

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KİL İÇERİĞİ YÜKSEK SÜLFÜRLÜ BİR MADEN ATIĞININ MACUN DOLGU
OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Taha Yavuz DEVECİ

KASIM 2024
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KİL İÇERİĞİ YÜKSEK SÜLFÜRLÜ BİR MADEN ATIĞININ MACUN DOLGU
OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Taha Yavuz DEVECİ

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

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 / 09 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 04 / 11 / 2024

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ferdi CİHANGİR

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Kil İçeriği Yüksek Sülfürlü Bir Maden Atığının Macun Dolgu Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Macun Dolgu ve Kaya Mekaniği laboratuvarlarında macun dolgu numunelerinin hazırlanmasında ve testlerin gerçekleştirilmesinde emekleri geçen Öğr. Gör. Dr. Mürsel ORAK’a, bölümümüz teknisyenlerinden İsmail USTA ve Ahmet BORAN’a, bölümümüz yüksek lisans öğrencisi arkadaşım Arş. Gör. Yunus İSKENDER’e ve üniversitemiz mezun lisans öğrencilerinden Cengizhan BAYRAKDAR’a teşekkür ederim.

Tez çalışmam ve öğrencilik dönemim boyunca desteğini hiçbir zaman esirgemeyen ve bilim insanı olma yolunda ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgi ve tecrübeleri ile yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ferdi CİHANGİR’e teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca tez çalışmamda ve öğrencilik dönemlerimde her zaman yanımda olan, her türlü desteğini benden esirgemeyen saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Bayram ERÇIKDI’ya da teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmam sürecinde bana desteklerini esirgemeyen Maden Mühendisliği Bölümü’ndeki tüm saygıdeğer kıymetli hocalarıma ve asistan arkadaşlarıma ve eğitim öğretim hayatımda katkısı olan tüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Doğduğum günden bugüne beni hiç yalnız bırakmayan, aldığım kararlarda sürekli arkamda duran, maddi ve manevi desteklerini hiç esirgemeyen, bu günlere gelmemde en büyük pay sahibi olan annem Belkız DEVECİ ve babam Ömer DEVECİ’ye ve sevgili kardeşlerim İnanç DEVECİ ve Ravza DEVECİ’ye de minnettarlığımı sunarım. Son olarak tez çalışmam süresince zaman zaman belki de yalnız bıraktığım ama benden desteklerini hiç esirgememiş ve her adımında yanımda olan, bana güç veren, her zaman hedefim ve ideallerim doğrultusunda ilerlememde yardımcı olan sevgili eşim Neslihan DEVECİ’ye de teşekkürü bir borç bilir, minnettarlığımı sunarım.

Taha Yavuz DEVECİ

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Kil İçeriği Yüksek Sülfürlü Bir Maden Atığının Macun Dolgu Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Ferdi CİHANGİR’in 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. 04 /11 / 2024

Taha Yavuz DEVECİ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No:

ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Tezin Gerekçesi ve Amacı	3
1.3. Macun Dolgu Yöntemi	4
1.3.1. Macun Dolgu Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları	6
1.4. Macun Dolgunun Dayanımını ve Duraylılığını Etkileyen Faktörler	7
1.4.1. Bağlayıcı Tipi ve Oranı	9
1.4.2. Kimyasal Katkı Maddesi Kullanımı.....	13
1.4.3. Mineral Katkı Maddesi Kullanımı	14
1.4.4. Reolojik Özellikler	16
1.4.5. Su-Çimento Oranı	18
1.4.6. Asit ve Sülfat Etkisi	18
1.4.7. Tane Boyut Dağılımı.....	20
1.4.8. Atığın Mineralojik Özellikleri	21
1.5. Kıl Mineralleri.....	21
1.5.1. Klorit Minerali.....	23
1.6. Uçucu Küller	24
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	26
2.1. Numune Karakterizasyonu.....	26
2.2. Numune Hazırlama	29
2.3. Tek Eksenli Basınç Dayanımı Testleri.....	31
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	34

3.1. Katı Oranının Etkisi	34
3.2. Akışkanlığın (Slamp) Etkisi	37
3.3. Bağlayıcı Tipinin Etkisi	42
3.4. Kıl Minerallerinin Etkisi	43
3.5. Bağlayıcı Oranının Etkisi	45
3.6. Kum İkamesinin Etkisi.....	46
3.7. Uçucu Kül İkamesinin Etkisi	48
3.8. Kaba Atık Kullanımının Etkisi.....	50
3.9. Akışkanlaştırıcı Katkısının Etkisi	51
4. SONUÇLAR.....	52
5. ÖNERİLER.....	54
6. KAYNAKLAR	55
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

KİL İÇERİĞİ YÜKSEK SÜLFÜRLÜ BİR MADEN ATIĞININ MACUN DOLGU OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Taha Yavuz DEVECİ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Ferdi CİHANGİR
2024, 61 Sayfa

Macun dolgu karışımları ince boyutlu maden tesis atıklarından hazırlanmaktadır. Her maden atığı yapısı gereği bünyesinde farklı mineraller barındırmaktadır. Macun dolgunun kısa ve uzun dönemdeki dayanım değerleri, macun dolgu karışımında kullanılan atığın içerdiği mineraller ile ilişkilidir. Atık malzeme bünyesinde kil mineralleri içermesi durumunda, macun dolgunun dayanım performansını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu nedenle bu tez çalışmasında yüksek kil içeren atıkların macun dolguda kullanıldığı durumdaki dayanım ve işlenebilirlik özellikleri araştırılmıştır. Atık malzeme ile hazırlanan karışım uygun çimentolu macun dolgu tasarımına ulaşabilmek amacıyla katı oranı, slamp, bağlayıcı tipi ve bağlayıcı oranına bağlı olarak dizayn edilmiştir. Bu şartlar altında hazırlanan numunelere ek olarak kum ilavesi ve uçucu kül katkısı da araştırılmıştır. Macun dolgu numuneleri, 14-360 günlük kür sürelerinde tek eksenli basınç dayanımı (TEBD) deneylerine tabi tutulmuştur. Macun dolgu numunelerinin kısa ve uzun dönemde yüksek dayanıma ulaşamadıkları gözlenmiştir. Kil minerallerinin, kısa ve uzun dönemdeki dayanım performansını olumsuz etkilediği dayanım testleri sonucunda tespit edilmiştir. Bu değerlendirmeler neticesinde yüksek kil içeriğine sahip sülfürlü bir maden atığının macun dolguda kullanılabilir olması için ön hazırlık işlemleri ile kil içeriğinin azaltılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çimentolu macun dolgu, Kil minerali, Sülfürlü maden atığı, Basınç dayanımı

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF USABILITY A SULPHUREOUS MINE WASTE WITH HIGH CLAY CONTENT AS PASTE BACKFILL

Taha Yavuz DEVECİ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mining Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Ferdi CİHANGİR
2024, 61 Pages

Paste filling mixtures are prepared from mine plant waste. Each mine waste contains different minerals due to its structure. Short and long term strength values of paste backfill depend on mineral content of waste which used in paste backfill mixture. The clay minerals contained in the waste are evaluated as a negative factor affecting the strength performance of the cemented paste backfill. Therefore, this thesis aims to investigate the potential of high clay content wastes to be a usable material in cemented paste backfill mixtures. The mixture prepared with the evaluated waste material was designed in relation to certain criteria in order to reach the appropriate cement paste backfill design. These criteria were solid ratio, slump, binder type and binder ratio. In addition to the samples prepared under these conditions, additional samples were prepared in which sand and fly ash addition were also examined. Paste backfill samples were subjected to uniaxial compressive strength (UCS) tests at 14-360 days of curing time to measure their strengths. It has been observed that paste backfill samples cannot reach high strength in short and long terms. It has been determined as a result of strength tests that fine-grained clay minerals negatively affect the strength performance in the short and long term and it was obtained that it would be beneficial to subject a sulfurous mine waste with high clay content to preliminary preparation processes in order to be usable in paste backfill.

Key Words: Cemented paste backfill, Clay minerals, Sulfidic mine tailings, Compressive strength

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Maden atık barajlarından görüntüler a) Hisarcık-Espey atık barajı b) Giresun-Şebinkarahisar maden atık barajı kazası (URL-1, 2024; URL-2, 2024).....	1
Şekil 2. Macun dolgunun şematik gösterimi (Erçikdi vd., 2022).....	4
Şekil 3. Yeraltı cevher üretimi ve macun dolgu prosesi döngüsü a)galeri sürümü b)üretim delikleri c)patlatma ve nakliye d)dolgu işlemi (Erçikdi, 2009)	5
Şekil 4. Macun dolgunun yeraltındaki işlevinin şematik görünümü (Erçikdi vd., 2017).....	8
Şekil 5. Bağlayıcı tipinin macun dolgu dayanımı üzerindeki etkisi (Erçikdi vd., 2009a)...	11
Şekil 6. Bağlayıcı oranının macun dolgu dayanımı üzerindeki etkisi (Erçikdi vd., 2009a)	13
Şekil 7. Slamp ölçümünün şematik gösterimi (URL-3, 2024)	17
Şekil 8. Macun dolguda hidrasyon ve bozunma sürecinin flematik gösterimi (Erçikdi vd., 2008b).....	20
Şekil 9. Killerin yapısındaki yüklerin şematik gösterimi (URL-6, 2024)	22
Şekil 10. Klorit mineralinin görüntüsü (URL-8, 2024).....	24
Şekil 11. Tesis atığının tane boyut dağılımı	26
Şekil 12. Atık malzemenin XRD paterni ve içerdiği mineraller	28
Şekil 13. Farklı akışkanlıklarda slamp ölçümleri	29
Şekil 14. Katı oranına bağlı slamp değerleri	30
Şekil 15. Macun dolgu numunelerinin hazırlanması ve dayanım testi: karıştırma (a); sıkılama (b); kür alma (c) ve TEBD testi (d).....	33
Şekil 16. %65 katı oranında hazırlanan numunelerin 14-360 gün kür süresi sonundaki dayanımları.....	34
Şekil 17. %68 katı oranında hazırlanan numunelerin 14-360 gün kür süresi sonundaki dayanımları.....	35
Şekil 18. %70 katı oranında hazırlanan numunelerin 14-360 gün kür süresi sonundaki dayanımları	36
Şekil 19. 9,5" slamp değerinde hazırlanan numunelerin 14-360 gün kür süresi sonundaki dayanımları.....	38
Şekil 20. 11" slamp değerinde hazırlanan numunelerin 14-360 gün kür süresi sonundaki dayanımları.....	39
Şekil 21. 11" slamp değerinde hazırlanan 28 günlük numunelerin kırılmadan önceki durumları	40

Şekil 22. 360 günlük kür süresi sonunda bazı numunelerde oluşan çatlamların yakın görünüşü	41
Şekil 23. 360 günlük kür süresi sonunda bazı numunelerin üst yüzeyinde oluşan çatlamlar	42



TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Deneylerde kullanılan atık, uçucu kül ve bağlayıcıların kimyasal ve fiziksel karakterizasyonu	27
Tablo 2. Çimento eklendiği durumda karışımların katı oranındaki değişim	30
Tablo 3. Farklı katı oranlarında hazırlanan numunelerin TEBD test programı	31
Tablo 4. Farklı akışkanlıklarda hazırlanan numunelerin TEBD test programı	32
Tablo 5. Ek deneysel çalışmalarda hazırlanan numunelerin TEBD test programı.....	32
Tablo 6. Farklı katı oranlarında hazırlanan dolgu karışımlarının su/çimento oranları.....	37
Tablo 7. Farklı slump değerlerinde hazırlanan dolgu karışımlarının su/çimento oranları...	40
Tablo 8. %70 katı oranında %12 ve %14 bağlayıcı oranında hazırlanan numunelerin dayanımı.....	45
Tablo 9. %68 katı oranında farklı bağlayıcı oranlarında atığa %5-10 kum ikame edilerek hazırlanan numunelerin dayanımı.....	46
Tablo 10. %70 katı oranında farklı bağlayıcı oranlarında atığa %5-10 kum ikame edilerek hazırlanan numunelerin dayanımı	47
Tablo 11. %68 katı oranında atığa %5-10 kül ikame edilerek hazırlanan numunelerin dayanımı	48
Tablo 12. Atığa %10 kül ikamesinin işletme giderleri açısından ekonomik analizi (2021)	49
Tablo 13. Kaba atık kullanılarak %70 katı oranında hazırlanan numunelerin dayanımı	50
Tablo 14. %70 katı oranında akışkanlaştırıcı ile hazırlanan numunelerin dayanımı.....	51

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

μm	: Mikrometre (mikron)
AMD	: Asit maden drenajı
ÇMD	: Çimentolu macun dolgu
İSG	: İş, Sağlığı ve Güvenliği
KKM	: Kimyasal katkı maddesi
MPa	: Megapascal
PÇ	: Portland çimentosu
PKÇ	: Portland kompoze çimentosu
SDÇ	: Sülfata dayanıklı çimento
SG	: Özgöl ağırlık
TEBD	: Tek eksenli basınç dayanımı
UCS	: Uniaxial compressive strength
UK	: Uçucu kül

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Maden atıklarının çevreye verdiği olumsuz etkiler nedeniyle özellikle son yıllarda madencilik proseslerine karşı tepkiler artmakta ve madenlerin işletilerek ekonomiye katkı sağlanması her geçen gün güçleşmektedir. Söz konusu atıkların bu nedenle güvenli bir şekilde depolanması oldukça elzemdir. Günümüzde madencilik faaliyetlerinin sonucunda ortaya çıkan tesis atıklarının (sülfürlü vb.) depolanması sürecinin çoğunluğunu, atığın emniyetli bir şekilde atık barajlarında depolanması ve bertaraf edilmesi oluşturmaktadır. Dünyada 3500'den fazla atık barajı olduğu belirtilmektedir (Chambers ve Higman, 2011). Buna karşın dünya çapında bugüne kadar 327 kez gerçekleşen atık barajı kazası, birçok kişinin ölümü ile sonuçlanmıştır. Bu kazalar ayrıca yapısal hasarlara, tarım ve orman arazilerinin zarar görmesine, su kirliliği gibi olumsuz çevresel etkilere neden olmuştur. Meydana gelen bu kazalar ve ilgili süreçler atığın depolanması ve bertarafı konusunda yeni yöntemlerin gelişimine yol açmıştır. Bu yöntemler arasında macun dolgu teknolojisinin önemi ve kullanımı güç geçtikçe artmaktadır.



Şekil 1. Maden atık barajlarından görüntüler a) Hisarcık-Espey atık barajı b) Giresun-Şebinkarahisar maden atık barajı kazası (URL-1, 2024; URL-2, 2024)

Tesis atıklarının yeraltı üretim boşluklarında depolanmasına olanak sağlayan bu yöntem ilk olarak 1980’de Almanya’nın Bad Grund madeninde uygulanmış ve başarılı olması sonucu dünyada popülaritesi artmıştır (Landriault, 2001). Tesis atıklarının yeraltında depolanabilirliği atıkların özelliklerine, atıkların depolanacağı alanın özelliklerine, dolgunun kullanım amacına bağlı olarak kısa ve uzun dönemdeki mekanik ve duraylılık özellikleri ile depolanacağı kaya kütlelerinin bünyesindeki yeraltı suyunun özelliklerinin etkisine bağlıdır (Brackebusch 1994; Grice, 1998; Landriault, 2001).

