

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**MACUN DOLGUDA KESME DAYANIM PARAMETRELERİNİN DOLGU
DAYANIMI AÇISINDAN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Maden Müh. Alp TURAN

**HAZİRAN 2011
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**MACUN DOLGUDA KESME DAYANIM PARAMETRELERİNİN DOLGU
DAYANIMI AÇISINDAN İNCELENMESİ**

Maden Mühendisi Alp TURAN

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"MADEN YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 18.05.2011
Tezin Savunma Tarihi : 16.06.2011**

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ayhan KESİMAL

Trabzon 2011

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Maden Mühendisliği Anabilim Dalında

Alp TURAN tarafından hazırlanan

**MACUN DOLGUDA KESME DAYANIM PARAMETRELERİNİN DOLGU
DAYANIMI AÇISINDAN İNCELENMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 31.05.2011 gün ve 1407 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından 16.05.2011 tarihinde yapılan sınavda**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Ayhan KESİMAL

Üye : Doç. Dr. Mehmet TURAN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Bayram ERÇİKDI

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

“Macun Dolguda Kesme Dayanım Parametrelerinin Dolgu Dayanım Ve Duraylılığı Açısından İncelenmesi” isimli bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır. Tezin deneysel çalışmaları, KTÜ Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü Kaya Mekaniği, Macun Dolgu ve Cevher Hazırlama Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Yüksek lisan tez konunun belirlenmesinden sonuçlandırılmasına kadar her aşamasında deneyim, bilgi ve değerli görüşlerinden yararlandığım danışman hocam Prof. Dr. Ayhan KESİMAL’a minnet borçluyum.

Çalışmam boyunca her konuda bana yardımcı olan çok değerli hocalarım başta Araştırma Görevlisi Ferdi CİHANGİR ve Yard. Doç Dr. Bayram Erçikdi’ya teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Ayrıca desteklerini benden esirgemeyen ailem ve sevgili eşime saygı ve sevgilerimi sunarım.

Alp TURAN
Trabzon 2011

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Macun Dolguda Kesme Dayanım Parametrelerinin Dolgu Dayanımı Açısından İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Ayhan KESİMAL ‘ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/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. 18/05/2011

Alp TURAN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ BEYANNAMESİ	IV
İÇİNDEKİLER	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ	XI
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Madencilikte Dolgu İşlemi ve Tarihçesi	2
1.3. Dolgu Yöntemleri	3
1.4. Macun Dolgu Yöntemi	6
1.4.1. Macun Dolgu Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları	8
1.5. Macun Dolgu Dizaynında Önemli Faktörler	10
1.5.1. Dayanım ve Duraylılık	10
1.5.2. Reoloji	11
1.5.3. Ekonomi	15
1.6. Çimentolu Macun Dolgu Performansını Etkileyen Faktörler	16
1.6.1. İç Etkenler	17
1.6.1.1. Tane Boyu Dağılımı	17
1.6.1.2. Tane Şekli	21
1.6.1.3. Mineraloji ve Özgül Ağırlık	22
1.6.1.4. Asit ve Sülfat Etkisi	22
1.6.1.5. Karışım Suyu	23
1.6.1.6. Su:Çimento Oranı	24
1.6.2. Dış Etkenler	25
1.7. Macun Dolgu Uygulamaları	26
1.7.1. Grund Madeni	26
1.7.2. Lucky Friday Madeni	27

1.7.3.	Çayeli Bakır İşletmeleri	27
2	.YAPILAN ÇALIŞMALAR	29
2.1.	Giriş	29
2.2.	Atık Malzeme Özellikleri	30
2.3.	Bağlayıcı Malzeme	33
2.4.	Atık Malzemenin Reolojik Özellikleri	34
2.5.	Macun Dolgu Örneklerinin Hazırlanması	36
2.6.	Kesme Dayanım Değerleri	39
2.7.	Tek Eksenli Basınç Dayanım Testleri	40
2.8.	Mikroyapı Analizleri	39
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA	42
3.1.	Atık Malzeme Tane Boyut Dağılımı ve Şekli	42
3.2.	Atık Malzeme Karakterizasyonu	43
3.3.	Bağlayıcı Malzeme Karakterizasyonu	44
3.4.	Macun Dolgu Dayanım ve Duraylılığının Değerlendirilmesi	45
3.4.1.	Tek Eksenli Basınç Dayanım Testleri	45
3.4.2.	Kesme Dayanım Testleri	47
3.5.	Macun Dolgu Mikroyapısının Değerlendirilmesi	51
4.	SONUÇLAR	53
5.	ÖNERİLER	54
6.	KAYNAKLAR	55
	ÖZGEÇMİŞ	58

Yüksek Lisans

ÖZET

MACUN DOLGUDA KESME DAYANIM PARAMETRELERİNİN DOLGU
DAYANIMI AÇISINDAN İNCELENMESİ

Alp TURAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ayhan KESİMAL
2011, 57 Sayfa

Çimentolu macun dolgu, zenginleştirme sonrası filtrelenmiş maden atıklarının su ve bağlayıcı maddeler ile karşılaştırılmasından oluşan, yüksek yoğunluklu, akışkan ve pompalanabilir bir malzeme olarak tanımlanabilir. Macun dolgu yöntemi, sülfür içeriği yüksek atıklara karşı yapılan sıkı çevresel düzenlenmelerinden dolayı dünyadaki kullanımı giderek artan bir metottur. Macun dolguyu oluşturan malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri dolgunun kalitesini etkileyen en önemli faktörlerdir. Bağlayıcı içeriği, macun dolgu dayanım ve duraylılığını etkileyen en önemli fiziksel özelliklerdendir. Bu çalışmada, bünyesinde 20 μm altı malzeme içeriği % 55 olan çimentolu macun dolgunun kısa ve uzun dönem kür sürelerindeki mekanik davranışları incelenmiştir. Üç farklı dozajda bağlayıcı içeren sülfürlü maden atıkları kullanılarak macun dolgu örnekleri elde edilmiştir. %5 çimento içeriğindeki macun dolgu numunesinin dayanımı 56 günlük kür süresine kadar arttığı, 56 günden itibaren azalmaya başladığı görülmüştür. %6 ve %7 bağlayıcı içeren macun dolgu numunelerinin dayanımlarında sırasıyla 112 gün ve 224 günden itibaren azalma görülmüştür. Tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları kesme dayanım değerleri ve kohezyon değerleri ile karşılaştırıldığında değerlerin paralel bir eğilim gösterdiği görülmektedir. Sonuçlar, bağlayıcı miktarının kısa ve uzun dönemde çimentolu macun dolgunun mekanik performansını etkilediğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Çimentolu Macun Dolgu, Mekanik Performans, Kür Süresi, Bağlayıcı Miktarı, Kesme Dayanımı, Kohezyon

Master Thesis

SUMMARY

THE EFFECT OF SHEAR STRENGTH PARAMETERS ON CEMENTED PASTE BACKFILL PERFORMANCE

Alp TURAN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mining Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Ayhan KESİMAL
2011, 57 Pages

Cemented paste backfill can be defined as a pumpable, fluid, high density and composite material of filtered tailings of the milling operation of mine with water and hydraulic binders. Cemented paste backfill is a method increasingly used by mines throughout the world due to increasingly stringent environmental regulations opposite to sulfur-rich tailings. Physical, chemical and mineralogical properties of the materials composing backfill are the crucial factors affecting the quality of cemented paste backfill. Quantity of binder is one of the most important physical factors influencing the strength and stability of paste backfill. In this paper studies the mechanical behaviour of cemented paste backfill containing 15 wt% finer than 20 μm with short term and long term curing time. Many tailings containing sulfur were used for making backfill samples with three different dosage of binder. Paste backfill samples containing 5 wt% cement were observed to no loss of strength until 56 days curing time. However, they lose their strengths after 56 days. Strength of paste backfill had been dropped by 112 days and 224 days for binder composition with 6 % and 7 % respectively. By comparing, uniaxial compressive stress tests and shear stress parameters confirm the relation between them. Consequently, percentage of binder determines past backfill performance in both short and long term.

Key Words: cemented paste backfill; mechanical performance; curing time; binder dosage, Shear Strength, Cohesion

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Madencilik işlemleri sonucunda asidik maden suyu oluşumu.	2
Şekil 2. Macun dolgunun yapısal görünümü	4
Şekil 3. Yeraltı madenlerinde kaya ve hidrolik dolgu uygulaması	5
Şekil 4. Yeraltı madenlerinde macun dolgu uygulaması	5
Şekil 5. Dünyada macun dolgu teknolojisinin uygulandığı yerler	6
Şekil 6. Macun dolguyu oluşturan bileşenlerin şematik gösterimi	7
Şekil 7. Yeraltı üretim boşluklarında macun dolgunun işlevi	11
Şekil 8. Slump ölçümünün şematize gösterimi	12
Şekil 9. Slump değeri yüksek (a), normal (b) ve düşük (c) dolgu	13
Şekil 10. Macun dolguda katı içerik ve slump arasındaki ilişki	14
Şekil 11. Tapalı akışın hız profili	14
Şekil 12. Optimum macun dolgu sistemi için yapılması gereken işlemler	17
Şekil 13. Tane boyutunun tek eksenli basınç dayanımına etkisi	18
Şekil 14. İyi bir tane boyuna sahip olan (a) ve olmayan (b) malzemeden üretilen dolgu	19
Şekil 15. Küresel şekilli (a) ve düzensiz şekilli (b) tane yapısına sahip malzeme	21
Şekil 16. Su/çimento oranının macun dolgu dayanımına etkisi	24
Şekil 17. Drenaj koşullarının macun dolgu dayanımına etkisi	26
Şekil 18. Deneylerde kullanılan atık malzemenin laboratuara getirilmesi	30
Şekil 19. Atık malzeme tane boyu dağılımı grafiği	31
Şekil 20. Atık malzemenin XRD çekim ve mineralojik analiz profili	33
Şekil 21. Çimento malzemesinin tane boyu dağılımı	33
Şekil 22. Slump ölçüm işlemi	35
Şekil 23. Slump değerlerinin katı içeriğine bağlı değişimi	36
Şekil 24. Macun dolgu hazırlanmasında kullanılan mikser	37
Şekil 25. Kesme dayanım deneyi için hazırlanan numuneler	38
Şekil 26. Tek eksenli basınç dayanım deneyi için hazırlanan numuneler	38
Şekil 27. Kesme kutusu test cihazı	39
Şekil 28. macun dolgu numunesinin hazırlanması ve kesme haznesine yerleştirilmesi	39
Şekil 29. Kesme gerilmesinin bilgisayar tarafından belirlenmesi	40

Şekil 30. Tek eksenli basınç dayanımı test cihazı	41
Şekil 31. Kür süresine bağlı olarak değişen dayanım değerleri	47
Şekil 32. 0.171 MPa düşey gerilme altındaki kesme dayanım değerleri	48
Şekil 33. 0.235 MPa düşey gerilme altındaki kesme dayanım değerleri	48
Şekil 34. 0.297 MPa düşey gerilme altındaki kesme dayanım değerleri	49
Şekil 35. Kohezyon değerlerinin kür sürelerine bağlı değişimi	50
Şekil 36. İçsel sürtünme açısı değerlerinin kür süresine bağlı değişimi	51
Şekil 37. %5 bağlayıcı oranında (a) ve %7 bağlayıcı oranında (b) normal çimento içeren numunelerde 360 günlük kür süresinde oluşan genleşme ürünleri	52

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Dolgu tipleri ve özellikleri	8
Tablo 2. Dolgu karışımlarının slump özellikleri	13
Tablo 3. Macun dolgunun dayanım ve duraylılığını etkileyen faktörler	16
Tablo 4. Macun dolgu karışımının boyuta göre sınıflandırılması	18
Tablo 5. Farklı çimento oranlarında, farklı kür sürelerinde hazırlanan macun dolgu numunelerinin kesme dayanım deneyleri	29
Tablo 6. Farklı çimento oranlarında, farklı kür sürelerinde hazırlanan macun dolgu numunelerinin tek eksenli basınç dayanımı deneyleri	29
Tablo 7. Atık malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri	32
Tablo 8. Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mineralojik özellikleri	34
Tablo 9. Atık malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri	43
Tablo 10. CEM I 425 R Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mineralojik özellikleri	45
Tablo 11. Tek eksenli basınç dayanımı test sonuçları	46

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Madenicilik, yer kabuğunda bulunan cevher, endüstriyel hammadde, kömür ve petrol gibi ekonomik değeri olan herhangi bir maddeyi ekonomik ve emniyetli bir şekilde yeryüzüne çıkarıp insanlığın yararına kazandırma işlemleridir. Cevheri alınan yerlerde oluşan boşluklar genellikle dolgu malzemesi ile doldurulmaktadır (Yılmaz, 2003). Dolgu; çimentolu kaya, yan kayaç, katı atık ve maden proses atıklarının kullanıldığı atık kontrol metodlarından biridir ve her atık kontrol tekniğinin birinci amacı çevresel açıdan zararlı ve tehlikeli atıkları çevreden izole etmektir (Cihangir vd., 2008). Yeraltı madenciliğinde uygulanan dolgu işlemi; gerek yeraltı faaliyetlerinin güvenli bir şekilde yapılması ve yüzeyde meydana gelen çökmeleri engelleme gerekse atıkları depolama açısından büyük bir önem taşımaktadır.

Bakır, kurşun gibi metalik cevherlerin üretimi ve zenginleştirilmesi işlemleri sonucunda, önemli miktarda sülfür içeriği yüksek atık malzeme açığa çıkmaktadır. Sülfürlü minerallerin (pirit, pirotit vb.) su ve oksijen varlığında oksidasyona uğraması, asidik maden suyu (AMD) oluşumuna (Şekil 1) ve atık içerisinde bulunan arsenik (As), bakır (Cu) ve çinko (Zn) gibi toksik metallerin çözünmesine yol açarak çevreye zarar vermektedir (Kuyucak, 1998; Akçıl ve Koldaş, 2006). Ayrıca cevher zenginleştirme işlemleri esnasında atıklara birçok kimyasal madde karışmakta ve atıkların çevreye olan olumsuz etkilerini çok yönlü hale getirmektedir (Çetiner vd., 2006). Sülfürlü atıkların atmosferik koşullarda depolanması sonucu ortaya çıkacak çevresel sorunlar (asidik maden suyu oluşumu, ağır ve toksik metallerin yer altı/içme sularına karışma riski, suda yaşayan canlıların zarar görmesi ve tarım arazilerinin elverişsiz duruma gelmesi gibi) ve çevrecilerin madenciliğe yönelik olumsuz tepkileri atıkların yeraltında daha güvenli biçimde depolanmasıyla büyük ölçüde önlenmektedir. (Kesimal vd, 2004; Fall vd, 2008; Yılmaz vd, 2004)

Bu çalışmada, Çayeli Bakır İşletmeleri A.Ş.' ye ait bakır-çinko konsantratör atıklarından üretilen macun dolgu karışım örneklerinin kısa ve uzun dönemde dayanım ve duraylılığına etki eden faktörlerin belirlenmesi amacıyla, farklı bağlayıcı oranlarında ve farklı kür sürelerinde kesme dayanımları belirlenmiştir ve kesme dayanım parametreleri (kohezyon ve içsel sürtünme açısı) dolgu dayanım ve duyarlılığı açısından incelenmiştir.



Şekil 1. Madencilik işlemleri sonucunda asidik maden suyu oluşumu

1.2. Madencilikte Dolgu İşlemi ve Tarihçesi

Derin yeraltı madenlerinde karşılaşılan çok yüksek basınçlar, maden cevherinin ekonomik bir şekilde alınması ve emniyetli bir operasyonun yürütülebilmesi için farklı tahkimat sistemlerini gerekli kılmaktadır. Yeraltı madenciliğinde uygulanan dolgu işlemi; gerek yeraltı faaliyetlerinin güvenli bir şekilde yapılması, gerekse yüzeyde meydana gelen çökmeleri engelleme açısından büyük bir önem taşımaktadır. Dolgu, yeraltı maden ocaklarında cevher üretimi sonucu oluşan boşlukları uygun bir malzeme kullanarak tahkimat sağlamak, topukların kazanımı ve/veya atıkları depolamak amacıyla yapılan doldurma işlemidir (Erçikdi, 2009). Dolgunun cevheri alınmış bölgelere yerleştirilmesi genellikle karışım içerisinde bir miktar bağlayıcı ve karışım suyu ilave edilerek gerçekleştirilmektedir. Dolgu malzemesi olarak genellikle tesis atıkları, kum, taşocaklarından patlatma sonucu elde edilen iri kayaç parçaları ve kırılmış agrega kullanılmaktadır (Çakmakçı, 1997). Dolgu malzemeleri, sahip oldukları tane boyut dağılımına göre 4 sınıfa ayrılmaktadır.

Tesis Atıkları: Atıkların tamamı tesis atığı veya şlamı uzaklaştırılmış malzemedir oluşmaktadır ve tane boyutu; cevher zenginleştirme ve şlam uzaklaştırma teknolojisine bağlıdır. Tesis atıklarının tane boyut dağılımına bakıldığında 10 μm altındaki ince boyutlu

malzemenin, toplam malzeme miktarının ağırlıkça $\leq 30\%$ 'unu oluşturduğu görülmektedir (Hassani ve Archibald, 1998).

Kum: Dolgu işleminde kullanılan kumun tane boyut dağılımı genellikle 6 μm ile 5mm arasında değişmektedir (Hassani ve Archibald, 1998).

Çakıl: Dolgu malzemesi olarak kullanılan çakıl malzemesinin tane boyut dağılımı 1mm ile 25mm arasında değişmektedir. (Arioğlu, 1983)

Kaya: Dolguda kullanılan maksimum kaya boyutu kullanılan dağıtım sistemine göre değişiklik göstermektedir. Hidrolik taşımada kayanın tane boyutu 60 mm, kamyon ve konveyörle taşımada ise 300 mm' dir (Hassani ve Archibald, 1998).

Dolgu işlemi ilk defa, 1864 yılında Kuzey Amerika'nın Pennsylvania eyaletindeki bir kilisenin yüzeyde meydana gelen çökmelerden dolayı yıkılmasını engellemek amacıyla kullanılmıştır. İlk çimentolu dolgu uygulaması, 1957 yılında Sudbury Falconbridge Nikel Madeninde başarıyla uygulanmış ve çimento olarak kolay bulunması ve ucuz olmasından dolayı Portland Çimento tercih edilmiştir. 1970'lere geldiğinde ise, atıkların çimento ile birlikte dolgu olarak yeraltına yerleştirilmesi işlemi endüstriyel bir uygulama haline gelmiştir. Aşağıdaki liste, yeraltı madencilğinde dolgu kullanımının zamana bağlı gelişim süreci hakkında bilgi vermektedir.

- 1930'dan önce – Konsolide olmayan kaya dolgusu kullanımı
- 1930'lu yıllar – İlk konsolide kaya dolgusunun kullanımı
- 1940'lı yıllar – Hidrolik dolgu sistemlerinin kullanımı
- 1950'li yıllar – Çimentolu hidrolik dolgunun uygulanması
- 1960'lı yıllar – Çimentolu kaya dolgunun uygulanması
- 1970'li yıllar – Hacimli malzemelerin depolanması
 - ✓ Tahkimatsız alan
 - ✓ Alternatif bağlayıcılar (cüruf ve uçucu kül gibi)
- 1980'li yıllar – Macun dolgunun araştırılması ve geliştirilmesi
- 1990'lı yıllar – Macun dolgunun yer altı maden sahalarına uygulanması

1.3. Dolgu Yöntemleri

Yeraltı maden sahalarında yaygın olarak kaya dolgu, hidrolik dolgu ve macun dolgu yöntemleri kullanılmaktadır. Kaya dolgusu, madeni alınmış boşlukları doldurmak için pas olarak adlandırılan yan kayaç ve çeşitli boyutta agregalardan oluşan bir dolgu tipidir. Kaya

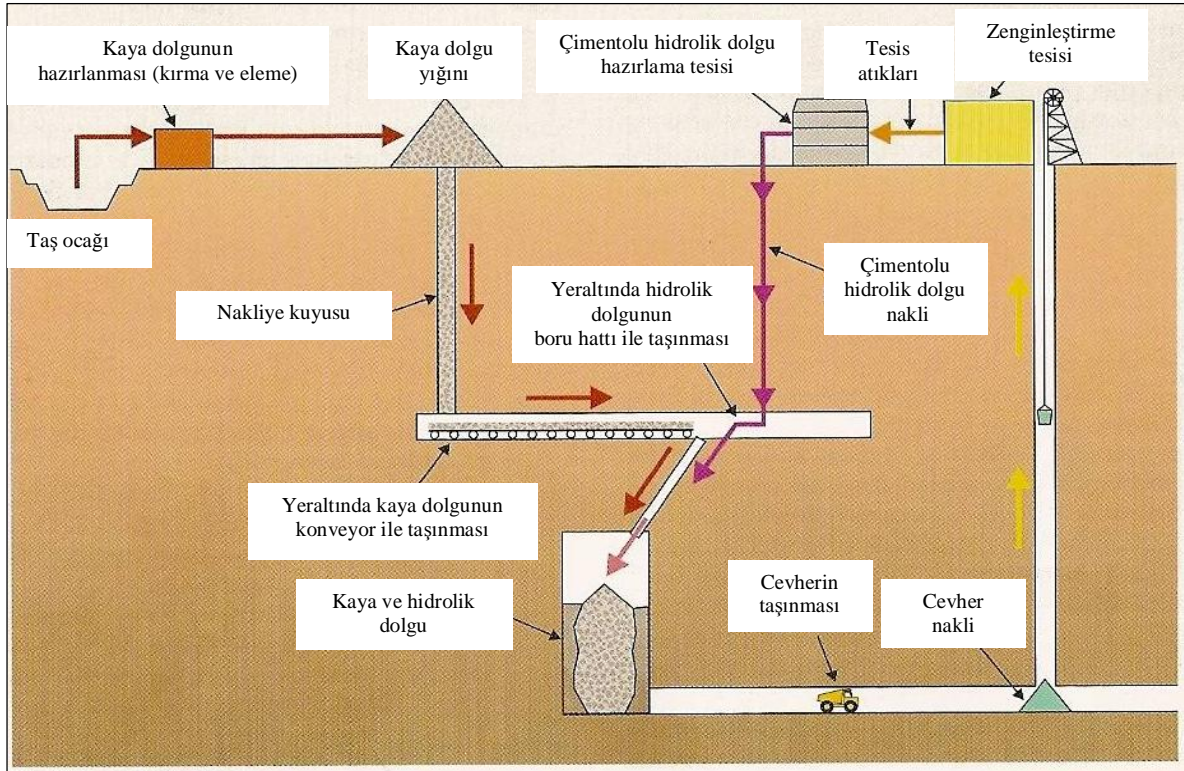
dolgu uygulamasında malzemenin taşocağı vb. yerlerden temin edilmesi, maliyetini önemli oranda artırmaktadır. Ancak, aynı çimento oranında diğer dolgu yöntemlerine kıyasla dayanım kazanımı oldukça yüksektir (Yılmaz, 2003).

