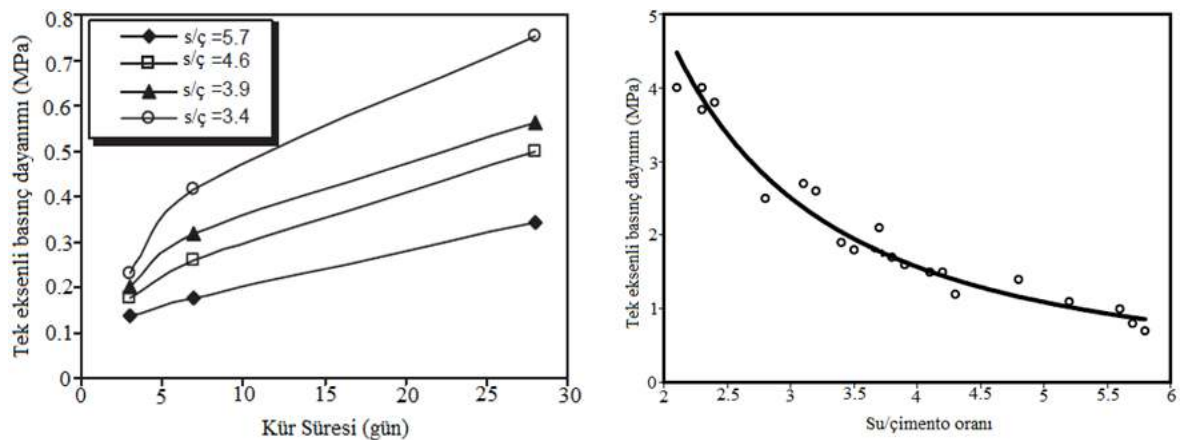
Şekil 6. Bağlayıcı tipi (a) ve oranının (b) macun dolgu dayanımına etkisi (Yılmaz vd., 2004).

Macun dolgu tesisinde hazırlanan karışımın boru hattı ile yeraltı üretim boşluklarına taşınabilmesi ve dolgu nakil hattında tıkanmalara neden olmaması için belirli bir akışkanlığa sahip olması gerekmektedir (Şekil 7).



Şekil 7. Macun dolgu karışımının akışkan görünümü

Macun dolgu karışımı içerisinde 20 μm altı malzeme miktarı arttıkça dolgunun akışkanlığı (belli bir katı oranında) azalmaktadır. Akışkanlığın azalması, dolgunun boru hattı ile yeraltına nakliyesinde daha fazla enerji gereksinimine ve borularda birtakım aşınma ve tıkanma problemlerinin oluşmasına yol açmaktadır (Clayton vd., 2003). İstenen akışkanlığı elde etmek için karışıma ilave edilen su dolgunun porozite ve su/çimento oranını artırmakta, ancak macun dolgunun dayanım ve durabilitesini olumsuz yönde etkilemektedir (Benzaazoua vd., 2004; Erçikdi vd., 2010a,b). Dolgunun su: çimento oranına bağlı olarak dayanım kazanımı Şekil 8’de verilmektedir.



Şekil 8. Su/çimento oranının macun dolgu dayanımına etkisi (Yılmaz vd., 2004; Kesimal vd., 2005).

Macun dolgu yönteminin avantaj ve dezavantajları kısaca aşağıdaki gibidir (Karapınar, 2009; Erçıkı vd., 2012);

- Tesis atıklarının %65-70'inin yeraltına depolanmasına olanak sağlamakta ve yerüstü atık depolama maliyetlerini önemli ölçüde azaltmaktadır.
- Macun dolgu karışımının gözenekliliği hidrolik dolguya oranla azdır ve bu da dayanıma olumlu yönde etki yapmaktadır.
- Atıkların yeraltına güvenli bir şekilde depolanmasını sağlamasıyla yeryüzünde oluşabilecek çevre sorunlarını (AMD oluşumu vb.) azaltmaktadır.
- Temelde bütün atıklar macun olarak kullanılabilir, fakat hidrolik dolguda sadece iri malzeme kullanılmaktadır. Sürekli iri malzeme temini problemi yaşanmaktadır.
- İşletme maliyetlerinin diğer dolgu yöntemlerine oranla düşük olması macun dolgunun önemli avantajlarından birisidir.
- Boru hattıyla yeraltına taşındığı için düzensiz ve dar noktalara bile uygulanabilmektedir, böylece güvenli madencilğe ışık tutmaktadır.
- Hidrolik dolguya kıyasla daha erken sürede yüksek dayanım sağlaması maden ocağındaki üretimi hızlandırmaktadır.
- Dolgunun taşınması boru sistemiyle yapıldığı için kaya dolgunun taşınmasından daha ucuzdur. Kaya dolgu, kamyon veya raylı sistem gerektirmektedir.
- Cevher zenginleştirme atıkları kullanıldığı için kaya ve agrega gibi diğer doğal kaynakların kullanımı azalmaktadır.

Macun dolgunun dezavantajları ise şöyledir:

- Diğer dolgu yöntemlerine göre macun dolgu yönteminin ilk yatırım maliyeti yüksektir (susuzlandırma işlemi ve pompa maliyetleri vb.).
- Madenin ömrünün macun dolgu tesisinin ilk yatırım maliyetini geri kazanacak kadar uzun olması gerekmektedir.
- Macun dolguyu yeraltına nakletmek için boru hattı kullanılmaktadır ve bu hat boyunca ilerleyen dönemlerde aşınmalar ve tıkanmalar olabilir.
- Sülfürlü atıkların su ve oksijen varlığında oksidasyona uğraması uzun dönemde dolgunun dayanım ve duraylılığını kaybetmesine neden olabilmektedir.
- Macun dolgunun yeraltına nakliyatı esnasında tane boyut dağılımı, yoğunluk ve su miktarı gibi dolgunun dayanım ve duraylılığını etkileyen parametrelerde küçük değişiklikler oluşabilir.

1.3.1. Macun Dolguda Tane Boyut Dağılımının Önemi

Macun dolguda kullanılan atık malzemenin tane boyut dağılımı; dolgu dayanım ve durabilitesi, reolojik özelliği ve işletme maliyetlerini etkileyen en önemli parametrelerden birisidir (Fall vd., 2005b). Tesis atığından oluşturulan karışımın macun oluşturabilmesi için malzemenin 20 μm altı içeriğinin ağırlıkça en az %15 olması gerekmektedir (Landriault, 1995). 20 μm altı malzeme miktarına bağlı olarak macun dolgu karışımı için üç tip boyut dağılım kategorisi bulunmaktadır (Landriault; 1995, 2001) (Tablo 3). 20 μm altı malzeme miktarının artması, hazırlanan karışımların bünyesinde daha fazla su tutmasına neden olacak ve yeraltı üretim boşluklarına yerleştirilen macun dolgu karışımının erken kür sürelerinde sıvılaşmaya maruz kalabileceği, daha geç dayanım kazanacağı ve cevher üretimi döngüsünü uzatacağı belirtilmektedir (Fall vd., 2005b). İnce malzeme oranı arttıkça genellikle dolgunun yoğunluğu artar ve geçirgenliği azalır. Macun dolgu, ince malzeme içeriğine bağlı olarak geçirgenliğinin çok düşük olmasından dolayı yüksek su tutma özelliğine sahiptir (Yılmaz vd., 2004). Bu ince malzemeli atıklarla yapılan karışım, yeraltı nakliyesi için iyi bir dolgudur fakat az dayanım üretirler. Yapılmış olan deneysel çalışmalar incelendiği zaman, kullanılan atık malzemelerin boyut sınıfının genellikle orta taneli atıklar sınıfına girdiği görülmektedir (Tablo 4).

Tablo 3. Macun dolgu karışımının boyuta göre sınıflandırılması (Landriault, 1995)

Atık grubu	20 μm altı malzeme miktarı, (ağ. %)	7" Slamp'da katı oranı (ağırlıkça %)
İri taneli	15-35	78-85
Orta taneli	35-60	70-78
İnce taneli	60-90	55-70

Tablo 4. Dolguda kullanılan 20 μm altı malzeme miktarları

20 μm altı malzeme miktarı (% ağırlıkça)	Landriault (1995)'e göre atık sınıflandırılması (Tablo 1)	Referanslar
48-67	Orta ve ince taneli atık	Benzaazoua vd., 2002
52-54	Orta taneli atık	Kesimal vd., 2004
37-45	Orta taneli atık	Fall ve Benzaazoua, 2005a
42-47	Orta taneli atık	Moghaddam ve Hassani, 2007
40	Orta taneli atık	Erçikdi, 2009
45	Orta taneli atık	Fall ve Samb, 2009
41	Orta taneli atık	Fall vd., 2010

Tablo 4'ün devamı

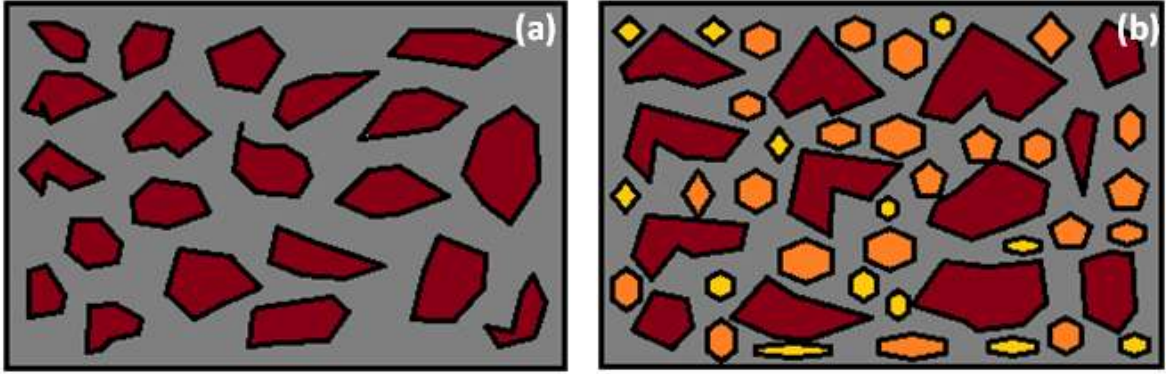
20 μ m altı malzeme miktarı (% ağırlıkça)	Landriault (1995)'e göre atık sınıflandırılması (Tablo 1)	Referanslar
53	Orta taneli atık	Coussy vd., 2011
76,73	İnce taneli atık	Yin vd., 2012
45	Orta taneli atık	Abdul-Hussain ve Fall, 2012
44	Orta taneli atık	Yılmaz vd., 2012
56	Orta taneli atık	Cihangir vd., 2012

Ancak, iri taneli atık malzeme kullanılarak yapılan macun dolgu karışımlarında yüksek katı içeriği ve düşük su/çimento oranı elde edilmekte ve buna bağlı olarak karışımın dayanımının arttığı belirtilmektedir (Kesimal vd., 2003; Fall vd., 2005b). Orta taneli atıklar genellikle iyi bir macun dolgu karışımı sağlarlar fakat iri taneli atıklardan daha düşük dayanım elde ederler. Bunun da öncelikli sebebi daha yüksek su/çimento oranına sahip olmalarıdır. İnce taneli atıklar ise 20 μ m altı malzeme miktarı çok olduğundan dayanımları oldukça düşüktür.

İyi bir tane boyut dağılımına sahip olmayan macun dolgu karışımları daha yüksek bağlayıcı miktarına ihtiyaç duymaktadır. Optimum bir dağılıma sahip atıklarla üretilen dolguda ise ince taneler iri tanelerin aralarındaki boşlukları doldurduğu için daha yüksek dayanım vermektedirler.

Macun dolgu malzemesi olarak kullanılacak atık malzemenin tane boyut dağılımı, dayanım, dolgu nakliye işlemi ve dolgunun yerleşmesini de etkilemektedir. Bu nedenle macun dolgu içindeki atık malzemenin optimum tane boyut dağılımına sahip olması ve her fraksiyon boyutundaki malzemenin içermesi gerekmektedir (Erçikdi, 2009). Optimum tane boyut dağılımı, iri taneler arasını ince tanelerin doldurması olarak da ifade edilmektedir (Şekil 9).

Daha önce yapılmış olan deneysel çalışmalarda optimum 20 μ m altı malzeme miktarının ne kadar olacağı hakkında ortak bir bilgi bulunmamaktadır. Genellikle optimum tane boyut dağılımını belirlemek için üniformluk katsayısı (C_U) ve eğrilik katsayısı (C_C) kullanılmaktadır (Annor vd. 1999). İyi bir tane boyut dağılımına sahip dolgu malzemeleri için C_U değeri 4-6, C_C değeri ise 1-3 arasında olmalıdır.



Şekil 9. İri taneli (a), iri ve ince taneli (b) atıklardan oluşan macun

Yapılan çalışmalar, bir macun dolgu uygulamasında yüksek dayanım ve duraylılık sağlayan bir karışım dizaynının tüm işletmeler için genelleştirilemeyeceğini, bu nedenle her bir dolgu uygulaması için en uygun karışım dizaynının (optimum bağlayıcı oranı, bağlayıcı tipi, optimum tane boyut dağılımı vb.) ayrı olarak belirlenmesi gerektiğini göstermiştir (Kesimal vd., 2004; Erçikdi vd., 2010a,b; Cihangir vd., 2012). Örneğin Erçikdi vd. (2003)'de yapmış olduğu çalışmada en yüksek dayanım kazanımının C_u değeri 6 olan atık malzeme; Benzaazoua vd. (2004) ise C_u değeri 12 olan atık malzemenin sağladığını belirtmiştir.

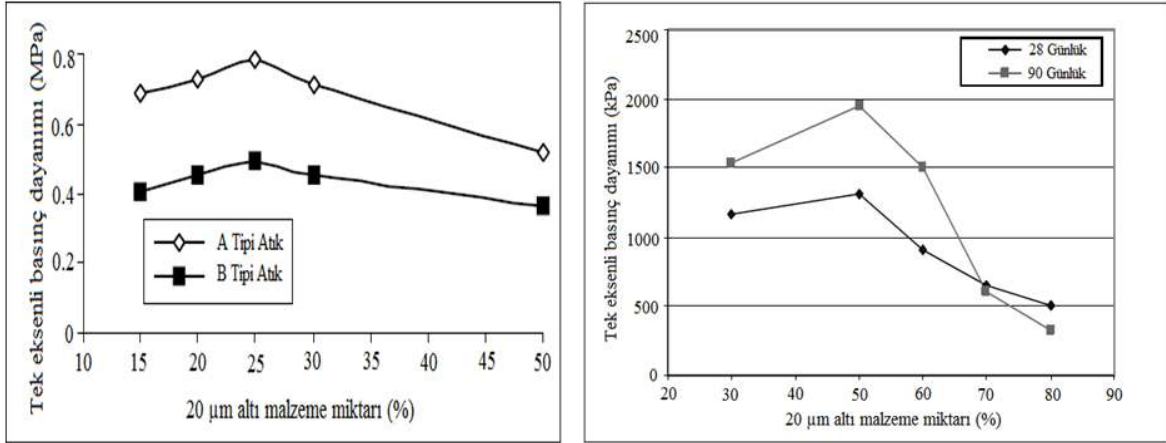
Üniformluk ve eğrilik katsayı değerleri aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanmaktadır;

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}}, \quad (\text{üniformluk katsayısı}) \quad (1)$$

$$C_C = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10}) \times (D_{60})}, \quad (\text{eğrilik katsayısı}) \quad (2)$$

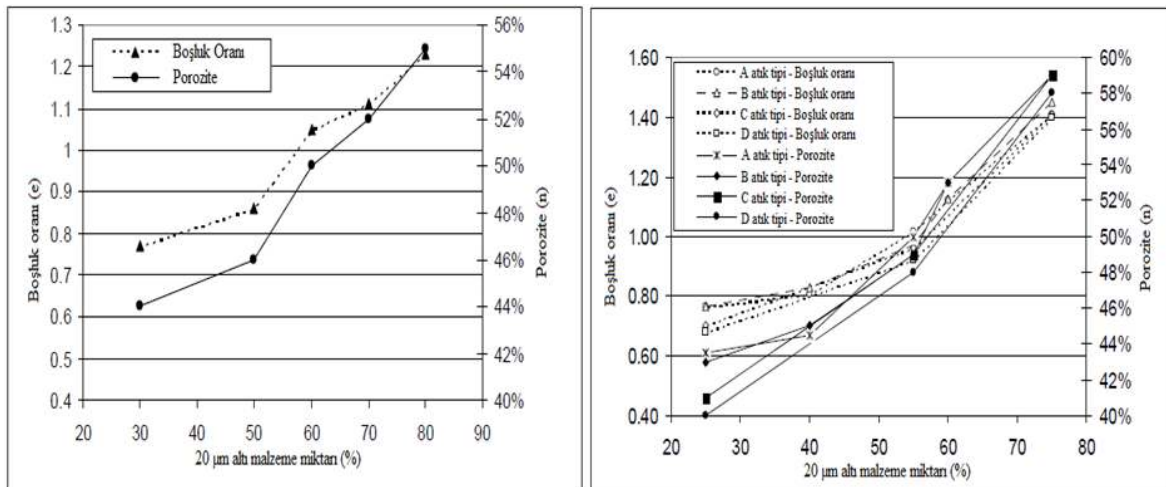
Burada; D_{10} , toplam malzemenin %10'nun elek altına geçtiği boyut; D_{30} , toplam malzemenin %30'nun elek altına geçtiği boyut ve D_{60} , toplam malzemenin %60'nın elek altına geçtiği boyut miktarlarını göstermektedir.