Her maden kütlesinin jeolojik, jeoteknik ve hidrolojik özellikleri ile birlikte madenden çıkarılan cevherin işlenmesi sonucu atık özellikleri de değişkenlik göstermektedir. Macun dolgu teknolojisinin uygulanabilmesi için planlanan maden işletmelerinde öncelikle jeoteknik (dayanım testleri vb.) ve jeokimyasal (statik ve kinetik testler, liç testleri vb.) inceleme ve deneysel çalışmaların yapılması gerekmektedir

Atık malzeme, bağlayıcı maddeler ve karışım suyu gibi dolgu bileşenlerinden her birinin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri, macun dolgunun kısa ve uzun dönemdeki dayanım ve duraylılık gibi özellikleri ile taşınabilirlik özelliklerini önemli derecede etkilemektedir. Dolgunun dayanımı (tek eksenli basınç dayanımı; UCS) ve durabilitesi (uzun dönemde dayanım kaybı) dolgunun performansı açısından oldukça önemlidir.

Macun dolguda dayanım ve duraylılık değerleri yeraltında dolgunun kullanım amacına göre değişebilmektedir. Yeraltı madencilik çalışmalarında genel olarak dolgu bloğunun yanında yer alan maden bloklarının üretimi yapıncaya kadar dolgunun kendi dayanımının en az 1.0 MPa olması ve bunu devam ettirmesi gerekmektedir. Bu süre yaklaşık 28 gün olarak esas alınmakta ve 360 gün boyunca da bu dayanımını muhafaza etmesi istenmektedir.

Macun dolgu eğer tavan tahkimatı amaçlı kullanılacaksa dayanımının minimum 5 MPa olması gerekmektedir (Stone 1993; Li vd., 2002; Belem ve Benzaazoua, 2008). Macun dolgu dayanımı ne kadar erken dayanım kazanır ve erken dayanımı yüksek olursa, üretim döngüleri de o derece kısalabilmektedir.

1.2. Tezin Gerekçesi ve Amacı

Macun dolgu karışımları madenlerin tesis atıklarından hazırlanmaktadır. Kil mineralleri içeren tesis atıkları, macun dolgunun performansına ince tane boyutları ve su tutma özelliklerinden dolayı önemli ölçüde etki etmektedir. Su tutma özelliği fazla olan kil mineralleri, suyun drene olmasına engel olarak macun dolgunun dayanım kazanamamasına veya erken süresinde düşük dayanıma neden olmaktadır. Bundan dolayı katı oranını arttırmak macun dolgunun yeraltına boru hattı ile naklini zorlaştıracak ve daha güçlü pompa ihtiyacına sebep olacaktır. İnce taneli malzemelerin oranı ise çimentonun temas edeceği yüzey ile ilişkili olarak ince tanelerin artışı çimento sarfiyatını artırmaktadır. Bu sebeple yüksek kil içeriğine sahip atıklardan hazırlanmış macun dolgunun kısa ve uzun dönemlerdeki performansının belirlenmesi ve buna göre macun dolgu karışımının tasarımının hazırlanması önem teşkil etmektedir.

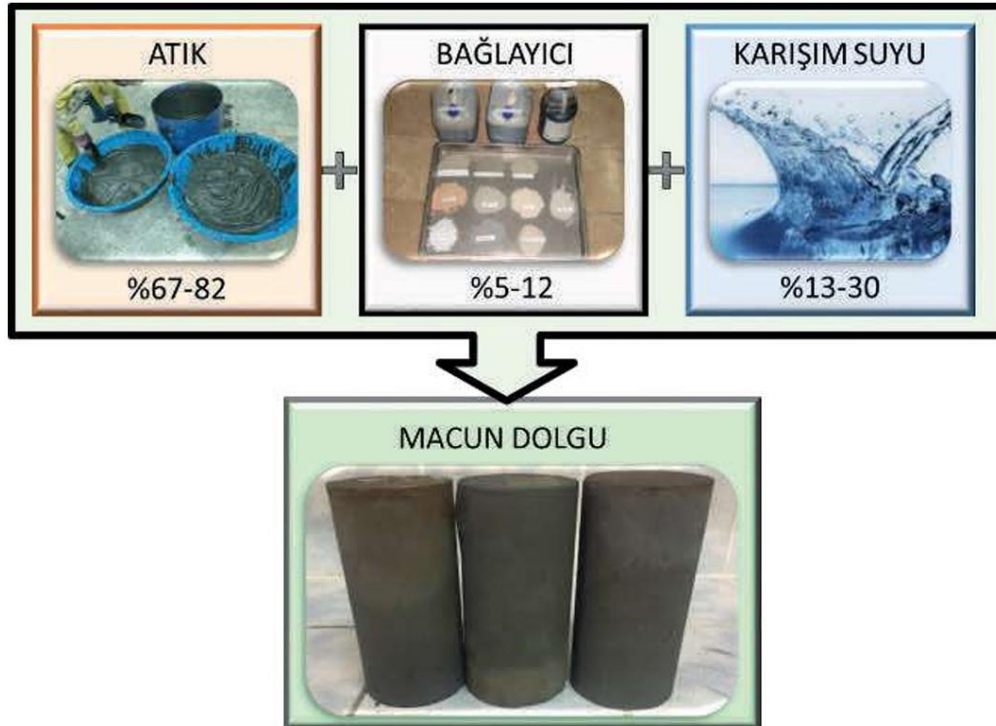
Yüksek kil içeriğine sahip sülfürlü bir atığın macun dolgu olarak kullanılabilirliğini belirlemek için araştırma yapılan bu tezin amacı;

- Katı oranın etkisi altında kısa ve uzun dönemde macun dolgu performansını incelemek,
- Akışkanlığa (slamp) bağlı olarak kısa ve uzun dönemde macun dolgu performansını incelemek,
- Çimento tipine ve oranına bağlı kısa ve uzun dönemde macun dolgu performansını incelemek,
- İnce malzemenin uzaklaştırılmasının, bağlayıcı yerine mineral katkı maddesi olarak uçucu kül kullanımının ve kum ilavesinin macun dolgunun dayanım performansına etkisini incelemek,
- Dayanım performanslarına göre macun dolgu tasarımını iyileştirilmesi için öneriler geliştirmek,
- Killerin macun dolguya etkilerini tanımlayarak ilgili bilim alanına yeni bilgiler kazandırmaktır.

1.3. Macun Dolgu Yöntemi

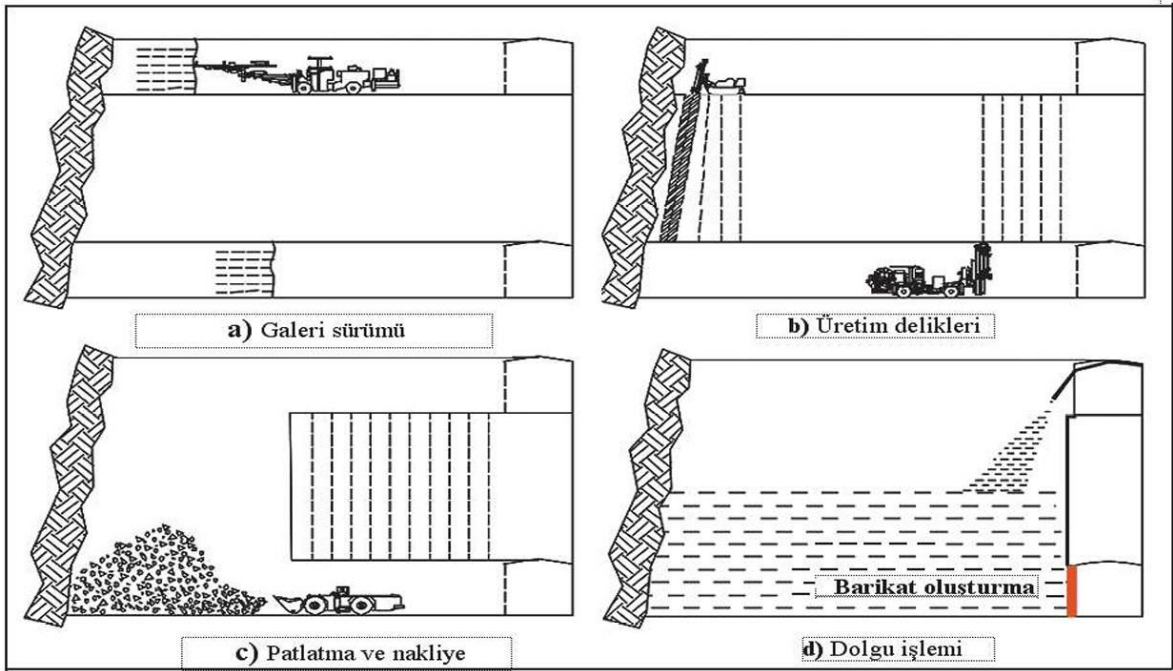
Madenlerde üretilen tüvenan cevherlerin zenginleştirilmesi sonucu oluşan tesis atıklarının çimentolu macun dolgu (ÇMD) yöntemi ile yeraltındaki madeni alınan boşluklara depolanması, yeraltı madenciliğinin önemli ve tamamlayıcı bir parçasını oluşturmaktadır. Günümüzde dünyada aktif olarak 400'ün üzerinde macun dolgu tesisi bulunmakta, 100'e yakın proje de kurulum aşamalarındadır (Yumlu, 2020). Diğer taraftan Avrupa'da yaklaşık 17 tesis aktif olarak faaliyet gösterirken, 16 tesis de kurulum ve inşaat aşamasındadır (Yumlu, 2020). Macun dolgu teknolojisi, yeraltı madenciliğinin yoğun olarak uygulandığı Kanada ve Avustralya'da oldukça yaygın olup, Ülkemizde de Çayeli Bakır İşletmesi, Eti Bakır Küre ve Şirvan İşletmeleri ve Tüprag Efemçukuru Altın İşletmelerinin bu teknolojiyi uyguladığı-uygulama hazırlığı yaptığı bilinmektedir (Landriault, 2006; Erçıkı vd., 2022)

Macun dolgu, oldukça etkili bir atık yönetimi yöntemidir. Bu teknoloji ile hazırlanan macun dolgu malzemelerinin katı oranı yaklaşık %65–80, bağlayıcı madde içeriği %2-13 arasında değişmektedir (Şekil 2).



Şekil 2. Macun dolgunun şematik gösterimi (Erçıkı vd., 2022)

Yeraltında macun dolgu uygulaması; üretim odasının tavan ve tabanında hazırık galerilerinin sürülmesi ile başlayan prosesin devamında patlatmayla maden üretim deliklerinin açılması, patlatma işlemi, üretilen cevherin nakli, sonrasında barikat inşası ve en sonunda da maden üretim boşluğunun çimentolu macun dolgu ile doldurulmasıyla tamamlanan bir süreçtir (Şekil 3). Macun dolgu uygulamasının kullanıldığı yeraltı üretim odaları, genellikle yüksekliği 10-25 m, uzunluğu ise 10-50 m arasında değişmekte olan yerlerdir. (Erçikdi vd., 2022)



Şekil 3. Yeraltı cevher üretimi ve macun dolgu prosesi döngüsü a) galerî sürümü b) üretim delikleri c) patlatma ve nakliye d) dolgu işlemi (Erçikdi, 2009)

Macun dolgunun; uygulamada kendi stabilitesini sağlamak için 28 günlük dayanım sürecinde 0.5 MPa'nın üzerinde yeterli olacağı belirtilmiştir. Ancak yeraltı madencilik faaliyetleri sürdürülürken iş sağlığı ve güvenliği (İSG) göz önüne alındığında, emniyet katsayısı=2 olduğu durum için, 28 günlük bir kür süresinde dayanım değerinin maden işletmecileri tarafından 1.0 MPa olarak esas alınması gerektiği belirtilmiştir (Cihangir, 2011). Özellikle dolgu işlemini gerektiren arakatlı kazı ve kes-doldur gibi yöntemlerin olduğu yeraltı işletmelerinde macun dolgu tercih edilmektedir. Çünkü macun dolgu yöntemi teknik ve çevresel açısından önemli avantajlara sahiptir.

1.3.1. Macun Dolgu Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

Teknik ve çevresel açıdan önemli avantajlara sahip olan macun dolgunun avantajları şöyle belirtilmiştir (Yumlu, 2001; Erçikdi vd., 2017).

- i) Klasik taşıma sistemlerine (mobil ekipmanlar ve konveyörler gibi) göre meydana gelen problemler (tahkimatın zarar görmesi, trafik problemi vb.), boru hattı ile yeraltına taşınması nedeni ile azalmaktadır.
- ii) Kaya ve hidrolik dolguya kıyasla işletme maliyeti daha ekonomiktir.
- iii) Yine kaya ve hidrolik dolguya göre yeraltı maden boşluklarının doldurulmasına olanak sağladığı için yerüstü tasman oluşumunu minimize eder
- iv) Atıkların %65-70'inin yeraltında depolanmasını mümkün kılarak sonradan atık depolama maliyetleri ile saha rehabilitasyonu maliyetlerini minimum kılar,
- v) Cevher zenginleştirme işlemleri sırasında çeşitli kimyasal ilave edilen proses suyunun tıknar ve filtreler ile yaklaşık %90 oranında geri kazanımına olanak sağlar.
- vi) AMD üretebileceği önceden belirlenen atıkların geçirgenliği düşük ($\geq 10^{-7}$ m/sn) bir formda hapsedilmesini sağlar.
- vii) Macun dolgu, düşük permeabilitesi ve yüksek doygunluk derecesi ile yeraltı suyunun dolgu bünyesine nüfuz etmesini minimize ederken, oksijenin dolgu içerisine difüzyonunu da minimuma indirir. Dolayısıyla, bünyedeki ve ortamdaki AMD oluşturma potansiyeli taşıyan minerallerin oksidasyonunu engelleyerek AMD oluşumunun önüne geçer. Diğer taraftan, bünyesindeki çimento, atıkların AMD açısından nötralizasyon kapasitesini artırarak bünyeden de sızıntı suyu oluşumu durumunda ağır metal salınımını minimuma indirir.
- viii) Aynı bağlayıcı oranında uygulanan hidrolik dolguya kıyasla nispeten daha erken sürede yüksek dayanım kazanmakta ve dolgu prosesinin daha hızlı gerçekleşmesi sebebi ile madencilik işlemlerinin (ocağın döngü süresinin) kısılmasını mümkün kılar.
- ix) Cevher üretimini maksimum kılıp, tasarımına bağlı olarak tahkimat görevi görerek etrafındaki maden bloklarının üretimi için emniyetli ve güvenli bir çalışma platformu oluşturur. Bu da topuklardaki cevherin maksimum oradan kazanıma olanak vererek üretim kapasitesini arttırır.

- x) Dolgu malzemesi olarak kullanılan diğer doğal kaynakların (kaya, agerega, çakıl vb.) tüketimi azalmakta ve böylece doğaya minimum müdahale olacaktır.

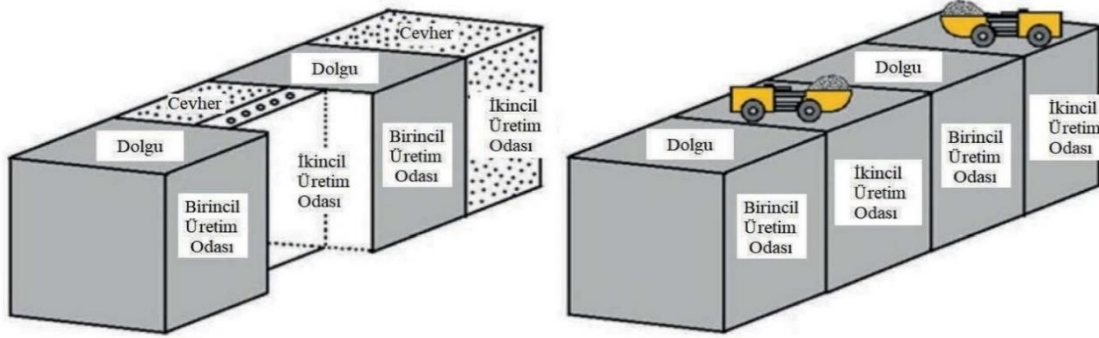
Macun dolgu uygulamasının bazı dezavantajları ise şöyle belirtilmiştir (Erçikdi, 2009; Cihangir, 2011; Yılmaz, 2013).