Hidrolik dolgu, malzemenin su ile nakli, üretilen yerin doldurulması, fazla suyun katı malzemedan ayrışması ve sertleşmesi esasına dayanır. Hidrolik dolgu yönteminde kullanılan malzemenin tane boyu dağılımı, dolgunun yeraltına nakliyesi ve yerleştirilmesi sonrası fazla suyun drenajı açısından önemlidir. Bu nedenle hidrolik dolguda genellikle sınıflandırılmış atıklar kullanılmaktadır (Erçikdi, 2009; Yılmaz, 2003). Hidrolik dolgu, yeraltında oluşturulan açıklıklara yerleştirildiğinde dolgu içindeki fazlalık su, drenaj yoluyla uzaklaştırılmaktadır. Bunun için genellikle dolgu içerisine yerleştirilen gözenekli borulardan oluşan bir drenaj sistemi kullanılmaktadır. Hidrolik dolguda tesis edilen barikatın sağlamlığı, sıvılaşma riski veya zayıf drenaj nedeniyle oluşabilecek göçüklerin engellenmesi bakımından önemlidir (Grice, 2005; Erçikdi, 2009).

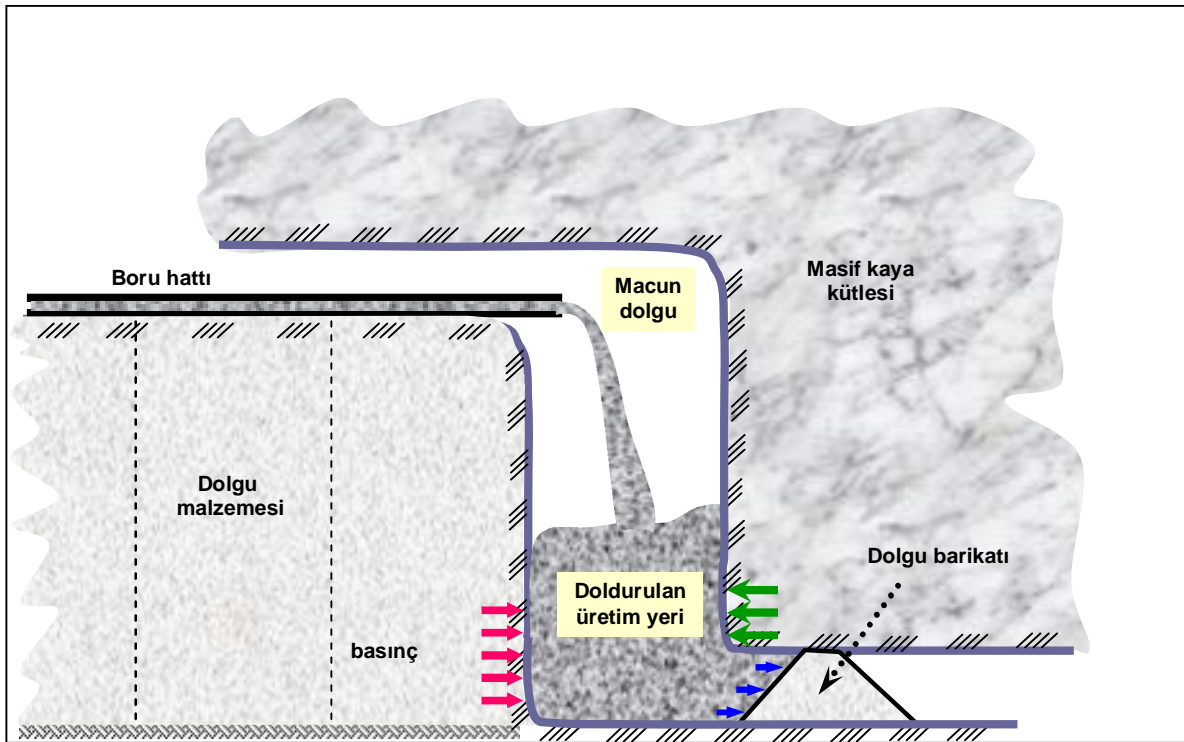
Macun dolgu, oldukça kompleks bir malzeme olup yüksek yoğunluklu tesis atıkları (tane boyut dağılımı ve özgül ağırlığına bağlı olarak %78-85 katı oranında), dolgunun dayanım kazanımını sağlamak için bağlayıcı, hidratasyon işlemi ve yeraltı üretim boşluklarına istenen kıvamda taşınmasını sağlamak için ilave edilen karışım suyundan oluşmaktadır. Şekil 2 yeraltı madenlerinde kullanılmakta olan macun bileşiminin yapısal görünümünü, Şekil 3 ve (b) ise yeraltı uygulamasını göstermektedir.



Şekil 2. Macun dolgunun yapısal görünümü



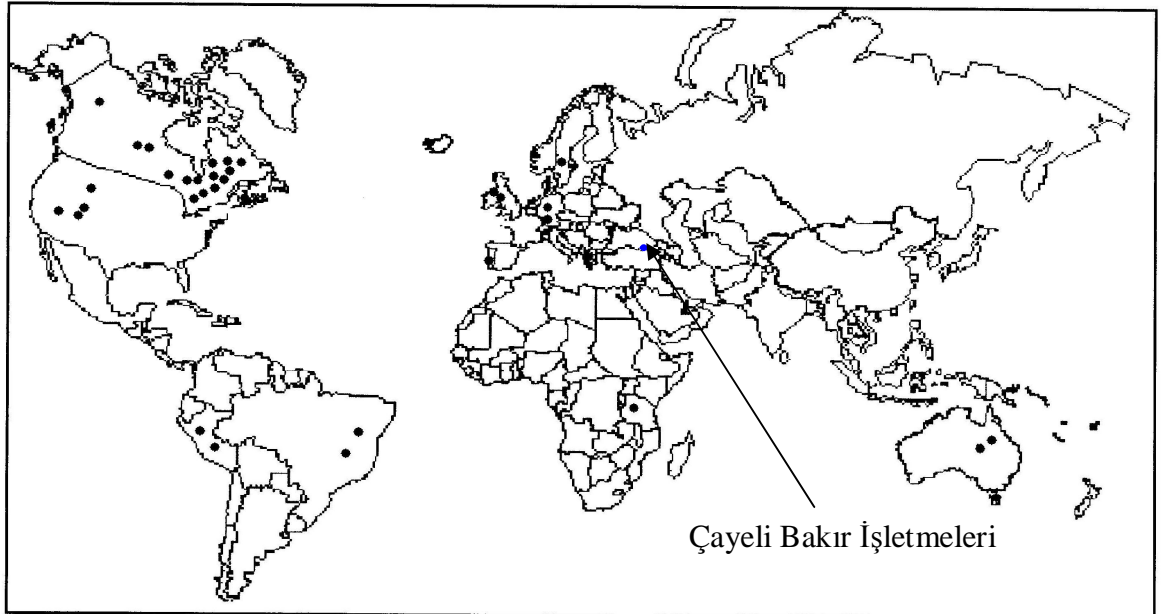
Şekil 3. Yeraltı madenlerinde kaya ve hidrolik dolgu uygulaması (Erçikdi, 2009)



Şekil 4. Yeraltı madenlerinde macun dolgu uygulaması (Erçikdi, 2009)

1.4. Macun Dolgu Yöntemi

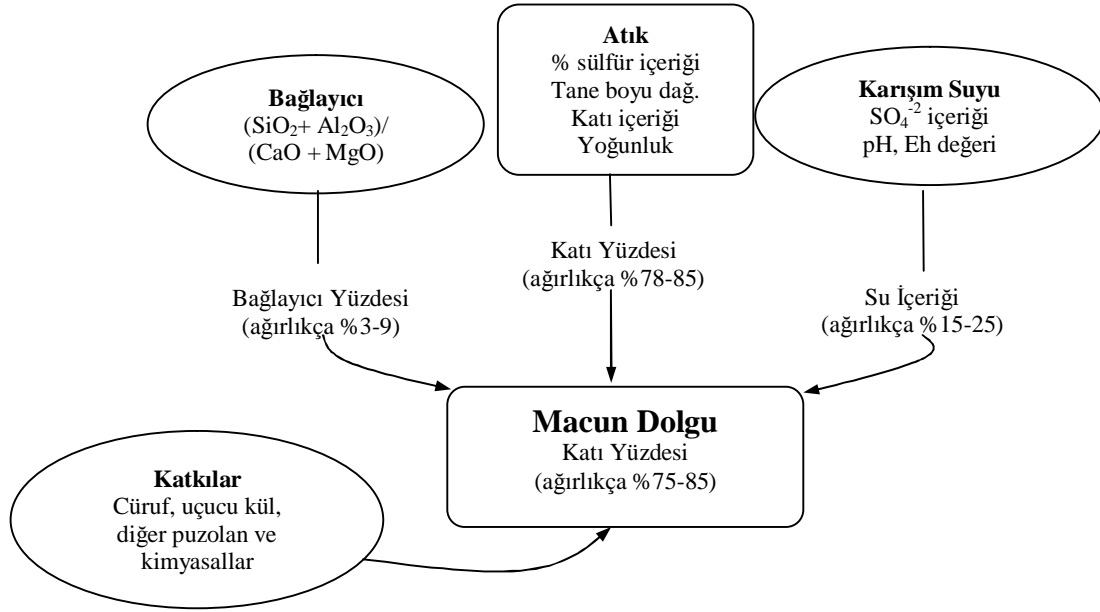
Madencilik endüstrisinde macun dolgu yöntemi oldukça yeni bir teknolojidir. İlk olarak 1980 yılında Grund Madeninde kullanılmış ve başarısından dolayı dünyada yaygın olarak kullanılmaya başlanan dolgu yöntemlerinden bir tanesi olmuştur. Kanada ve Avustralya yeraltı madenciliğinde çok yaygın olan macun dolgu teknolojisi, son yıllarda hem hidrolik ve kaya dolgusuna kıyasla düşük işletme maliyeti hem de cevher zenginleştirme atıklarının tamamına yakınının yeraltına depolanabilir olması ve böylece atık depolama ve rehabilitasyon maliyetlerinin önemli ölçüde azalması nedeni ile günümüzde diğer ülkeler tarafından da tercih edilmeye başlanmıştır (Landriault, 2006). 1980 yılında sadece bir işletmede uygulanan macun dolgu teknolojisi bugün, dünya genelinde başta Kanada ve Avustralya olmak üzere, ABD, Almanya, Peru, Brezilya, İsveç, Güney Afrika, Tanzanya, İrlanda ve Türkiye’de toplam 30’dan fazla yeraltı madeninde uygulanmaktadır (Şekil 5). Ülkemizdeki kullanımı ise henüz yeni olup 1999 yılında Çayeli Bakır İşletmesi’nde uygulanmaya başlanmıştır (Erçikdi, 2009).



Şekil 5. Dünyada macun dolgu teknolojisinin uygulandığı yerler

Macun dolgu, atık malzeme (ağırlıkça katı oranı %78-85), bağlayıcı ve su karışımı olarak ifade edilmektedir (Şekil 6). Karışımda kullanılan katı malzeme, cevher zenginleştirme tesisinden elde edilen atık malzemelerdir. Macun dolgunun yeraltına

borularla belli bir akışkan kıvamda taşınabilmesi ve sürtünme nedeniyle oluşabilecek aşınma problemlerini önlemek ve su tutmayı sağlamak için en az ağırlıkça %15 veya daha yüksek oranda 20 μm altı ince taneli atık malzeme olması gerekmektedir (Erçikdi, 2009; Landriault, 1995). Dolgunun dayanım kazanımını sağlaması için, macun dolguya ağırlıkça %3-8 oranında bağlayıcı ilave edilmektedir. Bağlayıcının hidratasyonu ve dolgunun yeraltına belli bir akışkan formda taşınması amacıyla ilave edilen su, ağırlıkça %15-25 arasında değişmektedir (Kesimal vd., 2002; Yılmaz vd., 2003; Erçikdi vd., 2008).



Şekil 6. Macun dolguyu oluşturan bileşenlerin şematik gösterimi (Benzaazoua vd., 2002).

Macun dolgu yöntemi; zemin kontrolü, topukların kazanımında yeraltı tahkimatı ve kes-doldur sistemlerinde çalışma platformu gibi kullanımların olduğu çoğu yeraltı madencilik uygulamalarında bütünleşmiş bir rol oynamaktadır. Macun dolgu, kaya ve hidrolik dolguya kıyasla tesis zenginleştirme atıklarının yeraltında güvenli bir şekilde depolanabilmesine imkan vermesi ve özellikle sülfürlü atıkların atmosferik koşullarda bozunması sonucu oluşabilecek zararlı bileşenleri (asidik maden suyu oluşumu gibi) önlemesi bakımından çevreyi korumakta ve maden ekonomisi üzerinde cevher kazanımını arttırarak maliyetleri azaltmaktadır. Ancak, özellikle sülfürlü atıklardan üretilen macun dolgunun uzun dönemde duraylılığını kaybetme nedenlerinin tam olarak anlaşılabilmesi uygulanmasında zorluklar çıkarmaktadır. Tablo 1’de kaya, hidrolik ve macun dolgu yöntemlerinin özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. Dolgu tipleri ve özellikleri (Yılmaz vd., 2003)

Özellikler	Hidrolik Dolgu	Macun Dolgu	Kaya Dolgu
Katı oranı	% 60-75	% 75-85	% 95-100
Nakliye sistemi	sondaj kuyusu ve boru hattı	sondaj kuyusu ve boru hattı	nakliye kuyusu ve mobil ekipmanlar
Bağlayıcı	çimentolu veya çimentosuz	yalnızca çimentolu	çimentolu veya çimentosuz
Bağlayıcı miktarı	%3-11	%3-8	%1-10
Su/çimento oranı	w/c oranı yüksek, dayanım düşük	w/c oranı yüksek, dayanım yüksek	w/c oranı düşük, dayanım yüksek
Tane boyu	> 20 µm (≥ % 90)	< 20 µm (≥ % 15)	> 20 cm
Yerleştirme hızı	100-200 ton/saat	50-200 ton/saat	100-400 ton/saat
Ayrışma (segregation)	mevcut	yok	mevcut
Dayanıklılık	düşük	düşük veya yüksek	yüksek
Barikat dizaynı	pahalı	ucuz	gerekli değil
Drenaj	su miktarı fazla	gözardı edilebilir	önemsiz
İlk yatırım giderleri	düşük	yüksek	yüksek
İşletme giderleri	orta (8.20 \$/ton)	düşük (5.10 \$/ton)	yüksek (9.70 \$/ton)
Avantajları	<ul style="list-style-type: none"> • altyapı tesislerinin kurulum ve işletiminin nispeten kolay olması, • malzeme temini kolay, • kullanımının yaygın olması • iyi bir nakliye dizayn sistemi ile pompa ve boru maliyetlerinin azaltılabilmesi, 	<ul style="list-style-type: none"> • aynı çimento oranında hidrolik dolguya kıyasla dayanım kazanımı yüksek, • sülfürlü atıkların yeraltında depolanması sağlama, • yerüstü atık depolama ve rehabilitasyon maliyetlerini azaltma, • drenajla birlikte bağlayıcı kaybının düşük olması 	<ul style="list-style-type: none"> • dolgu hazırlamanın kolay olması, • yüksek dayanım elde edilebilmesi • Su ihtiyacının düşük olması ve yeraltında su drenajına gerek olmaması
Dezavantajları	<ul style="list-style-type: none"> • fazla suyun uzaklaştırılması (drenaj) işlemi maliyeti arttırmakta, • çimentonun bir kısmının drenaj ile birlikte ortamdaki uzaklaşması dayanım kazanımını azaltmakta, • yeraltındaki ateşlemeler nedeniyle sivilaşma ve barikat yıkılması problemlerinin oluşması, 	<ul style="list-style-type: none"> • pompalama ve susuzlandırma işlemlerinin pahalı olması, • ileri teknoloji gerektirmesi, • yeraltındaki ateşlemeler nedeniyle sivilaşma ve barikat yıkılması problemlerinin oluşması, • Sülfürlü atıkların oksidasyonu nedeniyle sülfat atak oluşması ve uzun dönemde dayanım kaybının görülmesi 	<ul style="list-style-type: none"> • malzeme temininin taşocağı vb. yerden temini nakliye maliyetini arttırmakta, • ayrışma nedeniyle yeraltında (in-situ) porozite ve gözenekliliğin fazla olması

1.4.1. Macun Dolgu Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

Yeraltı maden ocaklarında macun dolgu kullanımının bazı avantajları ve dezavantajları vardır. Macun dolgunun avantajları şu şekilde sıralanabilir;

- Çevresel açıdan zararlı sülfürlü atıkların tamamına yakınının yeraltında depolanmasını sağlamakta ve böylece yerüstü atık depolama ve rehabilitasyon maliyetlerini önemli oranda azaltmaktadır.
- Aynı bağlayıcı oranında, hidrolik dolguya kıyasla nispeten daha yüksek dayanım kazanımı sağlamaktadır.
- Yüksek mukavemet değerlerine daha erken sürede ulaşıldığından (daha hızlı tahkimat sağladığından), madencilik işlemleri kısalmaktadır.
- Yeraltına yerleştirilen macun dolgu içindeki ince malzemenin uzaklaştırılmasına gerek olmadığından daha temiz bir işlem yürütülmektedir.
- Kaya ve hidrolik dolgu yöntemlerine kıyasla işletme maliyetleri düşüktür.
- Boru hattı ile yeraltına taşınması, klasik taşıma sistemlerinin (konveyör ve mobil ekipmanlar) yol açtığı problemleri (tahkimatın zarar görmesi ve trafik problemleri gibi) azaltmaktadır.
- Dolgu malzemesi olarak kullanılacak diğer doğal kaynakların (kaya, agrega, çakıl vb.) tüketimi azalmaktadır.

Macun dolgunun dezavantajları ise şu şekilde sıralanmaktadır.

- İlk yatırım maliyetleri yüksektir.
- Yüksek katı yoğunluğu nedeniyle pahalı susuzlandırma ekipmanlarına ve teknik hassasiyete ihtiyaç duyulmaktadır.
- Macun dolguyu yeraltına nakletmek için yüksek pompa basıncı gerekmektedir. Bu ise pompa bakım ve enerji maliyetlerini artırmaktadır.
- Sülfürlü atıkların su ve oksijen varlığında oksidasyona uğraması macun dolgu performansını olumsuz etkilemektedir.
- Tane boyu, yoğunluk, özgül ağırlık ve su miktarındaki değişikliklerde dolgunun yeraltına nakliyatında problemler oluşabilmektedir.
- Teknolojinin yeni olması nedeniyle kalifiye elemana ve büyük çapta mühendislik tasarımına gereksinim duyulmaktadır.

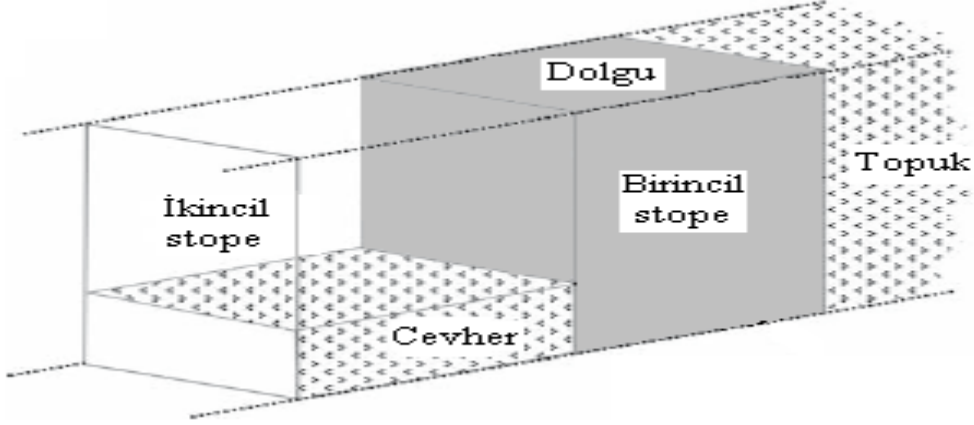
1.5. Macun Dolgu Dizaynında Önemli Faktörler

1.5.1. Dayanım ve Duraylılık

Tesis atıklarının dolgu içindeki davranışı malzemenin bir bütün halindeki özellikleri (fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikler) ile etkilenmektedir. Katıların çökmesi, konsolidasyon ve kuruma dolgu davranışını etkileyen en önemli parametrelerdir. Bu üç faktör dolgunun gözeneklilik veya boşluk miktarı ve katıların yoğunluğuna bağlıdır. Ayrıca dolgu suya doyduktan sonra dolgunun yerinde duraylılığına da tesir etmektedir (Kesimal vd., 2002; Yılmaz, 2003). Macun dolguda kullanılan tesis atıkları, bağlayıcı reaksiyonunu etkileyebilecek bazı (pirit gibi) mineraller içerebilir ve dolgu içindeki bu mineraller dayanımı geciktirici veya azaltıcı etki göstermektedir. Macun dolgu dizaynında göz önünde bulundurulması gereken en önemli faktörlerden biri, hazırlanacak karışımın kısa ve uzun dönem mekanik özelliğidir. Yeraltı üretim boşluklarına yerleştirilen macun dolgunun dayanım ve duraylılığı, yan odaların üretimi esnasında çalışanların ve ekipmanların emniyeti ve cevher seyrelmesini önlemesi bakımından büyük önem teşkil etmektedir. Çünkü yeraltında meydana gelecek göçükler çevresel problemlere, iş gücü kaybına ve üretim veriminin azalmasına neden olmaktadır. Belli bir kür süresi sonunda dayanım kazanan macun dolgunun mekanik performansı, uygulamasının ucuz ve maden işletmelerinde rutin ve kolay bir şekilde uygulanabilir olmasından dolayı genelde tek eksenli basınç testi ile değerlendirilmektedir. Günümüzde gelişen teknoloji ve yeraltı uygulamalarındaki gereksinimler göz önünde bulundurularak, macun dolgunun mekanik performansını değerlendirmek için üç eksenli basınç dayanımı testi ve makaslama dayanımı testi de uygulanmaya başlanmıştır. Ancak üç eksenli basınç dayanımı testi ve makaslama dayanımı testi daha çok bilimsel çalışmalarda uygulandığından pratikteki uygulamasından dolayı literatürde macun dolgunun tek eksenli basınç dayanımı sonuçları standart olarak kabul edilmektedir.