Dolgu tasarımı açısından ağırlıkça 20 μm altında bulunması gereken optimum malzeme miktarı atığın özelliğine (fiziksel vb.) bağlı olarak değişmektedir. Şekil 10'da da görüleceği gibi 28 günlük kür süresi sonunda en yüksek dayanımı Kesimal vd. (2003) 20 μm altı ağırlıkça %25; Fall vd. (2004) ise 20 μm altı ağırlıkça %50 olan atık malzemenin sağladığını belirtmiştir.



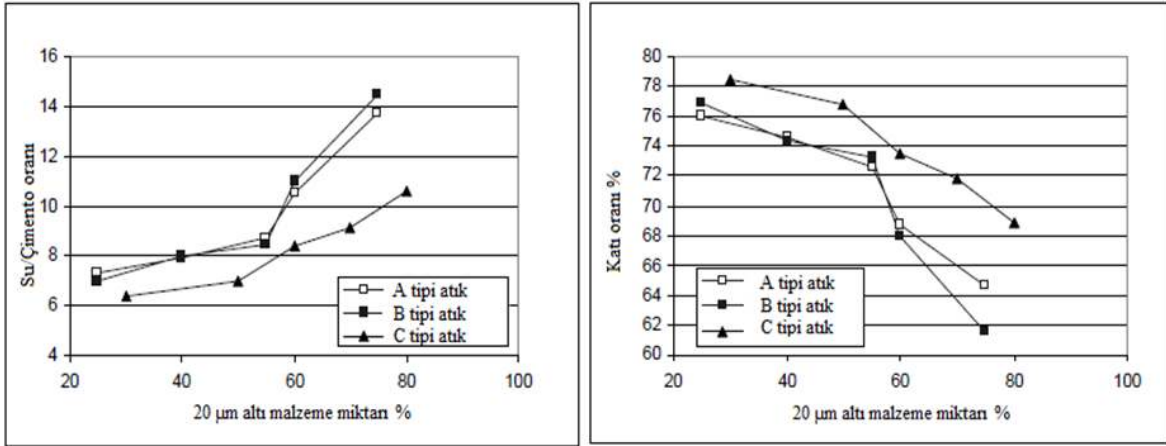
Şekil 10. 20 µm altı malzeme miktarının macun dolgu dayanımına etkisi (Kesimal vd. 2003; Fall vd. 2004).

Atık malzemenin tane boyut dağılımı, dolgunun mikro yapısı (porozite vb) üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Fall vd. 2004’de yapmış olduğu çalışmada porozite ve boşluk oranının 20 µm altı malzeme miktarının artmasıyla arttığını göstermiştir (Şekil 11).



Şekil 11. Atık tane boyutunun porozite ve boşluk oranı üzerine etkisi (Fall vd., 2004, Fall vd., 2005b).

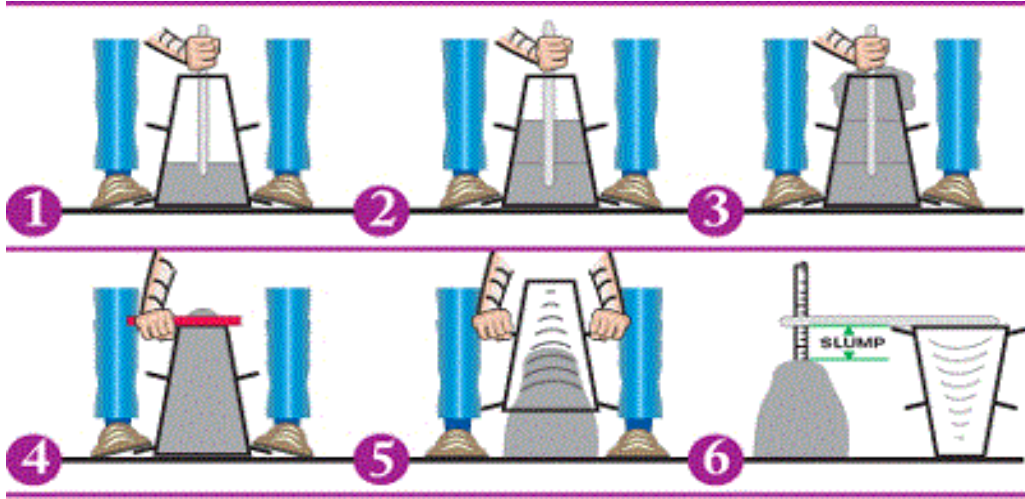
Macun dolgu karışımında ince malzeme miktarı arttıkça su/çimento oranı artmakta, katı oranı azalmaktadır (Şekil 12). Bu da macun dolguda dayanım kaybına yol açabilmektedir.



Şekil 12. 20 µm altı malzeme miktarıyla su/çimento (a) ve katı oranı (b) arasındaki ilişki (Fall vd., 2004).

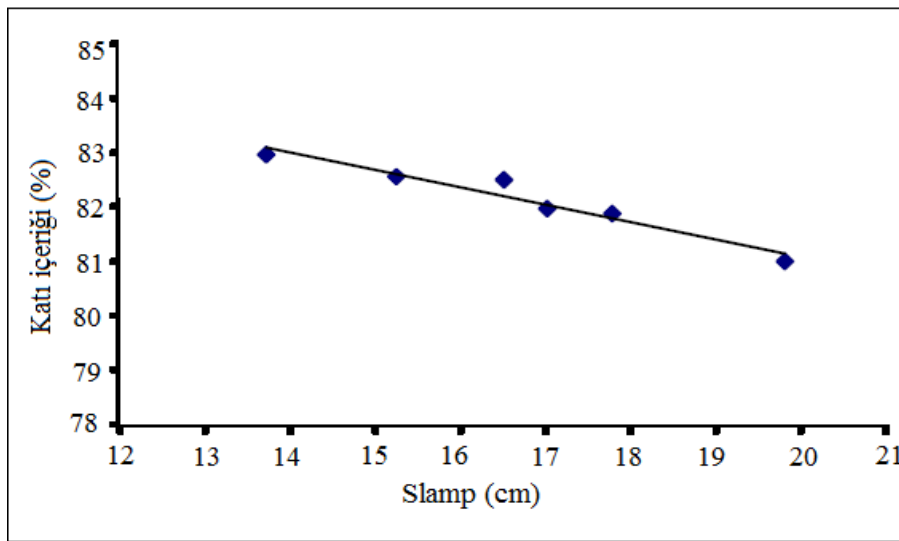
1.3.2. Macun Dolguda Reolojinin Önemi

Reoloji, macun dolgu karışımının yeraltına taşınabilirliği açısından oldukça önemli olup bir malzemenin akışkanlık özelliklerini ifade etmektedir. Reolojik indeks testleri, düşük nem içerikli macun şeklindeki karışımın boru hattı nakliyesi sırasındaki olası sorunları azaltmak için kullanılır (Kesimal vd., 2003). Karışımın yerüstü macun dolgu tesisinde hazırlanıp yeraltı üretim boşluklarına boru hattı ile taşınabilmesi için belirli bir akışkanlığa sahip olması gerekmektedir. Macun dolgu akışkanlığını etkileyen başlıca faktörler; katı oranı, su/çimento oranı, bağlayıcı tipi ve oranı, atık malzemenin tane boyut dağılımı, tane şekli vb.'dir (Clayton vd., 2003; Huynh vd., 2006). 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 13). Macun dolgu için uygun bir slamp değerinin belirlenmesi, boru hattı ile yeraltına nakliyesi esnasında tıkanmaları engelleyerek emniyetli ve verimli bir nakliye işleminin gerçekleştirilmesini sağlamaktadır (Clark vd., 1995).



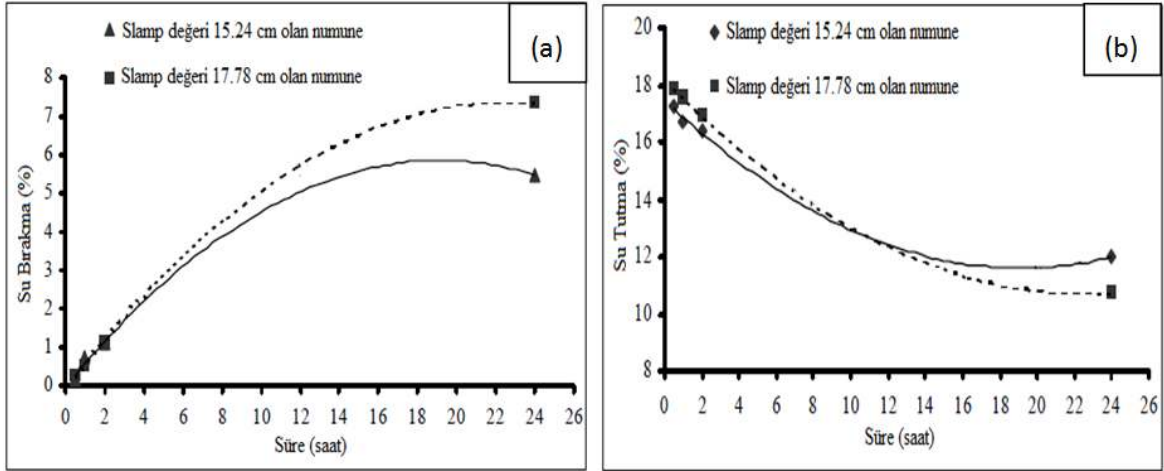
Şekil 13. Slamp ölçümünün gösterimi

Kıvam ölçümünün yanı sıra akma gerilmesi (yield stress) ve viskozite ölçümlerinin de yapılması dolgunun reolojik davranışını anlamada ve taşıma sistemlerinin tasarımında faydalı olacaktır (Moghaddam ve Hassani, 2007). Dolguyu oluşturan malzemenin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliklerine bağlı olarak macun dolgunun kıvamı genellikle 15,24-25,4 inch arasında değişmektedir. Macun dolgu karışımında katı oranı arttıkça slamp değeri düşmektedir (Şekil 14). Katı oranının artması, boru hattında sürtünme ve tıkanmalara neden olarak dolgu nakliyatının performansını düşürmektedir (Huynh vd., 2006).



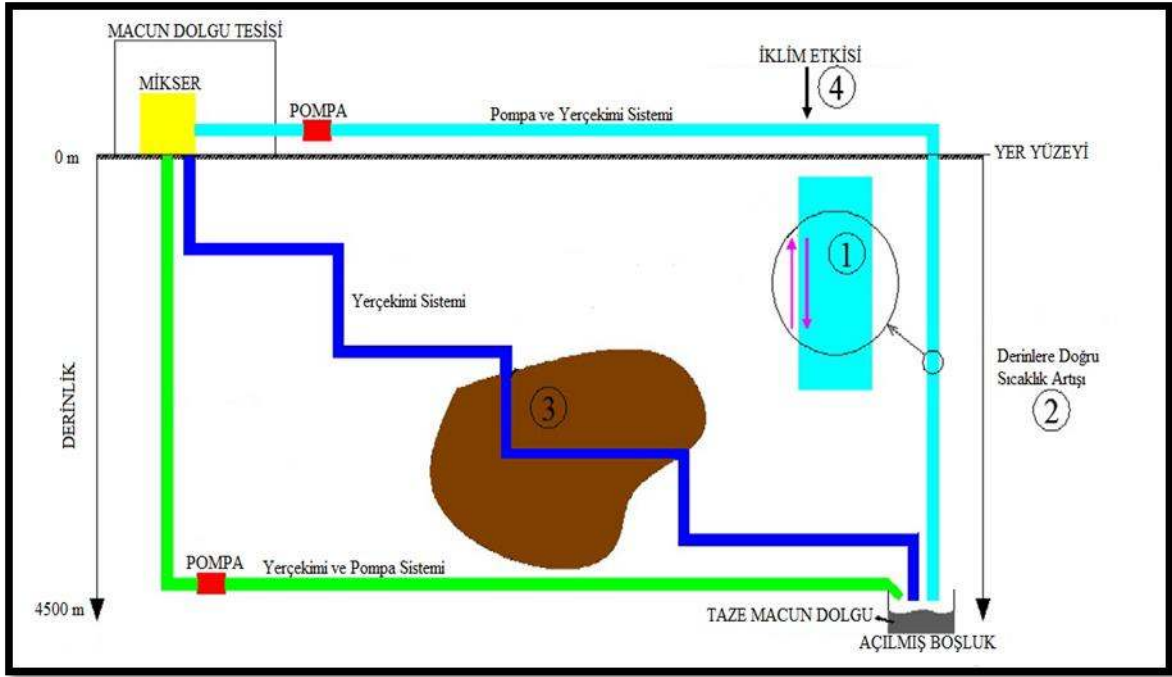
Şekil 14. Macun dolgu karışımı katı içeriğinin slamp değeri ile ilişkisi (Kesimal vd., 2003).

Kesimal vd. (2003) yapmış oldukları çalışmada çimentosuz macun karışımının su bırakma ve su tutma özelliğine sahip olduğunu göstermişlerdir (Şekil 15). Başlangıç saatleri içerisinde hızlı bir su değişimi meydana gelmekte ve 24 saat sonunda su yüzdelerinin sabit kalmakta olduğu görülmektedir (Kesimal vd., 2003).



Şekil 15. Su bırakma (a) ve su tutmanın (b) zamana bağlı grafiği (Kesimal vd., 2003).

Macun dolgu karışımının akışkanlık özelliklerini etkileyen bir diğer etken ise sıcaklıktır. Macun dolguda prizlenme zamana ve sıcaklığa bağlıdır. Sıcaklığın artmasıyla prizlenme hızı artacak ve karışım katılaşmaya başlayacaktır. Bu da dolgunun nakliyesi esnasında sorunlar oluşturabilecektir. Şekil 16'da dolgunun taşınması esnasında ne şekilde sıcaklık değişimi olabileceği gösterilmektedir.

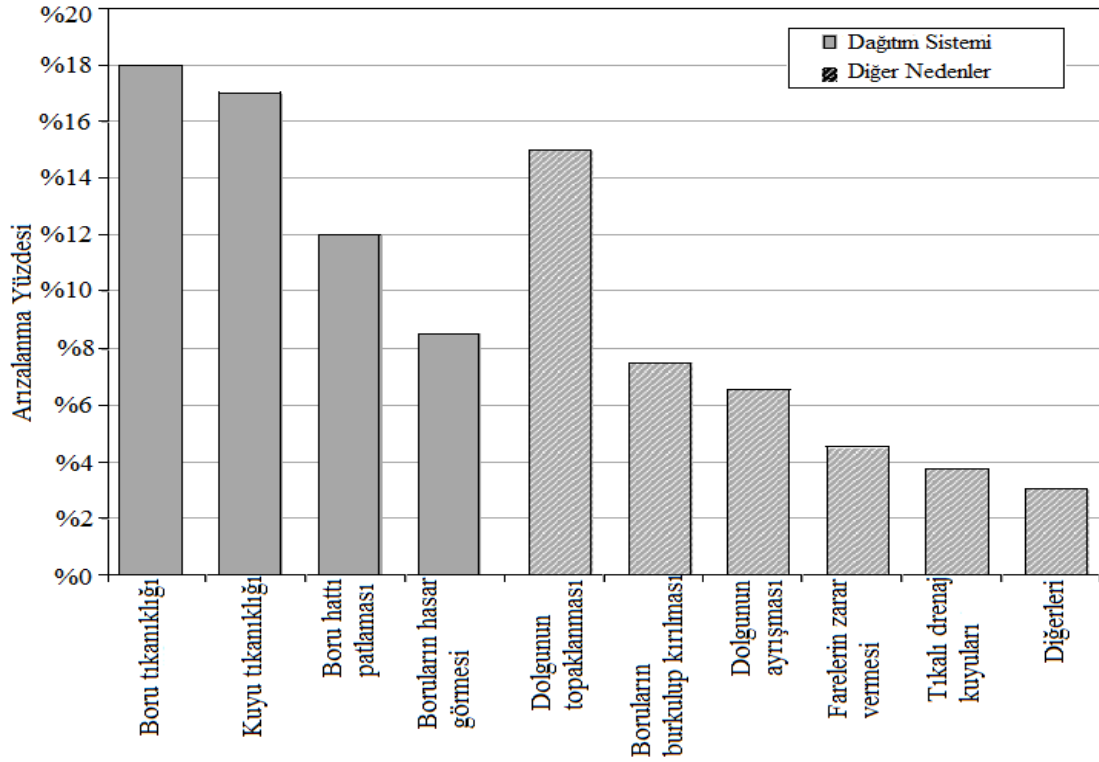


Şekil 16. Dolgu ulaşım sisteminde termal etkileşimin gösterimi (Wu vd., 2013).

Macun dolgu karışımı yeraltı boşluklarına taşınırken boru hattının iç yan çeperi ile sürekli sürtünme halinde olup bu sürtünme sonucunda ısı enerjisi açığa çıkmaktadır (1). Yeraltında açılan boşlukların uzaklığına bağlı olarak taşıma mesafesi uzayacaktır ve sürtünmeyle beraber oluşan sıcaklık daha da artacaktır. Bu artış sadece uzun taşıma mesafesiyle alakalı olmayıp madenin derinlerine inilmesiyle de artacaktır (2). Madenlerde birincil ısı kaynağı kaya kütleleridir. Bu kütleler arasından geçen boru hatları termal etkileşime girerek karışımın sıcaklığını artırır (3). Çevrede açıkta bulunan boru hatları iklim koşullarından (sıcak, soğuk) etkilenmektedirler ve bu da macun dolgu karışımının akışkanlığına yansımaktadır (4) (Wu vd., 2013).