- i. İlk yatırım maliyetleri yüksektir. Ayrıca, katı yoğunluğu da yüksek olduğu için pompa-boru sistemi ile taşınması pahalıdır. Macun dolgu hazırlamak için filtrasyon ile susuzlaştırma çalışmaları pahalıdır.
- ii. Macun dolgunun katı oranı nedeniyle boru hattında yüksek basınçlı pompa gerekmektedir. Bu da pompa bakımı ve enerji maliyetlerini artırmaktadır.
- iii. Macun dolgunun uzun dönemdeki duraylılığı, özellikle sülfürlü atıkların su ve oksijen ile temasında oksidasyon oluşumuyla azalmaktadır.
- iv. Yeraltına beslemesi yapılacak olan macun dolgunun; tane boyutu, yoğunluk, özgül ağırlık ve su miktarı gibi parametrelerindeki değişimler dolgunun yeraltına nakliyesinde olumsuzluklar meydana getirebilir.
- v. Dolgu prosesinin tüm safhalarında büyük çapta mühendislik, yüksek teknoloji ve kalifiye eleman gereklidir.

1.4. Macun Dolgunun Dayanımını ve Duraylılığını Etkileyen Faktörler

Macun dolgu için hazırlanacak karışımın kısa ve uzun dönemdeki mekanik özellikleri, tasarım için göz önünde bulundurulması gereken en önemli etkidir. Yeraltı üretim boşluklarını dolduracak olan macun dolgunun dayanım ve duraylılığı, çalışma alanları için uygun ve güvenli bir platform oluşturmak ve cevher seyrelmesini kontrol altına almak için büyük önem taşımaktadır. Çünkü yeraltında açığa çıkacak göçük problemleri yüzeyde oluşabilecek subsidans vb. hareketlerin, tasman oluşumunun, iş gücü kaybının, üretim veriminin ve hatta üretim kapasitesinin azalmasına sebebiyet verecektir. Bu gibi olumsuzlukların önüne geçebilmek için macun dolgu dayanımının istenilen koşullarda duraylılığını sağlamak gereklidir.

Fall ve Samb'a (2006) göre belirli bir kür süresinin sonunda sertleşme sağlamış veya sertleşme eğiliminde olan macun dolgunun mekanik performansı, pratikte kullanımı ucuz ve yaygın olmasından dolayı tek eksenli basınç dayanımı testleri ile ölçülmektedir. Yeraltı üretim boşluklarına beslenecek olan macun dolgunun işlevine göre tek eksenli basınç dayanımı değerleri farklılık taşımaktadır. Örnek olarak erken kür süresinde macun dolgu barikatlarının zarar görmesinin önüne geçmek ve macun dolgunun sıvılaşma (liquefaction) oranını azaltmak sebebiyle dolgunun en az 0.15 MPa dayanıma ulaşması istenmektedir (Le Roux vd., 2004). Bu dayanım değeri, üretim yöntemi arakatlı kazı ve kes-doldur olan maden işletmelerinde birincil üretim odasına (stope) yerleştirilen macun dolgu için, ikinci üretim odasının cevherinin alınması ve sonrasında macun dolgu ile doldurulması prosesi tamamlanıncaya kadar görev yapacak ise kendi stabilitesini sağlayacak kadar olmalıdır (Şekil 4). Bu dayanım değerinin 28 günlük bir kür süresinde en az 0.7 MPa olması gerektiği belirtilmiştir (Brackebusch, 1994; Landriault, 1995). Bunun yanı sıra maden ekipman ve işçilerinin çalışabileceği bir platform işlevini yerine getirecek dolgunun da yine erken kür sürelerinde yüksek dayanım elde etmesi gerektiği vurgulanmıştır (Erçikdi, 2009). Grice (1998), tavan tahkimatını sağlayacak dolgunun ise minimum 4 MPa'lık bir dayanıma sahip olması gerektiğini belirtmiştir.



Şekil 4. Macun dolgunun yeraltındaki işlevinin şematik görünümü (Erçikdi vd., 2017)

Macun dolgunun kullanılacağı işleve göre dayanım değerlerinin istenilen değere ulaşması ve stabilitesinin korunması için macun dolgu dayanımını ve duraylılığını etkileyen faktörlerin bilinmesi gerekir. Bağlayıcı özelliğine bağlı olarak bu etkenler; bağlayıcı tipi ve oranı, kimyasal katkı maddesi kullanımı ve mineral katkı maddesi kullanımı olacaktır. Bunların yanı sıra karışım özellikleri, karışım suyu özellikleri, macun

dolgunun yerindeki koşulları ve atık malzemenin özellikleri de macun dolgunun performansına etki eden faktörlerdir (Erçikdi vd., 2012). Bu faktörler arasında bağlayıcı özellikleri, su/çimento oranı, reolojik özellikler, atık malzemenin özellikleri (tane boyut dağılımı, asit ve sülfat etkisi, kimyasal ve mineralojik özellikleri) oldukça önemlidir.

1.4.1. Bağlayıcı Tipi ve Oranı

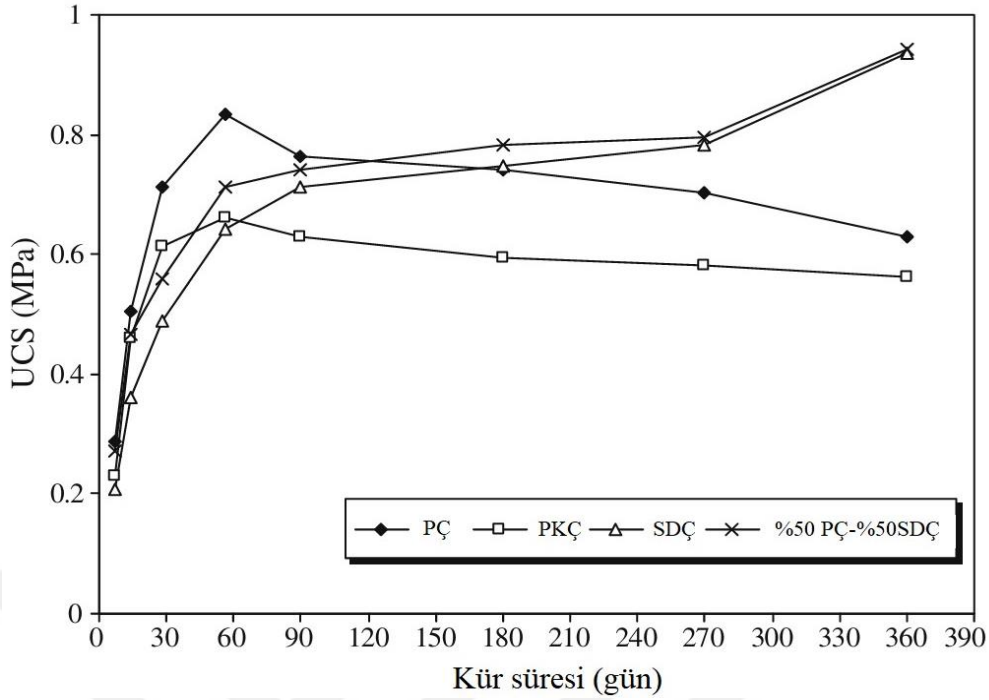
İşlevi göz önüne alındığında gerekli dayanımın elde edebilmesi için macun dolguya ağırlıkça %3-9 oranında bağlayıcı eklenmektedir. Ancak macun dolgu işletme giderlerinin büyük bir kısmını (%3 çimento oranı için %42'sini) bağlayıcı giderleri oluşturmaktadır (De Souza vd., 2003). Bunun yanı sıra bilhassa sülfürlü atıklarla hazırlanmış olan macun dolguda, Portland çimentosu gibi kalsiyum içeriğince zengin bağlayıcıların asit ve sülfat etkisinin altında düşük performans gösterdiğine değinilmiştir (Erçikdi, 2009). Bu sebeple gerek macun dolgunun kısa ve uzun dönemdeki dayanımı ve duraylılığı, gerekse de ekonomik ve verimlilik açısından en uygun bağlayıcı tipi ve oranının tespit edilmesi dolgu uygulamaları açısından çok kritiktir.

- Bağlayıcı Tipi

Bağlayıcı tipi, yeraltında uygulanan çimentolu macun dolgunun (ÇMD) mekanik davranışında önemli bir etkindir ve çimento masrafları macun dolgu tesisinde işletme maliyetlerinin önemli bir kısmını (yaklaşık %50-70) oluşturmaktadır. Yılmaz (2013), bundan dolayı macun dolgunun kısa ve uzun dönemdeki dayanım ve duraylılığına olumsuz etki edecek etkenlere (asit ve sülfat etkisi vb.) karşı dirençli en uygun ve en az maliyetli çimento tipinin kullanılmasının elzem olduğunu vurgulamıştır. Pirit, pirotin vb. gibi sülfürlü minerallerince zengin tesis atıklarının macun dolguda kullanılması durumunda uzun dönemde dayanım kaybı ve duraylılık problemleriyle karşılaşıldığı bildirilmektedir (Hassani vd., 2001; Erçikdi vd., 2009a). ÇMD, yeraltında su ve nemle karşılaştığında içerisindeki sülfürlü mineraller (pirit vb.) oksidasyona uğrar. Meydana gelen sülfat (SO_4^{2-}), kalsiyum hidroksit (CH) ve kalsiyum alüminat (C_3A) gibi fazlar ve hidratasyon ürünleri ile beraber tepkimeye girerek genleşme özelliği taşıyan etrenjit ve alçıtaşı oluşumuna sebebiyet vermektedir (Yılmaz, 2013). Bu minerallerin dolgunun dayanım ve duraylılığına olumsuz etkileri olduğu belirtilmiştir (Kesimal vd., 2004; Erçikdi vd., 2009a).

Macun dolgunun asit ve sülfata karşı direnç gösterebilmesi nedeni ile macun dolgu karışımı için tercih edilen bağlayıcının fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri önem arz etmektedir (Benzaazoua vd., 2004; Yılmaz, 2013). Portland çimentoları (PÇ) gibi ASTM Tip 1 çimentolar yüksek kalsiyum içeriğine sahip bağlayıcılardır ve sülfat ataklara karşı dayanıklı değildir. Bunların aksine sülfür içeriği yüksek atıklardan hazırlanmış macun dolguda puzolanik mineral katkı maddeleri (uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu veya doğal puzolan) içeren Portland kompoze çimentosu (PKÇ) veya sülfata dayanıklı çimento (SDÇ) gibi ASTM Tip 5 olan bağlayıcılar kullanılabilir (Benzaazoua vd., 2002; Kesimal vd., 2004; Erçikdi vd., 2009a).

Erçikdi (2009), çimento tipinin, sülfür içeriği yüksek (%26) maden atığı kullanılarak hazırlanmış macun dolgu üzerindeki etkisini belirlemek için Portland çimentosu (PÇ), Portland kompoze çimentosu (PKÇ), sülfata dayanıklı çimento (SDÇ) ve Portland çimentosu ile sülfata dayanıklı çimentonun (%50 PÇ - %50 SDÇ) karışımı ile %5 bağlayıcı oranında macun dolgu örnekleri hazırlamıştır. Bu çalışmaya göre 56 güne kadar bütün çimento tiplerinde dayanım artışı olduğu ve 28 günlük sür süresi tamamlandığında ise 0.7 MPa dayanım değerinin üzerine sadece PÇ ile hazırlanmış örneklerin ulaştığı gözlenmiştir. Sülfata dayanıklı çimento (SDÇ) ile hazırlanmış örneklere bakıldığında ise PÇ ve PKÇ ile hazırlanmış örneklere göre dayanım artış süreci daha yavaş gerçekleşmiştir. 56 günlük kür alma süresinden sonra ise PÇ ve PKÇ ile hazırlanmış numuneler dayanım kaybı yaşama eğiliminde olduğundan %5'lik bir bağlayıcı oranının sülfürce zengin maden atıkları ile hazırlanmış numuneler için uzun dönemde uygun olmadığını belirtilmiştir. Sülfürce zengin maden atıklarından hazırlanan macun dolgu numunelerinde uzun dönemde (56-360 günlük kür süresi) görülen dayanım kaybı sülfat atağa maruz kaldığını ortaya koymuştur. 28 gün sonunda, PÇ ve PKÇ ile hazırlanmış macun dolgu örneklerinin aksine SDÇ'nin tek başına veya PÇ ile ½ oranlarında karıştırılmış olarak kullanıldığı örneklerde 0.7 MPa dayanım sağlayamamış olmasına karşın uzun dönemde dayanım artışının olduğunu görülmüştür. Bunun yanı sıra karışım halinde kullanılan çimentonun (%50 PÇ : %50 SDÇ), tek başına kullanılan SDÇ'ye göre örneklerin dayanım kazanım oranına daha çok katkıda bulunduğu gözlenmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Bağlayıcı tipinin macun dolgu dayanımı üzerindeki etkisi (Erçikdi vd., 2009a)

Portland çimento (PÇ) ve sülfata dayanıklı çimentonun (SDÇ) beraber kullanılması durumunda macun dolgunun performansında olumlu sonuçlar ortaya koyduğu belirtilmiştir. Ancak SDÇ, diğer çimento türlerine kıyasla daha maliyetlidir. Bu sebeple PÇ ve SDÇ'nin $\frac{1}{2}$ oranında karıştırılarak macun dolgu numunelerinde kullanılabileceği önerilmiştir (Erçikdi vd., 2009). Yine benzer olarak sülfürce zengin atıklarla (%26-32 S) hazırlanan macun dolgu örneklerinde uzun dönemde meydana gelebilecek asit ve sülfat etkilerine karşı eşit oranlarda Portland çimentosunun (PÇ) ve sülfata dayanıklı çimentonun (SDÇ) karıştırılarak kullanılmasından yarar sağlanacağı belirtilmiştir (Benzaazoua vd., 2002; Fall ve Benzaazoua, 2005). Sülfür içeriği düşük (%6 S) maden atıkları ile hazırlanacak macun dolgu örneklerinde PÇ kullanımının uygun olduğu ve uzun dönemde dayanım kaybının görülmediği belirtilmiştir (Klein ve Simon, 2006).

Tariq ve Nehdi (2007) ise sülfür içeriği %21 olan tesis atıklarından yapılmış macun dolguda PÇ yerine SDÇ kullanımının dayanım kaybını azalttığını belirlemiştir. Yapılan bir macun dolgu çalışmasında puzolanik mineral katkı maddesince zengin (%21-35) olan Portland kompoze çimentosu (PKÇ) tipi bağlayıcının iki farklı türde atık üzerinde uzun dönemdeki etkileri incelenmiş ve bu bağlayıcı tipinin kil içeriği düşük olan atık için uygun, kil içeriği yüksek atık için ise uygun olmadığı ortaya konulmuştur (Kesimal vd., 2004).