Yeraltı üretim boşluklarına yerleştirilen macun dolguda istenen tek eksenli basınç dayanım değerleri, dolgunun işlevine göre farklılık göstermektedir. Erken kür sürelerinde, macun dolgunun sıvılaşma riskini azaltmak ve macun dolgu barikatlarının zarar görmesini engellemek için yeraltına yerleştirilen dolgunun en az 0,15 MPa dayanım kazanması gereklidir (Erçikdi vd., 2008). Üretim yöntemi olarak kes-doldur ve arakatlı kazı metodunun uygulandığı yeraltı madenlerinde, birincil üretim odasına yerleştirilen macun

dolgunun ikincil odanın üretimi ve dolgu ile doldurulması işlemleri tamamlanıncaya kadar geçen sürede kendi stabilitesini sağlaması gerekmektedir (Şekil 7). Bu amaçla yerleştirilen dolgunun 28 günlük kür süresi sonunda en az 0.7 MPa'lık dayanım kazanması gerekmektedir (Erçikdi, 2009).



Şekil 7. Yeraltı üretim boşluklarında macun dolgunun işlevi

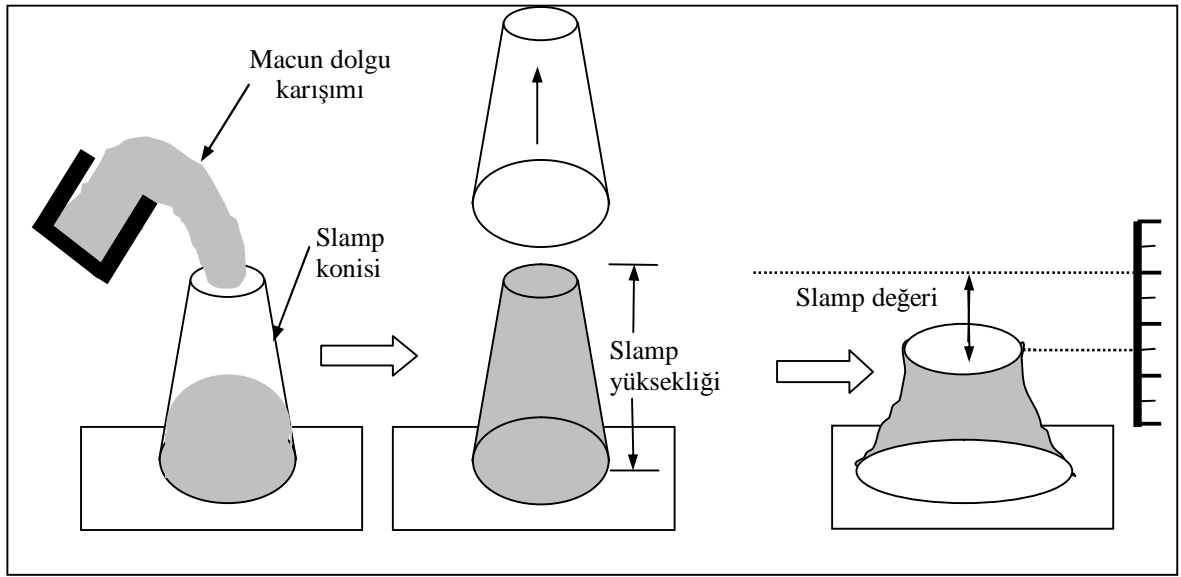
Macun dolgunun tavan tahkimatı sağlaması amacıyla yeraltı üretim boşluklarına yerleştirilmesi durumunda ise dolgunun en az 4 MPa'lık bir dayanıma sahip olması gerekmektedir (Grice, 1998). Macun dolgunun erken kür sürelerinde gereken dayanımı kazanması, işçi ve ekipmanların macun dolgu yakınında veya gerektiğinde üzerinde çalışmalarına imkan vererek bekleme süresini kısaltmakta ve üretimin hızlanmasını sağlamaktadır. Macun dolgunun yeraltındaki konumuna bağlı olarak gereken dayanım değerleri gelişmiş bir teknoloji ve iyi bir mühendislik uygulamasıyla elde edilebilir.

1.5.2. Reoloji

Atık malzemenin reolojik özellikleri dolgunun taşınabilirliği açısından önemli bir parametre olup malzemenin akışkanlık özelliğini ifade etmektedir. Yerüstü macun dolgu tesisinde hazırlanan karışımın boru hattı ile yeraltı üretim boşluklarına taşınabilmesi için belirli bir akışkanlığa sahip olması gerekmektedir. Başarılı ve ekonomik bir dolgu nakli, minimum enerji ile maksimum oranda katı malzeme içeren karışımın yeraltı üretim boşluklarına yerleştirilmesi ile mümkün olabilmektedir. Ancak katı oranının artması, karışımın akışkanlığını azaltmakta, boru hattında sürtünme kayıplarına ve tıkanmalara

sebebiyet vererek pompa maliyetlerini artırmakta, bunun sonucu olarak da dolgu nakliye verimini düşürmektedir (Huynh vd., 2006). Bu nedenle macun dolgu dizaynında göz önüne alınması gereken en önemli faktörlerden birisi, hazırlanacak karışımın reolojik özelliğinin belirlenmesi işlemidir (Eçikdi, 2009). Atık malzemenin reolojik özellikleri reolojik indeks testleriyle belirlenmektedir. Reolojik indeks testleri; su tutma, oturma ve çimentosuz bir malzemenin koloidal özelliklerini belirlemek için dizayn edilen değişik slamp testlerinden oluşmaktadır.

Macun dolgunun kıvamı, çoğu kez onun slamp değeri olarak belirtilmektedir. Slamp, bir karışım malzemesinin konik şeklindeki kaygan bir kalıptan serbest bırakıldığında boydaki düşmenin bir ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. Slamp değeri, tipik olarak macun dolgu uygulamalarında 6-10 inch arasında değişmekte olup 12 inch yüksekliğinde konik test aletiyle belirlenmektedir (Şekil 8).



Şekil 8. Slamp ölçümünün şematize gösterimi

Slamp, bir malzemenin kıvamını ifade etmekte olup taşınabilirliği açısından önemlidir. Genel olarak oluşturulan macun dolgu karışımlarını kıvam yönünden üçe ayırmak mümkündür. Bunlar Tablo 2’de özetlenmiştir. Şekil 9’da üç farklı akışkanlığa sahip macun dolgu örneğinin slamp değerleri verilmiştir.

Tablo 2. Dolgu karışımlarının slump özellikleri

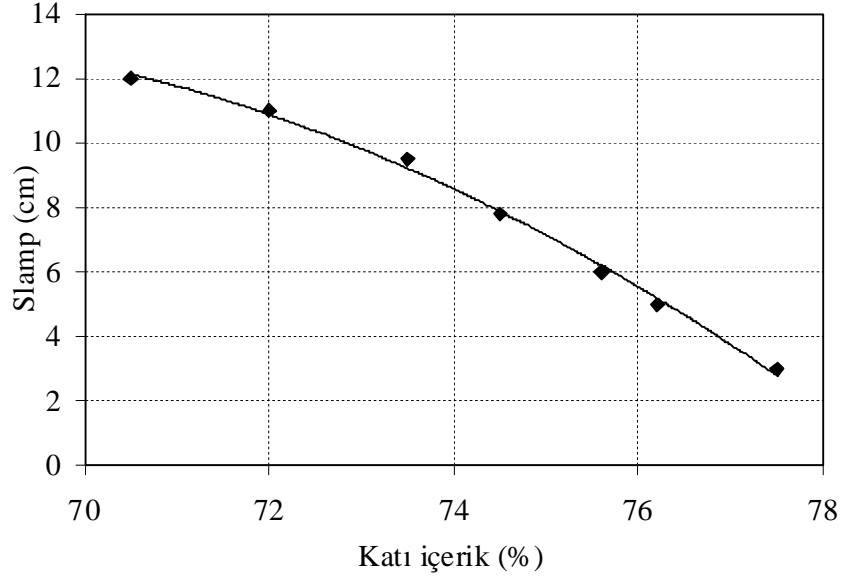
Özellikler	Düşük	Orta	Yüksek
Su/çimento oranı	0.3-0.5	0.45-0.65	0.6-1.0
Slamp, cm	< 6.5	6.5-17.5	17.5-25
Dış görünüş ve diğer özellikler	El ile yoğrulduğunda çimento hamuru ele yapışır	Karışım düşük kıvama nazaran daha fazla su içerir	Uygulamada pompa ile nakledilecek karışımlardır



Şekil 9. Slump değeri yüksek (a), normal (b) ve düşük (c) dolgu

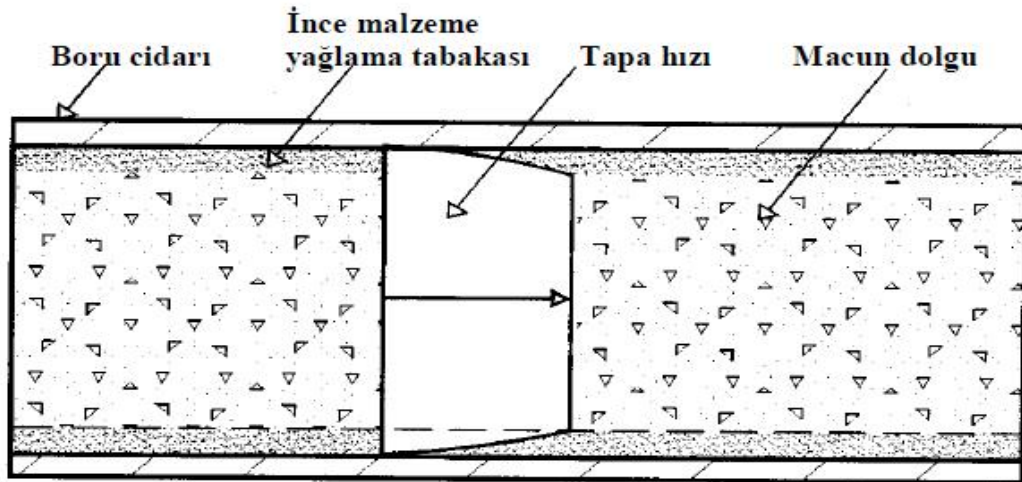
Macun dolgu karışımında slamp ile katı içerik arasında bir ilişki vardır. Yani dolgu karışımının slamp değeri arttıkça malzeme içindeki su oranı artar ve katı içerik azalır (Şekil 10). Bu durumda macun dolgu boru hattı ile yeraltına nakledilirken çok güçlü bir pompa gücüne ihtiyaç duyulmamaktadır. Ancak bünyesinde fazla su bulunduran karışımın kür süresi uzamakta ve dolgu dayanım ve duraylılığı azalmaktadır. Bu nedenle macun dolgu karışımlarında su:çimento oranını azaltmak için akışkanlaştırıcı kimyasallar kullanılarak malzemenin yeraltına nakliyesi gerçekleştirilmektedir. Su:çimento oranının azaltılması, dolgu mikro yapısını (boşluk ve gözeneklilik) iyileştirerek dayanım ve duraylılığını artırmakta ve dolgunun erken kür sürelerinde sıvılaşma riskini azaltmaktadır (Kesimal vd., 2005; Erçikdi vd., 2008).

İstenilen özellikte bir dolgu üretmede kullanılacak malzemelerin uygunluğunu belirlemek için atık malzeme karakteristiklerinin incelenmesi gerekmektedir. Macun dolgu karışımlarının içinde 20 μ m altı malzeme miktarının ağırlıkça % 15 olması gerektiği ifade edilmektedir (Yılmaz, 2003). Macun akış özelliklerini önceden tahmin etmede bir dizi belirsizlik yüzünden, akış esnasında doğru basınç derecelendirme ölçümleri yapmak için tam ölçekli kapalı devre pompalama testlerinin yapılması gerekmektedir. Macun dolgu hazırlandıktan sonra, uygun bir boru hattı ve beton pompası ile yeraltı üretim yerlerine, istenilen dayanım değerlerinde ve en ekonomik şekilde pompalanmaktadır.



Şekil 10. Macun dolguda katı içerik ve slamp arasındaki ilişki

Macun dolgu boru hattı boyunca taşındığında bir tapalı akış meydana getirmektedir. Tapalı akış şartlarında doğal olarak oluşan ince taneli halka düzeni, boru cidarı boyunca yağlama tabakası gibi hareket ederek, borudaki akış direncini ve aşınmaları azaltmaktadır. İri malzeme doğal olarak borunun merkezine doğru zorlanmakta ve ince malzeme taşıyıcısı içinde nakledilmektedir (Şekil 11). Bu tabii olay çok iri malzemeyi macun akış özelliğine sahip bir sıvı malzeme tarafından nakledilmesine imkan sağlamaktadır (Kesimal vd., 2003).



Şekil 11. Tapalı akışın hız profili

Macun dolgu, belirli bir ön gerilmeye ulaşıncaya kadar akışkan özellik göstermez. Bu nedenle bir ön gerilmeye ihtiyaç duyulmaktadır. Ön gerilme, akışkan tanelerinin statik sürtünmesini yenmesi için gerekli basınçtır. Bu basınca ulaşıldığında macun dolgu akışkan özellik gösterir. Bir macunun akış hızı 0,1-1,0 m/sn arasında değişmektedir. Akış özellikleri ince tane içeriğine, nakliye şekline ve partiküllerin mineralojik özelliklerine bağlıdır. Macun dolguyu yeraltına nakletmek için kullanılan boru çapı genellikle 100-200 mm arasında değişmektedir ve boru çapının artmasına bağlı olarak sürtünme direnci azalmaktadır (Yılmaz, 2003).

1.5.3. Ekonomi

Macun dolgu dizaynında göz önüne alınması gereken en önemli faktörlerden bir tanesi de hazırlanacak karışımın ekonomik olmasıdır. Macun dolgu sistemi, kaya dolgu ve hidrolik dolgu sistemlerine göre daha yüksek bir teknoloji gerektirdiğinden ilk yatırım maliyetleri yüksektir. Macun dolgu tesisi, genel olarak etkin susuzlandırma ekipmanları, beton pompa teknolojisi, çimento ve karışım tesisleri, dolgu nakliyesinde kullanılan boru hattı ve tüm tesis için bilgisayar kontrol sisteminden oluşması yatırım maliyetlerini yükseltmektedir. Ancak son yıllarda gelişen teknolojiyle birlikte susuzlandırma ve beton pompa teknolojisindeki yeniliklere bağlı olarak ilk yatırım maliyetleri nispeten azalmaya başlamıştır.

Macun dolgu işletme maliyeti, toplam maden işletme maliyetlerinin %10-20'sini teşkil etmektedir. İşletme maliyetlerinin en önemli kısmını ise bağlayıcı maliyetleri (ağırlıkça %3-9 bağlayıcı için 2-6 \$/ton) oluşturmaktadır (Erçıkıdı, 2009; Grice, 1998). Yapılan çalışmalar incelendiğinde kural olarak %1 bağlayıcı içeren macun dolgu karışımının tonunun 1 \$'a karşılık geldiği kabul edilmektedir. Bilindiği gibi macun dolgunun dayanım ve duyarlılığını artırmak için karışıma ilave edilen bağlayıcı miktarı arttıkça, işletme maliyetleri olumsuz yönde etkilenmektedir. Ağırlıkça %70 katı ve %9 normal portland çimento içeren hidrolik dolgu karışım örneği 28 günlük kür süresi sonunda %50 ince taneli atık ve %50 alüvyon kum karışımından oluşan ağırlıkça %5 çimento içeren macun dolgu örnekleri ile yaklaşık aynı tek eksenli basınç dayanım değerlerini üretmektedir. Bu nedenle macun dolgu karışımının dayanım ve duraylılığını etkilemeyecek optimum bağlayıcı oranının belirlenmesi, işletme maliyetlerinin azaltılması bakımından oldukça önemlidir (Benzaazoua vd., 2004; Fall ve. Benzaazoua, 2005; Erçıkıdı vd., 2008).

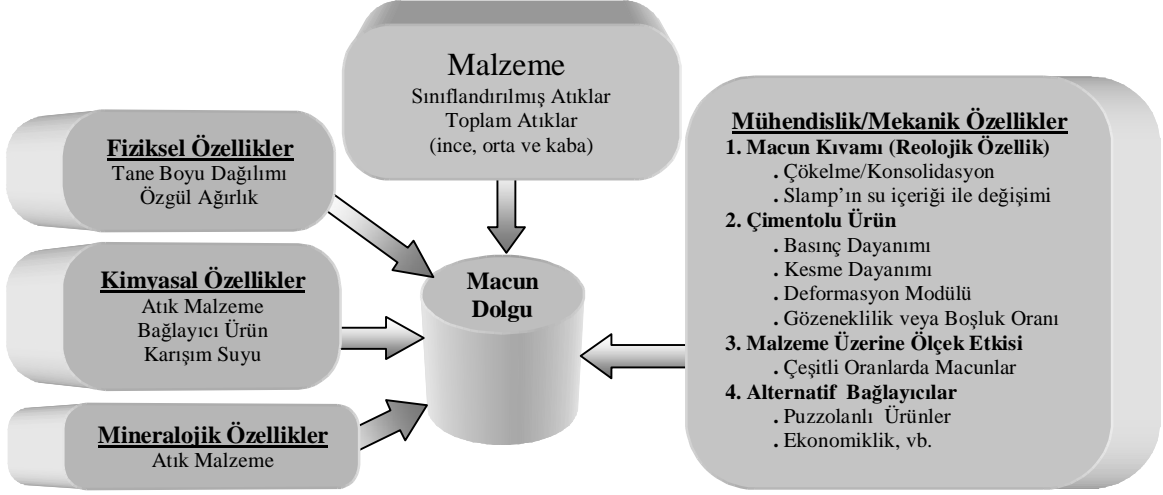
1.6. Çimentolu Macun Dolgu Performansını Etkileyen Faktörler

Çimentolu macun dolgunun davranışını etkileyen reolojik ve mekanik özellikler; atığın fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliklerine, suyun kimyasına ve miktarına, bağlayıcı tiplerine ve bunların oranlarına bağlıdır. Ayrıca, geçirgenlik, tane boyu ve şekli, çimento/su oranı, karışım suyu özellikleri ve kür koşulları dolgu dayanımı üzerinde önemli bir rol oynamaktadır (Kesimal, 2002; Benzaazoua vd., 1999; Yılmaz, 2003). Macun dolgunun kısa ve uzun dönem dayanım ve duraylılığını etkileyen bu faktörler iç ve dış etkenler olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır (Tablo 3).

Tablo 3. Macun dolgunun dayanım ve duraylılığını etkileyen faktörler

İÇ ETKENLER	DIŞ ETKENLER
<p><u>Atık malzeme özellikleri</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Tane boyut dağılımı • Tane şekli • Özgül ağırlık • Mineraloji • Asit ve sülfat etkisi <p><u>Bağlayıcı özellikleri</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Bağlayıcı tipi ve oranı • Mineral katkı maddesi (puzolan) kullanımı • Kimyasal katkı maddesi kullanımı <p><u>Karışım suyu özellikleri</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • SO₄²⁻ konsantrasyonu (mg/l) • pH <p><u>Karışım özellikleri</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Su/çimento oranı • Yoğunluk (%katı oranı) 	<p><u>Yerinde koşullar</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Kür koşulları (sıcaklık, nem) • Konsolidasyon • Drenaj koşulları • Sıvılaşma (liquefaction) riski • Yeraltı suyu koşulları • Yan kayaçla etkileşim (yanal basınçlar, çatlak vb.) • Patlatma kaynaklı titreşimler • Dolgu yerleştirme şekli (kademeli vb.) • Dolgu barikatının sağlamlığı

İç etkenler, dolgunun karışım özellikleri ve dolguyu oluşturan her bir bileşenin (atık, bağlayıcı ve karışım suyu) fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri ile ilişkilidir. Dış etkenler ise macun dolgu ile doldurulan yeraltı üretim boşluğunun yan kayaç ile etkileşimi (yanal basınçlar vb.), konsolidasyon etkisi, drenaj koşulları, patlatma kaynaklı titreşimler, kür koşulları (sıcaklık, nem) vb. ile ilgilidir (Erçikdi vd., 2008; Benzaazoua vd., 2002). Tesis atıklarından uygun bir macun dolgu üretilmesi için yapılması gereken işlemler Şekil 12’de özetlenmiştir.



Şekil 12. Optimum macun dolgu sistemi için yapılması gereken işlemler (Kesimal vd., 2002).

Her bir eleman dolgunun nakliyesinde, dağıtımında, kısa-orta ve uzun dönem kür sürelerindeki dayanımın kazanımında önemli rol oynamaktadır. Genellikle maden operatörleri dolgu işlemi tasarımında su ve atık malzemenin kimyasal bileşimini ihmal etmektedirler (Kesimal vd., 2002).