De Souza vd. (2003) yeraltı sistem arızalarına yönelik yapmış oldukları çalışmada, arızaların %55'den fazlasının dağıtım sistemine ilişkin olduğunu raporlamışlardır (Cooke, 2007). Bu arızaların nedenleri detaylı olarak Şekil 17'de verilmiş olup, kısaca aşağıda özetlenmiştir.

- Boru hattı tıkanıklıkları ve kuyu problemleri toplam arızaların %35'ini, dağıtım sistemi arızaları %63'ünü
- Boru patlamaları %12-%22'sini
- Boruların darbe görmesi arızaların %8,5-%15'ini oluşturmaktadır.



Şekil 17. Yeraltı sistem arızalarının nedenleri (De Souza vd., 2003).

Dolgu teknolojisi uzun vadeli bir sistem olduğu için bu aksaklıklar göz ardı edilmemelidir ve dağıtım sistemi daha sıkı kontrol edilerek gerekli önlemler önceden alınmalıdır (Cooke, 2007). Bu arızaların dışında kalan arızalar ise genellikle temel tasarım sorunlarından kaynaklanmaktadır. Bu sorunlar;

- Macun dolgu kıvamının istenilen seviyede olmaması
- Boru sistemleri hakkında sınırlı bilgiye sahip olunmasıdır.

Dolgu dağıtım sisteminin düzenli çalışabilmesi için bazı gereksinimleri vardır. Bunlar aşağıdaki gibidir:

- Sistemin güvenli ve verimli çalışabilmesi için personellerin sürekli kontrol etmesi gerekmektedir.
- Dolgu maden içerisinde farklı noktalara taşınacağı için akış hızı ve tonaj ayarı yeniden ayarlanmalıdır.
- Sistemde herhangi bir tıkanıklık olmamalıdır.
- Aşırı basınç sonucu yıpranmış borular göz ardı edilmemelidir.

En önemlisi etkili bir taşıma yapabilmek için planlama ve boru değişimi düzenli olmalıdır (Cooke, 2007).

1.3.3. Macun Dolguda Asit ve Sülfat Etkisinin Önemi

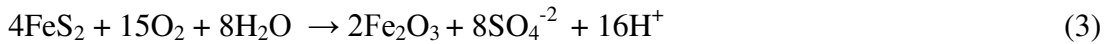
Asit ve sülfat etkisi çimentolu yapılarda hidrasyon ürünlerinin veya çimento bileşenlerinin asit ve sülfatla etkileşimidir. Sülfat etkisinin oluşabilmesi için çeşitli koşulların ortamda bulunması gerekmektedir. Bu koşullar şu şekildedir (Collepardi, 2003; Orejanere ve Fall, 2010);

- Ortamda sülfat bulunmalı (su vb.)
- Karışım geçirgen yapılı olmalı
- Nemli bir ortam olmalı

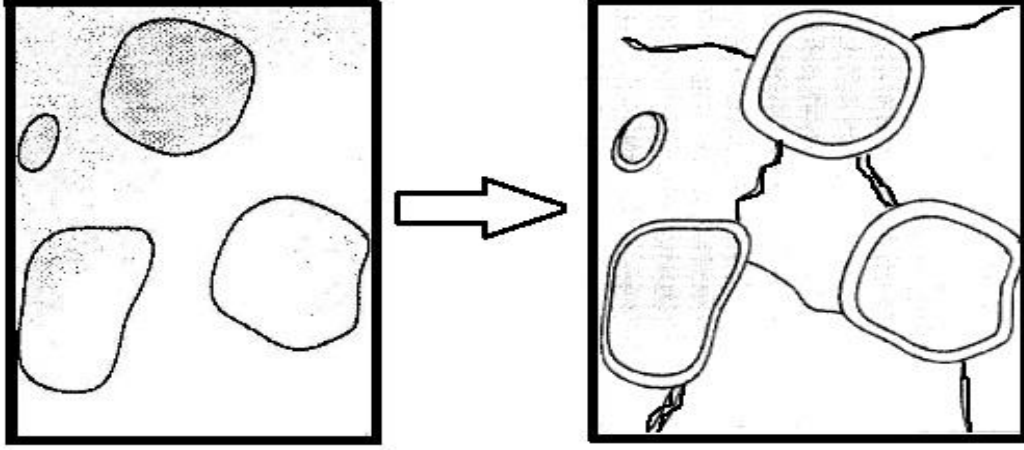
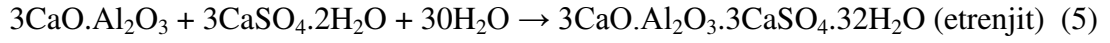
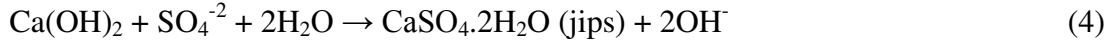
Sülfat etkisi iç kaynaklı ve dış kaynaklı olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Macun dolgu üretiminde kullanılan çimento, atık, su ve katkılardan gelen sülfat iyonlarının karışımın sertleşmesinden sonra uygun ortam şartlarında yeni ürünler oluşturmasıyla gelişen olaya iç kaynaklı sülfat etkisi denilmektedir (Ustabaş, 2008).

Dış kaynaklı sülfat etkisi, setleşmiş macun dolguya dış kaynaklardan gelen sülfat iyonunun çimento hidrasyon ürünleriyle kimyasal olarak reaksiyona girmesi biçiminde tanımlanmaktadır. En yaygın dış sülfat kaynağı yeraltı suyudur. Göl ve nehir suları da dış kaynaklı sülfat atığına sebep olabilecek miktarda sülfat içerebilirler. Endüstriyel atık suları da diğer bir sülfat kaynağıdır.

Macun dolguda sülfatın başlıca kaynağı %2-60 oranında sülfürlü mineral içeren atıklardır. Bu minerallerden en yaygın olanı pirit (FeS₂). Atık malzemenin özellikle sülfürlü mineraller (pirit vb.) içermesi, oksijen ve su varlığında SO₄⁻² iyonlarının oluşmasına ve asit üretimine neden olmaktadır (3). Oluşan bu asit ortamda bağlayıcı olarak görev yapan hidrasyon ürünlerinin (C-S-H, portlandit vb.) bağlayıcılık özelliklerini kaybetmesine neden olmaktadır (Tariq ve Nehdi, 2007).

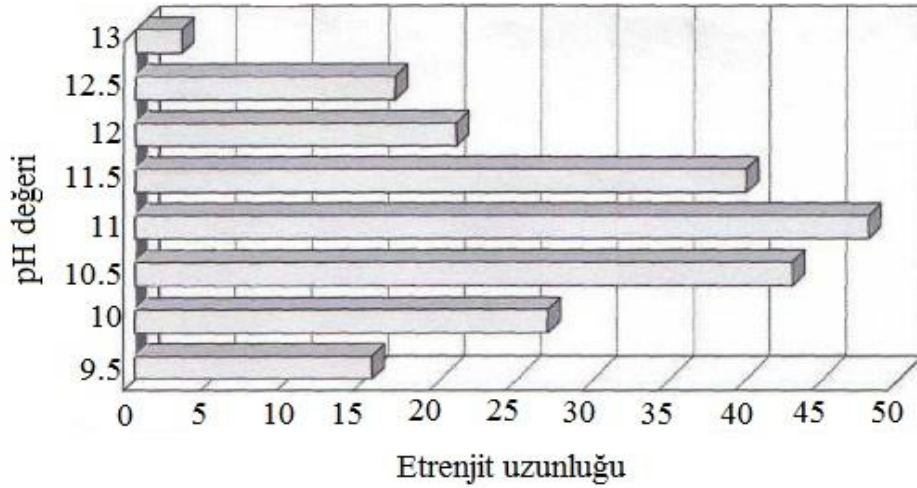


Benzer şekilde piritin bozunması sonucu oluşan sülfat iyonları bağlayıcı hidrasyonu ile oluşan kalsiyum hidroksit [Ca(OH)₂;CH] ve trikalsiyum alüminat [3CaO.Al₂O₃;C₃A] ile reaksiyona girerek jips (CaSO₄.2H₂O) ve etrenjit (3CaO.Al₂O₃.3CaSO₄.32H₂O) oluşmaktadır (Tariq ve Nehdi 2007; Glasser vd., 2008). Jips ve etrenjit dolgu ve beton içerisinde hacim artışı ile 70-200 MPa'lık içsel gerilme oluşturmakta beton ve dolguda çatlamalara neden olmaktadır (Şekil 18).



Şekil 18. Etrenjit oluşumuyla betonda oluşan çatlamlar (Ustabaş, 2008).

Etrenjit boyutu karışımın pH değerine göre değişmektedir. Yapılan çalışmalarda pH değerine göre etrenjit kristallerinin uzunluk değişimi Şekil 19'daki gibi tespit edilmiştir (Stark ve Bollmann, 2002; Ustabaş, 2008).

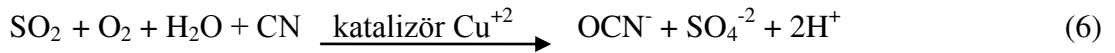


Şekil 19. pH değerine göre etrenjit kristallerinin boy değişimi

Macun dolgudaki sülfatın kaynağı ilk olarak atığın oksitlenmiş yüzeyinden oluştuğu düşünülebilir. Fakat atıklar bağlayıcı ile karıştığı zaman oksijenin iç kısımlara difüzyonu

zorlaşacaktır ve böylece sülfat saldırısı çoğunlukla su iyonları yüzünden olacaktır (Fall ve Benzaazoua, 2005a).

Sülfürik asitler dışında çimentolu macun dolguda sülfat kaynaklarından bir başkası da altın madenciliğinde siyanürün yok edilmesinde kullanılan sülfür dioksitli havadır. Bu işlemde SO_2 , siyanürü daha az zehirli olan siyanata oksitlemek için kullanılır (6) (Akcil, 2003).



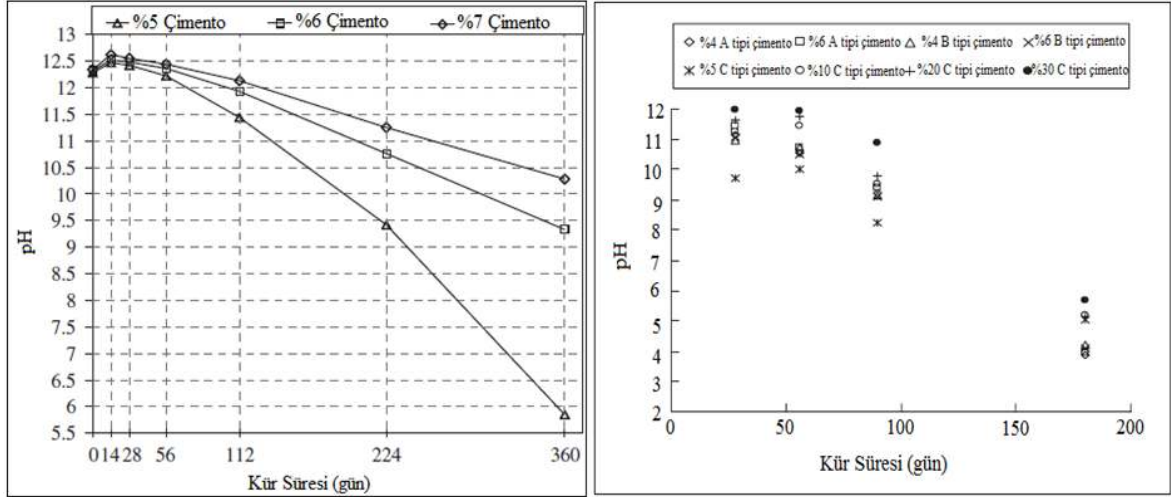
Bir diğer sülfat kaynağı ise, çimentonun ani prizini önlemek amacıyla çimentoya az miktarda ilave edilen alçıtaşıdır (Fall ve Benzaazoua, 2005a; Collepardi, 2003).

Sülfür içeriği arttıkça oksidasyon ürünlerindeki artış ile birlikte dolgu bünyesindeki bozulmalar da artacaktır (Şekil 20). Asit ve sülfatın beton dayanımı ve duraylılığını olumsuz yönde etkilediği belirtilmektedir (Bakharev vd., 2002).



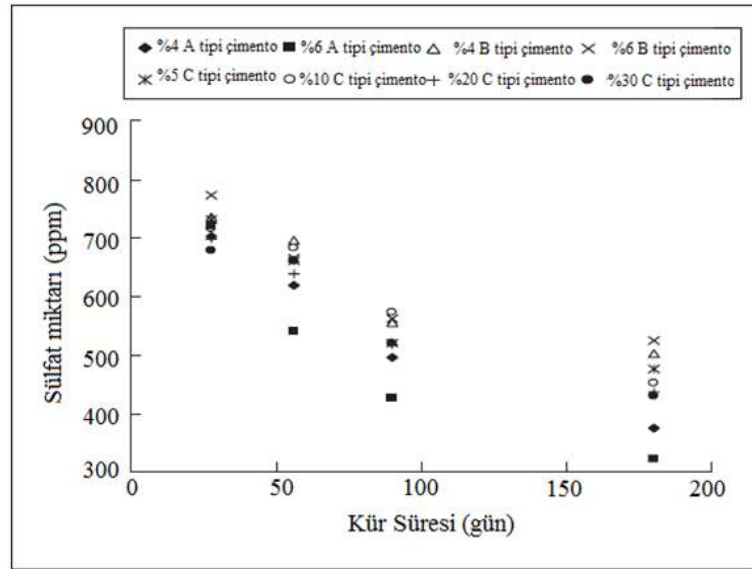
Şekil 20. Macun dolgu örneklerinde sülfürlü minerallerin oksidasyonu (Cihangir vd., 2012).

Araştırmacılar (Tariq ve Nehdi, 2007; Cihangir vd. 2012) yapmış oldukları deneysel çalışmalarda kür süresine bağlı olarak karışımın asit oluşumunu incelemişler ve bağlayıcı oranının artmasıyla asit oluşumunun azaldığını ifade etmişlerdir (Şekil 21).



Şekil 21. pH'nın zamana ve bağlayıcı miktarına göre değişimi (Tariq ve Nehdi, 2007; Cihangir, 2012).

Benzer şekilde Tariq ve Nehdi (2007) yapmış oldukları deneysel çalışmada zamana bağlı olarak macun dolgu karışımının sülfat içeriğini incelemiştir. Kür süresinin artmasıyla beraber sülfat değerinde düşme olduğunu gözlemlemiştir (Şekil 22).



Şekil 22. Macun dolgu karışımında kür süresine bağlı olarak sülfat miktarındaki değişim (Tariq ve Nehdi, 2007).

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Bu tez çalışmasının başlıca amacı;

- (i) 20 mikron altı malzeme miktarının dolgunun mekanik, reolojik ve mikroyapı özelliklerine etkisini incelemek,
- (ii) Farklı atıklardan hazırlanan karışımlar için en uygun bağlayıcı oranını belirlemek ve şlam uzaklaştırmanın dolgunun ekonomik özelliklerine (bağlayıcı tüketiminde azalma) etkisini açıklamak,
- (iii) Atık, bağlayıcı ve karışım suyunun fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri ile ilişkili olarak dolgunun kısa ve uzun dönem performansını etkileyen faktörleri belirlemek,
- (iv) Kür sürelerine bağlı olarak asit ve sülfat konsantrasyonlarını ölçerek şlam uzaklaştırmanın piritin oksidasyonuna etkisini incelemektir.

Yukarıda belirtilen amaçlara ulaşmak için 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, farklı bağlayıcı oranlarında referans ve sınıflandırılmış atıklar kullanarak 14-224 günlük kür süresi aralığında macun dolgunun tek eksenli basınç dayanımı (UCS) incelenmiştir (Tablo 5 ve 6). Kırılan numunelerden alınan örneklerin pH ve SO_4^{2-} içerikleri kür süresine bağlı belirlenmiştir. Ayrıca bazı kür sürelerinde örselenmemiş (kırılmayan örnekler) numunelerin SEM ve MIP analizleri gerçekleştirilmiştir.