- Bağlayıcı Oranı

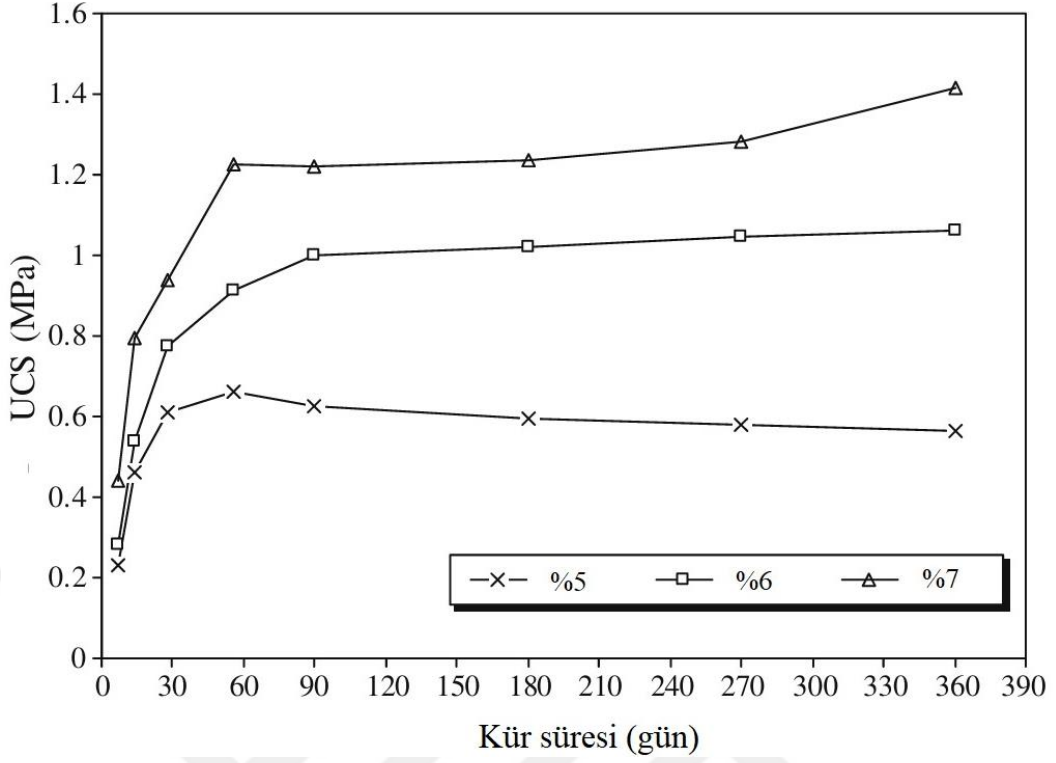
Macun dolgu uygulamalarında yeraltındaki macun dolgunun mekanik davranışı üzerinde (dayanım ve duraylılık gibi) bağlayıcı oranının etkisi büyüktür. Bağlayıcı oranını artırmak macun dolgu dayanımının artışına etki etse de maliyet açısından verimliliği düşürecektir. İşlevine göre %3-9 oranında bağlayıcı ilave edilmesi gereken macun dolgunun işletme maliyetlerine büyük oranda çimento masrafları da etki edecektir (Erçikdi, 2009; Yılmaz, 2013).

İki ayrı atık malzeme ve iki ayrı Portland kompoze çimentosu ile yapılan çalışmada, atık ve çimento tipinden hariç çimentolu macun dolgu (ÇMD) örneklerinde kısa dönemde (28 günde) tek eksenli basınç dayanımlarındaki artışın bağlayıcı oranının %4'ten %7'ye çıkarılması ile sağlandığı ortaya konulmuştur (Kesimal vd., 2005).

Yine benzer şekilde bağlayıcı oranının (%5-7) artırılmasının ÇMD'nin 360 günlük kür süresi boyunca dayanımına olumlu yönde etkilerinin olduğu belirtilmiştir (Erçikdi vd., 2009). %6 ve %7 bağlayıcı oranında uygulaması yapılan macun dolgu numunelerinin 0.7 MPa üzerindeki istenilen dayanım değerini 28 gün sonunda kazanmış olduğu gözlenmiştir. Ancak PKÇ ile hazırlanan macun dolgu örnekleri %5 bağlayıcı oranında 56 günlük kür süresi sonunda dahi 0.7 MPa'lık dayanım değerini sağlayamamıştır.

56 günlük kür sürelerindeki dayanımlara bakılacak olursa %7 oranında PKÇ ile hazırlanan numunelerin %5 bağlayıcı oranında hazırlanmış macun dolgu numunelerine kıyasla 1.9 kat daha fazla dayanım kazanmış olduğu görülmektedir (Şekil 6). Macun dolgunun uzun dönemdeki dayanımı bağlayıcı oranının artması ile önemli ölçüde artmıştır (Şekil 6).

Uzun dönem kür süresinde yaklaşık olarak %15'lik bir dayanım kaybı yaşayan %5 bağlayıcı oranında hazırlanmış numunelerin aksine yüksek bağlayıcı oranında hazırlanmış numunelerin aynı sürede ekstra dayanım kazanmış olduğu görülmektedir (Erçikdi vd., 2009a).



Şekil 6. Bağlayıcı oranının macun dolgu dayanımı üzerindeki etkisi (Erçikdi vd., 2009a)

1.4.2. Kimyasal Katkı Maddesi Kullanımı

Kimyasal katkı maddeleri taze çimentolu maddelerin özelliklerini değiştirerek iyileştirmek amacıyla belirli oranlarda eklenen maddelerdir. ASTM C 494'e (2008) göre kimyasal katkı maddeleri yedi sınıfta incelenmektedir.

- 1) Tip A: akışkanlaştırıcı
- 2) Tip B: priz geciktirici
- 3) Tip C: priz hızlandırıcı
- 4) Tip D: akışkanlaştırıcı ve priz geciktirici
- 5) Tip E: akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı
- 6) Tip F: yüksek oranda akışkanlaştırıcı
- 7) Tip G: yüksek oranda akışkanlaştırıcı ve priz geciktirici.

Beton teknolojisinde kimyasal katkı maddelerinin (KKM) kullanımı, macun dolgudaki kullanımına oranla günümüzde daha yaygındır. Macun dolgunun su/çimento oranı, betonla karşılaştırıldığında neredeyse 8 kat daha fazladır ve dolgudaki poroziteyi artırarak dayanımın azalmasına sebep olmaktadır (Erçikdi, 2009). Bundan dolayı özellikle akışkanlaştırıcı maddeler; dayanım kazanımını artırması, çimento tüketimini azaltması, akışkanlığı iyileştirmesi, pompalama işleminde kolaylık sağlaması, dolgu nakil hattındaki aşınma oranını azaltması, dolgunun daha uzak mesafelere naklinin sağlanması ve daha fazla tesis atığının yeraltı boşluklarında depolanmasına imkan vermesi nedenleriyle macun dolguda kullanılabileceği belirtilmiştir (Gay ve Constantiner, 1998; Henderson ve Revel, 2005; Huynh vd., 2006; Klein ve Simon, 2006). Bunun haricinde madencilik ve dolgu nakli gibi süreçlere ilişkin durumlarda priz hızlandırıcı veya geciktirici kullanımı erken kür dönemlerindeki dayanımlarda artış sağlamakta, üretimin hızını arttırmakta ve dolgu nakliyatında yaşanacak problemlerin (boru hattında tıkanıklık vb.) azalmasına katkı sağlamaktadır (Bloss ve Revel, 2001; Razavi ve Hassani, 2007).

Akışkanlaştırıcı kimyasal maddeler, kimyasal içeriklerine göre %10-30 oranında su azaltabilmektedirler. Lakin gereğinden fazla KKM kullanımının, akışkanlığı arttıracak ve betonun stabilitesini kaybederek ayrışmasına sebebiyet verebileceği belirtilmiştir (Türkel ve Felekoğlu, 2004). Macun dolgu uygulamalarında bağlayıcı olarak Portland çimento (PÇ) ile beraber akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı KKM kullanımının, dolgunun dayanım kazanımlarında 28-360 günlük kür süresi arasında %80 artış sağlamış olduğu ve uzun dönemde dayanım kayıplarının önüne geçildiği belirtilmiştir (Klein ve Simon, 2006).

1.4.3. Mineral Katkı Maddesi Kullanımı

Mineral katkı maddeleri; volkanik küller, tüfler (pumis gibi), kalsine olmuş killer ve şeyller olarak bilinen malzemeler doğal puzolanlar, yüksek fırın cürufu, uçucu kil ve silis dumanı gibi çeşitli sanayi artıklarından veya ısıtılma tabii tutulan doğal maddelerden oluşan malzemeler yapay puzolanlar olarak sınıflandırılmaktadır. Tras olarak da bilinen doğal puzolanlar yaygın olarak volkanik kayalardan oluşmaktadır (Erçikdi, 2009). Puzolan, çok ince bir şekilde öğütülerek bağlayıcı özellikte ürünler (C-S-H jeli) oluşturmak amacıyla uygun sıcaklık ve nem varlığında kimyasal olarak portlandit (CH) ile tepkimeye giren silisli veya silis ve alüminli madde olarak tanımlanır (ASTM C 219-07a, 2007).

Puzolanlar, mineral katkı maddesi olarak doğrudan çimentoya ikame edilerek kullanılabilmelerinin yanı sıra belirli oranlarda Portland çimento ile beraber de öğütölme işlemi sonrasında katkılı çimento olarak üretilerek de kullanımı mevcuttur. Puzolanik maddelerin puzolanik etkinliğine etki eden faktörlerine bakıldığında malzemenin fiziksel özellikleriyle (tane boyut dağılımı ve tane şekliyle), kimyasal ve mineralojik bileşimiyle doğrudan ilişkili olduğu vurgulanmıştır (Erçikdi, 2009; Erçikdi vd., 2010). Mineralojik olarak yüksek oranda camsı faz ve alkali feldspat, düşük oranda kil minerali içermesi malzemenin iyi bir puzolanik etkiye sahip olması ile örneklendirilebilir (Alp vd., 2003). Puzolan olarak kullanılacak malzemenin benzer bir şekilde kimyasal içerik bakımından en az %70'ini $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplamı oluşturmalıdır (ASTM C 618-08a, 2009). Ayrıca fiziksel olarak da en az $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ özgül yüzey alanına sahip olması gerektiği ve özgül yüzey alanının artması malzemede puzolanik etkinliğin artışı, dayanım ve duraylılığa da olumlu bir katkısı olduğuna değinilmiştir (Erçikdi, 2009).

Mineral katkı maddesi kullanımı, çimentolu karışımlarda portlanditin meydana getirebileceği olumsuz etkileri (ikincil alçıtaşı oluşumu vb.) azaltabilmektedir. Çimentolu karışımlarda puzolanların mineral katkı maddesi olarak tercih edilmesi bizlere; i) porozite, boşluk oranı ve geçirgenliği düşürmek, ii) alkali-silika reaksiyonu ve asit ve sülfat etkisinin yol açtığı dayanım ve duraylılık kaybının önüne geçmek, iii) çimento tüketimini dolayısı ile çimento maliyetini azaltmak, iv) puzolanlarla ilgili (uçucu kül vb.) atığın depolanması ve rehabilitasyon maliyetlerini düşürmek ve çevreye karşı ortaya çıkardığı olumsuz koşulları (tozlanma, tarım ürünlerine verilen zarar, çevre kirliliği vb.) indirmek gibi avantajlar sağlamaktadır (Erçikdi, 2009).

Yüksek fırın cürufu, uçucu kül, atık cam malzeme gibi yapay puzolanların macun dolgu da kullanımları, özellikle sülfürlü atıklardan hazırlanmış macun dolgularda asit ve sülfat etkisinin neden olduğu dayanım ve duraylılık kaybını engellemesi ve işletme maliyetlerini düşürmesi sebebiyle son yıllardaki kullanımı giderek artmaktadır (Klein ve Simon, 2006; Tariq ve Nehdi 2007; Erçikdi, 2009). Endüstriyel işlemler neticesinde ülkemizde her yıl oldukça önemli oranda yapay puzolan malzeme açığa çıkmaktadır. Örneğin uçucu kül için bu miktarın 2018 yılında 18,6 milyon ton civarında olduğu tahmin edilmektedir (Akgül ve Yoncacı, 2021).

Sülfürce zengin (%30 S) atıklar için macun dolgu karışımına Portland çimentosu yerine ağırlıkça %40-60 uçucu kül eklemenin uzun dönemde yeteri kadar dayanıma ulaşamamış olmasına karşın dayanım kaybının önüne geçtiği belirtilmiştir (Hassani vd., 2001). Yine sülfürce zengin (%32 S) atıklar için %6 ve üzerindeki çimento oranlarında PÇ yerine %50 oranında uçucu kül ikamesi yapmanın olumlu sonuçlar verdiği ortaya koyulurken (Benzaazouza vd., 2002), sülfür içeriği düşük (%6 S) atıklar için de Klein ve Simon (2006) PÇ yerine UK kullanımının yararlı olacağını belirtmiştir. Erçikdi (2009)'da sülfürce zengin atıklardan hazırlanan macun dolguda C sınıfı uçucu kül kullanımının dolgudaki geçirimsizliği azaltması sebebi ile dayanımın arttığını vurgulamıştır.

1.4.4. Reolojik Özellikler

Reoloji, bir malzemenin akışkanlık özelliklerini ifade etmektedir. Macun dolgunun, yer üstü tesisinden itibaren kurulan boru hattı ile yeraltı üretim boşluklarına naklinin sağlanabilmesi için belirli bir akıcılıkta olması gerekmektedir. Bu da reolojik özelliklerin bir malzemenin taşınabilirliğini belirlemek açısından oldukça önemli olduğunu ortaya koymaktadır (Cihangir, 2011). En az enerji ile en yüksek oranda katı malzeme içeren bir dolgu karışımının yeraltına nakledilmesi verimli ve ekonomik olacaktır. Ancak, katı oranının artışı malzemenin akıcılığını düşürecektir. Bu da boru hattında sürtünme kayıplarını artıracak ve tıkanıklıklara sebebiyet vererek dolgu naklinin verimini olumsuz yönde etkileyecektir (Huynh vd., 2006). Bu şartlar göz önüne alındığında macun dolgu proseleri için hazırlanacak olan karışımların reolojik özelliklerinin belirlenmesi sağlıklı bir nakil işlemi için oldukça önemlidir.

Macun dolgunun akıcılığını, karışımın hazırlanacağı atık malzeme, bağlayıcı ve karışım suyunun fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri de önemli ölçüde etkilemektedir. ÇMD'nin akışkanlığına etki edecek başlıca önemli faktörlere aşağıdaki gibi değinilmiştir (Cihangir, 2011).

1. Katı oranı
2. Su/çimento oranı
3. Bağlayıcı tipi ve oranı
4. Mineral ve kimyasal katkı maddeleri
5. Atıkların mineralojik bileşimi

6. Tanelerin yüzey özellikleri (su tutma, zeta potansiyeli vb.)
7. Atık ve bağlayıcı malzemenin tane boyut dağılımı, tane şekli, özgül ağırlığı ve yüzey alanı
8. Karışım suyunun kimyasal (iyon konsantrasyonu ve pH) özellikleri

Pratik olmasından kaynaklı olarak macun dolgunun reolojik özellikleri, genellikle slamp testi ile tespit edilmektedir. Slamp, bir karışımın koni şeklinde tasarlanmış kaygan bir kalıp içerisinde boydan düşürülmesinin bir ölçüsü olarak tanımlanabilmektedir (Şekil 7).



Şekil 7. Slamp ölçümünün şematik gösterimi (URL-3, 2024)

Cihangir (2011), macun dolgunun bünyesinde ihtiva ettiği su arttığında karışımın da slamp değerinin arttığını fakat fazla su içeren karışımın kür süresi uzamakta olduğunu ve dolgunun dayanım ve duraylılığına olumsuz etki ettiğini vurgulamıştır. Akışkanlaştırıcı özellik taşıyan kimyasal katkı maddelerinin, macun dolgu karışımının akıcılığını artırdığı dolayısıyla daha düşük su/çimento oranlarında yeraltına nakledilebildiği belirtilmiştir (Huynh vd., 2006).