1.6.1. İç Etkenler

1.6.1.1. Tane Boyu Dağılımı

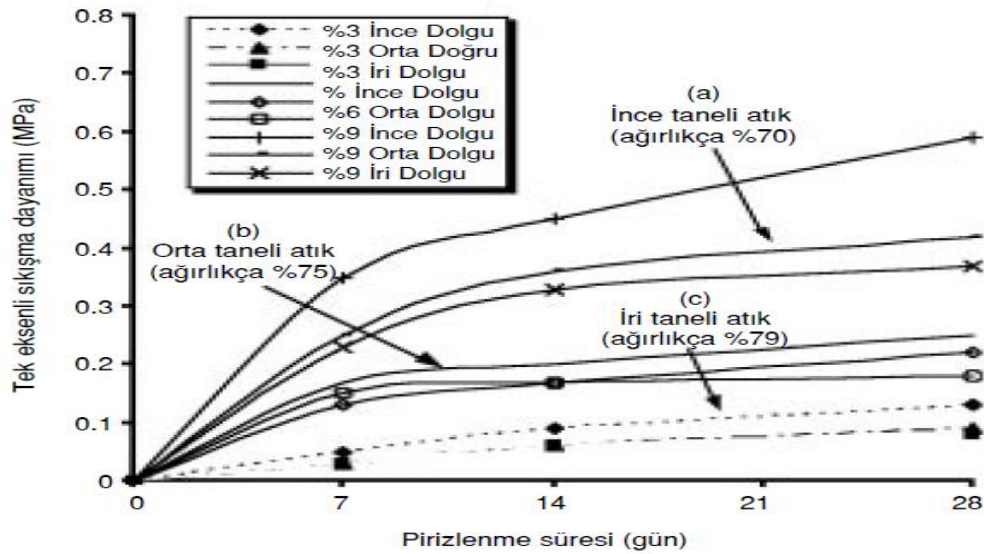
Macun dolgu hazırlanmasında kullanılan katı malzemenin tane boyu dağılımı, dolgu performansını etkileyen en önemli parametrelerden birisidir. Macun dolgunun fiziksel özelliklerini belirlemek için, atık malzemenin tane boyu dağılımı ve tane şeklinin detaylı olarak incelenmesi gerekmektedir. Tanelerin birbiriyle iç içe ve diğer tanelerle uyum içinde olup olmadığının belirlenmesi açısından önemlidir (Yılmaz, 2003). Karışımın macun oluşturması için taneli malzemenin 20 μ m altı içeriğinin ağırlıkça en az %15 veya daha yüksek olması gerekmektedir (Erçikdi, 2009). Dolgu işleminde kullanılan atık malzemenin tane boyu dağılımı, dolgu nakliye işlemini etkilemektedir (Erçikdi vd., 2003; Yılmaz vd., 2005). İyi bir boyut dağılımına sahip olmayan dolgu örneği üretim yerine homojen bir şekilde yerleştirilememektedir. Bunun sonucunda üretim yerinde sıvılaşma potansiyeli oluşacak ve uzun dönemde dolgu dayanım ve duraylılığı düşecektir.

Ayrıca nakliye ve pompalama esnasında daha fazla güç sarf edilecektir. Genellikle karışım içindeki malzemenin optimum bir tane boyu dağılımı sağlaması için her fraksiyon boyutunda malzeme içermesi gerekmektedir (Yılmaz, 2003). Macun dolgu yapımında kullanılacak maden atıkları iri, orta ve ince atıklar olarak sınıflandırılabilir (Kesimal vd., 2002) (Tablo 4).

Tablo 4. Macun dolgu karışımının boyuta göre sınıflandırılması (Kesimal vd., 2002).

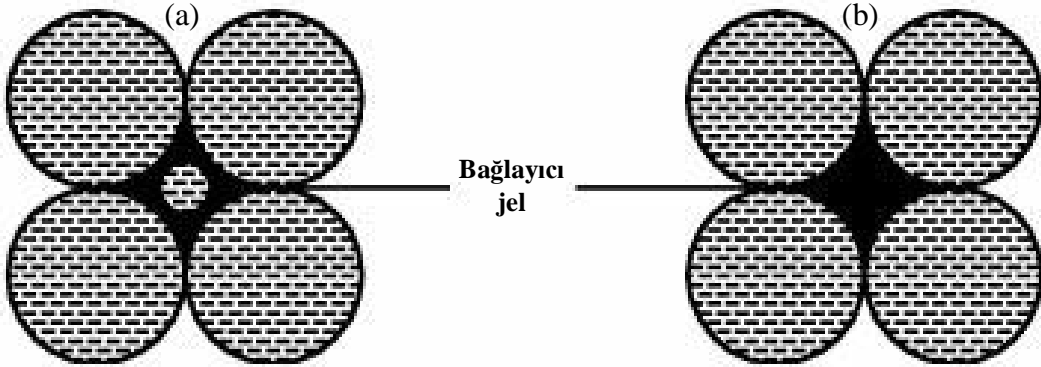
Atık grubu	20 µm altı miktar, (ağ. %)	7" slamp'da katı oranı, (ağ. %)	Açıklama (su/çimento oranına göre)
İri taneli	15-35	78-85	Yüksek dayanımlı dolgu
Orta taneli	35-60	70-78	Nispeten iyi dayanımlı dolgu
İnce taneli	60-90	55-70	Düşük dayanımlı dolgu

İri taneli atık malzeme kullanılarak üretilen macun dolgu karışımlarında verilen bir çimento içeriği için yüksek katı içeriği, iyi bir su/çimento oranını mümkün kılmakta ve hidrolik dolguyla kıyaslandığında yaklaşık iki kat daha fazla dayanım kazancı vermektedir. Orta taneli atıklardan, genellikle iyi bir macun dolgu örneği elde edilebilir fakat yüksek su/çimento oranından dolayı iri taneli atıklardan daha düşük dayanım üretirler. İnce taneli atıklar ise 20 µm altı malzeme içeriği çok olmasından dolayı yüksek su tutma kapasitesine sahiptirler. Ayrıca bu atıklar yeraltı akış nakliyesi için iyi bir macun dolgu karışımı sağlarlar fakat yüksek su/çimento oranında daha az dayanım üretirler (Thomas, 1981; Yılmaz, 2003) (Şekil 13).



Şekil 13. Tane boyutunun tek eksenli basınç dayanımına etkisi (Yılmaz vd., 2003).

İyi bir tane boyu dağılımına sahip olmayan dolgu karışımında daha fazla bağlayıcıya ihtiyaç duyulmaktadır. Dolayısıyla dolgu maliyeti artmaktadır. Diğer taraftan uygun bir dağılıma sahip atıklardan üretilen dolguda ise ince taneler, iri taneler arasındaki boşlukları doldurmak sureti ile düşük çimento içeriklerinde yüksek dayanım vermektedir (Şekil 14). Boyut küçüldükçe yüzey alanı artmakta ve çimento ile iyi bir etkileşim sağlamaktadır. Dolgu malzemesinin yük altındaki davranışı, dolgunun uygunluğunu belirleyen en önemli parametredir. Dolgu malzemesinin az sıkışan ve kolay nakledilebilen özellikte olması istenir. Bu ise, malzemenin düşük yığın boşluk oranına sahip ve tanelerin yük altında kırılmaya karşı sağlam olmasını gerektirir. Boşluk oranı ve tanelerin yığın halde yük taşınması özellikleri birbirine bağlı olmaktadır. Düşük boşluk oranı, iyi bir tane dağılımı ile sağlanabilir. Tanelerin yük taşınması, yığın halindeki malzemenin taneseli özelliklerine bağlı olmaktadır (Yılmaz vd., 2003).



Şekil 14. İyi bir tane boyuna sahip olan (a) ve olmayan (b) malzemenin üretilen dolgu

Macun dolgu malzemesi olarak kullanılacak atık malzemenin tane boyu dağılımı, dolgunun dayanımı, duraylılığı ve yeraltı üretim boşluklarına nakliyesi açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle karışım içindeki malzemenin optimum tane boyu dağılımına sahip olması ve her fraksiyon boyutundaki malzemenin içermesi gerekmektedir. Optimum tane boyu dağılımına sahip olmayan atıkların macun dolgu dayanım ve duraylılığını azalttığı belirtilmektedir (Kesimal vd., 2003).

Optimum tane boyu dağılımını belirlemek ve/veya dolgu malzemelerinin uygun bir boyut ölçümü üzerine literatürde bir bilgi yoktur. Fakat dolgu malzemelerinin tane boyu dağılımlarını belirlemek ve nitelendirmek için genellikle üniformluk katsayısı (C_U) ve

eğrilik katsayısı (C_C) kullanılmaktadır. D_{60}/D_{10} olarak bilinen “üniformluk katsayısı” % 60’dan ince boyut ile % 10’dan ince boyutun (D_{10} = efektif tane çapı) birbirine bölünmesinden elde edilen bir büyüklüktür. İyi bir tane boyu dağılımına sahip dolgu ve/veya zemin malzemeleri için C_U değeri 4-6 ve C_C değeri ise 1-3 arasında değişmektedir (Erçikdi vd., 2003; Yılmaz, 2003). Üniformluk ve eğrilik katsayı değerleri aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanmaktadır (Eşitlik 1 ve 2);

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}}, \quad (\text{üniformluk katsayısı}) \quad (3)$$

$$C_C = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10}) \times (D_{60})}, \quad (\text{eğrilik katsayısı}) \quad (4)$$

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’nun elek altına geçtiği boyut miktarlarını göstermektedir.

Üniformluk katsayısı küçüldükçe, dolgu içindeki suyun süzülme kabiliyeti artar. Fakat dolgu içinde çok fazla miktarda boşluk bulunduğu için uygun bir dolgu olarak nitelendirilemez. “Üniformluk sayısı”nın artmasıyla, boşluklar daha iyi bir şekilde ince malzemeyle dolmuş olduğundan dolgunun yoğunluğu ve yük taşıma kapasitesi artar.

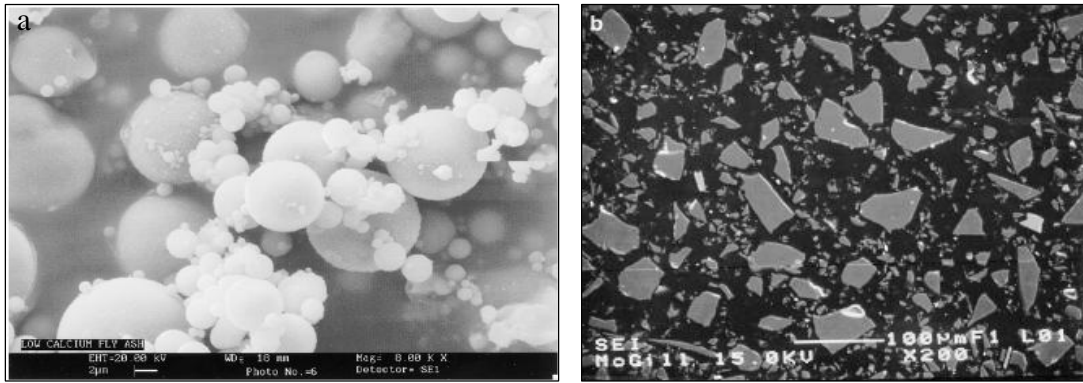
Daha zayıf bir korelasyon ile 20 μm boyutundan daha küçük taneciklerin yüzdeleri nihai boşluk oranını benzer şekilde etkilemektedir. Dolgu malzemesinde maksimum birim hacim ağırlığına ulaşmak için karışım içinde belirli bir ölçüde “ince malzeme” olması gerekmektedir. İnce malzeme miktarının optimum değerden fazla olması halinde, yoğunlukta önemli bir azalmanın olacağı daima göz önünde tutulmalıdır. Dolgu içinde gereğinden daha fazla ince malzeme bulunması, fazla suyun katı tanecikler üzerindeki yüzdürme etkisine benzer etki yaparak, tanecikleri birbirinden uzaklaştırmak yoluyla boşluk oranının artmasına neden olmaktadır.

Boşluk oranı, dolgu malzemesinin derecelenmesiyle yakından ilişkilidir. Minimum boşluk oranı, diğer bir deyişle maksimum birim hacim ağırlığı $C_U = 6-8$ arasında değişmektedir (Yılmaz, 2003).

1.6.1.2. Tane Şekli

Atık malzeme içindeki tane şeklinin macun dolgu dayanımı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Patlatma, kırma ve öğütme işlemlerine tabi tutulan kaya malzemesi genellikle düzensiz veya küresel yapıya sahiptir (Şekil 15). Özellikle köşeli atık malzemeye sahip dolgular bağlayıcı ile iyi bir etkileşime girerek dolgu dayanımına olumlu yönde katkı yapmaktadır. Yapılan bilimsel çalışmalarda, aynı özelliklere sahip dolgu malzemelerinde; tabakalı yapıdaki tanelerin küresel tanelere kıyasla daha uzun sürede çökeldiğini ve çökeltme süresinin dolgunun drenaj, konsolidasyon ve dayanım özelliklerini etkilediği belirtilmiştir. Çimentolu macun dolgu içerisinde birbirine paralel olarak çökelen tabakalı yapıdaki tanelerin birbirleriyle temas yüzeyinin arttığı ve bu nedenle küresel şekilli cam tanelerinden hazırlanan çimentolu macun dolgu karışımına kıyasla daha yüksek makaslama dayanımı ürettiği belirtilmektedir.

Boşluk oranı ve tanelerin yığın halde yük taşıma özellikleri birbirine bağlıdır. Düşük boşluk oranı, iyi bir tane dağılımı ile sağlanabilir. Tanelerin yük taşıması, yığın haldeki malzemenin tanelerle özelliklerine bağlıdır. Tanelerle faktörlerin başında şekil faktörü gelmektedir. Küresel şekilli tanelerin şekil faktörü değeri 1 olarak alınmaktadır ve küresellikten köşeli şekilli tanelere doğru gidildikçe bu değer azalmaktadır. Bir karışımda tanelerin şekil faktörünün yüksek olması halinde çok sayıda tane birbirleriyle temas etmektedir. Temas halindeki taneler birbirleriyle bir yapı oluşturarak, yük iletimi sağlarlar. Böylelikle bu kütlelerin yük altındaki kırılması güçleşir ve sıkışmaya karşı dirençleri artar (Cengiz, 2002).



Şekil 15. Küresel şekilli (a) ve düzensiz şekilli (b) tane yapısına sahip malzeme (temsili)

1.6.1.3. Mineraloji ve Özgül Ağırlık

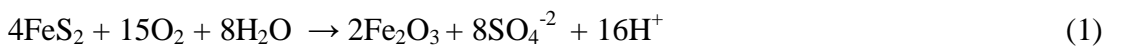
Macun dolgu dayanım ve duraylılığını etkileyen diğer bir önemli faktör atık malzemenin mineralojik bileşimidir. Belirli mineraller dayanım geciktirici, azaltıcı ve uzun dönemde bozucu olarak davranabilirler. Serisit, mika, klorit ve kil mineralleri gibi bünyesinde su tutma özelliği yüksek olan malzemeler macun dolgunun akışkanlığını artırmakta, ancak dayanımını azaltıcı yönde etki yapmaktadır (Kesimal vd., 2005, Erçıkıdı, 2009).

Minerallerin özgül ağırlıklarının farklı olması, dolgu içindeki çökeltme sürelerini, dolgunun nihai yoğunluğunu ve bunlara bağlı olarak dolgunun dayanımını etkilemektedir. Atık malzemenin özgül ağırlığı arttıkça doğru orantılı bir şekilde daha fazla bağlayıcı kullanılmakta ve dolayısıyla dolgu dayanımı artmaktadır. Ayrıca kuvars gibi silisli mineraller dolgunun boru hattı ile yeraltına nakliyesi sırasında boru hattı boyunca bir takım aşınmalara neden olarak pompa performansını etkilemekte ve bakım masraflarını arttırmaktadır.

1.6.1.4. Asit ve Sülfat Etkisi

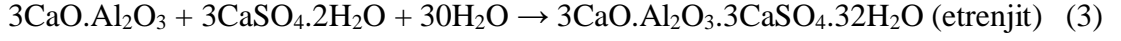
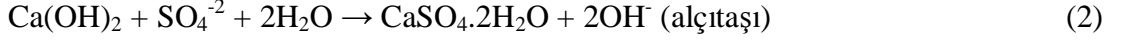
Asit ve sülfat etkisi, beton ve dolgu gibi çimentolu yapılarda hidrasyon ürünlerinin veya çimento bileşenlerinin asit (H^+) veya sülfat (SO_4^{-2}) ile etkileşimidir. Sülfat ve asitlerin beton dayanım ve duraylılığını olumsuz yönde etkilediği bilinmektedir. Macun dolgu malzemesi olarak kullanılan sülfürce zengin atık malzeme, su ve oksijen varlığında oksitlenerek asit ve sülfat oluşturmaktadır. Macun dolguda kullanılan atıkların genellikle ince boyutlu olması ve kür işlemlerinin yeraltında yüksek nemli ortamlarda gerçekleşmesi, sülfürlü minerallerin oksidasyon derecesini artırmaktadır (Erçıkıdı, 2009; Hassani ve Archibald, 1998).

Sülfürlü mineraller su ve oksijen varlığında oksitlenerek asit ve sülfat oluşumuna neden olmaktadır.



Sülfat bileşikleri macun dolgu içindeki kalsiyum hidroksit [$Ca(OH)_2$; simgesi CH] ve trikalsiyum alüminat [$3CaO \cdot Al_2O_3$; C3A] ile reaksiyona girerek alçıtaşı ve etrenjit

oluşturmaktadır. Genleşme özelliğine sahip alçıtaşı ve etrenjit dolgu içinde çatlakların oluşumuna neden olarak dolgu dayanımını ve duraylılığını düşürmektedir (Kesimal vd., 2004; Fall ve Benzaazoua, 2005; Yılmaz, 2003).



Sülfat etkisi, düşük geçirgenliğe sahip dolgu üretilerek veya sülfat etkisine dayanıklı bağlayıcılar kullanılarak kontrol edilebilir.

1.6.1.5. Karışım Suyu

Karışım suyu, macun dolgu kalitesine etki eden önemli bir parametre olup kimyasal bileşimine bağlı olarak hidrasyon işlemini etkilemektedir (Fall ve Benzaazoua, 2005; Erçikdi 2009). Macun dolgu üretiminde genellikle üç tip su kullanılmaktadır. Bunlar; tesis (proses) suyu, musluk suyu ve göl suyudur. Atık bünyesindeki su genellikle toplam karışım suyunun %75-80'ini oluşturmaktadır. Dolgu karışımında proses suyunu kullanmak çevresel yönden daha güvenilir ve uygun olmaktadır. Ancak karışım suyunun kimyasal bileşimi (pH, Ca^{+2} , özellikle SO_4^{-2} içeriği) dolgu performansı açısından önemlidir. Özellikle sülfürlü cevherlerin flotasyon işlemi sonucunda açığa çıkan proses atık suyu çözünebilir sülfat içeriği bakımından oldukça zengindir. Karışıma eklenen musluk suyu proses suyu içerisindeki sülfat oranını genellikle seyreltmektedir.

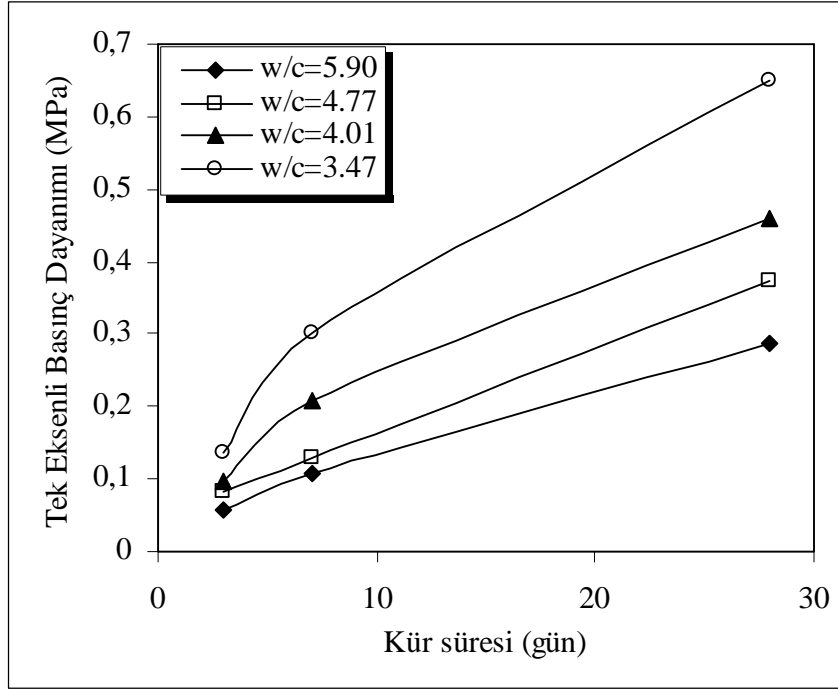
Su içindeki çözünebilir sülfat miktarının macun dolgu dayanımına olan etkisini değerlendirmek amacıyla yapılan deneysel çalışmalar, sülfat konsantrasyonu yüksek su kullanımının, hidrate olmuş sülfatlı bileşenlerin dolgu içerisinde çökmesine neden olduğunu ve sonuçta, dolgu porozitesinin azalarak dayanımın artmasına katkıda bulunduğunu ortaya koymuştur (Ouellet vd. 2007).

Yapılan uygulamalarda macun dolgu hazırlanması esnasında karışım suyunun kimyasal içeriği genellikle ihmal edilmektedir. Ancak yapılan çalışmalar karışım suyunun macun dolgu dayanımı üzerindeki önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir.

1.6.1.6. Su:Çimento Oranı

Macun dolgu karışımının su/çimento oranı, macun dolgunun dayanım ve duraylılığı ve uygulama esnasında macun dolgunun yeraltına nakliyesi açısından oldukça önemlidir. Çünkü yer üstünde hazırlanan macun dolgu yer altı üretim boşluklarına taşınabilmesi için belli bir akışkan kıvamda olması gerekmektedir. Bu nedenle macun dolguya ilave edilen fazla su, macun dolgunun istenen akışkanlığa ulaşmasını sağlamaktadır. Macun dolgunun su/çimento oranı arttıkça macunun yeraltına nakliyesi esnasında pompalama için gereken enerji sarfiyatı düşmekte, borularda meydana gelen aşınma ve tıkanmalar azalmaktadır.

Ancak su/çimento oranının artması, macun dolgu dayanım ve duraylılığını olumsuz yönde etkilemektedir (Şekil 16). Su/çimento oranı arttıkça karışımın porozitesi artmaktadır. Ayrıca yüksek su miktarlarında hidrasyona uğramış çimento, düşük su/çimento oranlarında hidrasyona uğramış çimentodan daha zayıf çimento jelleri oluşturmaktadır (Yılmaz vd., 2003). Karışımın yoğunluğu arttıkça hem karışıma ilave edilen çimento miktarının artması hem de ortamdaki su miktarının azalması nedeni ile dolgunun dayanımı artmaktadır (Kesimal vd., 2005).



Şekil 16. Su/çimento oranının macun dolgu dayanımına etkisi(Kesimal vd., 2005).