Tablo 5. Kısa dönem (14 ve 28 gün) tek eksenli basınç dayanımı test programı

Çimento tipi: CEM II 42,5 R Ünye çimento (192 numune)	Slamp (inç)	Kür Süresi (gün)	Çimento Oranı (%)	Referans Atık -20 µm (%)	Sınıflandırılmış Atık -20 µm (%)
Spek cevher atığı (SP) (96 numune)	7,5"	14, 28	4,5, 5,0, 5,5,	49,66	27,68
Bornit cevher atığı (BN) (96 numune)			6,0, 6,5, 7,0, 7,5, 8,5		

Tablo 6. Uzun dönem (28-224 gün) tek eksenli basınç dayanımı test programı

Çimento tipi: CEM II 42,5 R Ünye çimento (96 numune)	Slamp (inç)	Kür Süresi (gün)	Çimento Oranı (%)	Referans Atık -20 µm (%)	Sınıflandırılmış Atık -20 µm (%)
Spek cevher atığı (SP) (48 numune)	7,5"	28, 56,	4,5, 5,0 6,1	49,66	27,68
Bornit cevher atığı (BN) (48 numune)		112, 224	5,0, 6,7 10,4		

2.2. Atıkların Karakterizasyonu

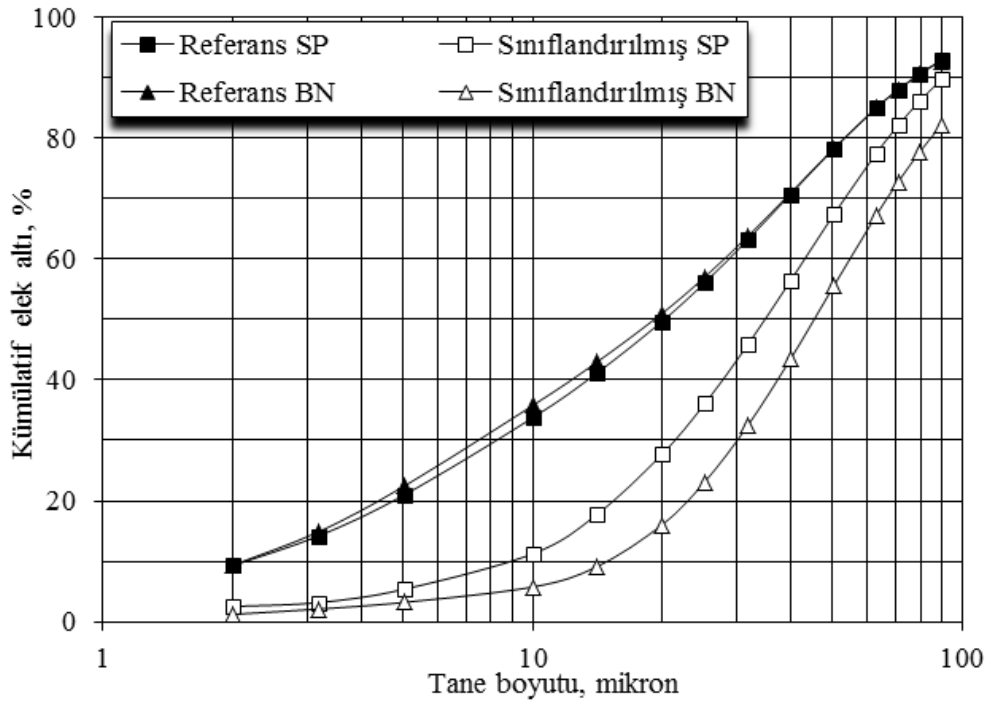
Çalışma kapsamında iki farklı tesis atığı (spek ve bornit, SP ve BN) Çayeli Bakır A.Ş. işletmeleri tarafından temin edilmiştir. Atıkların özellikleri KTÜ (Kaya Mekaniği ve Macun Dolgu Laboratuvarı), Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TCMA) ve ACME (Kanada) laboratuvarlarında belirlenmiştir. Laboratuvar deneylerinden önce atıklar dekantasyona tabi tutularak homojenleştirilmiştir. Atıkların tane boyut dağılımı, özgül ağırlığı, mineralojik bileşimi, kimyasal bileşimi ve reolojik özellikleri belirlenmiştir. Atıklar, Çayeli Bakır İşletmeleri cevher zenginleştirme tesisinde hidrosiklon vasıtasıyla sınıflandırılmıştır.

2.2.1. Tane Boyut Dağılımı

Atıkların tane boyut dağılımları (Şekil 23) Malvern Mastersizer (Version 2.15, Malvern Instruments Ltd, UK) cihazı ile belirlenmiştir. Benzer tane boyut dağılımına sahip SP ve BN atıklarının 20 mikron altı malzeme miktarı sırasıyla ağırlıkça %49,7 ve %51,0'dır. Şlam uzaklaştırma işleminden sonra sınıflandırılmış SP ve BN atıklarının 20 mikron altı ince malzeme miktarı ağırlıkça %27,7 ve %16,0 olmuştur. Referans ve

sınıflandırılmış SP ve BN atıkları bu haliyle Landriault (1995, 2001)'e göre orta ve iri taneli 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 (Annor, 1999). Referans SP ve BN'nin C_u değerleri sırasıyla 13,57 ve 13,33 olarak belirlenmiştir. Sınıflandırılmış SP ve BN'nin C_u değerleri ise 4,72 ve 3,62'dir (Tablo 7). Benzer şekilde, referans SP ve BN'nin C_c değerleri 1,12 ve 0,96 sınıflandırılmış SP ve BN'nin ise 1,22 ve 1,08 olarak belirlenmiştir. Üniformluk ve eğrilik katsayılarına göre sınıflandırma işleminin (şlam uzaklaştırma) atıkların tane boyut dağılımını iyileştirdiği anlaşılmaktadır.



Şekil 23. Deneylerde kullanılan atıkların tane boyut dağılımı

2.2.2. Özgül Ağırlık

Atıkların özgül ağırlığı (SG) piknometre kullanılarak ASTM C 128-97 (2002) standardına göre belirlenmiştir. Referans atıkların özgül ağırlığı 4,09-4,12, sınıflandırılmış atıkların ise 4,16-4,32 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. Özgül yüzey alanı ölçümleri atık içerisindeki ince tane miktarının artmasıyla birlikte yüzey alanının arttığını göstermiştir.

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. Referans ve sınıflandırılmış atıkların sülfür içeriği oldukça yüksektir (%34,7-37,4 S). Sınıflandırma işlemi sonucu ince fraksiyondaki silikat minerallerinin uzaklaşmasıyla atıkların SiO_2 + Al_2O_3 içeriği azalmış ve sülfür içeriği artmıştır (%39,2-42,2 S). Örneğin, atık içerisindeki ince malzeme miktarının azalmasıyla SP ve BN'nin SiO_2 + Al_2O_3 içeriği sırasıyla %17,81 ve %17,97'den %13,34 ve %12,89'a düşmüştür.

Tablo 7. Deneylerde kullanılan atıkların kimyasal ve fiziksel karakterizasyonu

Karakteristik	Spek atık (SP)		Bornit atık (BN)	
	Referans (%)	Sınıflandırılmış (%)	Referans (%)	Sınıflandırılmış (%)
Kimyasal bileşim				
SiO_2	13,96	11,12	13,16	10,43
Al_2O_3	3,85	2,22	4,81	2,46
Fe_2O_3	46,83	49,47	48,41	53,93
MgO	2,31	1,90	1,13	0,91
CaO	2,05	1,58	1,83	1,28
Na_2O	0,22	0,18	0,19	0,18
K_2O	0,14	0,08	0,64	0,23
TiO_2	0,07	0,06	0,08	0,07
P_2O_5	0,02	0,02	0,02	0,02
MnO	0,08	0,07	0,06	0,05
Cr_2O_3	0,011	0,006	0,012	<0,002
BaSO_4	0,84	1,16	2,54	2,02
Kızdırma kaybı (LOI)	27,4	27,6	26,9	28,2
Toplam	97,78	95,47	99,78	99,78
Piritik kükürt (S^{-2})	34,68	39,20	37,40	42,23
Pirit içeriği (FeS_2)	65,03	73,51	70,13	79,19
Fiziksel özellikler				
Özgül ağırlık	4,12	4,16	4,09	4,32
Özgül yüzey alanı (cm^2/g)	3594	2432	3662	1956
Eğrilik katsayısı (C_c)	1,12	1,22	0,96	1,08
Uniformluk katsayısı (C_u)	13,57	4,72	13,33	3,62

2.2.4. Mineralojik Bileşim

X-ışınları difraktometresi (XRD) kullanılarak belirlenen atıkların mineralojik bileşimi Tablo 8 ve Ek 1, 2, 3 ve 4’te verilmiştir. Atıklar içerisindeki baskın (major) mineral pirit mineralidir (%65,0-79,2). Referans ve sınıflandırılmış atıklar içerisinde ayrıca kuvars, kalsit, albit, dolomit ve illit mineralleri bulunmaktadır (Tablo 8).

Bilindiği üzere pirit minerali su ve oksijen varlığında oksidasyona uğrayarak asit ve sülfat oluşturmaktadır. Oksidasyon ürünleri portlandit gibi hidrasyon ürünleriyle reaksiyona girerek genleşme özelliğine sahip jips ve etrenjit minerali oluşumuna ve dolgunun yapısal bütünlüğünün bozulmasına neden olmaktadır (Kesimal vd., 2005; Tariq ve Nehdi, 2007; Erçikdi 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’nın 9’un altına düşmesi hidrasyon ürünlerinin bağlayıcılık özelliklerini yitirmesine ve dolgunun duraylılığını kaybetmesine yol açmaktadır (Erçikdi vd., 2010a,b; Cihangir vd., 2012).

Tablo 8. Deneylerde kullanılan atıkların mineralojik bileşimi

Atık	Mineral	Bileşim
Spek atık (SP)	Referans	Pirit Kuvars Barit Albit Dolomit Kaolinit Kalsit
	Sınıflandırılmış	Pirit Kuvars Barit Albit Dolomit Kaolinit Kalsit Ferroaktinolit

Tablo 8'in devamı

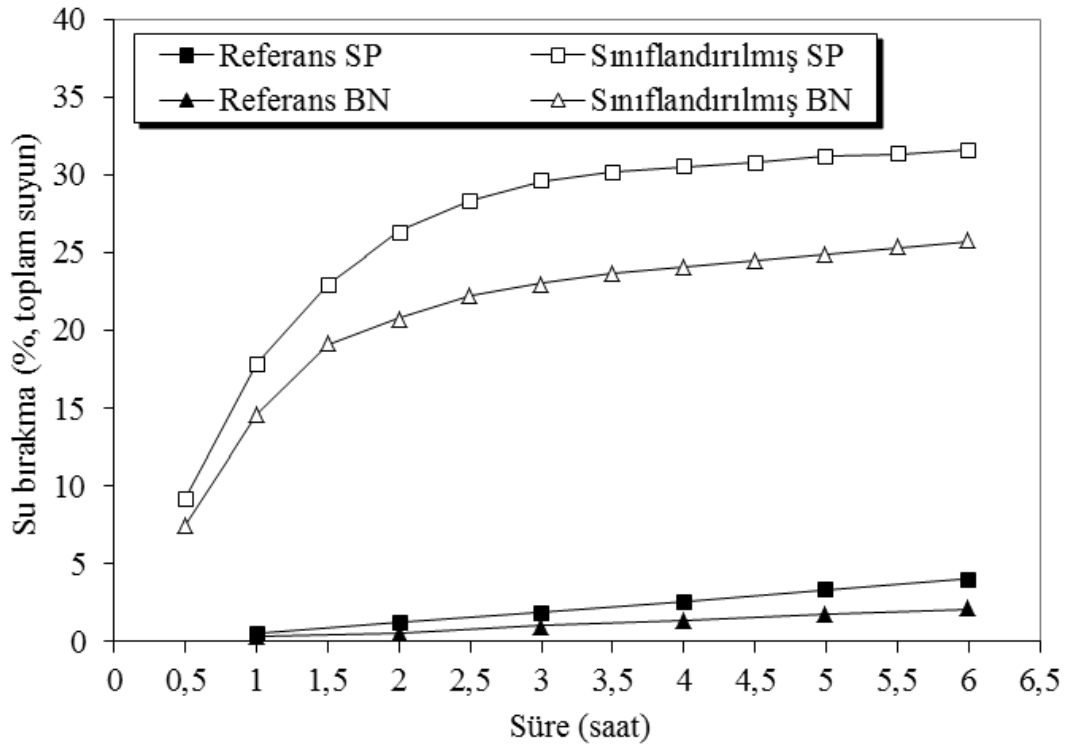
Atık	Mineral	Bileşim
Bornit atık (BN)	Referans	Pirit Kuvars Barit Albit Dolomit Kaolinit Kalsit İllit $(K,H_3O)Al_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$
	Sınıflandırılmış	Pirit Kuvars Barit Albit Dolomit Kaolinit Kalsit İllit Ferroaktinolit $(K,H_3O)Al_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$ $[(Ca,Na,K)_2Fe_5Si_8O_{22}(OH)_2]$

2.3. Çimentosuz 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 koloidal ve su tutmayı sağlayacak 20 µm altı ağırlıkça en az %15 malzeme olması gerekmektedir. İndeks testleri çimentosuz malzemenin kolloidal 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 24 ve Tablo 9-10'de verilmiştir. Sınıflandırılmış atıkların (şlamı uzaklaştırılmış) istenen akışkanlığı daha yüksek katı oranında elde ettiği açıkça anlaşılmaktadır.

Reolojik indeks testleri referans atıkların su tutma kapasitelerinin sınıflandırılmış atıklara kıyasla 6,77-12,15 kat daha yüksek olduğunu göstermiştir. Sınıflandırılmış atıklar daha fazla oturma özelliği göstermiştir (Şekil 25). Araştırmacılar (Fall vd., 2004; Erçikdi vd., 2008) iri taneli atıklardan hazırlanan macun dolgu karışımlarının ince ve orta taneli atıklardan hazırlanan karışımlara kıyasla drenaj yoluyla daha fazla su bıraktığını

belirtmişlerdir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar Fall vd. (2004) ile uyumludur. Elde edilen sonuçlar atıkların su tutma kapasitelerindeki farklılığı da ortaya koymuştur. Örneğin, aynı akışkanlıkta (7,5 inç slamp) sınıflandırılmış BN (-20 μ m, ağırlıkça %16,01) atığının drenaj kapasitesi sınıflandırılmış SP (-20 μ m, ağırlıkça %27,68) atığına kıyasla daha düşüktür. Bu durum sadece tane boyut dağılımının değil aynı zamanda mineralojinin de atıkların drenaj özelliklerinde etkili olduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 24. Spek (SP) ve bornit (BN) atıklarından zamana bağlı su ayrılması

Tablo 9. Çimentosuz SP atıklarının reolojik indeks testleri

Macun dolgu tipi	Süre aralığı (saat)	Katı oranı (%)	Ayrılan su miktarı (gr)	Su bırakma, % (toplam suyun)
Sınıflandırılmış spek (SP) (7,5" slamp)	0,5	82,31	71,20	9,23
	1,0	82,31	137,66	17,85
	1,5	82,31	176,92	22,94
	2,0	82,31	203,4	26,37
	2,5	82,31	218,46	28,32
	3,0	82,31	228,18	29,58
	3,5	82,31	232,92	30,20
	4,0	82,31	235,26	30,50
	4,5	82,31	237,9	30,84
	5,0	82,31	239,68	31,19
	5,5	82,31	241,54	31,31
	6,0	82,31	243,86	31,62

Tablo 9'un devamı

Macun dolgu tipi	Süre aralığı (saat)	Katı oranı (%)	Ayrılan su miktarı (gr)	Su bırakma, % (toplam suyun)
Referans spek (SP) (7,5" slamp)	1,0	80,80	4,34	0,54
	2,0	80,80	10,13	1,25
	3,0	80,80	15,40	1,90
	4,0	80,80	20,92	2,58
	5,0	80,80	26,98	3,33
	6,0	80,80	32,91	4,06

Tablo 10. Çimentosuz BN atıklarının reolojik indeks testleri

Macun dolgu tipi	Süre aralığı (saat)	Katı oranı (%)	Ayrılan su miktarı (gr)	Su bırakma, % (toplam suyun)
Sınıflandırılmış bornit (BN) (7,5" slamp)	0,5	81,75	60,42	7,51
	1,0	81,75	117,52	14,60
	1,5	81,75	153,74	19,11
	2,0	81,75	167,35	20,80
	2,5	81,75	178,99	22,25
	3,0	81,75	185,16	23,02
	3,5	81,75	190,21	23,64
	4,0	81,75	193,74	24,08
	4,5	81,75	196,98	24,49
	5,0	81,75	200,42	24,91
	5,5	81,75	203,81	25,33
	6,0	81,75	207,15	25,75
Referans bornit (BN) (7,5" slamp)	1,0	77,10	2,87	0,32
	2,0	77,10	5,39	0,60
	3,0	77,10	9,11	1,01
	4,0	77,10	12,51	1,39
	5,0	77,10	15,82	1,76
	6,0	77,10	19,09	2,12



Şekil 25. Referans ve sınıflandırılmış atıkların oturma karakteristikleri

2.4. Bağlayıcı

Dolguya yaygın olarak normal Portland çimentosu ve diğer çimentolu malzemeler ilave edilmektedir. Bu tez çalışmasında, atık tane boyutunun macun dolgu performansına etkisini araştırmak amacıyla Çayeli Bakır İşletmeleri macun dolgu tesisinde de kullanılan ve Ünye Çimento'dan temin edilen Portland kompoze çimento (CEM II 42.5 R) kullanılmıştır. Çayeli Bakır İşletmeleri'nde dolguda kullanılan bağlayıcı oranı, dolgunun yeraltındaki konumuna bağlı olarak %5-9 oranında değiştiğinden, sınıflandırmanın etkisini incelemek amacıyla deneyler %4,5-8,5 çimento aralığında gerçekleştirilmiştir. Kullanılan çimentonun kimyasal bileşimi Tablo 11'de verilmiştir. CEM II 42,5 tipi çimento dayanım ve duraylılığı artırmak ve bağlayıcı maliyetlerini azaltmak için doğal ve yapay puzolanik malzeme içermektedir.