1.4.5. Su-Çimento Oranı

Belirli bir yoğunluğa gelmesini istediğimiz macun dolgunun, gerekli kıvama ulaşabilmesi için yeteri kadar su miktarı içermesi gerekmektedir. Bununla birlikte su/çimento oranının artışı ÇMD'nin dayanım kazanmasına etkisinin olumsuz yönde etki edeceği vurgulanmıştır (Yılmaz, 2013).

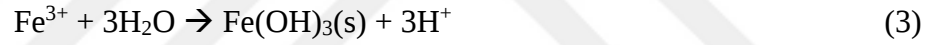
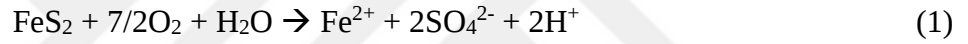
Yılmaz (2013) su içeriğinin artması sonucu çimentolu macun dolgunun dayanım kaybı yaşanmasının, karışımın yüksek su içerdiği durumlarda hidratasyona uğramış çimentonun, düşük su/çimento oranlarında oluşan çimento ile kıyaslandığında daha zayıf bağlayıcı jellerinin oluşmasından kaynaklandığına değinmiştir. Buna ek olarak; uygun değerdeki su/çimento oranı, kullanılan bağlayıcının hidratasyon hızı ve kürlenme sürecinde azalan su/çimento oranından etkilenmektedir.

Yılmaz vd. (2003)'ya göre su içeriği düşük bir dolgu aynı dayanım değerinde daha fazla su ihtiva eden bir dolgudan daha az çimentoya ihtiyaç duymaktadır. Su/çimento oranının düşmesi, ÇMD'nin mikro yapısını (gözeneklilik ve boşluk) iyileştirerek dayanım ve duraylılık performansını arttırarak dolgunun erken kür sürelerinde daha az sivilaşma riski ile karşı karşıya kalmasını sağlamaktadır (Kesimal vd., 2005; Erçikdi vd., 2008a).

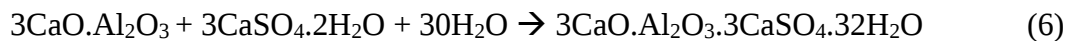
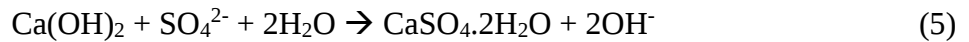
1.4.6. Asit ve Sülfat Etkisi

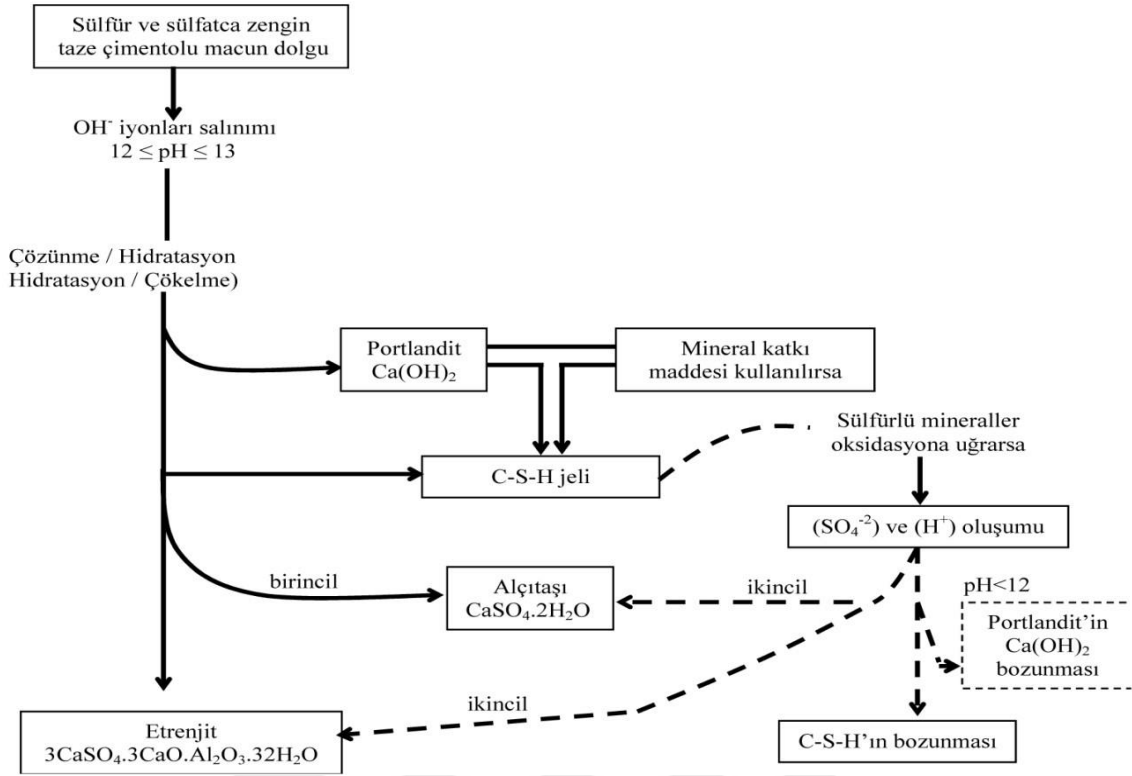
Sülfürlü atıklar ile hazırlanan macun dolgu karışımlarının kısa ve uzun dönemdeki performansları, yeraltına taşınması ve yeraltındaki üretim boşluklarına doldurulması göz önüne alındığında, mineralojik özelliklerine göre karışıma %15-25 oranında karışım suyu eklenmekte ve buda dolgunun yerleştirildiği bölgede uzun süre nemli kalmasına neden olmaktadır (Yılmaz, 2019). Macun dolgu karışımında kullanılan atıklar genellikle ince boyutlara yani yüksek yüzey alanına sahiptirler. Bu nedenle dolgu boşluklu bir mikro yapıya sahip olmakta ve yeraltındaki kür alma süreci nemli ortamlarda gerçekleşmektedir. Atık malzemenin sülfürlü mineraller ihtiva etmesi, boşluklardaki oksijen ve suyun bulunması durumunda SO_4^{2-} iyonları ve asit üretimine ($\text{H}^+:\text{H}_2\text{SO}_4$) neden olmaktadır. Macun dolguda açığa çıkan asit ve sülfat etkisi içsel kaynaklıdır ve ÇMD' nin ihtiva ettiği sülfatça zengin bileşenlere bağlıdır (Erçikdi, 2009; Yılmaz, 2019).

Erçıkıd (2009) sülfürlü minerallerin reaktivitesinin mineral tipine, minerallerin özgül yüzey alanına, ortamın pH ve oksijen içeriğine bağlı olduğuna değinmiştir. Sülfür tipine bağlı olarak sülfürlü minerallerin reaktivite değerine göre sıralamasını pirotit > arsenopirit > pirit > kalkopirit > sfalerit > galen > kalkosit şeklinde yapmıştır (Erçıkıd vd., 2017). Macun dolgunun uzun dönemlerde performansının olumsuz yönde etkilenmesinde özellikle pirit (FeS_2) gibi sülfürlü minerallerin oksijen ve su ile karşılaşması durumunda oksidasyona uğrayarak asit ve sülfat (SO_4^{2-}) oluşumuna neden olması önemli bir etkidir (Yılmaz, 2019). Sülfürlü mineraller içeren atıkların atmosferik şartlardaki oksidasyon reaksiyonları (1-4) sonucu oluşan oksidasyon kaynaklı asit, hidratasyon ürünlerini (C-S-H ve portlandit) bozundurmakta ve zayıflamasına sebep olmakta, buna bağlı olarak pH'nın 9'un altına düştüğü değerlerde hidratasyon ürünlerinin bağlayıcılık performansını yitirmesine neden olarak macun dolgunun dayanım ve duraylılığını düşürmektedir (Erçıkıd vd., 2015; Cihangir ve Akyol, 2018; Yin vd., 2018; Yılmaz vd., 2018).



Yukarıda verilen tepkimeler sonucu açığa çıkan asit ortamın pH'ını düşürmekte ve meydana gelen sülfat (SO_4^{2-}), karışıma eklenen çimentonun içermiş olduğu hidratasyon mineralleri (trikalsiyum alüminat ($3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$) ve portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)) ile reaksiyona girerek ikincil alçıtaşı ($\text{CaSO}_4.2\text{H}_2\text{O}$) (5) ve etrenjit ($3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.3\text{CaSO}_4.32\text{H}_2\text{O}$) (6) minerallerinin oluşmasına neden olmaktadır (Yılmaz, 2019). Bu mineraller genleşme özelliğinin olması sebebiyle hacimce kendilerini meydana getiren ürünlerin hacminden daha büyük olmakta ve hacimde açığa çıkan artış, önemli ölçüde (70-200 MPa) içsel gerilme oluşturarak bilhassa uzun kür süresinde dolgunun dayanım ve duraylılığını kaybetmesine yol açan çatlak oluşumlarına sebebiyet vermektedir (Fall ve Benzaazoua, 2005; Kesimal vd., 2005; Tariq ve Nehdi, 2007).





Şekil 8. Macun dolguda hidrasyon ve bozunma sürecinin şematik gösterimi (Erçikdi vd., 2008b)

1.4.7. Tane Boyut Dağılımı

Macun dolgunun performansına etki eden en önemli etkenlerden biri de macun dolgu karışımının hazırlandığı atık malzemenin tane boyut dağılımı olup atığın uygun değerdeki tane boyut dağılımına sahip olması gerekmektedir ve her boyut aralıklarında gerektiği kadar tane içermelidir (Yılmaz, 2013). Buradaki uygun değerde tane boyut dağılımını sağlamak, iri tanelerden kalan boşlukların ince taneler tarafından doldurularak çimento ile daha iyi bir etkileşim sağlanacak karışımın hazırlanması olacaktır (Erçikdi, 2009). Atık malzemenin macun dolguda kullanılabilir ve yeraltına yerleştirilebilir olması için 20 µm altındaki malzemenin (şlam) ağırlıkça en az %15 olması istenmektedir (Kesimal vd., 2003; Kesimal vd., 2004). Atık malzeme içerisindeki 20 µm altı tane miktarının azalmasının macun dolgu numunelerindeki toplam gözenekliliği de azalttığı belirtilmiştir (Fall vd., 2004).

Atığın içermiş olduğu 20 µm altındaki malzeme miktarının artması karışımın daha fazla su tutmasına neden olacak ve dolgunun dayanımını düşürecektir. İnce malzemenin artışı çimentoyla kaplanması gereken yüzeyi de artırarak yine dolgunun dayanım

performansını olumsuz yönde etkileyerek daha fazla çimento sarfiyatına neden olacaktır (Yılmaz, 2013). Erçikdi (2009), aynı su/çimento oranında hazırlanan iri taneli dolgunun, ince taneli dolguya göre daha fazla dayanım kazandığını belirtmiştir. Fall vd. (2004) ise 20 µm altındaki malzeme oranının %20'den %50'ye çıkarıldığında macun dolgu numunelerinin 28 ve 90 günlük kür süreleri sonunda en yüksek dayanıma ulaştığını belirtirken %50'den daha yüksek oranlarda 20 µm altında malzemenin bulunması durumunda dolgunun dayanımlarında sürekli azalmanın görüldüğü ifade edilmiştir.

1.4.8. Atığın Mineralojik Özellikleri

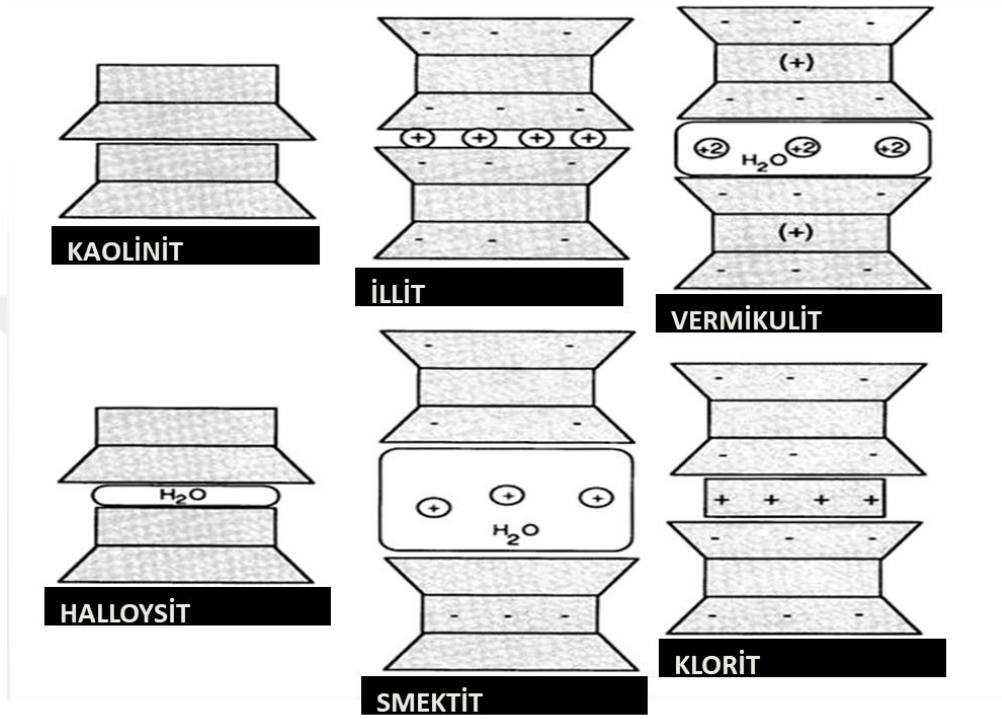
Atığın mineralojik bileşimi, macun dolgunun dayanımını ve duraylılığını etkileyen son derece önemli bir etkidir. Bünyesinde suyu barındırma özelliği fazla olan serisit, mika, klorit ve kil mineralleri dolgu dayanımını düşürmektedir (Henderson ve Revell, 2005; Kesimal vd., 2005). Özgül ağırlığı farklı olan mineraller, minerallerin dolgu içerisindeki çökme süreleri, dolgunun yoğunluğunu ve dayanımına etki etmekte olup kuvars gibi silisli minerallerde dolgunun nakli sürecinde boru hattında korozyonlara yol açmaktadır (Erçikdi, 2009).

Kil minerallerince zengin olan atıklar ile hazırlanan macun dolgunun pirit mineralince zengin olan atıklardan hazırlanan dolguya göre 28 günlük kür süresi sonucunda 1,35-2,2 kat daha düşük dayanım gösterdiği gözlemlenirken buna kil minerallerin bünyesinde su tutma özelliğinin neden olduğu vurgulanmıştır (Erçikdi, 2009).

1.5. Kil Mineralleri

Kil mineralleri, kayaçları oluşturan esas minerallerin ayrışması nedeniyle ikincil silikatlar olarak da adlandırılmaktadırlar. Kil minerallerin bileşenleri, temel olarak sulu alüminyum silikatlardan oluşmaktadırlar. Elektrik yüklü olup bir mıknaş gibi davranan killeri yaprakçıklar halinde, kat kat dizili görünüm verirler. Burada SiO_2 ve Al_2O_3 kristal yapıları (tetragonlar ve oktahedronlar) tabakalar meydana getirmek şartıyla farklı şekillerde bir araya gelmekte ve farklı özelliklerdeki kil minerallerini meydana getirmektedir (URL-4, 2024).

Bazı killerin yaprak arası boşluklarını artırma yeteneğine sahip olması, killerin şişme ve değişim özelliklerinin başında gelmektedir. Bu özellik, kalıcı yük eksikliklerini telafi etmeyi mümkün kılan hidratlı katyonların (Na, Ca, vb.) dâhil edilmesinden gelir (URL-5, 2024).