1.6.2. Dış Etkenler

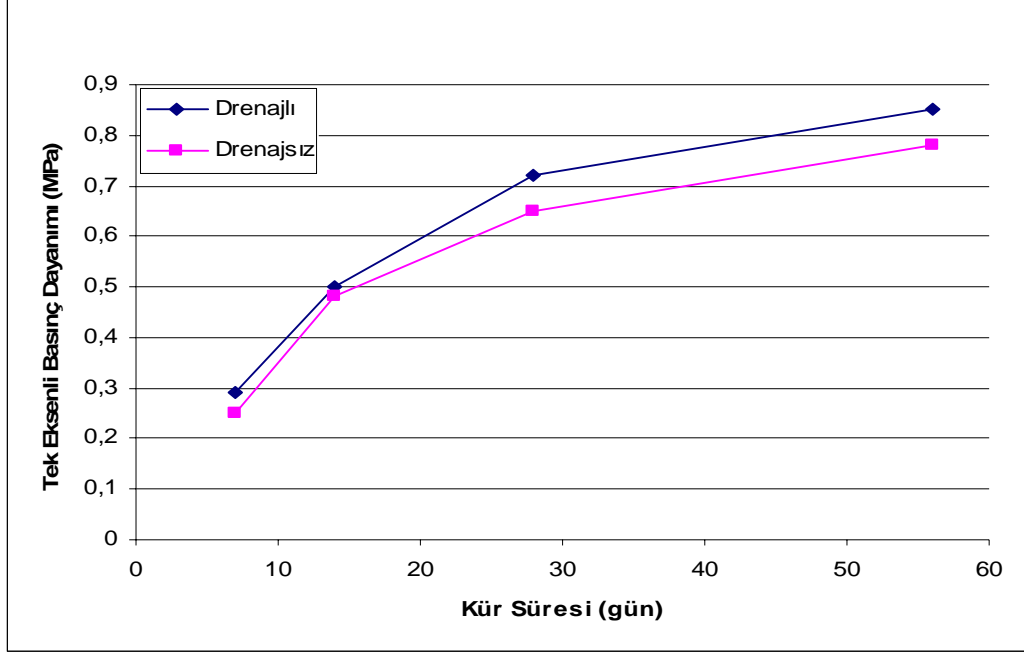
Macun dolgu dayanım ve duraylılığı açısından iç etkenler kadar; sıcaklık, yanıl basınçlar, drenaj, konsolidasyon etkisi ve patlatma kaynaklı titreşimler gibi dış etkenler de macun dolgu dayanım ve duraylılığını etkileyen önemli faktörlerdir.

Sıcaklık normal yapı betonlarında olduğu gibi macun dolguda da dayanım ve duraylılığı etkileyen en önemli dış etkendir. Macun dolgudan yüksek performans almak için sıcaklık +5 ile +30 arasında olmalıdır. Yüksek sıcaklıklarda macun dolgunun su ihtiyacı artar dolayısıyla porozite artacağından dayanım kaybı yüksek olur. Hidratasyon ısısı yükseleceğinden macun prizini daha kısa sürede alır. Bu durum plastik rötre (büzulme) çatlakları artır. Düşük sıcaklığın da macun dolgunun dayanım ve duraylılığına olumsuz etkisi vardır. Düşük sıcaklıklarda macun dolgunun priz alma süresi normal sıcaklıklardaki priz alma süresine göre daha uzundur. Bu da dayanım kazanma hızını yavaşlatacak dolayısıyla üretimin yavaşlamasına neden olacaktır. -5 °C'de karışım suyunun %92'si donar. Macun dolgu priz almadan veya yeterli dayanımı henüz kazanmadığı süre içerisinde karışım suyunun donması, macun dolgunun dayanım ve duraylılığını çok büyük ölçüde azaltmaktadır. Macun dolguda içsel çatlaklar oluşması sonucunda geçirgen boşluklu bir yapı oluşmaktadır. Bu da düşük dayanımlı bir macun dolgu elde edilmesine sebep olmaktadır.

Macun dolgunun dayanım ve duraylılığını etkileyen diğer bir dış etken de drenaj koşulları ve konsolidasyon etkisidir. Yer altı üretim boşluklarına yerleştirilen macun dolgu, drenaj koşullarının macun dolgu içerisindeki karışım suyunun uzaklaşması için uygun olmaması durumunda yüksek porozite ve boşluk oranına sahip olacağından düşük dayanım üretecektir (Benzaazoua vd., 2004; Erçikdi, 2009). Drenaj koşullarının macun dolgunun dayanım ve duraylılığına kısa dönemde etkisi az olmasına karşın uzun dönemde olumsuz yönde etkisi vardır (Erçikdi vd., 2008). İyi bir drenaj koşullarına bağlı olarak kendi ağırlığıyla sıkışarak bünyesindeki suyu uzaklaştıran macun dolgu daha düşük oranlarda gözeneklilik ve boşluk oranlarına sahip olacağından drena olmayan dolgulara göre daha yüksek dayanıma sahip olacaktır (Şekil 17) (Yılmaz vd., 2009).

Macun dolgu ile ilgili yapılan laboratuvar deneylerinde macun dolgunun uygulamadaki drenaj koşulları ve temsili numunelere göre çok daha büyük olan hacim ve ağırlıklarına bağlı konsolidasyon etkisi göz ardı edilmektedir. Dolayısıyla yer altı üretim

boşluklarına yerleştirilen macun dolgu temsili deney numunelerine göre daha yüksek dayanım ve duraylılığa sahiptirler.



Şekil 17. Drenaj koşullarının macun dolgu dayanımına etkisi (Erçikdi vd., 2008)

1.7. Macun Dolgu Uygulamaları

1.7.1. Grund Madeni

Almanya'daki Grund Madeni, macun dolgu teknolojisini uygulayan ilk maden işletmesidir. Macun dolgu üretimi, kurşun-çinko konsantrelerinden elde edilen atıklardan hazırlanmaktadır. Atıklar ilk olarak hidrosiklon ve tikiyerlerde susuzlandırıldıktan sonra vakumlu bant filtresinde filtrelenmektedir. Filtreleme işleminden sonra oluşan filtre keki yaklaşık % 12 nem içeriğine sahip olmaktadır.

Macun dolgu tesisi sürekli karışım sistemi olarak dizayn edilmiştir. Macun dolgu yaklaşık 500 m derinlikte bulunan üretim yerlerine pompalanmaktadır. Dolgu içerisine bağlayıcı olarak portland çimentosu eklenmektedir. Çimentolu macun dolgu karışımı kes-doldur madencilik yöntemi kullanılan üretim yerlerine nispeten yüksek yoğunlukta yerleştirilmektedir. Hacimsel dolgu oranı saatte 30 m^3 olup boru çapı 125 mm'dir (Yılmaz, 2003).

1.7.2. Lucky Friday Madeni

Lucky Friday Madeni'nde (Kuzey Amerika) macun dolgu üretimi, kurşun-çinko flotasyon tesisinden elde edilen atıklardan hazırlanmaktadır. Atıklar öncelikle tikiner ve filtrasyon işlemlerinin etkinliğini artırmak için bir hidrosiklon vasıtası ile kısmen sınıflandırılmaktadır. Tikinerleme ve filtreleme işleminden sonra atıklar sırasıyla ağırlıkça % 65 katı ve % 15 nem oranına sahip olan katı bir konsantrasyon şeklinde üretilmektedir.

Tam otomasyon sistemine sahip tesiste, 200-250 mm'lik bir slamp değerinde ve ağırlıkça % 85 katı oranına sahip macun dolgu karışımı üretilmektedir. Dolgunun yeraltına nakliye mesafesi 1500 m olup boru hattındaki değeri 7 Mpa'dır. Saatte 120 ton macun dolgu üretilerek kes-doldur madencilik yöntemi uygulanan üretim yerlerine gönderilir. Hacimsel dolgu oranı saatte $64 m^3$ 'dür. Boru hattı çapı 100-150 mm arasında değişmektedir (Yılmaz, 2003).

1.7.3. Çayeli Bakır İşletmeleri

Çayeli Bakır işletmeleri ülkemizin en büyük tam mekanize, yer altı bakır ve çinko madenidir. Arakatlı kazı metodu ile üretim yapılmaktadır. Dolgu malzemesi olarak flotasyon tesis atıkları ve hazırlık çalışmalarından çıkan açığa çıkan pasa kullanılmaktadır. Yer altı üretim boşluklarına yerleştirilen toplam dolgunun yaklaşık %70-75'i macun dolgu yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

1999 yılı temmuz ayında devreye giren macun dolgu tesisi, yeraltında cevheri alınan üretim boşluklarını uygun mukavemette cevher zenginleştirme tesisi atığı, su ve çimento karışımından oluşan macun dolgu ile doldurmak amacı ile kurulmuştur. Macun dolgu tesisi, yaklaşık olarak ağırlıkça % 82 katı oranına sahip ve saatte $45 m^3$ 'lük macun üreten bir tesis olarak dizayn edilmiştir. Ağırlıkça % 45-75 katı içeren tesis atıkları, 4" çapında borularla macun dolgu tesisine gönderilmektedir. Atıklar ilk olarak 16m çapındaki bir tikinerde koyulaştırılmakta ve depolama tankına nakledilmektedir. Depolama tankında homojenleştirilen atıklar iki adet vakumlu disk filtre kullanılarak susuzlandırılmaktadır. Bu işlem sonucunda oluşan filtre kekinin katı içeriği ağırlıkça % 84-86'dır. Daha sonra filtre kekinde su ve çimento ilave edilerek homojen bir şekilde karıştırılmakta ve hazırlanan karışım 5" borularla yer altı üretim boşluklarına pompalanmaktadır.

Yer altı üretim boşluklarına yerleştirilen macun dolgunun duraylılığı bozulmadan dayanım kazanması için kalas, hasır, kaya bulonu ve püskürtme beton gibi tahkimat malzemeleri ile dolgu barikatı yapılarak akması önlenmektedir. Dolgu barikatının sağlam olması çok önemlidir. Barikatın yıkılması durumunda üretim kaybının yanı sıra can ve ekipman kaybı yaşanması da büyük olasıdır.

Macun dolgu yer altı üretim boşlukların iki kademedede doldurulmaktadır. Üretim boşluğunun bir kısmı doldurulduktan sonra yaklaşık 1 hafta beklenildikten sonra geri kalan kısım da doldurulmaktadır. Bunun nedeni barikata gelen basıncı azaltmaktır. Üretim boşluğunun doldurulması esnasında alt, üst ve aynı katlarda patlatma yapılmamaktadır. Dolgunun hemen yanındaki topukta ise üretim 28 gün sonra başlamaktadır. Bu şekilde macun dolgunun dayanım kazanması sağlanmakta ve dolgu barikatı üzerine gelen yük azaltılmaktadır.

2.YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Bu tez çalışmasında kesme dayanım parametrelerinin farklı çimento oranlarında ve farklı kür sürelerinde davranışlarını ve bu parametrelerin macun dolgu dayanım ve duraylılığı üzerine etkisini incelemek amacıyla bir dizi deneysel çalışma yapılmıştır. Kesme dayanım parametrelerinin macun dolgunun dayanım değerleri ile karşılaştırılması amacıyla yine farklı çimento oranlarında numuneler hazırlanarak kısa ve uzun dönem kür sürelerinde tek eksenli basınç dayanım değerleri elde edilmiştir. Deneysel çalışmalarda pirit içeriği yüksek flotasyon tesisi atığı, CEM I 42,5R bağlayıcı ve musluk suyu kullanılmıştır.

Deneysel çalışmaların amacı; i) Kesme dayanım parametrelerinin (kohezyon, içsel sürtünme açısı) farklı bağlayıcı oranlarında kür süresine bağlı olarak değişimlerini incelemek (tablo 5); ii) macun dolgu dayanım değerlerinin farklı bağlayıcı içeriklerinde farklı kür sürelerinde belirlenmesi (tablo 6); iii) kesme dayanım parametrelerinin macun dolgu dayanım değerleri ile karşılaştırılması.

Tablo 5. Farklı çimento oranlarında, farklı kür sürelerinde hazırlanan macun dolgu numunelerinin kesme dayanım deneyleri

Bağlayıcı Tipi	Slamp değeri		Çimento (ağ. %)	Kür Süreleri (Gün)							
	(inç)	(cm)		3	7	14	28	56	112	224	360
CEM I 42,5R	7,5	19,05	5.0	3	3	3	3	3	3	3	3
CEM I 42,5R	7,5	19,05	6.0	3	3	3	3	3	3	3	3
CEM I 42,5R	7,5	19,05	7.0	3	3	3	3	3	3	3	3

CEM I 42,5 R: Portland çimento

Tablo 6. Farklı çimento oranlarında, farklı kür sürelerinde hazırlanan macun dolgu numunelerinin tek eksenli basınç dayanımı deneyleri

Bağlayıcı Tipi	Slamp değeri		Çimento (ağ. %)	Kür Süreleri (Gün)					
	(inç)	(cm)		14	28	56	112	224	360
CEM I 42,5R	7,5	19,05	5.0	3	3	3	3	3	3
CEM I 42,5R	7,5	19,05	6.0	3	3	3	3	3	3
CEM I 42,5R	7,5	19,05	7.0	3	3	3	3	3	3

CEM I 42,5 R: Portland çimento

2.2. Atık Malzeme Özellikleri

Deneysel çalışmalarda kullanılan atık malzeme, Çayeli Bakır İşletmeleri macun dolgu tesisinde vakumlu disk filtre çıkışından alınarak laboratuara getirilmiştir (Şekil 18).



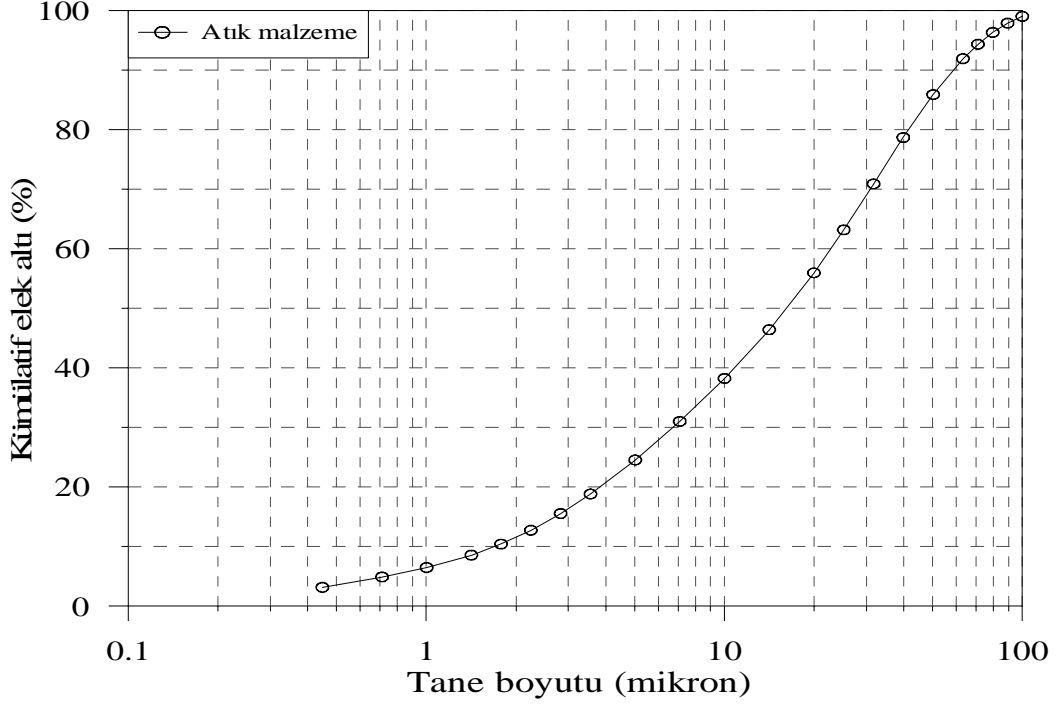
Şekil 18. Deneyslerde kullanılan atık malzemenin laboratuara getirilmesi

Dolgu malzemesi olarak kullanılan atığın tane boyu dağılımı, macun dolgunun dayanım, reolojik ve geoteknik özelliklerine etki etmesinin yanında sülfat atağa karşı direnç göstermesinde de önemli bir rol oynamaktadır. Macun dolgunun yeraltına borularla belli bir akışkan kıvamda taşınabilmesi ve sürtünme nedeniyle oluşabilecek aşınma sorununu önlemek için ortamda koloidal, su tutmayı sağlayacak 20 μm altı en az ağırlıkça %15 malzeme olması gerekmektedir (Brackebusch, 1994).

Atık malzemenin tane boyu dağılımı analizi, Malvern Mastersizer Hydro 2000 MU marka tane boyu dağılımı ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 19). Ölçüm sonuçlarına bakıldığında 20 μm altı malzeme miktarının ağırlıkça yaklaşık %55 olduğu ve atığın orta boyutlu malzeme (malzemenin ağırlıkça %35-60'ı <20 μm) sınıfına girdiği görülmektedir (Landriault, 2001; Kesimal vd., 2003; Erçikdi vd., 2003). Ancak, atık bu hali ile ince boyutlu atık sınıfına oldukça yakındır. Atık malzemenin üniformaluk katsayısı (Cu) 13.41 ve eğrilik katsayısı (Cc) 1.18 değerleri bulunmaktadır. Bu değerler göz önüne alındığında malzemenin iyi bir tane boyut dağılımına sahip olduğu söylenebilir (Annor vd., 2006).

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

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



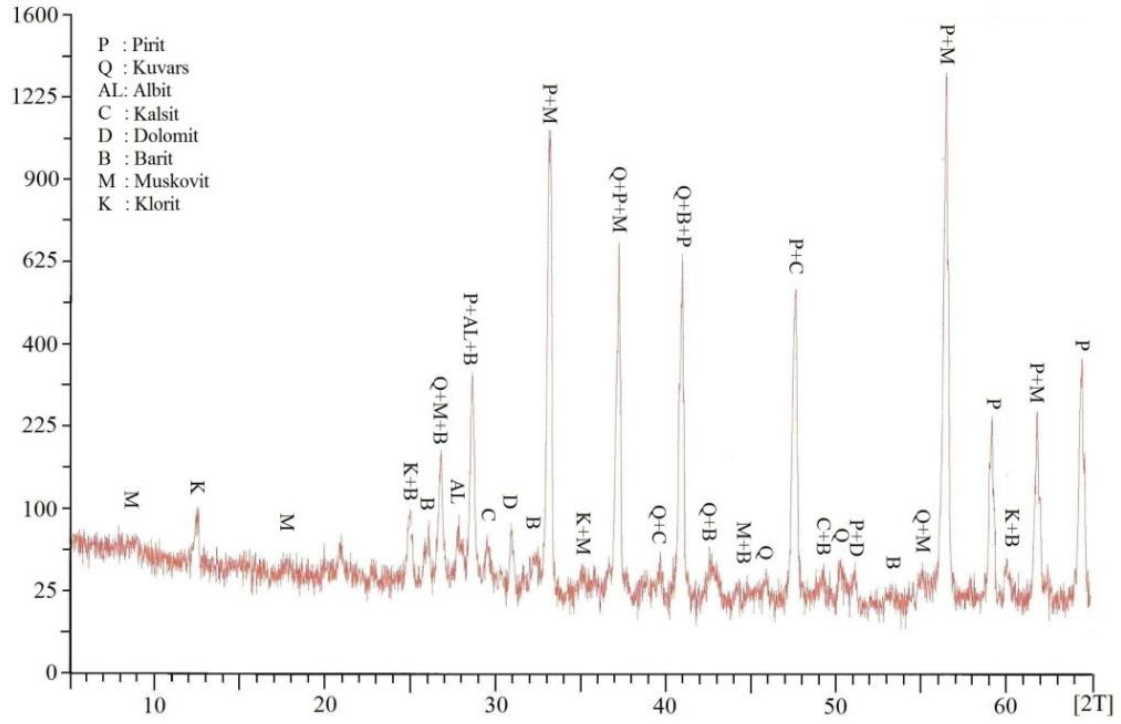
Şekil 19. Atık malzeme tane boyu dağılımı grafiği

Atık malzemenin tane boyu dağılımına bağlı diğer fiziksel özellikleri ve kimyasal analizi ise aşağıda Tablo 7'de verilmiştir. Atık malzemenin kimyasal analizi Kanada'da ACME laboratuvarlarında ICP-AES (Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectroscopy) kimyasal analiz cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Atık malzemenin kimyasal bileşiminden, atığın baskın olarak demir oksit (FeO), sülfür (S^{-2}) ve silisyum dioksit (SiO_2) içerdiği görülmektedir. Atık malzemenin kimyasal analizinden yaklaşık S^{-2} (Sülfid Kükürdü) içeriği %40,70 olarak elde edilmiştir. Buradan atık malzemenin yaklaşık %76 oranında pirit içerdiği görülmektedir. Bu nedenle, uzun dönem kür sürelerinde asit ve sülfat etkileri nedeniyle macun dolgu dayanım ve durabilitesi açısından, atığın problemleri bir malzeme olduğu görülmektedir (Benzaazoua vd. 2002; Kesimal vd. 2004-2005).

Tablo 7. Atık malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal bileşim	Atık (%)	Fiziksel özellikler	Atık (%)
SiO ₂	11.03	Özgül ağırlık	4.13
Al ₂ O ₃	4.11	Özgül yüzey (cm ² /g)	3940
Fe ₂ O ₃	50.62	D ₁₀	1.70
CaO	1.26	D ₃₀	6.76
MgO	0.78	D ₅₀	16.25
TiO ₂	0.12	D ₆₀	22.83
Cr ₂ O ₃	0.01	D ₉₀	58.40
Na ₂ O	0.18	C _u	13.41
K ₂ O	0.41	C _c	1.18
MnO	0.06		
P ₂ O ₅	<0.01		
Kızdırma Kaybı	27.40		
S ⁻ (Sülfid Kükürdü)	40.70		
Toplam Kükürt	42.60		

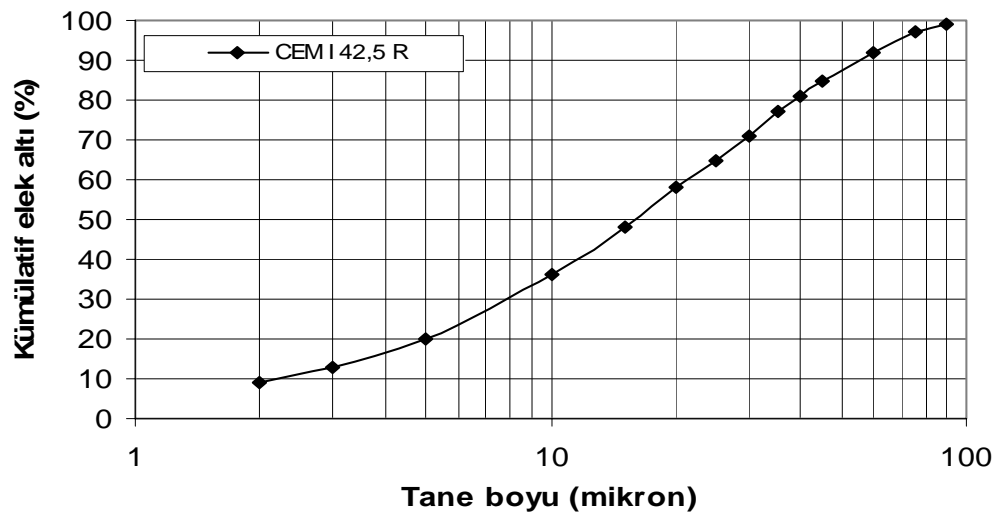
Atık malzemenin karakterizasyonuna yönelik Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Ar-Ge laboratuvarlarında Philips X'pert PW 3040 X-ışınları difraktometre (XRD) cihazı ile yapılan mineralojik analizinden de (Şekil 20) baskın mineralin pirit olduğu görülmektedir. Diğer mineraller ise kuvars, albit, kalsit, dolomit, barit, muskovit ve klorittir. Atık malzemelerde kısa ve uzun dönem dayanım ve uzun dönemde durabilite açısından, atıkların tane boyu dağılımlarının yanında mineralojik içerikleri de (sülfürlü mineraller, kil mineralleri vb.) kritik önem taşımaktadır (Kesimal vd. 2010).