Tablo 11. Deneysel çalışmalarda kullanılan bağlayıcının kimyasal bileşimi

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Cr ₂ O ₃	Kızdırma kaybı	Toplam
25,78	7,45	3,96	56,11	1,12	0,62	1,62	0,22	0,11	0,08	0,004	2,8	99,90

2.5. Numunelerin Hazırlanması ve Dayanım Testi

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 10,16 cm çapında ve 20,32 cm yüksekliğinde plastik silindir numune kapları kullanılmıştır (Şekil 26). Karışım içerisindeki fazla suyun drene olması için silindir kapların tabanında 7 adet 2 mm çapında delikler mevcuttur. Yeraltı koşullarında dolgu yerleştirme hızının yüksek ve/veya yan kayanın çatlak içermediği durumda drenaj koşullarının oluşmayacağı/zayıf olacağı göz önüne alınmalıdır. Referans ve sınıflandırılmış BN ve SP atıklarının SO₄⁻² konsantrasyonu 3154-3660 ve 2450-2960 mg/l'dir. Karışım sularının SO₄⁻² konsantrasyonları göz önüne alındığında, DIN 4030'a (2001) göre beton ve dolgu stabilitesi açısından etki derecesi

yüksek "agresif" ve "çok agresif" su sınıfına girdiği görülmektedir. Sınıflandırma işleminin macun dolgunun kısa dönem (14 ve 28 gün) dayanımına etkisi %4,5-8,5 bağlayıcı oranında incelenmiştir. Uzun dönem (56, 112 ve 224 gün kür süresi) performansı ise %5 çimento oranında ve 28 günde $\geq 1,0$ MPa dayanımı veren bağlayıcı oranlarında gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan macun dolgu karışımı 10x20 cm boyutundaki drenajlı silindir numune kabına dökülmüş ağzı plastik poşetle kapatıldıktan sonra 14-224 günlük kür süresi aralığında kür odasında bekletilmiştir (%80 nem ve 25°C).

Çimentolu macun dolgu numuneleri önceden belirlenen kür süreleri sonunda yük kapasitesi 50 kN ve yer değiştirme hızı 0,5 mm/dk olan bilgisayar kontrollü preste (ELE Digital Tritest) ASTM C 39'a (2002) göre tek eksenli basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. Sonuçlar kısmında her bir kür süresi için 3 adet numunenin ortalama dayanım sonucu verilmiştir. Bu tez çalışmasında kriter olarak, 28 günde en az $\geq 1,0$ MPa dayanım kazanımı ve 224 gün süresince bu dayanımını koruması baz alınmıştır.



Şekil 26. Macun dolgu numunelerinin hazırlanması ve testi: karıştırma (a), döküm işlemi (b), kür alma (c) ve dayanım testi (d)

2.6. pH ve Sülfat (SO_4^{-2}) Analizleri

Uzun dönem (28, 56, 112 ve 224 günlük) test numunelerinin dayanım testinden sonra alınan örnekler rendelenerek boyutu -2,36 mm'ye indirilmiştir. Hava ile teması kesilen numunelerin nem içerikleri Sartorius MA35 cihazında belirlenmiştir. Beher içindeki 500 gr katı malzemeye katı/sıvı oranı 1:1 olacak şekilde saf su ilave edilmiş, 5 dk el mikseri ile karıştırılmış ve 1 saat süreyle ağzı kapalı şekilde beklemeye bırakılmıştır. 1 saatlik süre sonunda filtrasyon yöntemiyle elde edilen sıvının pH'ı ve SO_4^{-2} konsantrasyonu pH metre ve Palintest ile ölçülmüştür.

2.7. Mikroyapı Analizleri

Mikroyapı değerlendirmesi SEM (taramalı elektron mikroskobu) ve MIP (civalı porozimetre) analizleri ile uzun dönemli testlere yönelik gerçekleştirilmiştir. Aynı özelliklere sahip karışımdan küçük numuneler hazırlanmış ve kür odasında ayrı olarak bekletilmiştir. Yük altında mikroyapı özelliklerin değişmesi söz konusu olduğundan bu numuneler dayanım testine tabi tutulmamıştır.

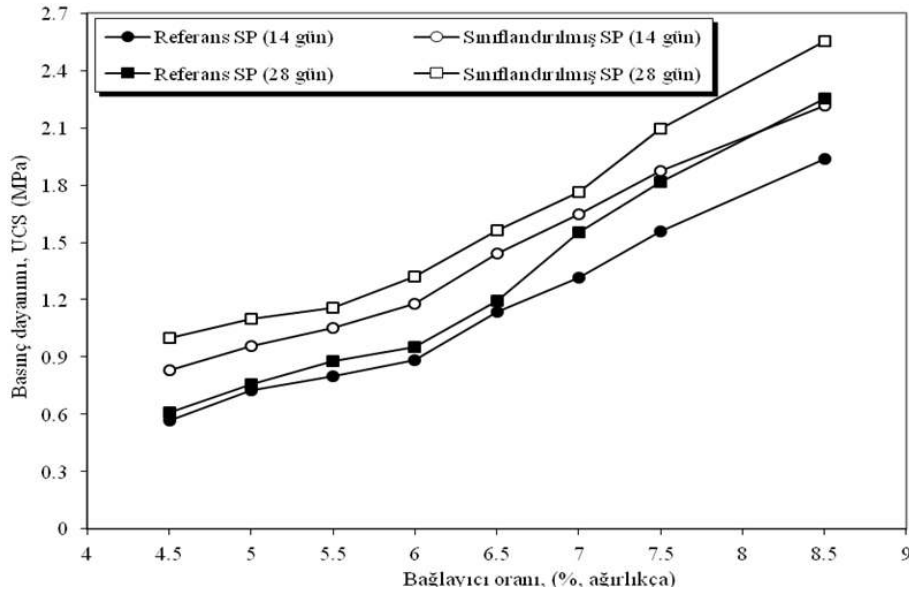
SEM analizleri Metalurji Mühendisliği Bölümü'nde ZEISS-EVO MA-LS SERIES LEO 1550 model taramalı elektron mikroskobu cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Örnekler öncelikle 50 C° sıcaklıkta kurutulmuş, düzgün yüzeyli örneklerin parlatılmasından sonra altın film ile kaplanarak farklı büyütme değerlerinde fotoğraflanmıştır.

Toplam porozite ölçümü 28 ve 224 günlük numuneler üzerinde civalı porozimetre cihazı ile 0-414 MPa basınç aralığında ASTM D 4404 (2002)'ye göre gerçekleştirilmiştir. Analizler Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkezi laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Sınıflandırmanın Dolgunun Kısa Dönem Dayanımına Etkisi

Şekil 27-28 farklı bağlayıcı oranlarında referans ve sınıflandırılmış SP ve BN atıkları kullanılarak hazırlanan macun dolgu numunelerinin 14 ve 28 günlük dayanım sonuçlarını göstermektedir. Bağlayıcı oranının artmasıyla birlikte (%4,5'ten 8,5'e) numunelerin dayanımı lineer olarak artmıştır. Benzer şekilde, şlamı uzaklaştırılmış SP ve BN atıklarından üretilen numunelerin tamamı, referans atıklara kıyasla 14 ve 28 günlük kür sürelerinde daha yüksek dayanım üretmişlerdir (Şekil 27-28). Örneğin, BN atıklarından hazırlanan numunelerin dayanımı şlam uzaklaştırma işleminden sonra neredeyse 2 katına çıkmıştır (Şekil 28).

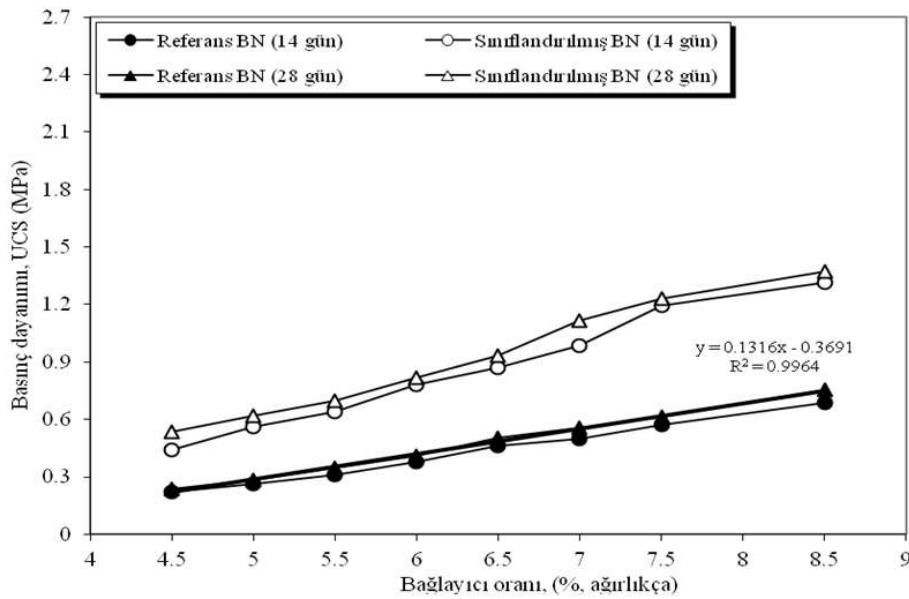


Şekil 27. Referans ve sınıflandırılmış SP atıklarından hazırlanan numunelerin kısa dönem dayanımı

Dayanım kazanım karakteristikleri benzer olmasına karşın SP atıklarından üretilen numuneler BN atıklarına kıyasla 1,6-3,0 kat daha yüksek dayanım vermiştir (Şekil 27-28).

Şekil 27 ayrıca sınıflandırılmış ve referans SP atığından üretilen macun dolgu numunelerinin 28 günde istenen $\geq 1,0$ MPa dayanımı, sırasıyla %4,5 ve %6,1 çimento oranında sağladıklarını ortaya koymaktadır. Sınıflandırılmış BN atıklarının, istenen

mekanik performansı (28 günde $\geq 1,0$ MPa) daha yüksek bağlayıcı oranında (%6,5) sağladıkları görülmektedir (Şekil 28). Referans BN atığından üretilen macun dolgu numuneleri ise en yüksek bağlayıcı oranında (%8,5) bile 28 günde istenen mekanik dayanımı vermemiştir. Dayanım grafiğinden elde edilen lineer eğilim çizgisinden, referans BN atığından üretilen macun dolgu numunelerinin $\geq 1,0$ MPa dayanım üretmesi için oldukça yüksek ($\geq$ ağırlıkça %10,4) bağlayıcı oranında hazırlanması gerektiği anlaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar macun dolgu açısından atıkların doğal karakteristiğinin önemini ortaya koymaktadır.



Şekil 28. Referans ve sınıflandırılmış BN atıklarından hazırlanan numunelerin kısa dönem dayanımı

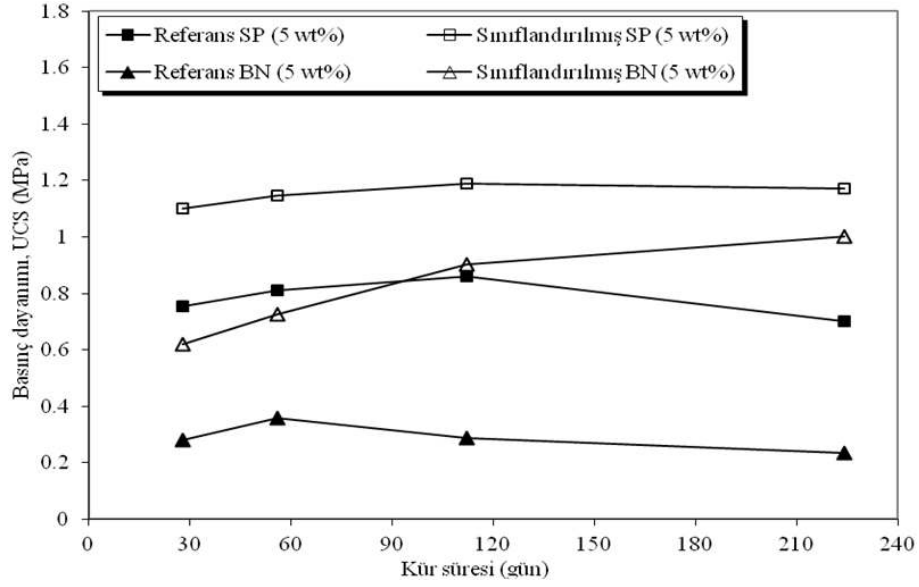
Kesimal vd (2003) iki farklı sınıflandırılmış atık kullanarak 20 μ m altı malzeme miktarının dolgu dayanımına etkisini incelemiştir. Araştırmacılar sınıflandırılmış atıkların en yüksek dayanımı 20 μ m altı malzeme miktarının ağırlıkça %25 olduğu durumda verdiğini belirtmişlerdir. Benzer olarak Fall vd (2005) 20 μ m altı malzeme miktarının dolgu dayanımına etkisini altın atığı ve farklı bağlayıcılar kullanarak 56 günlük kür süresi boyunca araştırmıştır. Numunelerin en yüksek dayanımı 20 μ m 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 BN atığı kullanılarak hazırlanan numunelerin nispeten düşük dayanım üretmesi düşük miktarda

(ağırlıkça %16,1) ince taneli malzeme içermesinden kaynaklanabilir. Sınıflandırılmış SP atığı ise ağırlıkça %27,7 oranında ince taneli malzeme içermektedir. Sınıflandırmanın (şlam uzaklaştırma) dayanım kazanımına olumlu etkisi su bırakma kapasitesindeki artış (çimento/su oranında artış vb.) ve tane boyut dağılımındaki iyileşme ile ilişkilendirilebilir. Benzaazoua vd. (2004) fazla suyun drene olmasının çimento hidrasyonunu artırdığını belirtmiştir. Bu çalışmada da, atıkların su bırakma kapasiteleri (Şekil 24) ile dayanım kazanımları (Şekil 27-28) arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu anlaşılmıştır.

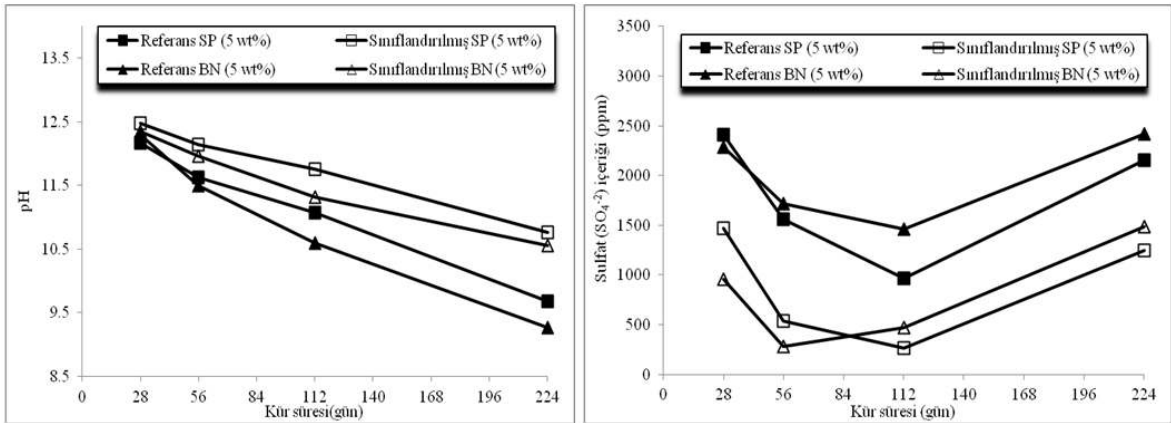
3.2. Sınıflandırmanın Dolgunun Uzun Dönem Dayanımına Etkisi

Şekil 29 referans ve sınıflandırılmış atıklar kullanılarak %5 çimento oranında hazırlanan macun dolgu numunelerinin 224 günlük kür süresi sonundaki dayanım sonuçlarını göstermektedir. Numunelerin uzun dönem dayanım kazanım karakteristiği kısa dönem ile benzerlik arz etmektedir (Şekil 27-28). Sınıflandırılmış SP ve BN atıklarından hazırlanan macun dolgu numuneleri referans atıklara kıyasla uzun dönemde sırasıyla 1,4-1,7 ve 2,0-4,3 kat daha yüksek dayanım üretmiştir. Şlam uzaklaştırma işlemi sonrası SP ve BN atıkların pirit içeriği %65 ve %73,5 ten %70,1 ve %79,2'ye çıkmasına rağmen, sınıflandırılmış atıklardan üretilen numuneler uzun dönemde dayanım kaybetmemişlerdir. Ancak, referans atıklardan üretilen numunelerde 56 günden sonra dayanım kaybı görülmüştür (Şekil 29).

Piritin su ve havaya maruz kaldığı kür koşullarında oksidasyona uğradığı ve asit ve sülfat ürettiği bilinen bir gerçektir. Oksidasyon sonucu oluşan asit ve sülfat, hidrasyon ürünleriyle reaksiyona girerek genleşme özelliğine sahip alçıtaşı ve etrenjit oluşumuna ve C-S-H yapısının bozunmasına neden olmaktadır (Tariq ve Nehdi, 2007; Erçikdi vd. 2009a,b; Cihangir, 2011). Macun dolgu numunelerinde 56-112 günlük kür sonrası oluşan dayanım kayıpları (Şekil 29), asit ve sülfat analizleri ile de kanıtlanan piritin oksidasyonu (asit ve sülfat etkisi) ile ilişkilendirilebilir (Şekil 30). Sınıflandırılmış atıklardan hazırlanan numunelerde asit ve sülfat oluşumu, referans atıklara kıyasla belirgin bir şekilde daha düşüktür (Şekil 30). Sınıflandırma (şlam uzaklaştırma) işleminin faydalı etkisi, atık tane boyut dağılımının iyileşmesiyle permeabilite, porozite ve çevredeki su ve hava ile reaksiyona girecek atık özgül yüzey alanı azalmaktadır (Tablo 7).