Şekil 9. Killerin yapısındaki yüklerin şematik gösterimi (URL-6, 2024)

Doygun olmayan zeminlerin davranışını yeterince anlamak, tanımlamak ve tahmin etmek için zeminlerin hem emme özelliklerinin hem de su içeriği miktarlarının ölçümü dikkate alınmalıdır. Zeminleri oluşturan kil minerallerinin su tutma özelliğinde aktif rol oynayan boşluk oranının yanı sıra kil minerallerinin fraksiyonlarının aktivitesi ve katı-sıvı etkileşimi de önemli birer etkidir. Yani bir zeminin hidrolik durumu, katı-sıvı etkileşiminin sonucundan kaynaklanmaktadır.

Katı-sıvı etkileşimleri kılcallık ve adsorpsiyon mekanizmalarının etkisi altında olup killi zeminlerin mineralojik bileşimi ve dokusu, sıcaklık ve gözeneklerdeki sıvının kimyasal özellikleriyle kuvvetli bir şekilde ilişkilidirler. Killerin su tutma özelliklerinde katı fazın oynadığı rolü uygun bir biçimde tanımlamak için özgül yüzey alanı ve gözenek boyutu dağılımı seçilebilir (Romero vd., 2011).

İnce tane boyutlarına sahip olması sebebi ile killler daha fazla özgül yüzey alanına sahip olacaktır. Buda daha fazla su ile etkileşime girmesine yani daha fazla su tutma özelliği göstermelerini sağlayacaktır. Bir zeminin su tutma özelliklerini belirlemek için doygunluk derecesi ve emmiş olduğu suyun miktarı dikkate alınmaktadır. Killerin şişme, büzülme, yükleme ve boşaltma yeteneklerinin tamamı malzemenin su emme kapasitesini etkilemektedir (Romero vd., 2011).

Kimyasal ve fiziksel tanımlamalar yapılamayan zamanlarda killerin sınıflandırılması, killerin mineral kavramı adı altında incelenmesiyle ortaya çıkmıştır. Killler mineralli yapısına göre 4'e, gruplarına göre 7'ye, cinsine göre ise 11'e ayrılmaktadır. Bu sınıflamaya göre killeri aşağıdaki gibi sıralayabiliriz (Koroğlu, 2007).

1. 2 tabakalı olanlar:
 - 1.1. Kaolinit grubu (Kaolinit cinsi);
 - a) Eş boyutlu olanlar (Dikit cinsi)
 - b) Bir yönde uzamış olanlar (Halloysit cinsi)
2. 3 tabakalı olanlar:
 - 2.1. Smektit grubu (Montmorillonit ve bedielit cinsi)
 - 2.2. İllit grubu (İllit cinsi)
 - 2.3. Vermikülit grubu (Vermikülit cinsi)
3. 4 tabakalı olanlar
 - 3.1. Klorit Grubu (Klorit cinsi)
4. Zincir yapısı olanlar
 - 4.1. Sepiyolit Grubu (Sepiyolit, atapulgit ve paligorskit cinsi)

1.5.1. Klorit Minerali

Klorit; iki tetrahedral tabaka, tetrahedral tabaka arasında bir oktahedral tabaka ve bir ara tabaka tabakası ile toplam dört katmandan oluşan hidroksitli ve magnezyumlu bir fillosilikat mineralidir. 2:1:1 katmanlı mineral olarak da adlandırılır. Genellikle demir ve alüminyum ihtiva eder. Rengi yeşilimsi gri veya kahverengimsidir. Genellikle metamorfik kayalar ile beraber bulunur. Klorit genellikle ince tabakalı olmakla beraber yaprak yapısı ile tanınmaktadır. Yüzeyine paralel bir çizgi oluşturacak şekilde bölünmekte ve 2-2.5 sertlik derecesine sahiptir. Yoğunluğu yaklaşık $2,7 \text{ g/cm}^3$ 'tür (Lamm, 2021; URL-7, 2024).



Şekil 10. Klorit mineralinin görüntüsü (URL-8, 2024)

1.6. Uçucu Küller

Uçucu kül, kömürle çalışan termik elektrik santrallerin açığa çıkardığı bir atık ürünüdür. (Türker vd., 2009)’e göre termik santrallarda ince öğütme işlemi yapıldıktan sonra yakılan kömürden aşağıda belirtilen üç farklı külün elde edilmesi mümkündür. Bunlar;

- Göreceli olarak iri taneli olan, baca gazlarının taşıyamadığı ve kazan tabanına düşen “taban külü”,
- Siklon tipi ocaklarda yakıldıktan sonra suda soğutularak uzaklaştırılan kömürden kazanılan “ham kül” ve
- Çok ince tanelere sahip olan ve baca gazlarının taşıyabildiği “uçucu kül” lerdir.

Uçucu külün ayırıcı nitelikleri; santral tipine, işletim biçimine, yakılan kömürün cinsi ve bu kömürün yanma koşullarına, kömür bileşimine ve yakma işleminin gerçekleştiği sisteme göre değişmektedir. Uçucu küllerin bölgeden bölgeye hatta aynı bölgede dahi farklılık göstermeleri; fiziksel, kimyasal, mineralojik ve puzalonik özelliklerinin en bariz ortak yanıdır. Uçucu kül, özellikle son yıllarda geliştirilen araştırmalar ile beraber çimento ve beton üretiminde kullanımı sık görülen ve puzolanik özellikler taşıyan bir malzemedir. Uygun oranlarda ve doğru kullanımı halinde betonun birçok özelliğine fayda sağladığı ve bilhassa kimyasal etkenlere karşı dayanıklılığı arttırmaktadır (Görhan vd., 2009).

ASTM C 618 (2000)'e göre uçucu küller F ve C sınıfı olarak ikiye ayrılmaktadırlar. Bu sınıflar ve temel özellikleri aşağıdaki gibidir.

a) F sınıfı uçucu küller bitümlü kömürlerin yakılması ile üretilmektedir ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %70'den daha fazla olan uçucu külleri sınıflamaktadır. Buna ek olarak bu küllerin CaO yüzdesinin %10'un altında olması düşük kireçli olmalarını nitelendirmektedir. F sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğe sahiptirler.

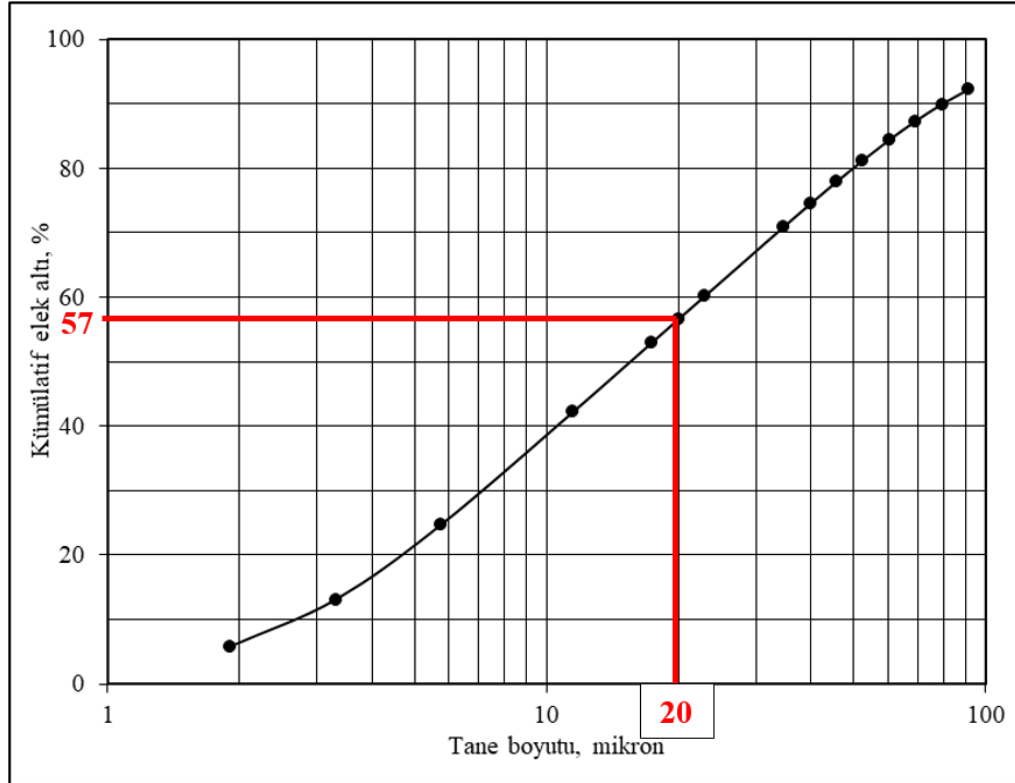
b) C sınıfı uçucu küller ise, linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesinin %50'den yüksek olduğu küllerdir. Ayrıca C sınıfı uçucu küllerin bileşimindeki CaO oranı %10'dan fazladır. Bu da onların yüksek kireçli uçucu kül olarak nitelendirilmesini sağlamaktadır. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğine ek olarak bağlayıcı özellik de taşımaktadırlar.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Numune Karakterizasyonu

Deneysel çalışmalarda kullanılan numuneler (atık malzeme, çimentolar, uçucu kül, akışkanlaştırıcı, kum) bir maden işletmesi tarafından sağlanmıştır. Deneyde kullanılan malzemelerin özellikleri KTÜ (Merkezi Araştırma Laboratuvarı, Kaya Mekaniği ve Macun Dolgu Laboratuvarları) ve Bureau Veritas laboratuvarlarında belirlenmiştir.

Atığın tane boyut dağılımı (Şekil 11) Malvern Mastersizer (Version 2.15, Malvern Instruments Ltd, UK) cihazı ile belirlenmiştir. Atığın 20 mikron altı malzeme miktarı ağırlıkça %57 olup, macun oluşturmak için gerekli limit değerden (ağırlıkça %15) daha yüksektir. Landriault (2001)'e göre, kullanılan tesis atıkları bu haliyle orta boyutlu macun dolgu malzemesi sınıfına (ağırlıkça %35-60, -20 μm) girmektedir. İlave deneysel çalışmalarda kullanılan kaba atığın 20 mikron altı malzeme miktarı ağırlıkça %53'tür. Atığın özgül ağırlığı (SG) piknometre kullanılarak $3,78 \text{ g/cm}^3$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 11. Tesis atığının tane boyut dağılımı

Deneysel çalışmalarda Portland çimento (CEM I 42,5N) ve Portland kompoze çimento (CEM II/A-LL 42,5N) kullanılmıştır. CEM II/A-LL 42,5N %12-20 oranında katkı maddesi içermektedir. İlave deneysel çalışmalarda kullanılan uçucu kül termik santralden temin edilmiş olup, C sınıfına girmektedir.

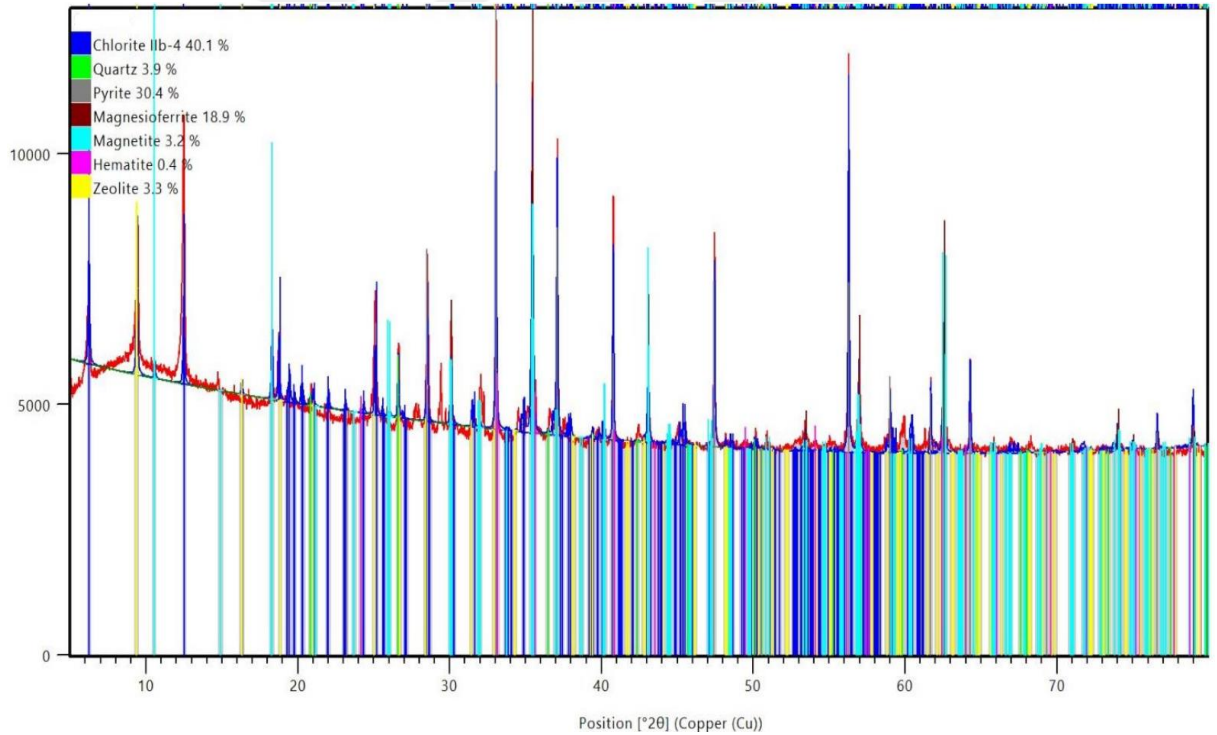
Atık ve bağlayıcı malzemelerin kimyasal bileşimi XRF ve yaş kimyasal analiz sonrası ICP AES (Inductively Coupled Plasma – Atomic Emission Spectroscopy) cihazı kullanılarak yapılmıştır (Tablo 1). Atığın sülfür içeriği gravimetrik analizle belirlenmiş olup, %13,81'dir.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan atık, uçucu kül ve bağlayıcıların kimyasal ve fiziksel karakterizasyonu

Karakteristik	Atık	CEM I 42,5 N	CEM II/A-LL 42,5 N	Uçucu Kül
Kimyasal bileşim	(%)	(%)	(%)	(%)
SiO ₂	17,99	19,38	16,32	29,27
Al ₂ O ₃	6,27	5,00	4,30	8,81
Fe ₂ O ₃	52,44	2,86	2,50	5,48
MgO	5,58	2,12	1,88	5,24
CaO	2,06	65,04	63,59	27,26
Na ₂ O	0,47	0,22	0,32	0,66
K ₂ O	0,42	0,70	0,60	3,64
TiO ₂	0,71	0,30	0,25	0,62
P ₂ O ₅	0,13	0,10	0,09	0,89
MnO	0,08	0,06	0,05	0,02
Cr ₂ O ₃	0,011	0,032	0,025	0,056
Kızdırma kaybı (LOI)	13,3	4,0	9,9	2,7
Toplam	99,46	99,81	99,83	84,65
Piritik kükürt (S ⁻²)	13,81	-	-	-
Pirit içeriği (FeS ₂)	25,89	-	-	-
Özgül ağırlık (g/cm ³)	3,78	3,13	3,04	2,42

Atık malzemenin XRD paterni ve mineralojik bileşimi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan PANalytical X-Pert3 Powder X-ışınları difraktometre (XRD) cihazı kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 12). Ayrıca Rietvelt analiz yöntemi kullanılarak numunenin içerdiği minerallerin miktarsal oranları elde edilmiştir. Şekil 12’de görüldüğü üzere atık içerisinde baskın olarak bir kil minerali olan klorit (%40,1) ve sülfürlü bir mineral olan pirit (FeS_2) (%30,4) ($(\text{Mg,Al,Fe})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$) bulunmaktadır.