Şekil 20. Atık malzemenin XRD çekim ve mineralojik analiz profili

2.3. Bağlayıcı Malzeme

Deneysel çalışmalarda kullanılan macun dolgu karışımlarının hazırlanmasında Trabzon çimento fabrikasından alınan erken dayanımlı normal Portland çimento (CEM I 42,5R) bağlayıcı malzeme olarak kullanılmıştır. Kullanılan bağlayıcı malzemenin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri şekil 21 ve tablo 8’de verilmiştir.



Şekil 21. Çimento malzemesinin tane boyu dağılımı

Tablo 8’de Boque eşitlikleri kullanılarak yapılan hesaplamalarda CEM I 42.5 R’nin %9 oranında C₃A ve %59,62 oranında C₃S içerdiği görülmektedir (Hurley ve Pritchard, 2005). Macun dolguda yaygın olarak kullanılan çimento portland çimento olmasına rağmen portland çimentosunun hidratasyonu sonucu oluşan portlandit (Ca(OH)₂), ortamdaki sülfat (SO₄²⁻) ile reaksiyona girerek ikincil jips minerali oluşumuna, C₃A da ikincil jips minerali ile reaksiyona girerek etrenjit minerali oluşumuna yol açmakta ve bu minerallerin macun dolgu dayanımını düşürdüğü belirtilmektedir (Ouellet vd., 1998).

Tablo 8. Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mineralojik özellikleri

Kimyasal bileşim	(%)	Fiziksel Özellikler	Değer
SiO ₂	19.75	Özgül ağırlık	3.12
Al ₂ O ₃	5.26	Özgül yüzey (cm ² /g)	4010
Fe ₂ O ₃	2.92	90 µm elek bakiyesi (%)	-
CaO	64.35	45 µm elek bakiyesi (%)	2.93
MgO	1.87	32 µm elek bakiyesi (%)	8.31
TiO ₂	0.23	Mineralojik Özellikler	
Cr ₂ O ₃	0.02	C ₃ S	59.62
Na ₂ O	0.36	C ₂ S	11.71
K ₂ O	0.91	C ₃ A	9.00
MnO	0.07	C ₄ AF	8.89
P ₂ O ₅	0.12		
Serbest Kireç	1.12		
Kızdırma Kaybı	3.90		
SO ₃	2.84		

2.4. Atık Malzemenin Reolojik Özellikleri

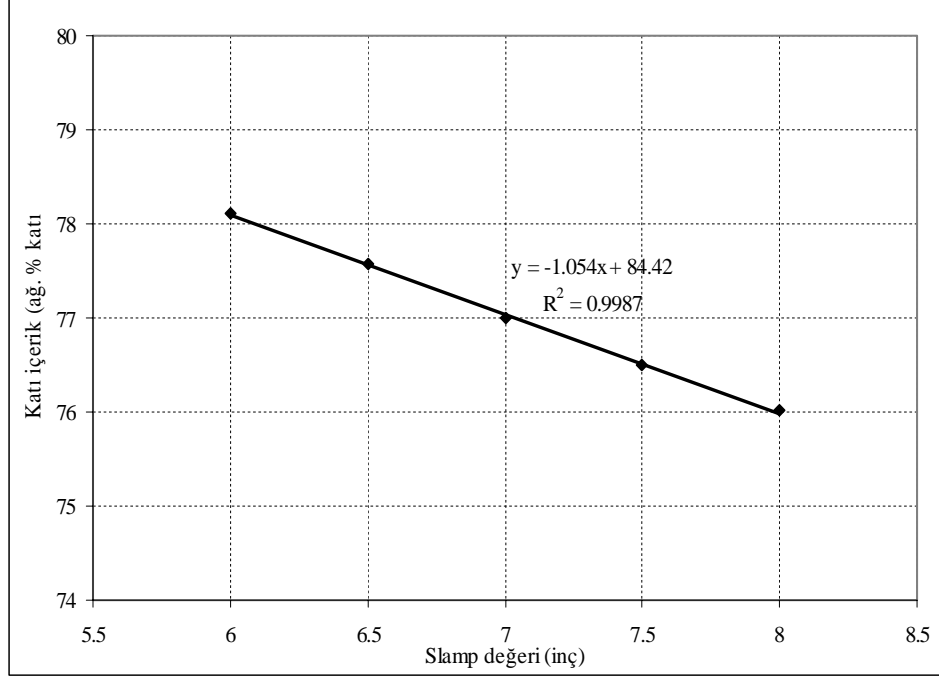
Atık malzeme örneklerinin ASTM C 143 standardına göre 6,0 ile 8,0 inch slump aralığında slump ölçümleri gerçekleştirilerek su ve katı oranları belirlenmiştir (Şekil 22). Malzemenin slump değerini belirlemek için karıştırıcıdan alınan atık malzeme 12 inch’lik standart slump konisinin 1/3’lük kısmını dolduracak şekilde koniye konulmuştur. Şişleme çubuğu ile tüm yüzeyi kapsayacak şekilde ve slump tablasına değmeyecek şekilde 25 defa şişleme yapılarak atık malzemenin koninin içine yerleşmesi sağlanmıştır. Daha sonra slup konisinin 2/3’lük kısmı macun dolgu karışımı ile doldurulup aynı şekilde şişleme yapılmıştır. İkinci kısmın şişleme işlemi ilk doldurulan kısmın yaklaşık 1 inch içerisine girecek kadar

yapılmıştır. Son olarak koninin tamamı macun dolgu karışımı ile doldurularak aynı şekilde şişleme yapılmıştır. Slump konisinin üst kısmından taşan fazla malzeme numune ile koni aynı seviyede olacak şekilde sıyrılmıştır. Koninin üst kısmındaki kulplardan tutularak yüzeye dik olacak şekilde koni kaldırılmıştır. Malzeme boşaldıktan sonra slump konisi malzemenin yan tarafına konularak koninin üst kısmı ile malzemenin üst kısmı arasındaki fark ölçülmüştür. Malzemenin yüzeyi genelde düz olmadığından yükseklik farkı olan birkaç noktadan ölçülerek ortalama bir slump değeri bulunmuştur.



Şekil 22. Slump ölçüm işlemi

Farklı slumplardaki macun dolgu örneklerinden alınan bir miktar malzeme 8 saat boyunca $105^{\circ}C$ 'de etüvde kurutulmuştur. Kurutulan numunenin katı oranı ve su içeriği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre malzemenin katı içeriği arttıkça slump değerinin azaldığı yani akışkanlığının azaldığı belirlenmiştir (Şekil 23). Yapılan deneylerde 7,5 inch slump değerindeki malzemenin katı oranının yaklaşık % 77,0 olduğu görülmektedir.



Şekil 23. Slump değerlerinin katı içeriğine bağlı değişimi (Erçıkıdı, 2009)

2.5. Macun Dolgu Örneklerinin Hazırlanması

Flotasyon tesisi atık malzemesi örnekleri, ağırlıkça % 5-7 oranlarında çimento ile karıştırılarak macun dolgu numuneleri hazırlanmıştır. Macun dolgu numunelerinin hazırlanmasında karışım suyu olarak çeşme suyu kullanılmıştır. Bağlayıcı malzemenin ilavesi atık malzeme katı oranına göre yapılmıştır. Atık malzeme, bağlayıcı ve sudan oluşan macun dolgu karışımı 20,8 lt kapasiteli Univex SRMF 20 model mikser kullanılarak hazırlanmıştır (Şekil 24). Karıştırma işlemi mikserin 2. devrinde yaklaşık 7-10 dakika arasında gerçekleştirilmiştir. Karışım suyunun SO_4^{2-} konsantrasyonu yaklaşık 1380 mg/l'tir. Bu değer göz önüne alındığında etki derecesi yüksek agresif su sınıfına girdiği ve bu tür suların uzun dönemde macun dolgu dayanım ve duraylılığını olumsuz yönde etkilediği belirtilmektedir (Fall ve Benzaazoua; 2005; Erçıkıdı, 2009).

Hazırlanan macun dolgu numuneleri % 80 nemli ve 20 °C sıcaklığa sahip kür odasında; tek eksenli basınç dayanımı testi için yapılan numuneler 14, 28, 56, 112, 224, 360 gün, kesme dayanım testi için hazırlanan numuneler 3, 7, 14, 28, 56, 112, 224, 360 gün kür sürelerinde bekletilmiştir.



Şekil 24. Macun dolgu hazırlanmasında kullanılan mikser

Hazırlanan macun dolgu karışımı kesme dayanım deneyinde kullanılmak üzere 63 mm çapında ve 31 mm yüksekliğindeki yuvarlak kalıplara konulmuştur (Şekil 25). Her bir kür süresi için 3 adet numune hazırlanmıştır. Bağlayıcı oranının kesme dayanımına etkisini belirlemek amacıyla 216 adet numune hazırlanarak kür süreleri boyunca kür odasında bekletilmiştir. Tek eksenli basınç dayanımı deneyinde kullanmak için hazırlanan macun dolgu karışımı 10 cm çapında ve 20 cm yüksekliğinde drenajlı silindir numune kalıplarına konulmuştur (Şekil 26). Yer altı üretim boşluklarındaki serbest drenaj koşullarını sağlamak amacıyla numune kaplarının altına 7 adet delik delinerek macun dolgu karışımının bünyesindeki suyun uzaklaştırılması sağlanmıştır. Standartlara uygun bir şekilde her bir kür süresi için 3 adet numune hazırlanmıştır. Bağlayıcı oranının etkisini görmek amacıyla % 5-7 çimento oranlarında 63 adet numune hazırlanmıştır. Bunlardan 7 günlük kür süresinde olan numuneler, yeterli kürü almamasından numune kalıplarından çıkartılamadığından dolayı deneye tabi tutulmamıştır.



Şekil 25. Kesme dayanım deneyi için hazırlanan numuneler



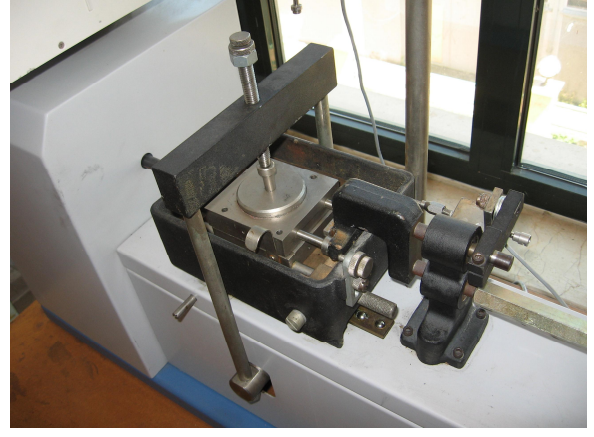
Şekil 26. Tek eksenli basınç dayanım deneyi için hazırlanan numuneler

2.6. Kesme Dayanım Deneyleri

Toplam 216 adet macun dolgu karışım örneği, bilgisayar kontrollü ELE marka kesme kutusu test cihazı ile 0,35 mm/dk kesme hızında belirlenen kür sürelerinde deneye tabi tutulmuştur (Şekil 27). Numuneler kesme kutusuna yerleştirilmeden önce kalıplarından çıkartılarak standart ölçülerde olan metal kalıba yerleştirilerek alt ve üst yüzeyleri düzleştirilmiştir. Yüzeyi düzeltilen macun dolgu numunesi kesme kutusu haznesine yerleştirildikten sonra deney numunesine normal gerilmeyi verecek olan önceden belirlenmiş yükler kesme kutusuna yerleştirilmiştir (Şekil 28). Takılan her 1 kg yük için deney numunesine düşeyde (Ağırlık x 10 +4,5) bağıntısından 14,5 kg yük etki etmektedir.

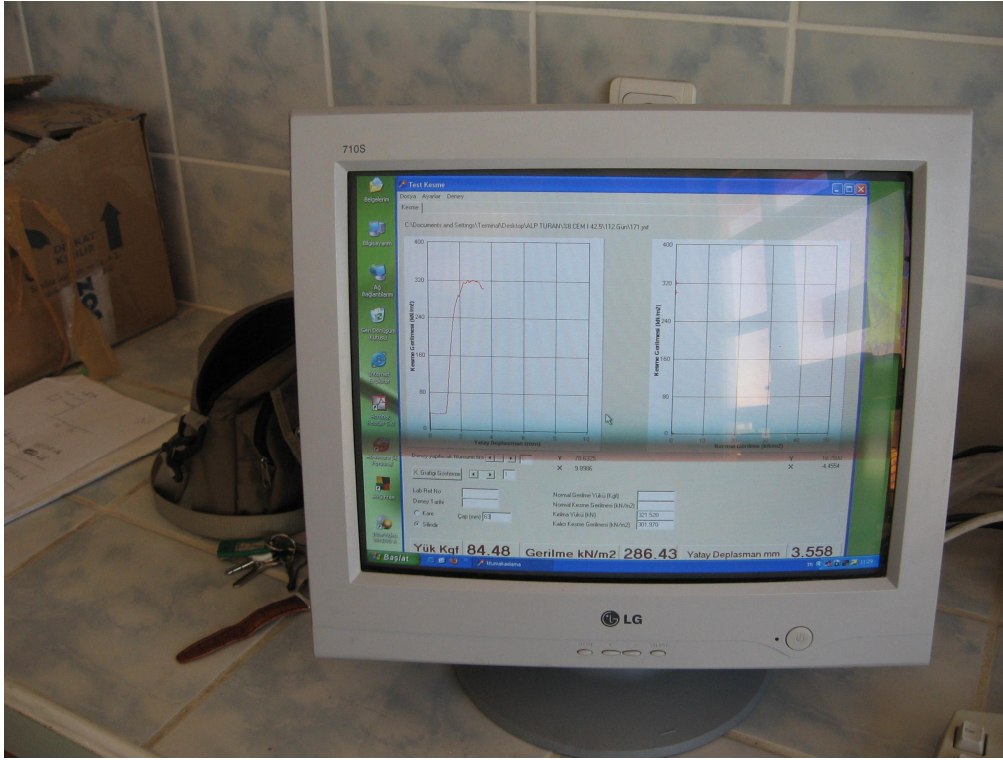


Şekil 27. Kesme kutusu test cihazı



Şekil 28. macun dolgu numunesinin hazırlanması ve kesme haznesine yerleştirilmesi

Her bir kür süresinde cihaza sırasıyla 5, 7 ve 9 kg yük takılarak macun dolgu numunesi 171, 235 ve 297 kPa normal gerilme altında kesme işlemine tabi tutulmuştur. Her bağlayıcı oranında her bir küresinde her normal gerilme için 3 adet macun dolgu numunesi kesme işlemine tabi tutulmuştur ve bu 3 değerın ortalaması alınarak numunenin kesme yükü belirlenmiştir. Bilgisayar kontrollü gerçekleştirilen kesme işlemi ekranda takip edilen kesme gerilmesi yatay deplasman eğrisi azalmaya başladığında sonlandırılmaktadır (Şekil 29). Eğrinin tepe noktası macun dolgu numunesinin kesme gerilmesi değerini vermektedir. Bu işlem sırasıyla her bir normal gerilme değeri için tekrarlanmıştır.



Şekil 29. Kesme gerilmesinin bilgisayar tarafından belirlenmesi

2.7. Tek Eksenli Basınç Dayanım Testleri

20 cm yüksekliğinde ve 10 cm çapında numune kaplarında hazırlanan toplam 63 adet macun dolgu numunesi, ELE marka 50 kN yük kapasitesine ve 0,5 mm/dk yükleme hızına sahip bilgisayar kontrollü tek eksenli basınç dayanımı test cihazı tarafından belirlenen kür sürelerinde deneye tabi tutulmuştur (Şekil 30).



Şekil 30. Tek eksenli basınç dayanımı test cihazı

Numune kalıplarından çıkartılan macun dolgu numunelerinin yüzey alanının doğru değeri vermesi için alt ve üst yüzeyleri düzleştirilmiştir. Bilgisayar kontrollü olarak başlatılan yükleme işlemine otomatik olarak kaydedilen yük-boy değişimi eğrisi azalmaya başladıktan son verilmiştir. Her bağlayıcı oranında her bir kür süresinde 3 adet macun dolgu numunesi deneye tabi tutularak bu 3 adet numunenin ortalama dayanım değerleri alınmıştır.

3.BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Atık Malzeme Tane Boyut Dağılımı

Hazırlanan macun dolgunun dayanım ve duraylılığını artırmak için atık malzemenin tane boyu dağılımının değerlendirilmesinde fayda vardır. Macun dolgu karışımında kullanılan atık malzemenin Malvern Mastersizer Hydro 2000 MU marka tane boyu dağılımı ölçüm cihazı ile belirlenen tane boyut dağılımı incelendiğinde 20 µm altı malzeme miktarının ağırlıkça %55.94 olduğu görülmektedir (Şekil 31). Atık malzemenin üniformalık katsayısı 13.41 (Cu) ve eğrilik katsayısı 1.18 (Cc) değerleri değerlendirildiğinde, malzemenin iyi bir tane boyut dağılımına sahip olduğu söylenebilir

Atık malzemenin orta boyutlu malzeme (malzemenin ağırlıkça %35-60'ı <20 µm) sınıfına girdiği görülmektedir (Landriault, 2001). Ancak, atık bu hali ile ince boyutlu atık sınıfına oldukça yakındır. İnce boyutlu malzemenin artmasıyla yüzey alanı artmakta dolayısıyla çimento gereksinimi de artmaktadır. İnce tane oranı artıkça tanelerin etrafını saran su miktarı da artacaktır. Dolayısıyla porozite artarak dayanımın düşmesine neden olacaktır. Ancak macun dolguda ince boyutlu malzemenin artmasıyla malzemenin yüzey alanını kaplayacak kadar yeterli çimentonun olması durumunda atık malzeme ile çimento iyi bir etkileşim sağlamak ve ince taneler iri taneler arasındaki boşlukları doldurarak yüksek dayanım elde edilmektedir. Ayrıca iri tane oranının fazla olması yeterli dayanımın yakalanmasında çimento gereksinimini artırmaktadır. İri taneler arasındaki boşlukları sadece çimento ile doldurmak yüksek dolgu maliyeti demektir. İyi bir tane boyut dağılımına sahip atıklardan üretilen dolguda, ince taneler iri tanelerin arasını çimento ile doldurarak bağlayıcı maliyetini düşürmektedir. Macun dolguda yığın boşluk oranının fazla olması düşük dayanıma neden olmaktadır.

Macun dolgu dayanımını etkileyen diğer bir faktör de tanelerin şeklidir. Küresel şekilli tanelerin şekil faktörü 1 olarak alınmakta ve düzensiz şekilli tanelere doğru gidildikçe şekil faktörü azalmaktadır. Macun dolgu karışımında şekil faktörünün yüksek olması halinde çok sayıda tane birbiriyle temas etmektedir. Temas halindeki taneler birbiriyle bir yapı oluşturarak yük iletimini sağlamaktadırlar. Böylelikle macun dolgu karışımının boşluk oranı azalarak sıkışmaya karşı dirençleri artar. Dolayısıyla dayanım değeri artmaktadır.

3.2. Atık Malzeme Karakterizasyonu

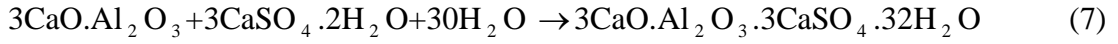
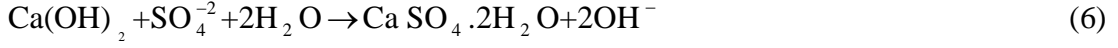
Macun dolgu uygulamalarında atık malzemenin mineralojik özelliklerinin son derece önemli olduğu yapılan çalışmalarda görülmektedir. Sülfat ve asitlerin betonun dayanımını olumsuz yönde etkilediği bilinmektedir. Macun dolguda kullanılan atık malzemenin içerdiği bazı mineraller (kurşun, çinko, pirit vb.) dayanım geciktirici, azaltıcı ve uzun dönemde bozucu olarak davranabilir. Macun dolguda kullanılan atık malzemenin kimyasal analizi Kanada'da ACME laboratuvarlarında ICP-AES (Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectroscopy) kimyasal analiz cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Tablo 9).

Tablo 9. Atık malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal bileşim	Atık (%)	Fiziksel özellikler	Atık
SiO ₂	11.03	Özgül ağırlık	4.13
Al ₂ O ₃	4.11	Özgül yüzey (cm ² /g)	3940
Fe ₂ O ₃	50.62	D ₁₀	1.70
CaO	1.26	D ₃₀	6.76
MgO	0.78	D ₅₀	16.25
TiO ₂	0.12	D ₆₀	22.83
Cr ₂ O ₃	0.01	D ₉₀	58.40
Na ₂ O	0.18	C _u	13.41
K ₂ O	0.41	C _c	1.18
MnO	0.06		
P ₂ O ₅	<0.01		
Kızdırma Kaybı	27.40		
S ⁻ (Sülfid Kükürdü)	40.70		
Toplam Kükürt	42.60		

Atık malzemenin kimyasal analizinden yaklaşık S= (Sülfid Kükürdü) içeriği %40.70 olarak elde edilmiştir. Buradan atık malzemenin yaklaşık %76 oranında pirit içerdiği görülmektedir. Atık malzemenin karakterizasyonuna yönelik Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Ar-Ge laboratuvarlarında Philips X'pert PW 3040 X-ışınları difraktometre (XRD) cihazı ile yapılan mineralojik analizinden de baskın mineralin pirit olduğu görülmektedir (Şekil 20). Diğer mineraller ise kuvars, albit, kalsit, dolomit, barit, muskovit ve klorittir. Atık malzemelerde kısa ve uzun dönem dayanım ve uzun dönemde durabilite açısından, atıkların tane boyu dağılımlarının yanında mineralojik içerikleri de (sülfürlü mineraller, kil mineralleri vb.) kritik önem taşımaktadır (Kesimal vd. 2010).