Şekil 29. Referans ve sınıflandırılmış SP atıklarından %5 çimento oranında hazırlanan numunelerin uzun dönem dayanımı

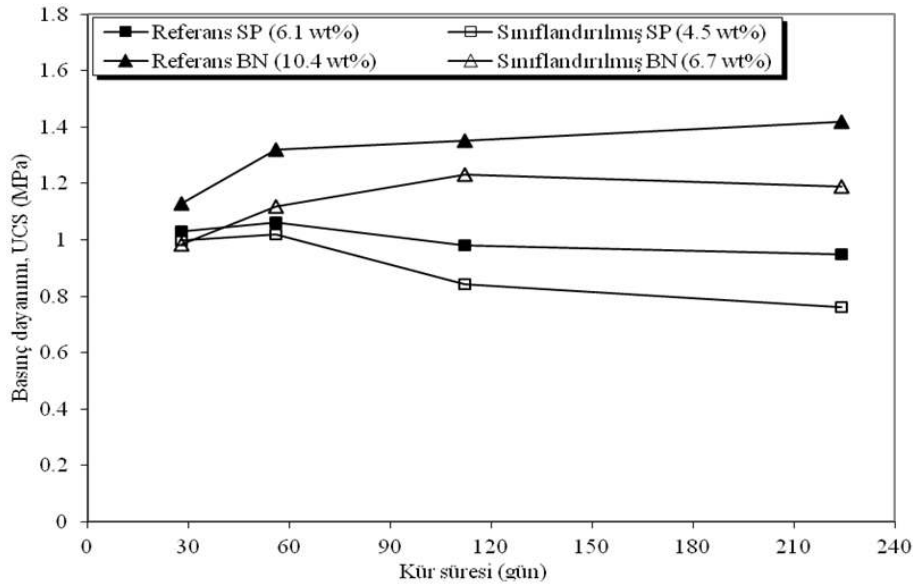


Şekil 30. Referans ve sınıflandırılmış atıklardan %5 çimento oranında hazırlanan numunelerin kür süresine bağlı pH ve SO_4^{2-} konsantrasyonu

28 günde $\geq 1,0$ MPa dayanım üreten atıklardan (SP ve BN) hazırlanan macun dolgu numunelerinin uzun dönem duraylılık performansları Şekil 31’de verilmiştir. Sınıflandırılmış SP atıkları kullanılarak %4,5 çimento oranında hazırlanan ve 28 günde $\geq 1,0$ MPa dayanım veren numunelerde 56 günden sonra dayanım kaybı (%25 oranında) gözlenmiştir. Buna karşın, referans SP atıklarından hazırlanan numunelerde dayanım kaybı daha azdır (%10,3). Fall vd. (2004) piritik kükürt içeriği farklı (%2-39 S^{2-}) atıklardan hazırlanan macun dolgu numunelerinin dayanım ve duraylılık performanslarını karşılaştırmıştır. Araştırmacılar yüksek sülfür içeriğine sahip numunelerde 120 günden

sonra dayanım kaybı görülmesine karşın, düşük sülfür ($\%2-18 \text{ S}^{-2}$) içeriğine sahip atıklardan hazırlanan numunelerde dayanım kaybının oluşmadığını belirtmişlerdir. Ayrıca yapılan oksijen tüketim testleri, 28 günden sonra sülfür içeriğinin artmasıyla ($\%39 \text{ S}^{-2}$) birlikte reaktivitenin arttığını belirtmişlerdir.

SP atıklarından hazırlanan numunelerin aksine, referans ve sınıflandırılmış BN atığı kullanılarak $\%10,4$ ve $\%6,7$ çimento oranında hazırlanan numuneler, hem yüksek dayanım üretmişler hem de 224 gün kür süresi boyunca dayanım kaybına uğramamışlardır. Bunun başlıca nedeni, SP atıklarına kıyasla bağlayıcı oranının BN atığından hazırlanan numunelerde daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır (Tablo 12). Sülfür içeriği yüksek atıklardan hazırlanan macun dolgu numunelerinin asit ve sülfat etkisine karşı dayanıklılığı bağlayıcı oranının artmasıyla birlikte artış göstermiştir (Erçikdi vd., 2009b).

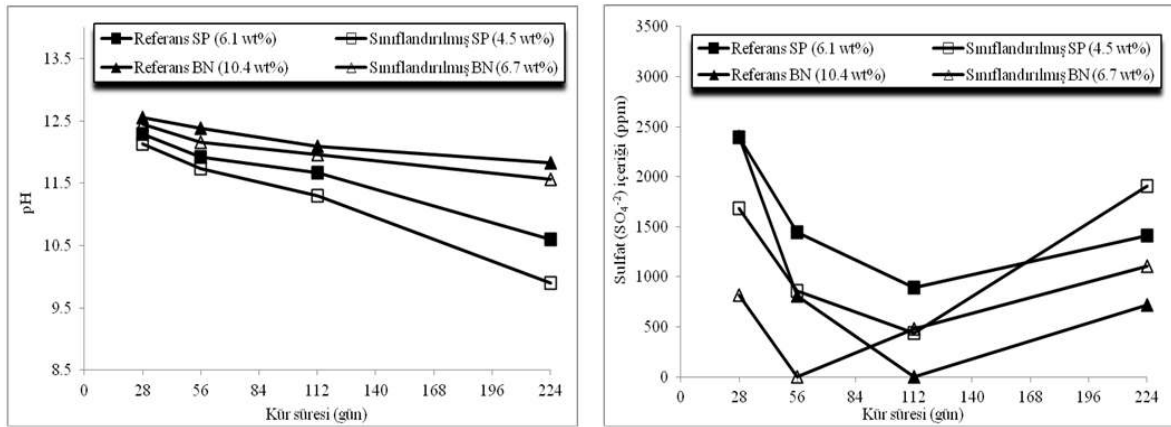


Şekil 31. 28 günde $\geq 1,0$ MPa dayanım veren numunelerin uzun dönem performansı

Tablo 12. İstenen dayanım ve duraylılığı sağlayan 1 m^3 CPB karışımı için gerekli bağlayıcı miktarları

Karakteristik	SP atığı		BN atığı	
	Referans	Sınıflandırılmış	Referans	Sınıflandırılmış
Katı oranı (%)	80,8	82,31	77,1	81,75
Slamp (cm)	19,05	19,05	19,05	19,05
Yoğunluk (ton/m^3)	2,55	2,64	2,35	2,65
Bağlayıcı oranı, kg (%)	125,42 (6,1)	108,64 (5)	188,55 (10,4)	144,94 (6,7)
Bağlayıcı tüketiminde azalma (%)	13,38		23,13	

Cihangir vd. (2012) farklı bağlayıcı oranlarında (%5-7) hazırlanan macun dolgu numunelerinde kür süresine bağlı asit oluşumunu (pH’da azalma) incelemiş ve bağlayıcı oranının artmasıyla asit oluşumunun azaldığını ifade etmiştir. Bağlayıcı oranının artması, ortamda bağlayıcı özelliğe sahip hidratasyon ürünlerini (CH ve C-S-H) ve dolgunun asit etkisine karşı buffer kapasitesini artırarak fayda sağlamaktadır. Ayrıca, bağlayıcı oranındaki artış çimento hidratasyon ürünleri ile kaplı atık yüzey alanının artmasına ve dolayısıyla oksidasyon riskinin azalmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada da kür süresine bağlı asit ve sülfat oluşumu Cihangir vd. (2012) ile aynı sonuçları vermiştir (Şekil 32). Şekil 32 incelendiğinde, BN atığından hazırlanan macun dolgu numunelerinin pH’ı $\geq 11,5$ ’in üzerinde, SP atıklarından hazırlanan numunelerin ise pH’ı $\leq 10,6$ ’nın altında olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlarda SP atıklarından hazırlanan macun dolguda istenen dayanım ve duraylılık için bağlayıcı oranının arttırılması gerektiği anlaşılmaktadır. Ancak, bağlayıcı oranındaki artış macun dolgu işletme maliyetlerini olumsuz yönde etkileyecektir.



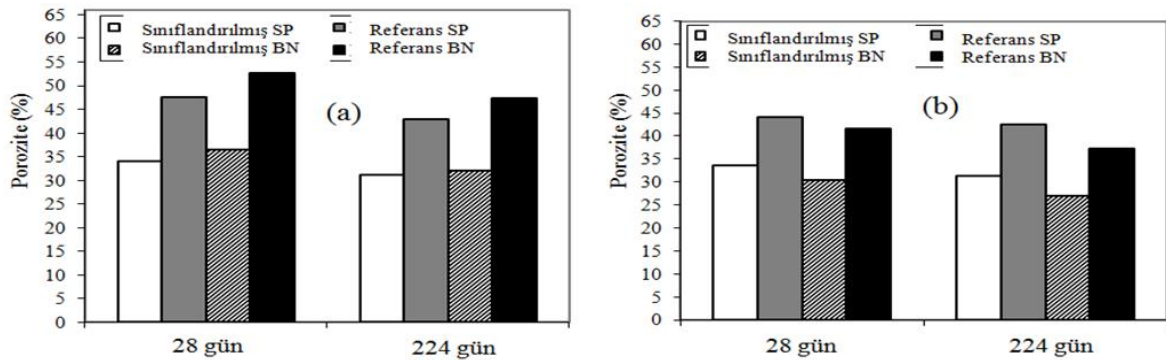
Şekil 32. 28 günde $\geq 1,0$ MPa dayanım veren numunelerin kür süresine bağlı pH ve SO_4^{2-} konsantrasyonu

Erçıkıdı (2009) farklı bağlayıcı tipi, mineral (puzolanik özelliğe sahip) ve kimyasal katkı (akışkanlaştırıcı) maddeleri kullanarak % 5 çimento oranında SP atıklarından (% 26 S^{2-}) hazırlanan macun dolgu numunelerinin düşük dayanım (28 ve 360 günde $< 1,0$ MPa) ve duraylılık (dayanım kaybı) verdiğini belirtmiştir. İşletme maliyetlerini artırmasına rağmen istenen dayanım ve duraylılık için bağlayıcı oranının %7’nin üzerine çıkartılması gerektiğini belirtmiştir (Erçıkıdı, 2009). Bu anlamda, sınıflandırma (şlam uzaklaştırma) işleminin bağlayıcı tüketimine etkisini değerlendirmek amacıyla 28 günde $\geq 1,0$ MPa

dayanım kazanımı ve uzun dönem duraylılığı sağlayan 1 m³ macun dolgu karışımı (referans ve sınıflandırılmış SP ve BN atıklarından hazırlanan) için gerekli bağlayıcı miktarları karşılaştırılmıştır. Tablo 12’de görüldüğü üzere, şlam uzaklaştırma işlemi bağlayıcı tüketimini %13,4-23,1 oranında azaltmıştır. Tane boyutu incelidikçe su ve çimento ile kaplanması gereken yüzey alanı artmaktadır. Bu bakımdan, referans atıkların sınıflandırılmış atıklara kıyasla belirli bir akışkanlık için daha fazla suya gereksinim duydukları ve bu nedenle yüksek nem içeriği ve düşük katı oranına sahip oldukları anlaşılmaktadır (Tablo 12). Sınıflandırılmış atıklardan hazırlanan karışımların aynı akışkanlığı daha yüksek katı oranında elde etmesi, yeraltı üretim boşluklarında daha fazla atığın depolanmasına imkân sağlayacaktır. Şlam uzaklaştırma ile ince tane miktarındaki azalma, su gereksinimini ve bağlayıcı tüketimini azaltmıştır. Bağlayıcı tüketiminin macun dolgu işletme maliyetlerinin %50-75’inin oluşturduğu göz önüne alındığında (Grice, 1998), dolgunun işletme maliyetleri açısından sınıflandırma (şlam uzaklaştırma) işleminin önemini ortaya koymaktadır.

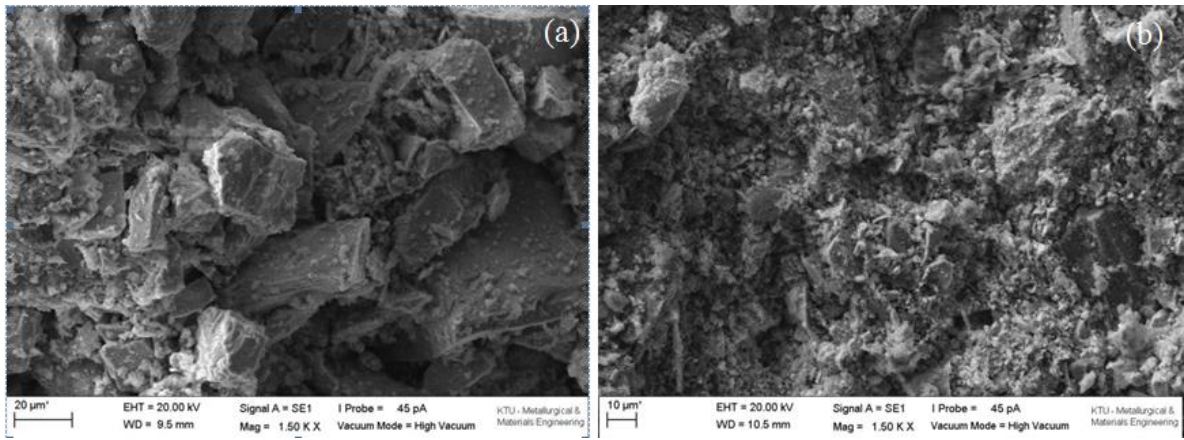
3.3. Sınıflandırmanın Dolgunun Mikroyapı Özelliklerine Etkisi

Macun dolgunun porozite ve boşluk oranı, karışım içerisinde ince taneli atık malzeme miktarının artmasıyla birlikte artmaktadır (Fall vd. 2005; Erçikdi vd., 2013). Bu çalışmada, macun dolgu mikroyapısının (porozite ve boşluk oranı) karışımın drenaj özelliklerinden önemli derecede etkilendiği ortaya çıkmıştır. Erçikdi vd. (2008) drenaj koşullarının dolgunun dayanım ve duraylılık özelliklerine etkisini incelemiş ve drene olmuş numunelerin daha yüksek dayanım ve duraylılık ürettiğini belirtmiştir.

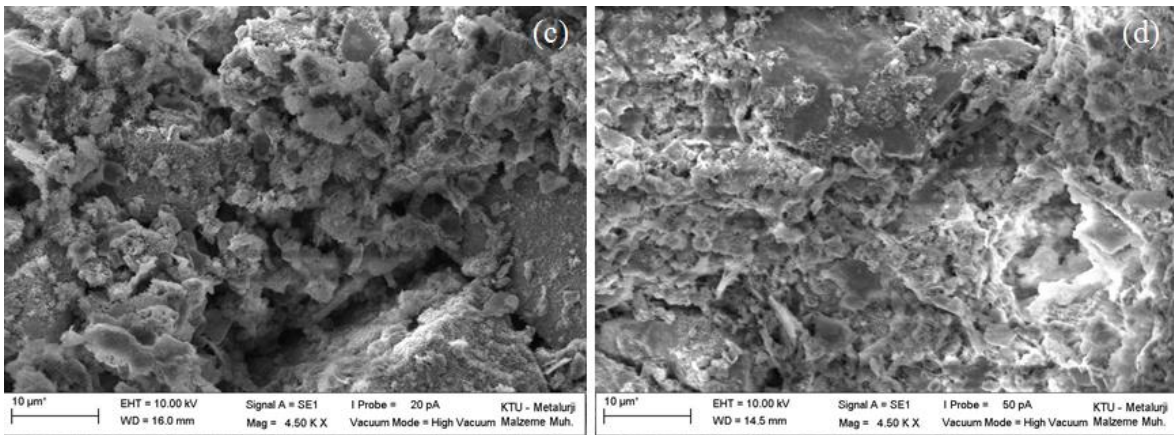


Şekil 33. %5 çimento oranında (a) ve 28 günde $\geq 1,0$ MPa dayanım üreten çimento oranlarında (b) hazırlanan numunelerin kür süresine bağlı porozite değişimi

Su bırakma testlerinde görüldüğü üzere, sınıflandırılmış atıklar referans atıklara kıyasla drenaj yoluyla daha fazla su bırakmaktadırlar (Şekil 24). Bu bulgularla bağıntılı olarak, sınıflandırılmış atıklardan hazırlanan dolgu numunelerinin referans atıklardan hazırlananlara kıyasla daha düşük porozite ve boşluk oranına sahip olduğu belirlenmiştir (Şekil 33). Şlam uzaklaştırma işleminin dolgu mikroyapısını iyileştirmesi aynı zamanda dayanım ve duraylılığı artırmıştır. Sınıflandırma işlemi ayrıca taneler arasındaki boşlukların kapanmasına ve daha kompakt bir dolgu yapısının oluşmasına katkı sağlamıştır (Şekil 34a,b).