Atık malzeme için yapılan piritik kükürt (S^{2-}) analizi sonucundan da atığın pirit içeriği dolaylı olarak %25,89 olarak tespit edildiğinden (Tablo 1), kimyasal ve mineralojik analiz sonuçları birbiriyle yaklaşık uyumludur. Atık içerisinde klorit ve pirit minerallerinin dışında %18,9 oranında magnezyum ferrit (MgFe_2O_4), hematit (Fe_2O_3), manyetit (Fe_3O_4), kuvars (SiO_2) ve zeolit (SiO_2) bulunmaktadır.



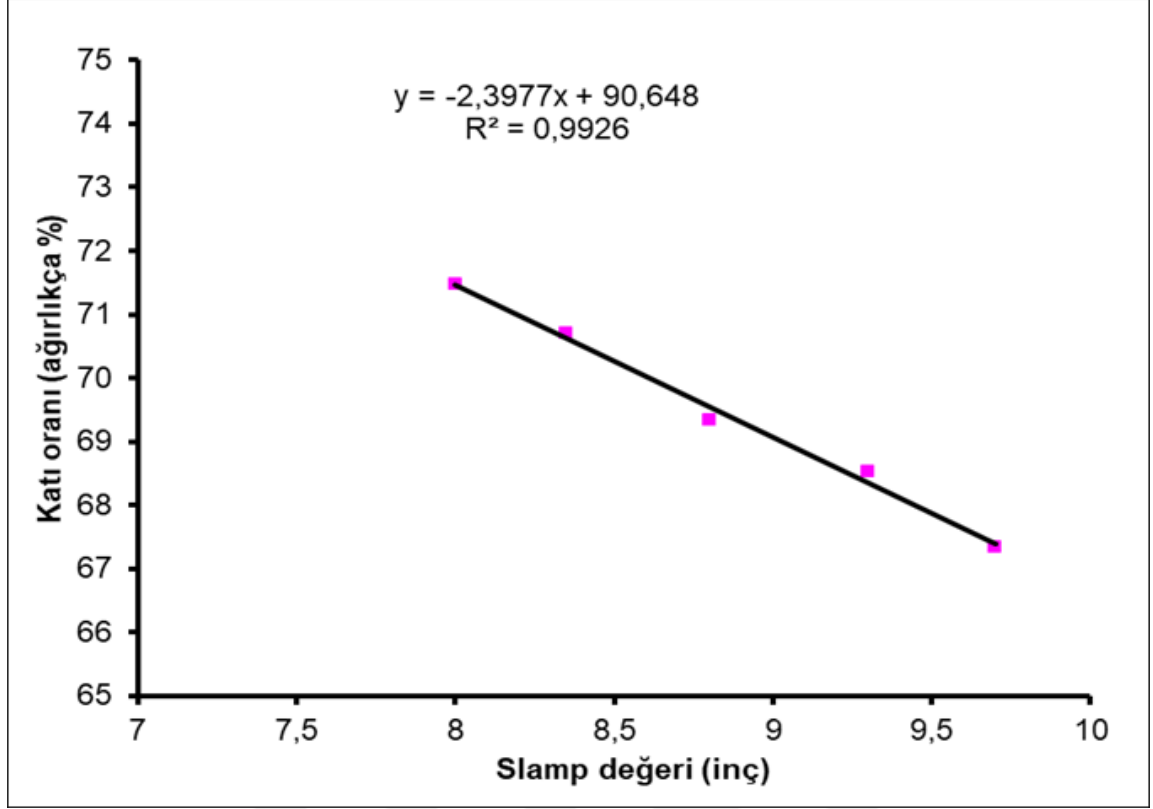
Şekil 12. Atık malzemenin XRD paterni ve içerdiği mineraller

2.2. Numune Hazırlama

İstenen karışım özelliklerinde numune hazırlama işlemine başlamadan önce çimento içermeyen atık malzeme için 12 inch yüksekliğindeki standart slamp ölçer ile slamp ölçümleri gerçekleştirilmiş ve katı oranı - slamp grafiği oluşturulmuştur (Şekil 13 ve 14). 8 inch slamptaki katı oranı %71,41; 9,7 inch slampdaki katı oranı ise %67,34 olarak belirlenmiştir. %68 katı oranındaki karışıma %12 oranında çimento eklendiğinde ($161,7 \text{ kg/m}^3$) katı oranı %70,73'e çıkmaktadır (Tablo 2).



Şekil 13. Farklı akışkanlıklarda slamp ölçümleri



Şekil 14. Katı oranına bağlı slamp değerleri

Tablo 2. Çimento eklendiği durumda karışımların katı oranındaki değişim

Çimentosuz Katı Oranı (Atık+Su)	%7 Çimento eklendiğinde (Atık+Su+Çimento)	%12 Çimento eklendiğinde (Atık+Su+Çimento)
%65	%66,64	%67,85
%67	%68,57	%69,75
%68	%69,58	%70,73

Çimentolu macun dolgu karışımlarını hazırlamak için gerekli bileşenlerin (atık, bağlayıcı, su, uçucu kül, kum) miktarı önceden belirlenen dizayna göre hesaplanmıştır. Çimento, karışıma ağırlıkça katı oranına göre %7, %9 ve %12 oranında ilave edilmiştir. Uçucu kül ve kum, atığa ağırlıkça ikame olarak %5-10 oranında kullanılmıştır. Akışkanlaştırıcı ise ağırlıkça çimentonun %1'i kadar ilave edilmiştir. Hesaplanan miktarda malzeme (atık, bağlayıcı vb.) tartılarak kovaya yerleştirilmiş ve mikserde homojenleşme sağlanıncaya kadar (yaklaşık 7 dk) karıştırılmıştır. Hazırlanan karışımlar 10 cm çapında ve 20 cm yüksekliğinde drenajlı plastik silindir numune kaplarına konulmuştur (Şekil 15). Numuneler hazırlandıktan sonra plastik poşetle kapatılmış ve 14-360 günlük kür süresi aralığında yeraltı kür şartlarını yansıtacak biçimde %80-85 nem ve 20-25°C'de kürlenmeye tabi tutulmuştur. Macun dolgu numuneleri Tablo 3, 4 ve 5'te verilen dizayn özelliklerine göre hazırlanmıştır.

2.3. Tek Eksenli Basınç Dayanımı Testleri

Bu tez kapsamında, sülfür içeriği yüksek tesis atığı ve iki farklı çimento kullanılarak farklı katı oranı (%65, %68 ve %70) ve akışkanlıklarda (9,5" ve 11,0" slump) hazırlanan çimentolu macun dolgu numunelerinin kısa (14 ve 28 gün) ve uzun (90 ve 360 gün) dönem tek eksenli basınç dayanımları (TEBD) belirlenmiştir. Ayrıca atığa ikame olarak %5-10 oranında kum ve uçucu kül kullanımının macun dolgunun kısa dönem (14 ve 28 gün) dayanımına etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmalara başlamadan önce macun dolgu karışımlarının hazırlanmasında kullanılan atık ve bağlayıcıların detaylı fiziksel, kimyasal ve mineralojik karakterizasyonu yapılmıştır. Tez kapsamında toplam 792 adet macun dolgu numunesi hazırlanmış olup, uygulanan deneysel çalışma programı Tablo 3, 4 ve 5'te verilmiştir.

Tablo 3. Farklı katı oranlarında hazırlanan numunelerin TEBD test programı

Dizayn özellikleri	Çimento tipi	Katı oranı	Kür süresi	Çimento oranı
		%	gün	ağırlıkça, %
Toplam 432 numune	CEM I 42,5 N CEM II/A-LL 42,5 N	65, 68, 70	14, 28 90, 360	7, 9, 12

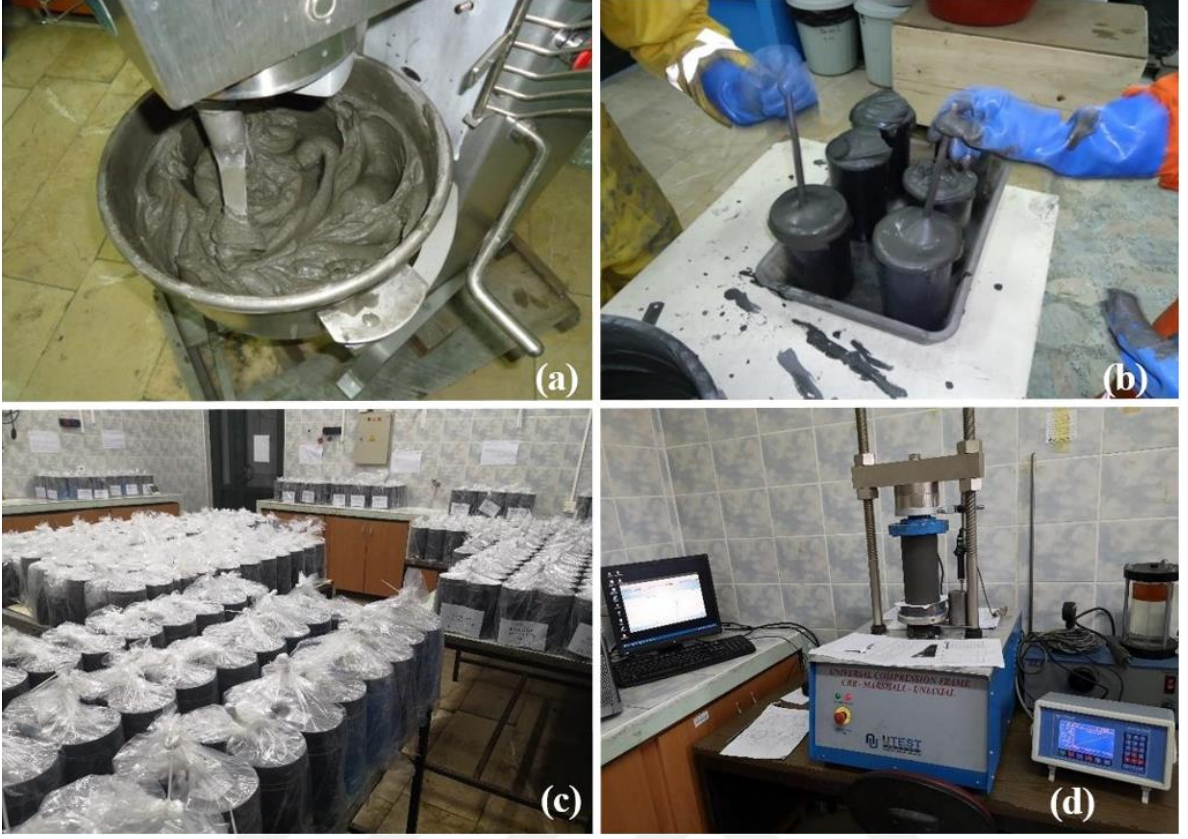
Tablo 4. Farklı akışkanlıklarda hazırlanan numunelerin TEBD test programı

Dizayn özellikleri	Çimento tipi	Slamp	Kür süresi	Çimento oranı
		inch	gün	ağırlıkça, %
Toplam 288 numune	CEM I 42,5 N CEM II/A-LL 42,5 N	9,5", 11"	14, 28 90, 360	7, 9, 12

Tablo 5. Ek deneysel çalışmalarda hazırlanan numunelerin TEBD test programı

Dizayn Özellikleri (Toplam 72 numune)	Çimento tipi	Atığa ikame oranı	Katı oranı	Kür süresi	Çimento oranı
		%	%	gün	ağırlıkça, %
Atık yerine UK kullanımı Toplam 12 numune	CEM I 42,5 N	5, 10	68	14, 28	9
Atık yerine kum kullanımı Toplam 12 numune		5	68		9, 12
Atık yerine kum kullanımı Toplam 6 numune		10	68		12
Atık yerine kum kullanımı Toplam 24 numune		5, 10	70		9, 12
Normal atık kullanımı Toplam 6 numune		-	70		14
Kaba atık kullanımı Toplam 6 numune		-	70		12
Ağırlıkça çimentonun %1'i kadar akışkanlaştırıcı kullanımı Toplam 6 numune		-	70		14

Çimentolu macun dolgu numuneleri önceden belirlenen kür süreleri sonunda (14-360 gün) yük kapasitesi 50 kN ve yükleme hızı 0.5 mm/dk olan bilgisayar kontrollü servo preste (UTEST) ASTM C 39'a göre tek eksenli basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. Bulgular ve tartışma kısmındaki tablo ve grafiklerde her bir kür süresi için 6 adet numunenin ortalama dayanım sonucu verilmiştir.



Şekil 15. Macun dolgu numunelerinin hazırlanması ve dayanım testi: karıştırma (a); sıkılama (b); kür alma (c) ve TEBD testi (d)

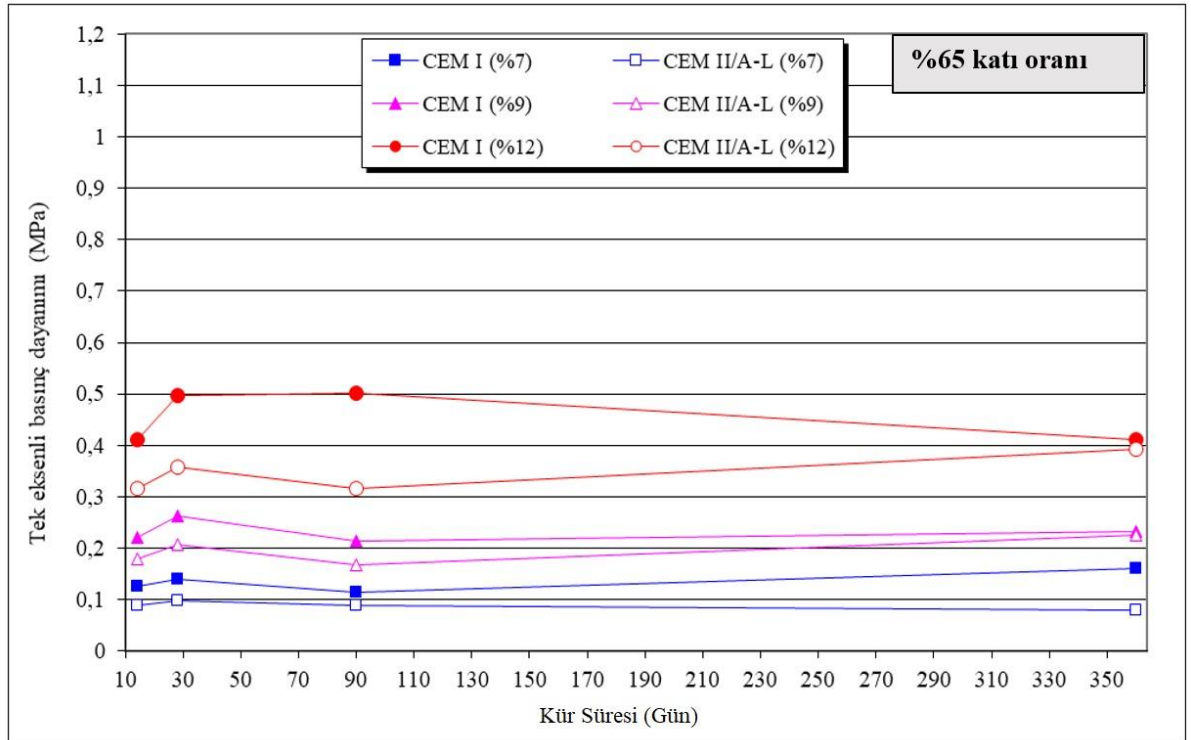
Tez kapsamında hazırlanmış toplam 792 adet numune ve 14, 28, 90 ve 360 günlük kür sürelerinde tek eksenli basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. İlgili numunelerde dayanım sonuçları; katı oranın etkisi, akışkanlığın (slump) etkisi, bağlayıcı tipinin etkisi, kil minerallerinin etkisi, bağlayıcı oranının etkisi, kum ikamesinin etkisi, uçucu kül ikamesinin etkisi, kaba atık kullanımının etkisi ve akışkanlaştırıcı katkısının etkisi başlıkları altında incelenmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Macun dolgu karışımları çoğunlukla 28 günde 0.7-2.0 MPa dayanım sağlayacak biçimde dizayn edilmektedir (Brackebusch, 1994). Bu tez kapsamında, numunelerin 28 günde ≥ 1.0 MPa dayanım üretmesi ve 360 gün boyunca dayanımlarını koruması (duraylılık) kriter olarak esas alınmıştır. Bu kısımdaki grafiklerde her bir kür süresi için 6 adet numunenin ortalama dayanım sonucu verilmiştir.