Sülfürlü mineraller (özellikle pirit gibi) suyun ve oksijenin varlığında oksitlenerek asit ve sülfat oluşumuna neden olmaktadır. Bütün hidratasyon ürünleri pH=9'un altında bozunur. Benzer şekilde, sülfat bileşikleri macun dolgu içindeki kalsiyum hidroksit ve trikalsiyum aliminat ile reaksiyona girerek alçıtaşı ve etrenjit oluşumuna neden olur (Yılmaz vd., 2003).



Genleşme özelliğine sahip alçıtaşı ve etrenjit macun dolgu içinde çatlakların oluşumuna neden olarak dolgu dayanım ve duraylılığını düşürmektedir. Bu yüzden, uzun dönem kür sürelerinde asit ve sülfat etkileri nedeniyle macun dolgu dayanım ve durabilitesi açısından, atığın problemleri bir malzeme olduğu görülmektedir.

3.3. Bağlayıcı Malzeme Karakterizasyonu

Macun dolgunun duraylılığını sağlamak ve tahkimat potansiyelini artırmak için çeşitli bağlayıcı malzemeler kullanılmaktadır. Normal portland çimento yaygın olarak kullanılan bağlayıcı türüdür. Macun dolgu uygulamalarında bağlayıcı oranı dolgunun istenilen mekanik özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Karışımdaki bağlayıcı oranı arttıkça genellikle daha kısa kür süresinde daha yüksek dolgu dayanımı elde edilir. Ancak bir dolgu tesisinde dolgu maliyetinin en yüksek kısmını çimento giderleri oluşturmaktadır. Bu nedenle optimum bağlayıcı oranını bulmak macun dolgu uygulamasında en önemli unsurlardan bir tanesidir. Deneyde kullanılan CEM I 42,5 R portland çimentonun fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir (Tablo 10). Bağlayıcının fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri sülfat atağa karşı direnç göstermesinde önemli bir etkidir.

Tablo 10. CEM I 425 R Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mineralojik özellikleri

Kimyasal bileşim	(%)	Fiziksel Özellikler	Değer
SiO ₂	19.75	Özgül ağırlık	3.12
Al ₂ O ₃	5.26	Özgül yüzey (cm ² /g)	4010
Fe ₂ O ₃	2.92	90 µm elek bakiyesi (%)	-
CaO	64.35	45 µm elek bakiyesi (%)	2.93
MgO	1.87	32 µm elek bakiyesi (%)	8.31
TiO ₂	0.23	Mineralojik Özellikler	
Cr ₂ O ₃	0.02	C ₃ S	59.62
Na ₂ O	0.36	C ₂ S	11.71
K ₂ O	0.91	C ₃ A	9.00
MnO	0.07	C ₄ AF	8.89
P ₂ O ₅	0.12		
Serbest Kireç	1.12		
Kızdırma Kaybı	3.90		
SO ₃	2.84		

Tablo 10’da Boque eşitlikleri kullanılarak yapılan hesaplamalarda CEM I 42.5 R’nin %9 oranında C₃A ve %59.62 oranında C₃S içerdiği görülmektedir. Yüksek C₃A içeriği, C₃S/C₂S oranı ve düşük SiO₂/CaO oranına sahip bağlayıcıların asit ve sülfat etkisine karşı dayanıksız olduğu bilinmektedir. Deneylerde kullanılan CEM I 42,5 R’nin yüksek C₃A ve düşük SiO₂/CaO oranına sahip olduğu tablo 10’da görülmektedir. Bu nedenle CEM I 42,5 R kullanılarak hazırlanan macun dolgu numunelerinin asit ve sülfat etkisine karşı düşük direnç göstereceği anlaşılmaktadır.

3.4. Macun Dolgu Dayanım ve Duraylılığının Değerlendirilmesi

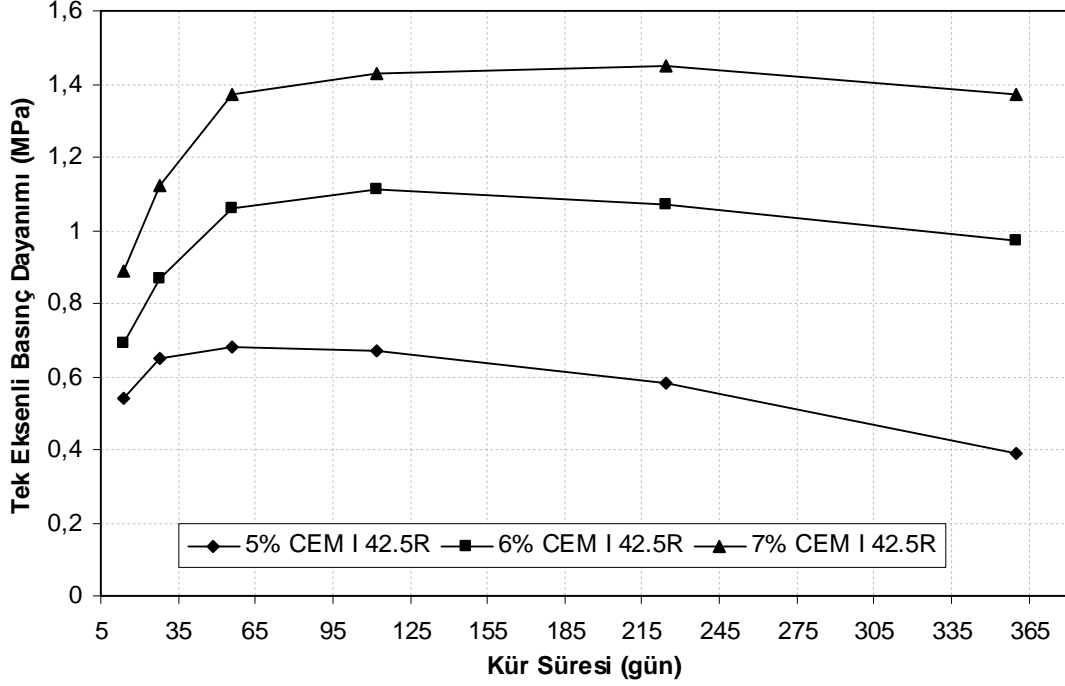
3.4.1. Tek Eksenli Basınç Dayanım Testleri

%5, %6 ve %7 çimento oranlarında CEM I 42,5 R kullanılarak hazırlanan numunelerin 14-360 günlük kür sürelerinde tek eksenli basınç dayanım sonuçları tablo 11’de görülmektedir.

Tablo 11. Tek eksenli basınç dayanımı test sonuçları

Bileşim / Açıklama		14 gün	28 Gün	56 Gün	112 Gün	224 Gün	360 Gün
%5 CEM I 42.5 R / DAYANIM (N)	1	4342	5068	5464	5328	4540	3140
	2	4226	5157	5420	5560	4828	3136
	3	4405	5369	5604	5354	4662	3224
Ortalama Dayanım (MPa)		0,5376	0,6462	0,6833	0,6731	0,5814	0,3937
%6 CEM I 42.5 R / DAYANIM (N)	1	5582	6902	8665	9074	8640	7560
	2	5408	6888	8582	8822	8450	7962
	3	5645	7178	8420	8920	8836	7854
Ortalama Dayanım (MPa)		0,6894	0,8689	1,0637	1,1113	1,0744	0,9687
%7 CEM I 42.5 R / DAYANIM (N)	1	6950	9012	10812	11250	11554	10825
	2	7179	8883	10754	11743	11868	11486
	3	7253	9216	11578	11574	11480	10862
Ortalama Dayanım (MPa)		0,8861	1,1235	1,3735	1,4325	1,4464	1,3747

%5 çimento oranında hazırlanan numunelerin hiçbir kür süresinde yeterli dayanıma (>0,7 MPa) ulaşamadığı görülmektedir. %5 çimento oranında hazırlanan macun dolgu numunesi kısa dönemde yeterli dayanıma ulaşamadığı gibi uzun dönemde de belirgin bir dayanım düşmesi görülmektedir. 360 günlük kür süresi sonunda 14 günlük dayanım değerinden daha düşük bir değer verdiği görülmektedir. Çimento oranı %5'ten %6'ya yükseltildiğinde macun dolgu dayanım değerlerinde 56 günden itibaren 1,5 kattan fazla artış gözlemlenmiştir. %6 çimento içeriğindeki macun dolgu örnekleri 28 günlük kür süresinde yeterli dayanımı yakalamış ancak 112 günden itibaren dayanımda düşmeler gözlemlenmiştir. Çimento oranı %7'ye çıkarıldığında dayanım değerlerinde her kür süresinde %5 çimento içerikli macun dolgu dayanımına göre 1,6 kattan fazla artış görülmektedir. %7 çimento içerikli macun dolgu 14 günden itibaren yeterli dayanımı yakalamış olmasına rağmen 224 günlük kür süresinden itibaren dayanım kaybı yaşamıştır (Şekil 31).

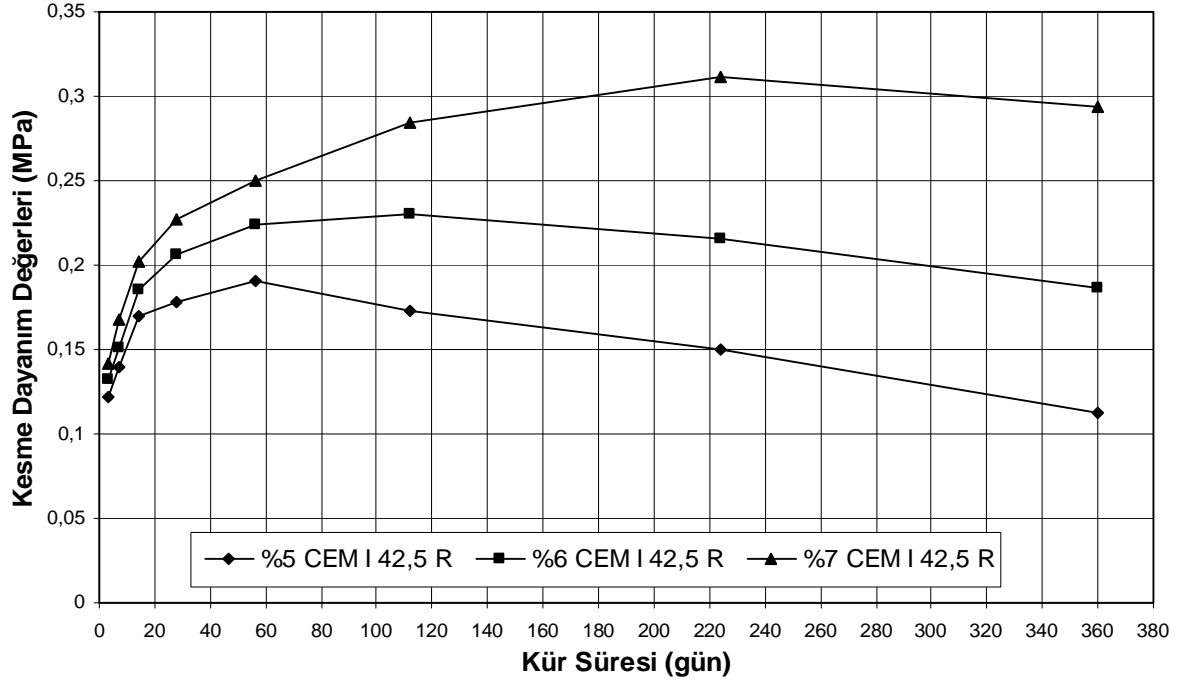


Şekil 31. Kür süresine bağlı olarak değişen dayanım değerleri

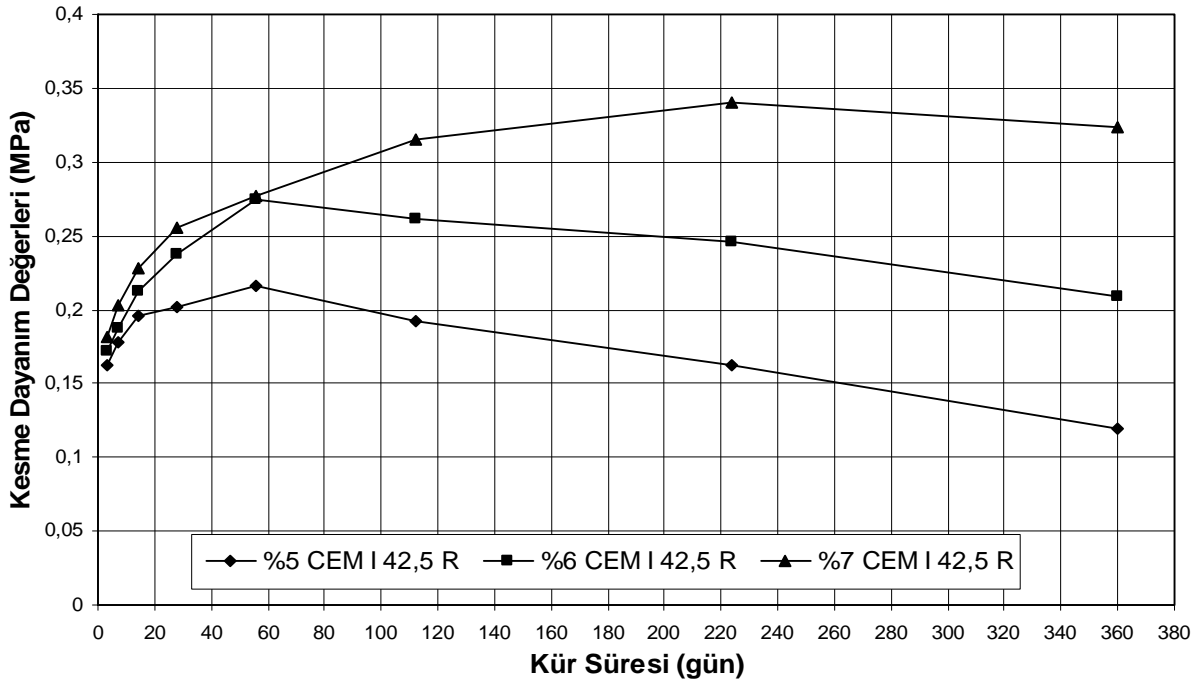
Çimento miktarının artmasıyla birlikte asit ve sülfat etkisi azalmaktadır ve buna bağlı olarak uzun dönemde dayanım kaybı oluşmamaktadır. Çimento miktarının artması sonucu kısa ve özellikle uzun dönemde macun dolgu performansındaki iyileşmenin, ortamdaki C-S-H miktarının artmasına ve dolgunun gözeneklilik ve porozitesinin azalması sonucu olarak, asit ve sülfat etkisine karşı dolgu direncinin artması ile ilişkili olduğu öngörülmektedir. Düşük porozite nem ve havanın macun dolgu bünyesine difüzyonunu azaltmak suretiyle piritin oksidasyonunu ve buna bağlı olarak asit ve sülfat etkisini azaltmaktadır (Erçikdi, 2009; Fall ve Benzaazoua, 2005).

3.4.2. Kesme Dayanım Testleri

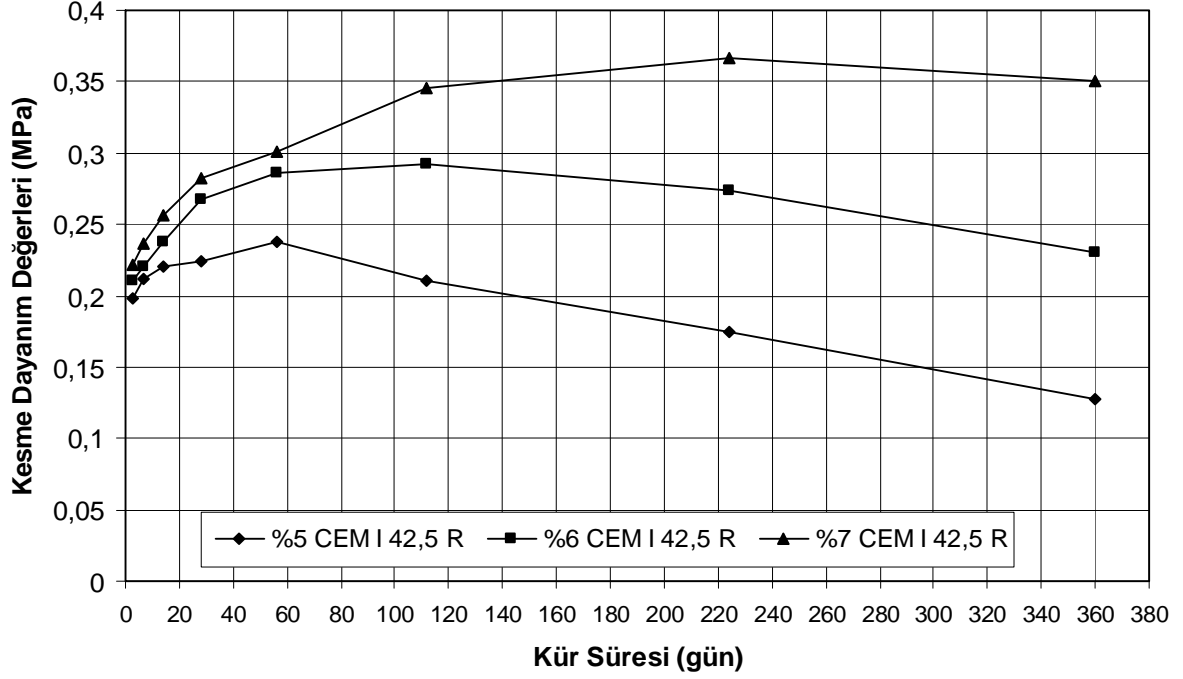
Şekil 32, şekil 33 ve şekil 34, %5, %6 ve %7 çimento içeriklerinde hazırlanan macun dolgu numunelerinin sırasıyla 0.171, 0.235 ve 0.297 Mpa düşey gerilmeler altındaki kesme dayanım değerlerini vermektedir. Bu kesme dayanım değerlerine bağlı olarak elde edilen kohezyon değerlerinin kür süresine bağlı değişimleri bulunmuştur (şekil 35).



Şekil 32. 0.171 MPa düşey gerilme altındaki kesme dayanım değerleri

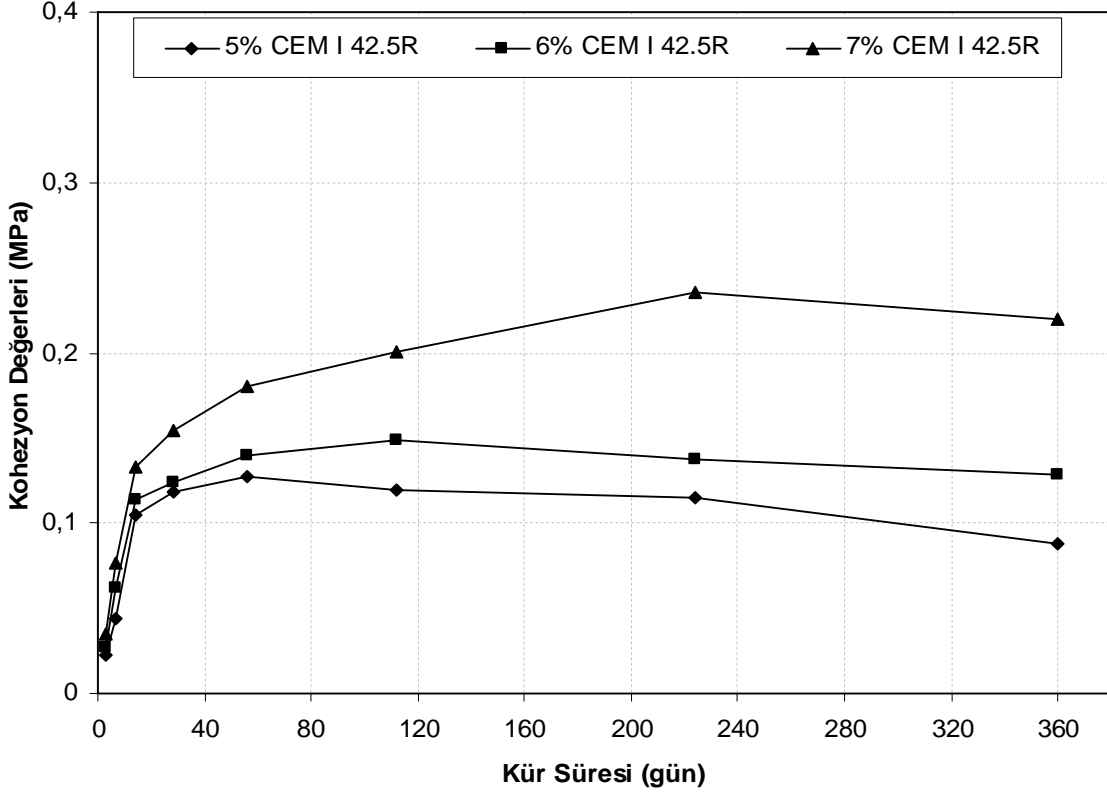


Şekil 33. 0.235 MPa düşey gerilme altındaki kesme dayanım değerleri



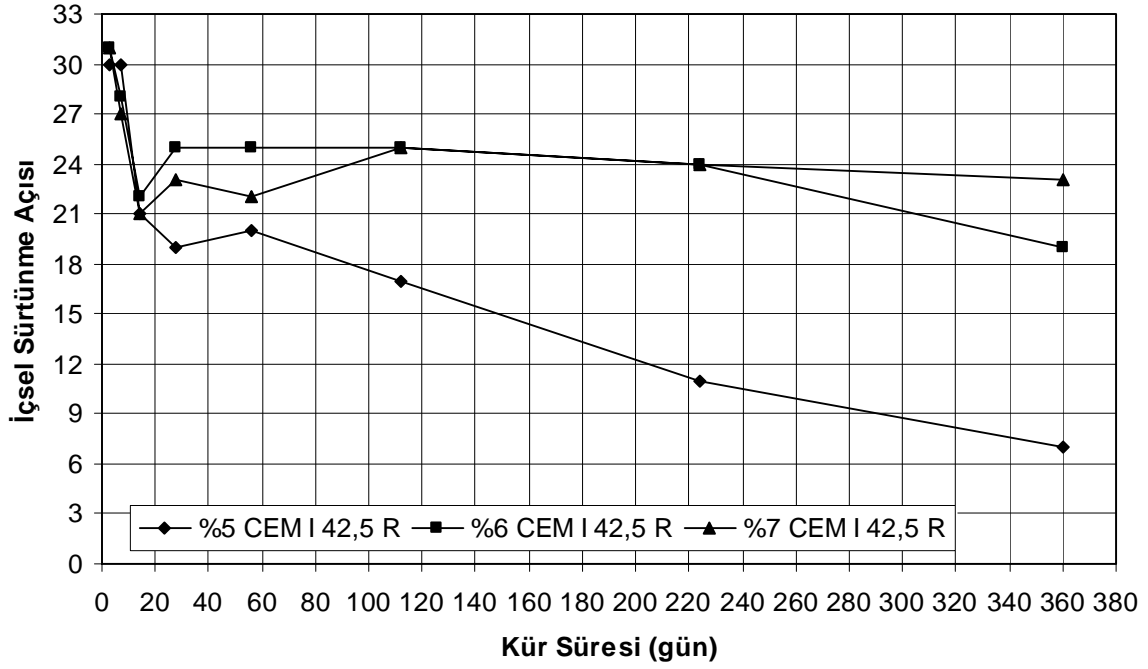
Şekil 34. 0.297 MPa düşey gerilme altındaki kesme dayanım değerleri

Bu kesme dayanım değerlerine bağlı olarak elde edilen kohezyon değerlerinin kür süresine bağlı değişimleri bulunmuştur (şekil 34). Kesme dayanımı ve kohezyon değerlerinin tek eksenli basınç dayanımı değerleri ile paralel bir seyir izlediği görülmektedir. %5 çimento içeriğinde hazırlanan macun dolgu örneklerinin kesme gerilmelerine bağlı olarak kohezyon değerlerinin uzun dönem kür süresinde ani düşüşler yaşadığı görülmektedir. Çimento oranı %5'ten %6 ve %7'ye çıkarıldığında kohezyon değişimlerinin o kadar keskin olmadığı görülmektedir. %6 çimento içerikli macun dolgu numunesinde kohezyon değeri aynı çimento içerikli tek eksenli basınç dayanım değerine paralel bir şekilde 112 günlük kür süresinden itibaren düşmeye başlamıştır. Aynı örtüşme %7 çimento içerikli macun dolgu numunesinde de görülmektedir. Kohezyon değeri 224 günden itibaren düşmeye başlamıştır. Bu sonuçlar asit ve sülfat etkisinin tek eksenli basınç dayanımı deneylerinde ortaya konulmuş olan macun dolgu dayanım ve duraylılığı üzerindeki etkisini desteklemektedir. Ayrıca çimento içeriğindeki artışa bağlı olarak macun dolgu dayanımının arttığı kohezyon değerlerindeki artış ile ortaya konulmaktadır.