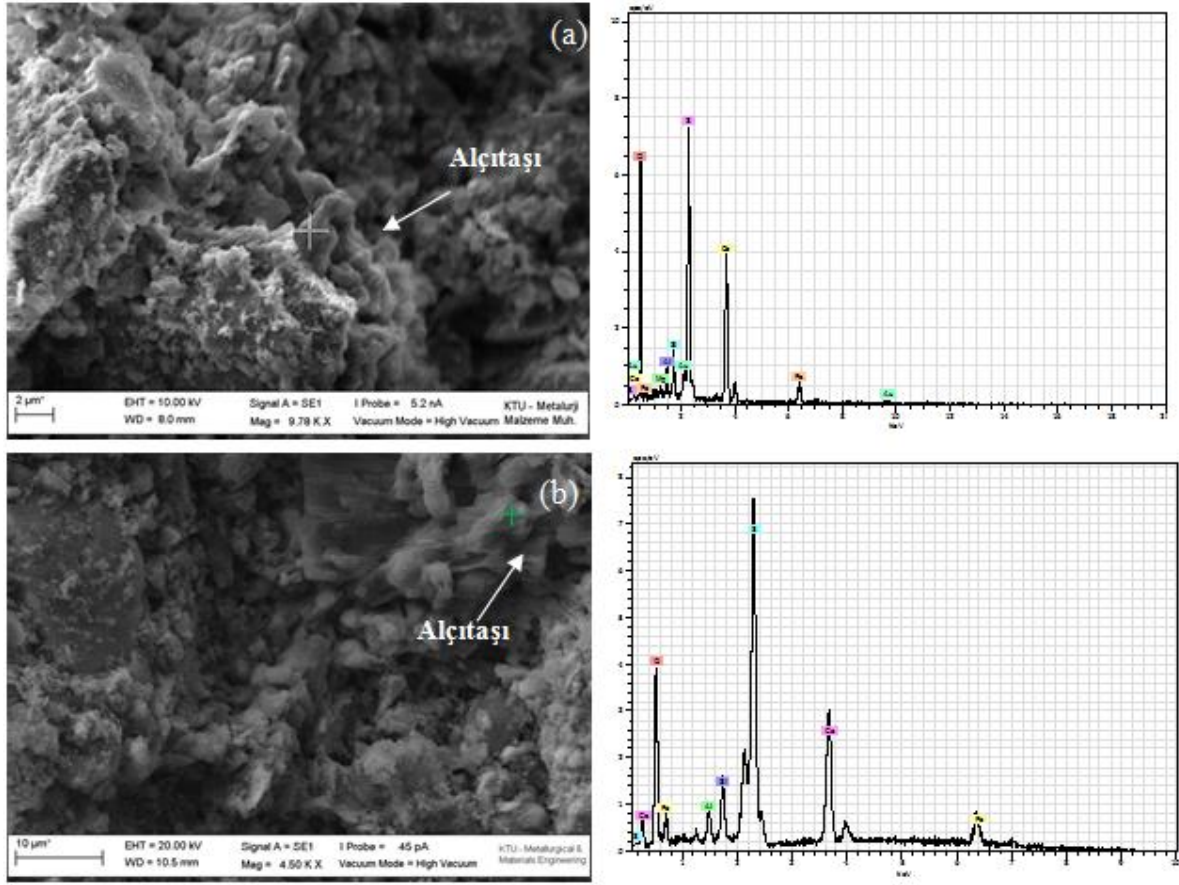


Şekil 34. Sınıflandırılmış (a) ve referans (b) atıklar kullanılarak %5 çimento oranında hazırlanan numunelerin mikro-yapısı



Şekil 35. 28 günlük kür süresinde $\geq 1,0$ MPa dayanım üreten numunelerin (%6,7 ve 10,4 çimento oranında hazırlanan) mikro-yapısı

Ayrıca çimento oranının artırılması, ortamda C-S-H miktarının artmasının yanı sıra dolgunun mikroyapı ve uzun dönem duraylılık performansını iyileştirmiştir (Şekil 35). Macun dolgu numunelerinin porozitesi, kür süresinin artmasıyla azalmaktadır (Şekil 33). Bu durum Portland kompoze çimento içerisindeki mineral katkı maddelerinin puzolanik özelliği nedeniyle 28 günden sonra da hidrasyonun devam etmesi ve ikincil minerallerin oluşumuyla taneler arasındaki boşlukların azalmasıyla ilişkilendirilebilir (Şekil 36a,b).



Şekil 36. %5 (a) ve %10,4 (b) çimento oranında hazırlanan numunelerde 224 gün kür süresi sonunda ikincil alçıtaşı oluşumu

İkincil alçıtaşının genişleme özelliği nedeniyle uzun dönem duraylılığı azalttığı belirtilmesine karşın (Tariq ve Nehdi, 2007; Erçıkı vd., 2009a,b), Fall ve Benzaazoua (2005) ikincil alçıtaşının belirli miktarda oluşması durumunda taneler arasındaki boşlukları doldurarak poroziteyi azalttığını ve dolgunun dayanımını artırdığını belirtmiştir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, sınıflandırma (şlam uzaklaştırma) işleminin sülfürlü atıklardan (spek ve bornit, SP ve BN) hazırlanan macun dolgunun kısa ve uzun dönem mekanik performansına etkisi değerlendirilmiştir. Referans ve sınıflandırılmış atıklardan hazırlanan macun dolgunun dayanım ve duraylılık performansı, mikroyapı (SEM ve MIP analizleri) ve kür süresine bağlı asit (pH) ve sülfat (SO_4^{-2}) analizleri ile ilişkilendirilmeye çalışılmıştır. İstenen dayanım (28 günde $\geq 1,0$ MPa) ve uzun dönem duraylılığı (dayanım kaybının oluşmaması) sağlayacak optimum bağlayıcı oranını belirlemek amacıyla farklı bağlayıcı oranlarında (%4,5-10,4) hazırlanan numunelerin dayanım testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalardan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- i. Atık içerisindeki ince tane miktarı belirli bir akışkanlıktaki dolgu karışımının drenaj özelliklerini önemli derecede etkilemektedir. İnce tane miktarı arttıkça dolgunun su tutma kapasitesi artmıştır. Sınıflandırma işlemiyle özellikle ince taneli silikat minerallerinin uzaklaşması sonucu, atıkların su tutma kapasiteleri azalmıştır.
- ii. Bağlayıcı miktarının artmasıyla dolgunun dayanım ve duraylılık performansı artmıştır. Bağlayıcı oranındaki artışın dolgunun işletme maliyetlerini artırmaya karşın, özellikle sülfür içeriği yüksek atıklardan hazırlanan dolgunun nötralizasyon kapasitesini artırmakta ve piritin oksidasyonu sonucu oluşan asitin olumsuz etkisini (C-S-H jelinin bağlayıcılık özelliğini yitirmesi) azaltmaktadır. Bağlayıcı oranını artırmak yerine alternatif olarak sülfata dayanıklı çimento kullanımı deneysel olarak incelenebilir.
- iii. Atıklardan şlamın uzaklaştırılması dolgunun kısa ve uzun dönem dayanım kazanımını artırmıştır. Şlamı uzaklaştırılmış atıklar kullanılması durumunda istenen mekanik performans için daha az bağlayıcı kullanımı yeterli olmuştur. Şlam uzaklaştırma işleminin faydalı etkisi atık tane boyut dağılımında iyileşme ve özellikle drenaj kapasitesinin artması nedeniyle su: çimento oranındaki azalma olmuştur.
- iv. Atık tipi (fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikler vb.) dolgunun performansını önemli derecede etkilemiştir. SP atıklarından hazırlanan macun

dolgu 28 günde istenen $\geq 1,0$ MPa dayanımı, BN atıklarına kıyasla daha düşük bağlayıcı oranında elde etmiştir.

- v. SEM ve MIP analizleri sınıflandırma işleminin dolgunun mikroyapısını iyileştirerek porozitesi daha düşük dolgu yapısının oluşmasına katkıda bulunmuştur. Yapılan pH ve sülfat (SO_4^{-2}) analizleri, sınıflandırılmış atıklardan hazırlanan dolguda pirit oksidasyonunun daha az olduğunu göstermiştir. Bunun sonucunda sınıflandırılmış atıklar kısa ve uzun dönemde daha yüksek dayanım ve duraylılık elde etmişlerdir.
- vi. Sınıflandırma işleminin faydalı etkisine karşın, şlamı uzaklaştırılmış atıklardan daha fazla suyun drene olması nedeniyle macun dolgunun borularla yeraltına taşınması ve mikserde karıştırılması esnasında oturma ve segregasyon (ayrışma) oluşabilir. Bu nedenle sınıflandırılmış atıkların mikserde karışımı ve yeraltına taşınma karakteristiklerini incelemek için yerinde testler yapılmalıdır. Ayrıca sınıflandırılmış atıklar daha fazla su bıraktığı için başlangıçta drenajla bir miktar çimento uzaklaşabilir. Bunun da incelenmesi gerekmektedir.
- vii. Sınıflandırma işleminin dolgu performansına etkisi farklı mineralojik yapıya sahip tesis atıkları (altın, gümüş) için de incelenmelidir.
- viii. Alçıtaşı ve etrenjit oluşumunun % olarak hangi oranlarda dayanıma katkı sağlayacağı, hangi oranda dayanımı azaltacağı ilave çalışmalarla ortaya konulmalıdır.

5. KAYNAKLAR

- Abdul-Hussain, N. ve Fall, M., 2012. Thermo-Hydro-Mechanical Behaviour of Sodium Silicate-Cemented Paste Tailings in Column Experiments, Tunnelling and Underground Space Technology, 29, 85-93.
- Akçil, A., 2003. Destruction of Cyanide in Gold Mill Effluents: Biological Versus Chemical Treatments, Biotechnology Advances, 21, 501-511.
- Akçil, A. ve Koldaş, S., 2006. Acid mine drainage (AMD): Causes, Treatment and Case Studies, Journal of Cleaner Production, 14, 12-13, 1139-1145.
- Annor, A.B., 1999. A Study of the Characteristics and Behaviour of Composite Backfill Material, PhD Thesis, McGill University, Montreal, Canada, 396.
- 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.
- ASTM C 39., 2002. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Annual Book of ASTM Standards, American Society of Testing Material.
- ASTM D 4404., 2002. Standard Test Method for Determination of Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry. Annual Book of ASTM Standards, American Society of Testing Material.
- Bakharev, T., Sanjayan, J.G. ve Cheng, Y.B., 2002. Sulfate Attack on Alkali-Activated Slag Concrete, Cement and Concrete Research, 32, 2, 211-216.
- Benzaazoua, M., Belem, T. ve Bussiere, B., 2002. Chemical Factors That Influence the Performance of Mine Sulphidic Paste Backfill, Cement and Concrete Research, 32, 7, 1133-1144.
- Benzaazoua, M., Fall, M. ve Belem, T., 2004. A Contributing to Understanding the Hardening Process Cemented Pastefill, Minerals Engineering, 17, 2, 141-152.
- Brackebusch, F.W., 1994. Basics of Cemented Paste Backfill Systems, Mining Engineering, 46, 10, 1175-1178.

- Clayton, S., Grice, T. ve Boger, D.V., 2003. Analysis of the Slump Test for on-Site Yield Stress Measurement of Mineral Suspensions, International Journal of Mineral Processing, 70, 1-4, 3-21.
- 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., 2011. Investigation of Utilisation of Alkali Activated Blast Furnace Slag as Binder in Paste Backfill, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey, 207p.
- 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.
- Colleparidi, M., 2003. A State-of-the Art on Delayed Ettringite Attack on Concrete, Cement and Concrete Composites, 25, 401-407
- Cooke, R., 2007. Backfill Pipeline Distribution Systems-Design Methodology Review, Minefill, Montreal, Canada, 9 p.
- Coussy, S., Benzaazoua, M., Blanc, D., Moszkowicz, P. ve Bussiere, B., 2011. Arsenic Stability in Arsenopyrite-Rich Cemented Paste Backfills: A Leaching Test-Based Assessment, Journal of Hazardous Materials, 185, 1467-1476.
- Çavuşoğlu, İ. 2008. Uçucu Küllerin Dolgu Malzemesi Olarak Kullanılması: Örnek Bir Uygulama (Çayırhan), Madencilik, 47, 3, 3-13.
- Çetiner, E.G., Ünver, B. ve Hindistan, M.A., 2006. Maden Atıkları ile İlgili Mevzuat: Avrupa Birliği ve Türkiye, Madencilik, 45, 1, 23-34.
- De Souza, E., Archibald, J.F. ve Dirige, A. P. E., 2003. Economics and Perspectives of Underground Backfill Practices in Canadian Mining, 105th Annual General Meeting of the Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Montreal, Canada, 15 p.
- DIN 4030., 2001. Standard Assessment of Water, Soil, and Gases for Their Aggressiveness to Concrete; Principles and Limiting Values. German Standard, Construction Materials and Building.
- Dorricott, M.G. ve Grice A.G., 2002. Backfill – The Environmentally Friendly Tailings Disposal System, Proceedings Green Processing, 265-270.
- Erçikdi, B., Kesimal, A., Yılmaz, E. ve Deveci, H., 2003. Effect of Desliming on the Strength of Paste Backfill, Balkan Mineral Processing Congress, Bulgaria, 850-857.

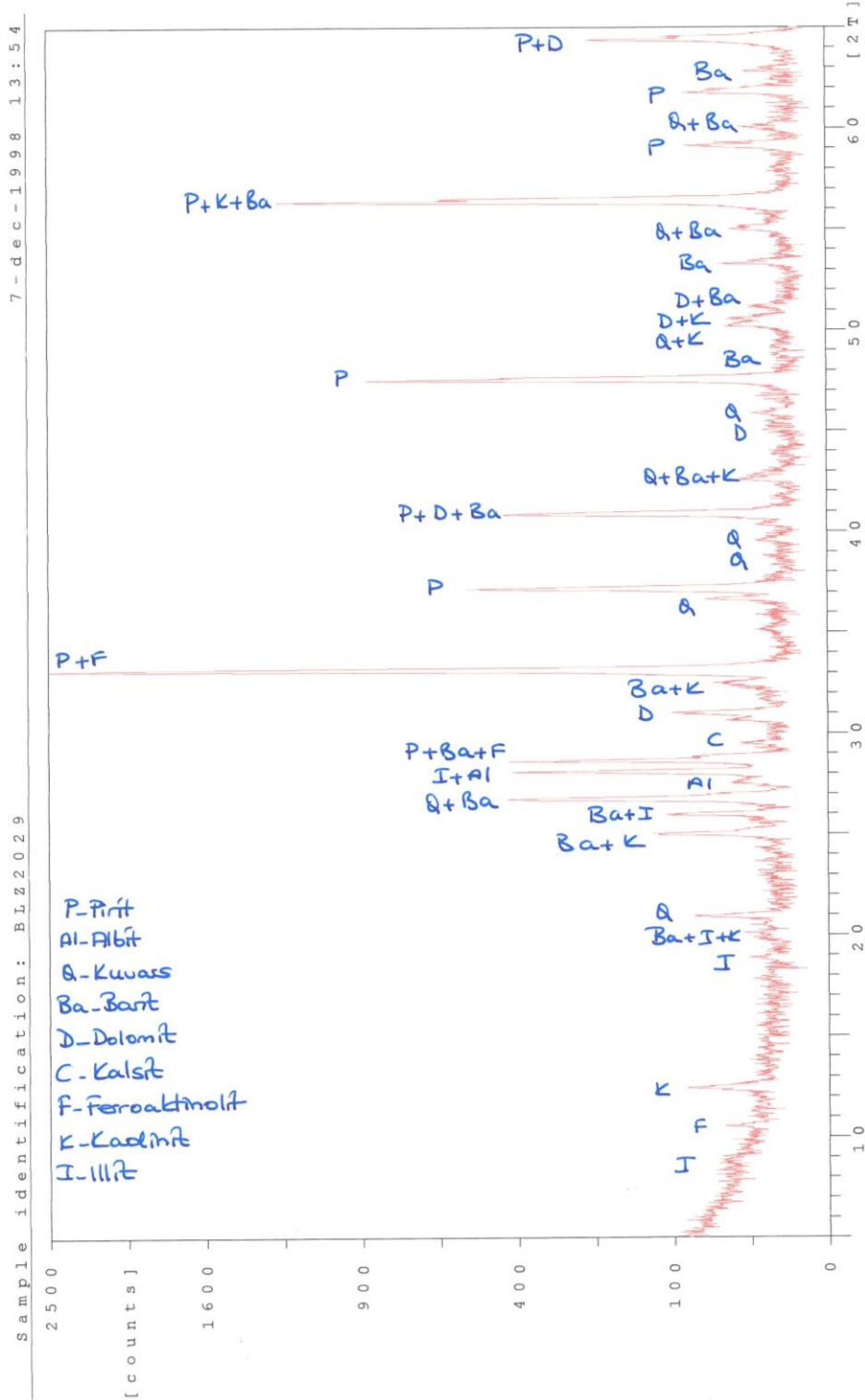
- Erçıkıdı, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H. ve Alp, İ., 2008. Drenaj Koşullarının Macun Dolgu Dayanımına Etkisi, Madencilik, 47, 2, 15-24.
- Erçıkıdı, B., Kesimal, A., Cihangir, F., Deveci, H. ve Alp, İ., 2009a. Cemented Paste Backfill of Sulphide-rich Tailings: Importance of Binder Type and Dosage, Cement and Concrete Composites, 31, 4, 268-274.
- Erçıkıdı, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H. ve Alp, İ., 2009b. Utilization of Industrial Waste Products as Pozzolan Material in Cemented Paste Backfill of High Sulphide Mill Tailings, Journal of Hazardous Materials, 168, 2-3, 848-856.
- Erçıkıdı, B., 2009. Mineral ve Kimyasal Katkı Maddelerinin Macun Dolgu Performansına Etkisi, Doktora Tezi, K.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Erçıkıdı, 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.
- Erçıkıdı, 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.
- Erçıkıdı, B., Cihangir, F., Kesimal, A. ve Deveci, H., 2012. Tesis Atıklarının Yönetiminde Macun Dolgu Teknolojisi, Madencilik Türkiye, 24, 54-59.
- Erçıkıdı, 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. ve Benzaazoua, M., 2005a. Modeling the Effect of Sulphate on Strength Development of Paste Backfill and Binder Mixture Optimization, Cement and Concrete Research, 35, 2, 301-314.
- Fall, M., Benzaazoua, M. ve Ouellet, S., 2005b. Experimental Characterization of the Influence of Tailings Fineness and Density on the Quality of Cemented Paste Backfill, Minerals Engineering, 18, 1, 41-44.
- Fall, M. ve Samb, S.S., 2009. Effect of High Temperature on Strength and Microstructural Properties of Cemented Paste Backfill, Fire Safety Journal, 44, 4, 642-651.