Şekil 35. Kohezyon değerlerinin kür sürelerine bağlı değişimi

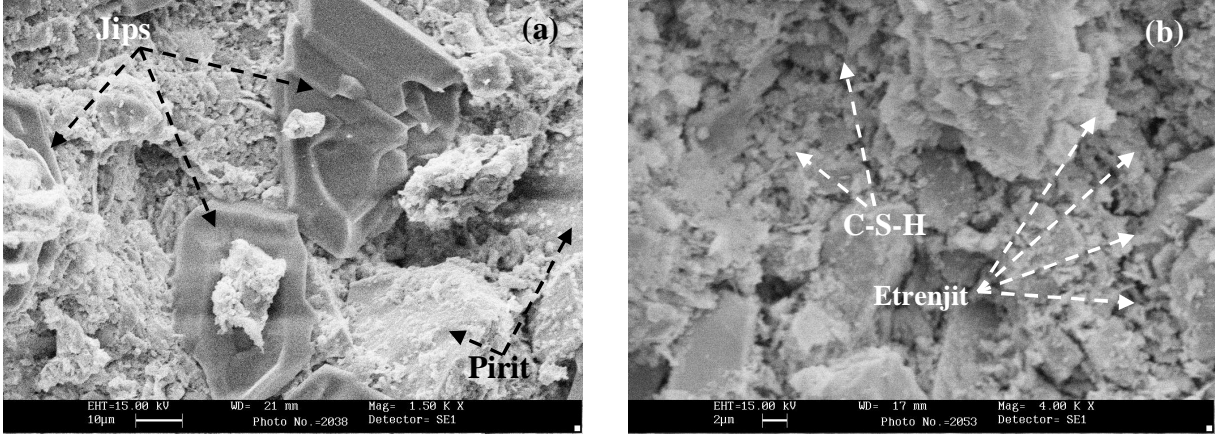
İçsel sürtünme açısı değerleri kohezyon ve tek eksenli basınç dayanımı değerleri ile benzer bir davranış göstermemiştir (şekil 36). Kür sürelerine bağlı olarak belli bir artma veya azalma eğilimi göstermemektedir. Her kür süresinde farklı değerler elde edilmiştir. Ancak çoğu kür süresinde içsel sürtünme açısı değerleri birbirine çok yakındır. İçsel sürtünme açısı değerlerindeki bu tutarsızlık malzemenin porozitesine bağlı olduğu söylenebilir. Ayrıca macun dolgu numunesinin kür almasının uzun dönemde olması ve dolgu örneklerinin ince malzeme içeriğinin ve su içeriğinin fazla olması sürtünme direncini düşürmektedir. Buna bağlı olarak dolgu numunesinin içsel sürtünme açısı değerleri verimli bir şekilde elde edilememektedir. Ayrıca yapılan araştırmalarda içsel sürtünme açısı değerlerinin farklı 2 tip malzeme yüzeyindeki sürtünme davranışlarına bağlı olarak elde edilebileceği anlaşılmaktadır.



Şekil 36. İçsel sürtünme açısı değerlerinin kür süresine bağlı değişimi

3.5. Macun Dolgu Mikroyapısının Değerlendirilmesi

Sülfürlü maden tesis atıkları ve çimento kullanılarak hazırlanan macun dolgu numunelerinde uzun dönemde meydana gelen dayanım kayıplarının, sülfat etkileri nedeniyle oluşan genleşme özelliğine sahip etrenjit ve ikincil alçıtaşı (jips) minerallerinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Şekil 37). Cihangir vd. (2011), normal portland çimento içeren sülfürce zengin atıklardan üretilen macun dolgu numunelerinde görülen dayanım kayıplarının, asit ve sülfat etkilerinden kaynaklandığını belirtmiştir.



Şekil 37. %5 bağlayıcı oranında (a) ve %7 bağlayıcı oranında (b) normal çimento içeren numunelerde 360 günlük kür süresinde oluşan genleşme ürünleri

Yapılan çalışmada dolgu dizaynından önce kullanılan atık bünyesindeki serbest sülfat içeriği 1380 ppm olarak ölçülmüştür. Çimento ile üretilen macun dolgu örneklerinde 56 günlük kür süresine kadar, sülfat iyonlarının yaklaşık tamamının tüketildiği görülmüştür. Bu kür süresinden itibaren sülfat içeriği artmıştır. Uzun dönemde ise asit etkilerinden kaynaklanan lokal oksidasyonlar nedeniyle %5 bağlayıcı oranında pH seviyesi 5,85 seviyelerine inmiştir. SEM fotoğrafları incelendiğinde CEM I 42,5 R ile hazırlanan macun dolgu numunelerinin gözenekli bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Boşluklu yapı içerisine nüfuz eden havanın pirit mineralinin oksidasyonunu artırdığı ve oksidasyon bölgelerinde bağlayıcı yapılarının tamamen ayrışarak bozunduğu görülmüştür.

4. SONUÇLAR

1. Atık malzemenin 20 µm altı malzeme miktarının ağırlıkça %55.94 olduğu görülmektedir. tane boyut dağılımına bağlı olarak atık malzemenin üniformluk katsayısı 13.41 (Cu) ve eğrilik katsayısı 1.18 (C_v) değerleri değerlendirildiğinde, malzemenin iyi bir tane boyut dağılımına sahip olduğu belirlenmiştir.

2. Atık malzemenin mineralojik yapısı incelendiğinde farklı mineraller içerdiği saptanmıştır. Atık malzemenin kimyasal analizinden yaklaşık S= (Sülfid Kükürdü) içeriği %40.70 olarak elde edilmiştir. Buna bağlı olarak Pirit içeriğinin % 70 olduğu görülmektedir. Atık bünyesinde bulunan piritin su ve oksijen varlığında zamanla sülfat oluşumuna neden olmaktadır. Bunun sonucunda ikincil mineraller oluşarak dolgu dayanımının düşmesine neden olmaktadır.

3. Dolguda bağlayıcı olarak kullanılan CEM I 42.5 R Portland çimentosunun belirlenen kimyasal ve mineralojik özelliklerine bakıldığında %9 oranında C₃A ve %59.62 oranında C₃S içerdiği ve yüksek C₃A ve düşük SiO₂ /CaO oranına sahip olduğu görülmektedir. Bu durum CEM I 42,5 R kullanılarak hazırlanan macun dolgu numunelerinin asit ve sülfat etkisine karşı direncinin düşük olmasına neden olmaktadır.

4. %5 çimento oranı ile hazırlanan macun dolgu numunelerinin hiçbir kür süresinde istenilen dayanıma ulaşmadığı hatta 56 günden itibaren dayanım değerinin düşmeye başladığı görülmektedir. %6 ve %7 bağlayıcı içeriğine sahip dolgu numuneleri 28 günden itibaren yeterli dayanıma ulaşmışlardır. Ancak bu dolgu numunelerinde de uzun dönemde dayanım kaybı görülmektedir.

5. %5, %6 ve %7 bağlayıcı içeriği ile hazırlanan macun dolgu numunelerinin 0,171 MPa, 0,235 MPa ve 0,297 MPa düşey gerilmeler altında farklı kür sürelerinde (3-360 gün) kesme dayanımları belirlenmiştir. Kesme dayanım değerleri ve düşey gerilme değerleri kullanılarak elde edilen kohezyon değerlerinin tek eksenli basınç dayanımı değerleri ile benzer davranışlar gösterdiği görülmektedir. İçsel sürtünme açısı değerlerinin kohezyon değerleri ile benzer eğilimde olmadığı, genelde tüm bağlayıcı içeriklerinde düşme eğiliminde olduğu görülmüştür.

5. ÖNERİLER

1. Macun dolguda kullanılan atık malzemenin tane boyut dağılımı çok iyi araştırılıp dolgu yapımına en uygun tane boyut aralığı seçilmelidir.

2. Karışım suyu kimyası analiz edilerek dolgu dayanımına olumlu yönde etkileyecek karışım suyu kullanılmalıdır.

3. Asit ve sülfat etkisini engelleyecek bağlayıcı kimyasal katkı maddeleri kullanılmalıdır.

4.En uygun çimento oranı deneyler yoluyla belirlenerek, düşük maliyette yeterli dayanımın elde edileceği çimento miktarı kullanılmalıdır.

5.Yer altı kür koşulları dolgunun kür almasını hızlandıracak ve yeterli dayanıma ulaşacak şekilde ayarlanmalıdır.

6.Yer altında uygulanmış olan macun dolgu örneklerinden karotlar alınarak yer altı koşullarının dolgu dayanımına etkisi araştırılmalıdır.

7. Yer altında uygulanmış olan macun dolgu örneklerinden dolgu ve zeminin temas halinde olduğu bölgelerden karot örnekleri alınarak kesme dayanım parametreleri belirlenmelidir.

5.KAYNAKLAR

- Akçil, A. Ve Koldaş, S., 2006. Acid Mine Drainage: Causes, Treatment and Case Studies, Journal of Cleaner Production, 14 (12-13), 1139-1145
- Arıoğlu, E., 1983. Engineering Properties of Cemented Aggregate Fill for Uludağ Tungsten Mine of Turkey, Proceedings of the International Symposium on Mining with Backfill, Lulea, 3-8
- Annor, A.B., 1999. A Study of the Characteristics and Behaviour of Composite Backfill Material, PhD Thesis, McGill University, Montreal, Canada, 396p.
- Benzaazoua, M., Ouellet, J., Servant, S., Newman P. ve Verburg, R., 1999, Cementitious Backfill with High Sulfur Content: Physical, Chemical, and Mineralogical Characterization. Cement and Concrete Research, 29 (5) 719-725.
- Benzaazoua, M. Belem, T. 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 of Cemented Pastefill, Minerals Engineering, 17 (2), 141-152
- Brackebusch, F.W., 1994. Basics of Paste Backfill Systems, Mining Engineering, 46 (10), 1175-1178.
- Cengiz, A.K., 2002. Lavvar Atıklarının Hidrolik Dolguda Sıkışma Özellikleri, Madencilik, 41,3,27-34
- Cihangir, F., Yılmaz, E., Erçikdi, B., Kesimal, A., Atık Tane Boyunun Macun Dolgu Dayanım ve Mikroyapısına Etkisi, IX.Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu / 9th Regional Rock Mechanics Symposium, 162-171, 2008, İzmir, Türkiye.
- Çakmakçı, G., 1997. Mechanical Evaluation of Cemented Backfill Materials, M.Sc. Thesis, Middle East Technical University, Graduate School of Natural & Applied Sciences, 181 p.
- Çetiner, E.G., Ünver, B. ve Hindistan, M.A., 2006. Maden Atıkları İle İlgili Mevzuat: Avrupa Birliği ve Türkiye, Madencilik, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, 45, 23-24
- Erçikdi, B., Kesimal, A., Yılmaz, E. ve Deveci, H., 2003; Effect of Desliming on the Strength of Paste Backfill, Proceedings of the X Balkan Mineral Processing Congress, Mineral Processing in the 21st Century, Varna, Bulgaria, p. 850-857
- Erçikdi, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H., Alp, İ., 2008. Drenaj Koşullarının Macun Dolgu Dayanımına Etkisi, Madencilik, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Dergisi, Cilt 47, Sayı 2, pp.15-24.
- Erçikdi, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H., Alp, İ., 2008a. Doğal Puzolan Özelliklerinin Macun Dolgunun Dayanım ve Duraylılığına Etkisi, Yerbilimleri, Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni, Hacettepe Üniversitesi, 29 (1), 25-35.

- Erçıkdı, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H., 2008b. Atık Cam ve Uçucu Kül Katkılı Macun Dolgunun Dayanım Özellikleri, IX Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu, 30-31 Ekim 2008, İzmir, s. 484-495.
- Erçıkdı, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H. ve Alp, İ., 2008c. Effect of Binder Type and Proportion on the Short –and Long Term Strength of Cemented Paste Backfill, First Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium (SHIRMS), Perth, Australia, pp. 193-199.
- Erçıkdı, B., 2009, Mineral ve Kimyasal Katkı Maddelerinin Macun Dolgu Performansına Etkisi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 125 s.
- Fall, M., Benzaazoua, M. ve Ouellet, S., 2005, Experimental Characterization of the Effect of Tailings Fineness and Density on the Quality of Cemented Paste Backfill, Minerals Engineering, 18(1) 41–44.
- Fall, M., Benzaazoua, M. ve Saa, E.G., 2008; “Mix Proportioning of Underground Cemented Tailings Backfill”, Tunn Undergr Sp Tech,23, 80-90
- Grice, T., 1998. Underground Mining with Backfill, The 2nd Annual Summit on Mine Tailings Disposal Systems, Brisbane, Australia, 5-15.
- Grice, A.G., 2005. Introduction to Hydraulic Fill, In: Handbook on Mine Fill, Australian Centre for Geomechanics, 179 p.
- Hassani, F. ve Archibald, J., 1998. Mine Backfill, Canadian Institute of Mine, Metallurgy and Petroleum, Published on CD-ROM Proceedings, Canada, 263 p.
- Hurley, P.W., ve Pritchard, R.G., 2005. Cement, Encyclopedia of Analytical Science, 458-463.
- Huynh, L., Beattie, D.A., Fornasiore, D. ve Ralston, J., 2006. Effect of Polyphosphate and Naphthalane Sulfonate Formaldehyde Condensate o the Rheological Properties of Dewatered Tailings and Cemented Paste Backfill, Minerals Engineering, 19, 28-36.
- Kesimal, A., Yılmaz, E., Erçıkdı, B., Alp, İ., Yumlu, M., Özdemir, B., 2002. Çimentolu Macun Dolgunun Laboratuvar Testi. Madencilik, 41 (4), 11-20.
- Kesimal, A., Yılmaz, E., Erçıkdı, B., Alp, İ., Yumlu, M., Özdemir, B., 2002a. Yeraltı Madenciliğinde Macun Dolgu Teknolojisi Örnek Uygulama. İstanbul Üniversitesi, Yer Bİlimleri Dergisi, 16 (1), 45-53
- Kesimal, A., Erçıkdı, 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 Erçıkdı, B., 2004. Evaluation of Paste Backfill Test Results Obtained From Different Size Slumps with Varying Cement Contents for Sulphure Rich Mill Tailings. Cement and Concrete Research, 34 (10), 1817-1822.

- Kesimal, A., Yılmaz, E., Erçikdi, B., Deveci, H. ve Alp, İ., 2005, Effect of Properties of Tailings and Binder on the Short- and Long-Term Strength and Stability of Cemented Paste Backfill, *Materials Letters*. 59(28) 3703-3709
- Kuyucak, N., 1998. Mining, The Environment and The Treatment of Mine Effluents Drainage – Treatment Options for Mining Effluents, *International Journal of Environment and Pollution* 10 (2), 315-325
- Landriault, D.A., 1995, Paste Backfill Mix Design for Canadian Underground Hard Rock Mining, In: Proc. of the 97th Annual General Meeting of the CIM Rock Mechanics and Strata Control Session, Halifax, Nova Scotia, s. 652.
- Landriault, D., 2001, Backfill in Underground Mining. In: Hustrulid, W.A. (ed.), *Underground Mining Methods Engineering Fundamentals and International Case Studies*, SME, USA, pp. 608– 609.
- Landriault, D., 2006. They Said “It Will Never Work” 25 Years of Paste Backfill 1981-2006, *Proceedings of 9th International Seminar on Paste and Thickened Tailings*, Limerick, Ireland, 277-292.
- Ouellet, J., Benzaazoua, M. ve Servant, S., 1998. Mechanical, Mineralogical and Chemical Characterization of a Paste Backfill, *Proceedings of the 4th International Conference on Tailings and Mine Waste*, A.A. Balkema, 10-13 October, Vail, Colorado, USA, pp.139-146.
- Ouellet, S., Bussiere, B., Aubertin, M. ve Benzaazoua, M., 2007, Microstructural Evolution of Cemented Paste Backfill: Mercury Intrusion Porosimetry Test Results, *Cement and Concrete Research*, 37 (12) 1654-1665
- Thomas, E.G., Nantel, J.H., and Notely, K.R., 1981. *fill Technology in Underdround Mealliferous Mines*, Internitonal Academic Services Limited, Canada, 293
- Yılmaz, E., 2003. Sülfid İçeren Maden Atıklarından Hazırlanan Çimentolu Macun Örneklerinin Dayanım Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 117 s.
- Yılmaz, E., Kesimal, A. ve Erçikdi, B., 2003a, Macun Dolgu Dayanımını ve Duraylılığını Etkileyen Faktörler, *Yerbilimleri*, Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni, Hacettepe Üniversitesi, 28 (2), 155-169.
- Yılmaz, E., Kesimal, A., Erçikdi, B. ve Deveci H., 2003b. Macun Dolgu Performansına Etki Eden Fiziksel, Kimyasal ve Mineralojik Faktörler, *Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar 1. Kongresi*, İstanbul, 683-690.
- Yılmaz, E., Kesimal, A. ve Erçikdi, B., 2004, Asit Üreten Sülfidik Maden Atıklarının Macun Dolgu Olarak Değerlendirilmesi. *İstanbul Üniversitesi Yerbilimleri Dergisi*, 17 (1), 11-19.
- Yılmaz, E., Benzaazoua, M., Belem, T., ve Bussiere, B., 2009. Effect of Curing Under Pressure on Compressive Stength Developmeent of Cemented Paste Backfill, *Minerals Engineering*, J.mineng. 2009.02.002

ÖZGEÇMİŞ

Alp TURAN, 13.12.1984 tarihinde Giresun ili Tirebolu İlçesinde doğdu. 1996 yılında Sultaniye Köyü İlköğretim okulundan mezun oldu. Lise eğitimini 2001 yılında Giresun Lisesinde tamamladı. 2003 yılında girdiği Karadeniz Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümünden 2007 yılında mezun oldu. 2007 yılında başladığı yüksek lisans eğitimine halen Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde devam etmektedir. Aynı zamanda Koza Altın İşletmeleri Mastra Altın Madeninde kaya mekaniği mühendisi olarak çalışmaktadır.

Alp TURAN aşağıdaki bilimsel çalışmalarda yer almıştır.

Cihangir, F., Turan, A., Erçikdi, B., Kesimal, A., Deveci, H., Aktifleştirilmiş yüksek fırın cürufunun macun dolguda bağlayıcı olarak kullanılabilirliği. Türkiye 21. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi, Antalya, 6-8 Mayıs, pp. 579-585, (2009).

Cihangir, F., Turan, A., Erçikdi, B., Kesimal, A. ve Deveci, H., 2009. Aktifleştirilmiş Yüksek Fırın Cürufunun Macun Dolguda Bağlayıcı Olarak Kullanılabilirliği, Türkiye 21. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi, Antalya, s. 579-585.

Cihangir, F., Erçikdi, B., Turan, A., Kesimal, A., Deveci, H., Yazıcı, M. ve Karaoğlu, K., 2011. Utilisation of Sodium Silicate Activated Blast Furnace Slag as an Alternative Binder in Paste Backfill of High-Sulphide Mill Tailings, Proceedings of the 14th International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Paste 2011, Perth, Avustralya, s. 465-475.

Cihangir, F., Erçikdi, B., Kesimal, A., Deveci, H. ve Turan, A., 2011. NaOH ile Aktifleştirilmiş Yüksek Fırın Cürufu Çimentosunun Sülfürce Zengin Atıklardan Hazırlanan Macun Dolguda Kullanılması ve Durabilite Değerlendirmeleri, Türkiye 22. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi, Ankara, 11-13 Mayıs, s. 329-339.

Cihangir, F., Erçikdi, B., Kesimal, A., Deveci, H. ve Turan, A., 2011. Çimentoya Alternatif Çevreci Bağlayıcılarla Duraylı Macun Dolgu Üretimi, 4. Madencilik ve Çevre Sempozyumu, İzmir, s. 281-291.