- Fall, M., Celestin, J.C., Pokharel, M. ve Toure, M., 2010. A Contribution to Understanding the Effects of Curing Temperature on the Mechanical Properties of Mine Cemented Tailings Backfill, Engineering Geology, 114, 3-4, 397-413.
- Glasser, F. P., Marchand, J. ve Samson, E., 2008. Durability of Concrete-Degradation Phenomena Involving Detrimental Chemical Reactions, Cement Concrete Research, 30, 212-219.
- Grice, T., 1998. Underground Mining with Backfill, The 2nd Annual Summit on Mine Tailings Disposal systems, Brisbane, Australia, 5-15.
- Golder PasteTec, Golder Paste Technology Corporate Profile. http://www.golder.com/modules.php?name=Services&sp_id=1221 (23 May 2012).
- Huynh, L., Beattie, D.A., Fornasiero, D. ve Ralston, J., 2006. Effect of Polyphosphate and Naphthalene Sulfonate Formaldehyde Condensate on the Rheological Properties of Dewatered Tailings and Cemented Paste Backfill, Minerals Engineering, 19, 28-36.
- Karapınar, N., 2009. Maden Atık Yönetimi; Macun Teknolojisi Kullanımı, Madencilik, 48 (1), 31-42.
- 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., Ercikdi, 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.
- Kuganathan, N., 2005. Rock Fill in Mine Fill, In: Handbook on Mine Fill, Australian Centre for Geomechanics, 179p.
- Landriault, D. A., 1995. Paste Backfill Mix Design for Canadian Underground Hard Rock Mining, Proceedings of the 97th Annual General Meeting of the CIM Rock Mechanics and Strata Control Session, Nova Scotia, Canada, 653-663.
- 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.

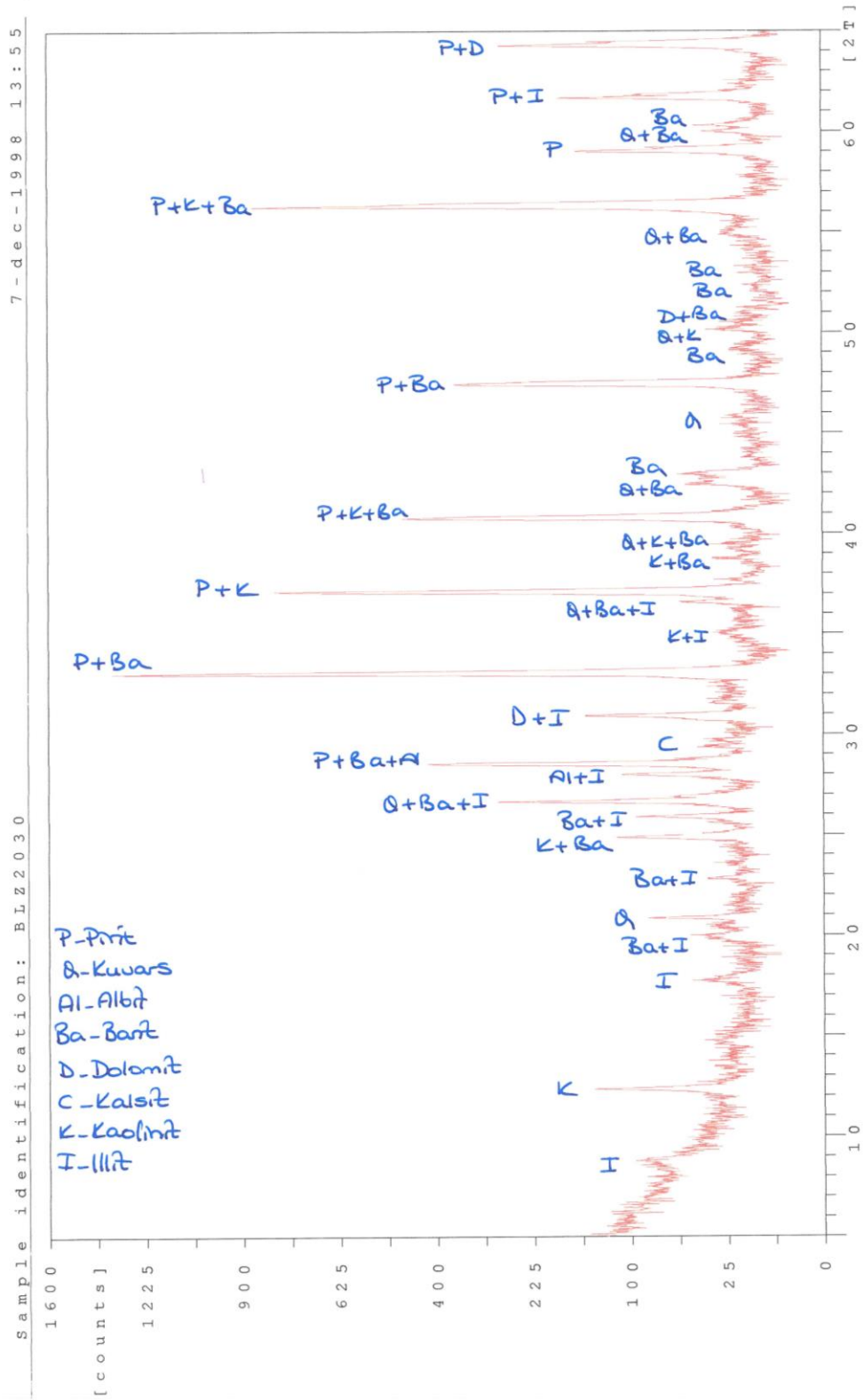
- Moghaddam, A.S. ve Hassani, F.P., 2007. Yield stress Measurement of Cemented Paste Backfill With the Vane Method and Slump Tests, Minefill 2007, Montreal, Canada, 8 p.
- Orejarena, L. ve Fall, M., 2010. The Use of Artificial Neural Networks to Predict the Effect of Sulphate Attack on the Strength of Cemented Paste Backfill, Bulletin of Engineering Geology and Environment, 69, 659-670.
- Stark, J. ve Bollmann, K., Delayed Ettringite Formation in Concrete, <http://www.faggruppeba.no/ikbViewer/Content/738949/doc-23-2.pdf>, 03.03.2013.
- Tariq, A. ve Nehdi, M., 2007. Developing Durable Paste Backfill from Sulphidic Tailings, Waste Management Research, 160, 4, 155–166.
- Topçu, Y., 2012. Pasa Yönetiminde Bütüncül Yaklaşım ve Asit Maden Drenajı, Sektör Maden Haberler Bülteni, 43, 39-43.
- Ustabaş, İ., 2008. Sülfat Etkisine Maruz Mineral Katkılı Beton ve Harçların Performansının İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 149 s.
- Yılmaz, E., 2003. Sülfat İçeren Maden Atıklarından Hazırlanan Çimentolu Macun Dolgu Örneklerinin Dayanım Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 117 s.
- Yılmaz, E., Kesimal, A. ve Ercikdi, B., 2003. Macun Dolgu Dayanımını ve Duraylılığını Etkileyen Faktörler, Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni, Ankara, 28, 2, 155-169.
- 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, E., Belem, T. ve Benzaazoua, M., 2012. One-dimensional Consolidation Parameters of Cemented Paste Backfills, Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 28, 4, 29-45.
- Yin, S., Wu, A., Hu, K., Wang, Y. ve Zhang, Y., 2012. The Effect of Solid Components on the Rheological and Mechanical Properties of Cemented Paste Backfill, Minerals Engineering, 35, 61-66.
- Yumlu, M., 2001. Backfill Practices at Çayeli Mine, Proceedings of the 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey, IMCET 2001, Ankara, 333-339.
- Wu, D., Fall, M. ve Cai, S.J., 2013 Coupling Temperature, Cement Hydration and Rheological Behaviour of Fresh Cemented Paste Backfill, Minerals Engineering, 42, 76-87.

6. EKLER

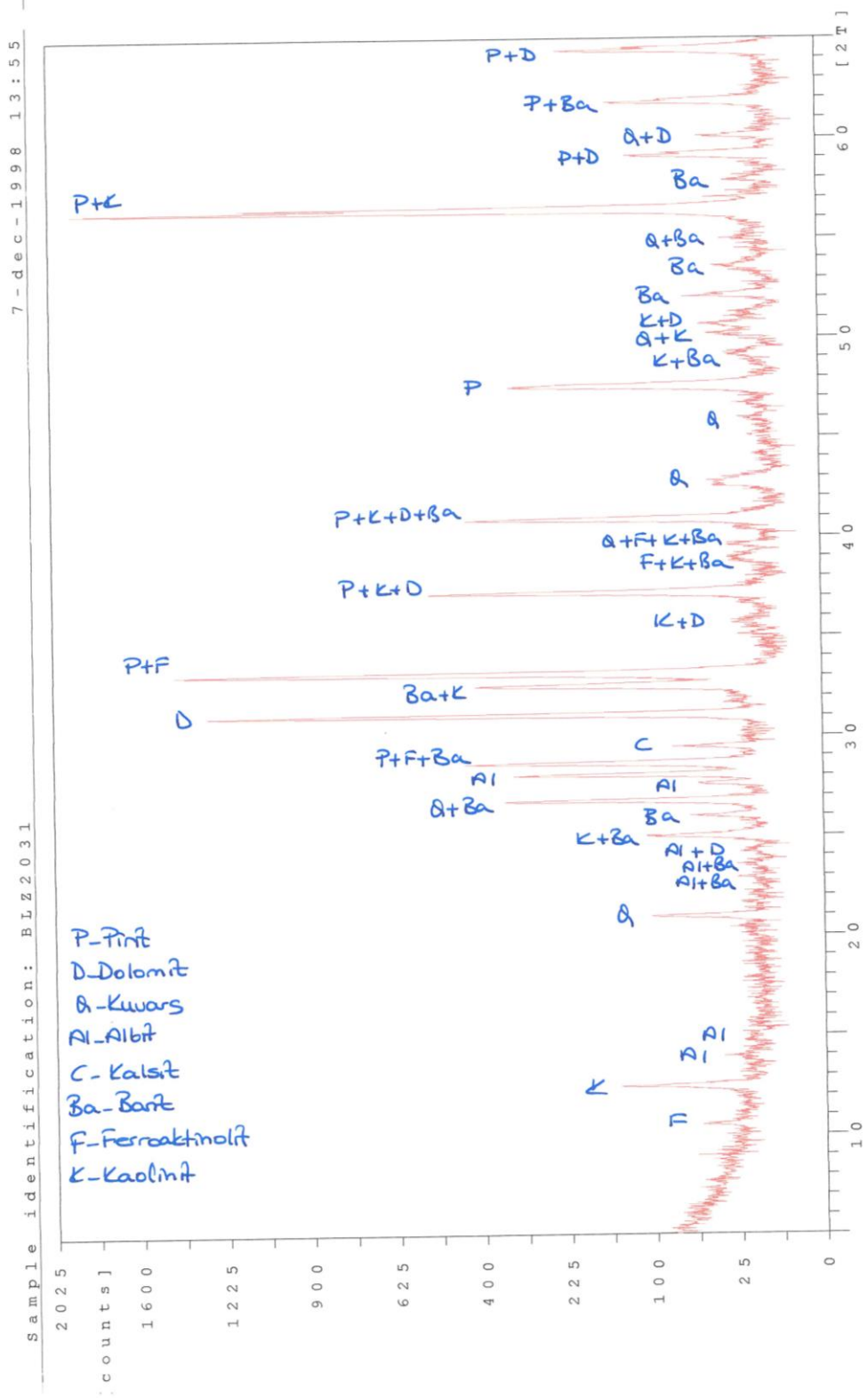
Ek 1. Sınıflandırılmış Bornit Atığının X-Işınları Difraktometre (XRD) Analizi



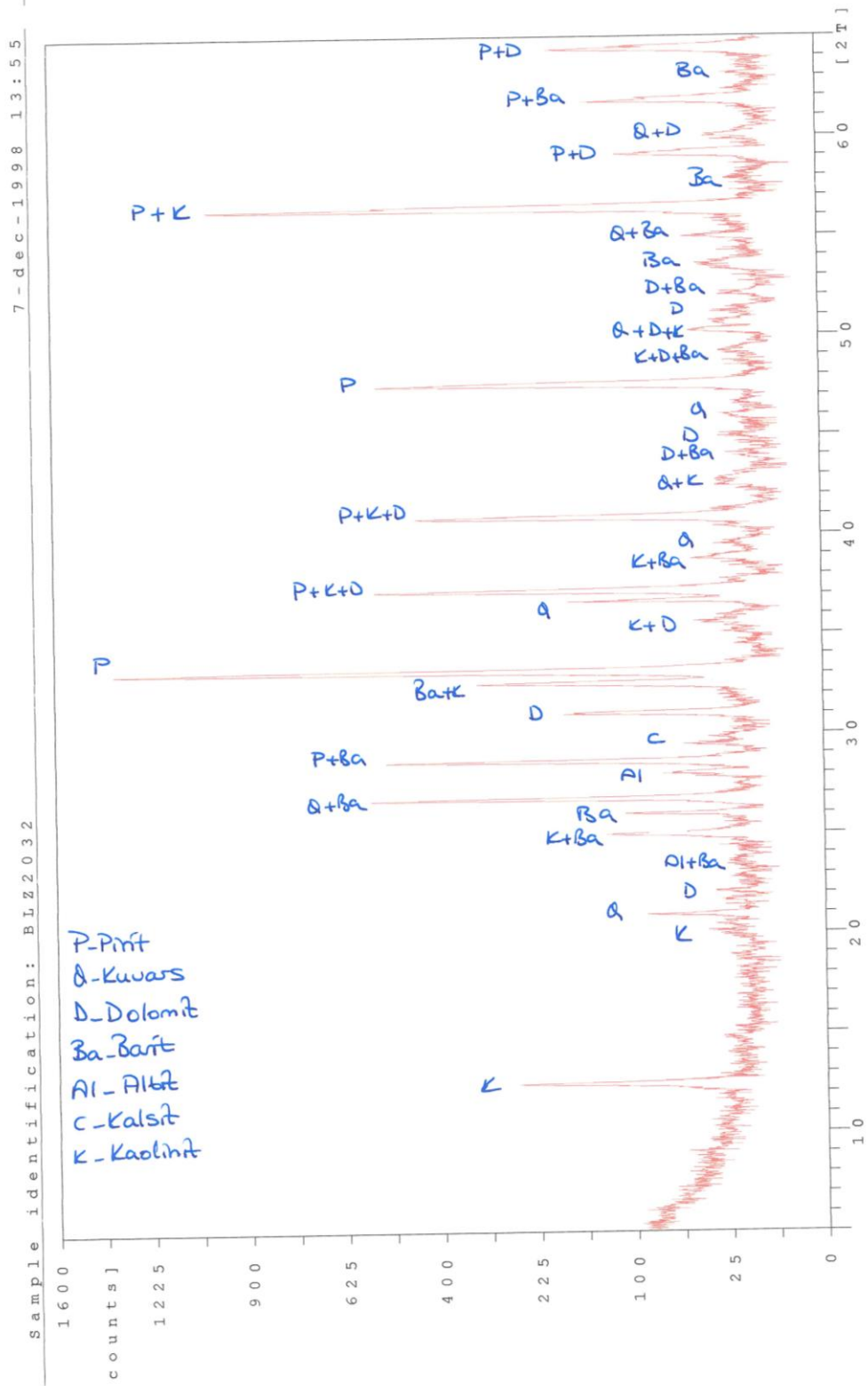
Ek 2. Referans Bornit Atığının X-Işınları Difraktometre (XRD) Analizi



Ek 3. Sınıflandırılmış Spek Atığının X-Işınları Difraktometre (XRD) Analizi



Ek 4. Referans Spek Atığının X-Işınları Difraktometre (XRD) Analizi



ÖZGEÇMİŞ

Hakan BAKİ, 07.03.1988 yılında Trabzon’da doğdu. 1999 yılında Cudibey İlkokulu’ndan mezun oldu. Orta öğrenimini Cumhuriyet İlköğretim okulunda, lise öğrenimini de Trabzon Lisesi’nde tamamladı. 2006 yılında kazandığı Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği bölümünden 2010 yılında başarıyla mezun oldu. Aynı yıl içerisinde Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı.

Bu tez çalışması sonunda Journal of Environmental Management’da “Effect of desliming of sulphide-rich mill tailings on the long-term strength of cemented paste backfill” adlı yayın yapılmıştır.