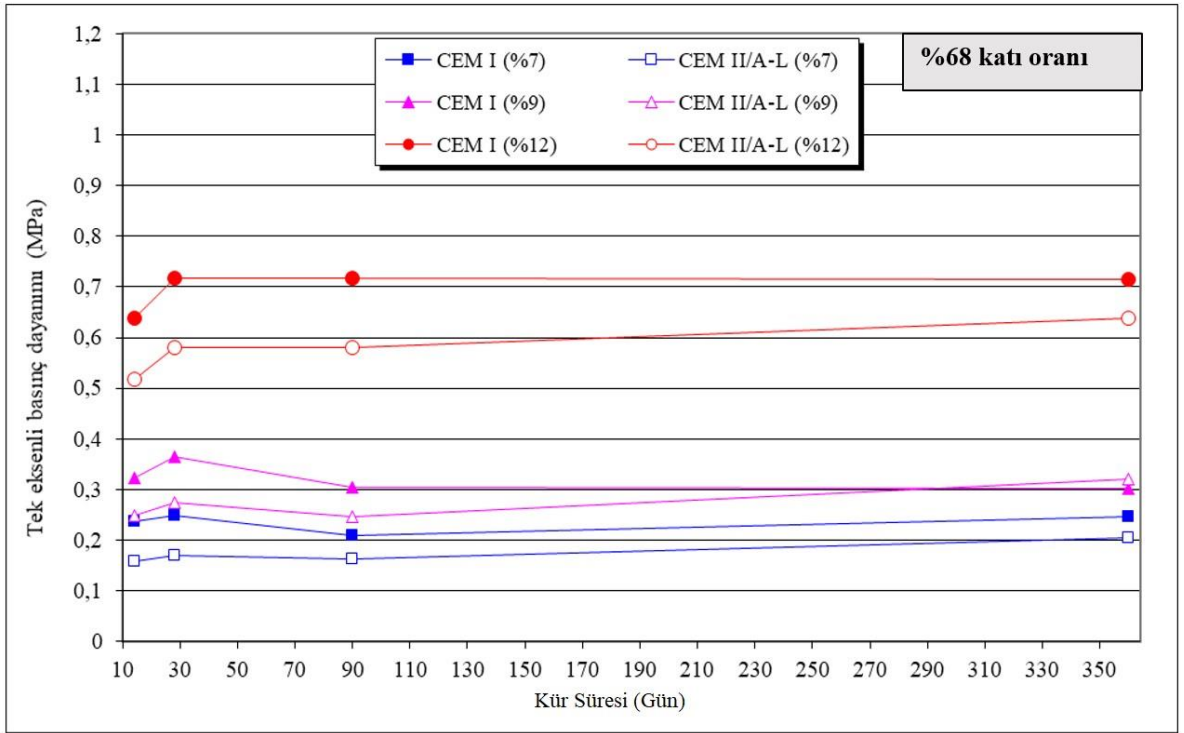
3.1. Katı Oranının Etkisi

Katı oranının etkisini incelemek amacıyla %65, %68 ve %70 katı oranında CEM I 42,5 N ve CEM II/A-LL 42,5 N bağlayıcı kullanılarak %7, %9 ve %12 bağlayıcı oranında hazırlanan numunelerin ortalama tek eksenli basınç dayanımı sonuçları Şekil 16, 17 ve 18’de verilmiştir.



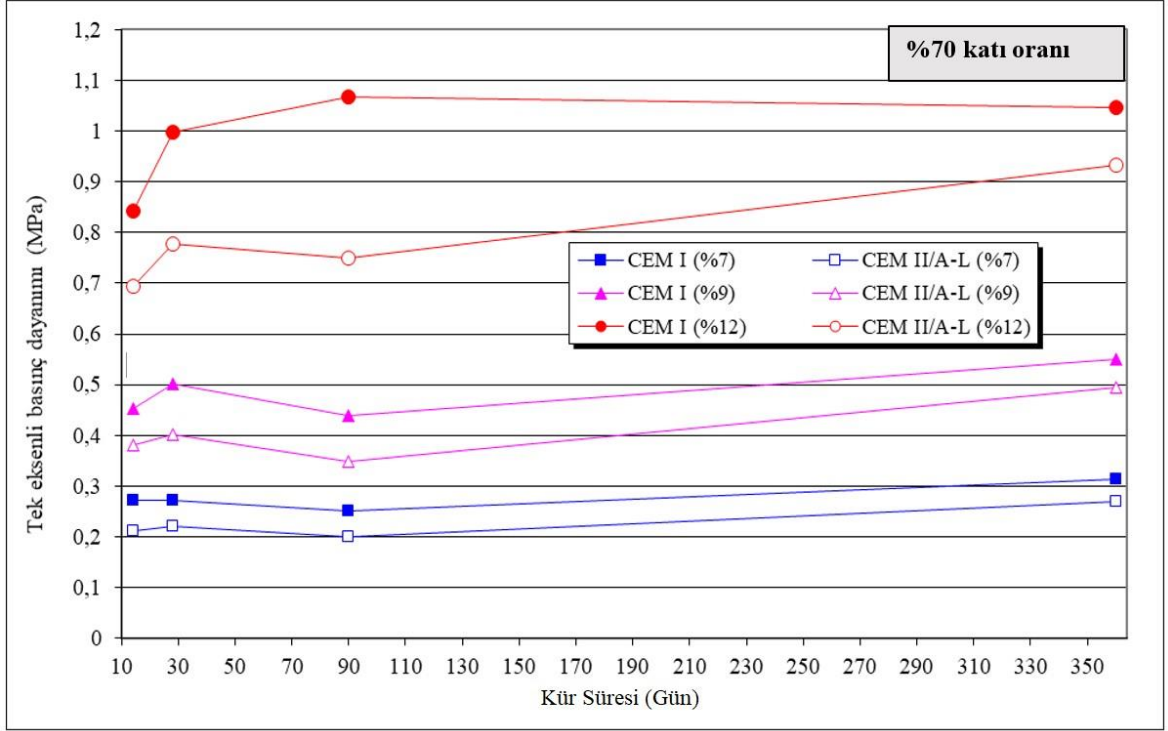
Şekil 16. %65 katı oranında hazırlanan numunelerin 14-360 gün kür süresi sonundaki dayanımları

Şekil 16 incelendiğinde, %65 katı oranında hazırlanan ve %7-12 oranında çimento (87-148 kg/m³) içeren numunelerin hiçbiri 28 günlük kür süresi sonunda hedeflenen $\geq 1,0$ MPa dayanım kazanımını sağlayamamıştır. 28 günde en yüksek dayanımı (0,5 MPa) CEM I 42,5 kullanılarak %12 bağlayıcı oranında hazırlanan numuneler üretmiştir. %65 katı oranında CEM II/A-LL 42,5 N bağlayıcı kullanılarak %7 bağlayıcı kullanılarak hazırlanan numuneler tüm kür sürelerinde 0,1 MPa'nın altında dayanım üretmiştir.



Şekil 17. %68 katı oranında hazırlanan numunelerin 14-360 gün kür süresi sonundaki dayanımları

Şekil 17, %68 katı oranında CEM I 42,5 N ve CEM II/A-LL 42,5 N bağlayıcı kullanılarak %7, %9 ve %12 bağlayıcı (95-162 kg/m³) oranında hazırlanan numunelerin ortalama tek eksenli basınç dayanımı sonuçlarını göstermektedir. Katı oranının %65'ten %68'e çıkmasıyla dayanım kazanımlarında artış olmuştur. Buna karşın, %68 katı oranında hazırlanan ve %7, %9 ve %12 oranında çimento içeren macun dolgu numuneleri 28 günde istenen $\geq 1,0$ MPa dayanım kazanımını sağlayamamıştır. 28 günde en yüksek dayanımı 0,72 MPa ile %12 oranında CEM I 42,5 N içeren numuneler üretmiştir.



Şekil 18. %70 katı oranında hazırlanan numunelerin 14-360 gün kür süresi sonundaki dayanımları

Şekil 18, %70 katı oranında CEM I 42,5 N ve CEM II/A-LL 42,5 N bağlayıcı kullanılarak %7, %9 ve %12 bağlayıcı ($100-172 \text{ kg/m}^3$) oranında hazırlanan numunelerin ortalama tek eksenli basınç dayanımı sonuçlarını göstermektedir. İstenen dayanım kazanımını (28 günde $\geq 1.0 \text{ MPa}$) sadece %12 bağlayıcı oranında CEM I 42,5 N kullanılarak hazırlanan numuneler sağlamıştır (Şekil 18). Ayrıca numuneler 360 gün boyunca dayanımını korumuştur. Katı oranının %65'ten %70'e çıkmasıyla dayanım kazanımı %100'e varan artışlar sağlamıştır. Katı oranının artmasıyla dayanım kazanımındaki artış su/çimento oranının azalması, palp yoğunluğunun artması ve aynı bağlayıcı oranında daha fazla çimento içermesi (%65 katı oranında $87-148 \text{ kg/m}^3$ çimentoya kıyasla %70 katı oranında $100-172 \text{ kg/m}^3$ çimento) ile ilişkilendirilebilir (Tablo 6). Erçikdi (2009)'da su/çimento oranının azalması ile birlikte dolgunun mikro yapısındaki gözeneklerin ve boşlukların azalmasıyla dayanım kaybının azalmasına etki ettiği sonucuna ulaşmıştır. Gözenek ve boşluk miktarının azalması, dolgu numunesine nüfuz edebilecek su ve oksijen miktarının düşmesine imkan sağlayarak macun dolgunun uzun dönemdeki dayanım kaybının düşmesine olanak vermektedir (Benzaazoua, 2004; Erçikdi vd., 2009a).

Şekil 16-18 ve Tablo 6’da görüldüğü üzere katı oranının %65’ten %70’e çıkması sonucu aynı bağlayıcı oranında (%7, %9 ve %12) ortama ilave edilen çimento miktarı ortalama %15-16 oranında artarken (87-148 kg/m³’ten 100-172 kg/m³’e) (Tablo 6), numunelerin dayanım kazanımı ~%100 artmıştır (Şekil 16 ve 18).

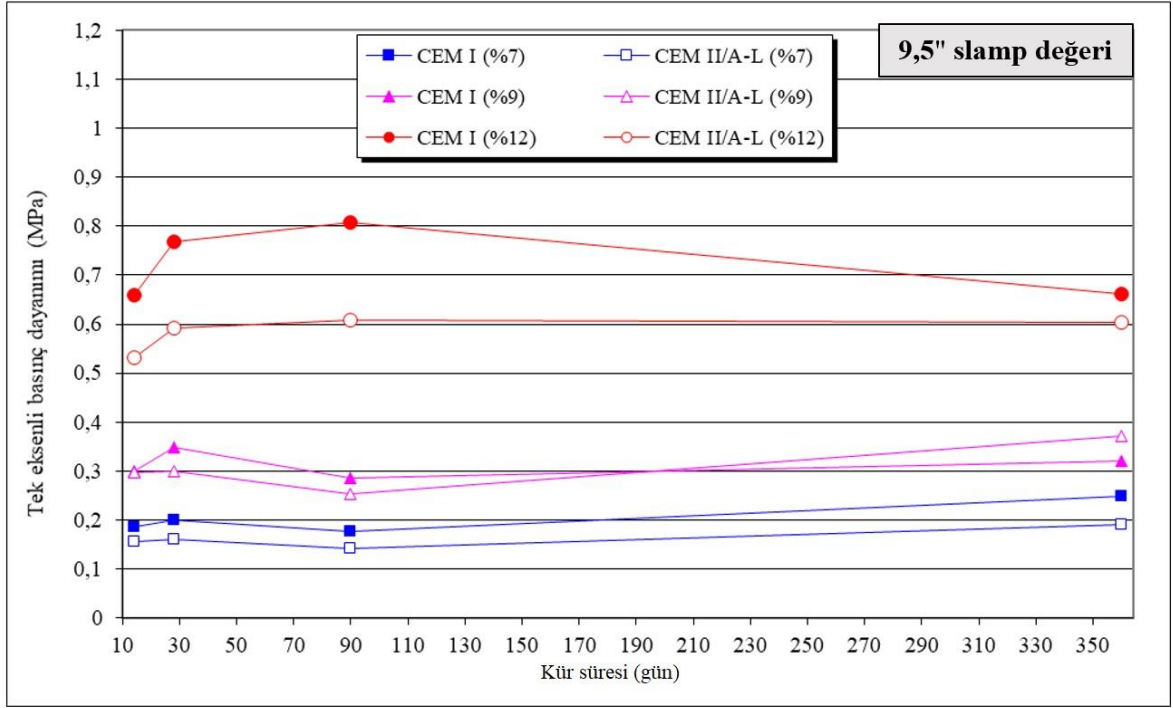
Tablo 6. Farklı katı oranlarında hazırlanan dolgu karışımlarının su/çimento oranları

Katı oranı (%)	Palp yoğunluğu (gr/cm ³)	Bağlayıcı oranı (%)	Bağlayıcı miktarı (kg/m ³)	Su/çimento oranı
65	1,90	7	86,8	7,69
		9	111,4	5,98
		12	148,2	4,49
68	1,98	7	94,75	6,72
		9	121,61	5,23
		12	161,77	3,92
70	2,04	7	100,44	6,12
		9	128,93	4,76
		12	171,49	3,57

3.2. Akışkanlığın (Slamp) Etkisi

Deneyisel çalışmalar esnasında %70 katı oranında hazırlanan karışımların akışkanlığının düşük olduğu ve bu nedenle yeraltı üretim boşluklarına yerleştirilirken sorun oluşturabileceği gözlenmiştir. Akışkanlığın düşük olmasının bir diğer nedeninin tikiğerde kullanılan flokülantlar olduğu düşünülmektedir. Bağlayıcı miktarındaki artış, bağlayıcı özelliği olan hidrasyon ürünlerinin (CH ve C-S-H) artmasına, macun dolgu mikroyapısının iyileşmesine, permeabilitenin azalmasına ve olası oksidasyonun azalmasına/engellenmesine katkı sağlamaktadır. Belirtilen potansiyel faydalarına karşın bağlayıcı miktarındaki artış, dolgu işletme maliyetlerini artıracaktır. Akışkanlığın (slamp) etkisini incelemek amacıyla 9,5" ve 11" slump değerinde CEM I 42,5 N ve CEM II/A-LL 42,5 N bağlayıcı kullanılarak %7, %9 ve %12 bağlayıcı oranlarında hazırlanan numunelerin ortalama tek eksenli basınç dayanımı sonuçları Şekil 19-20’de verilmiştir.

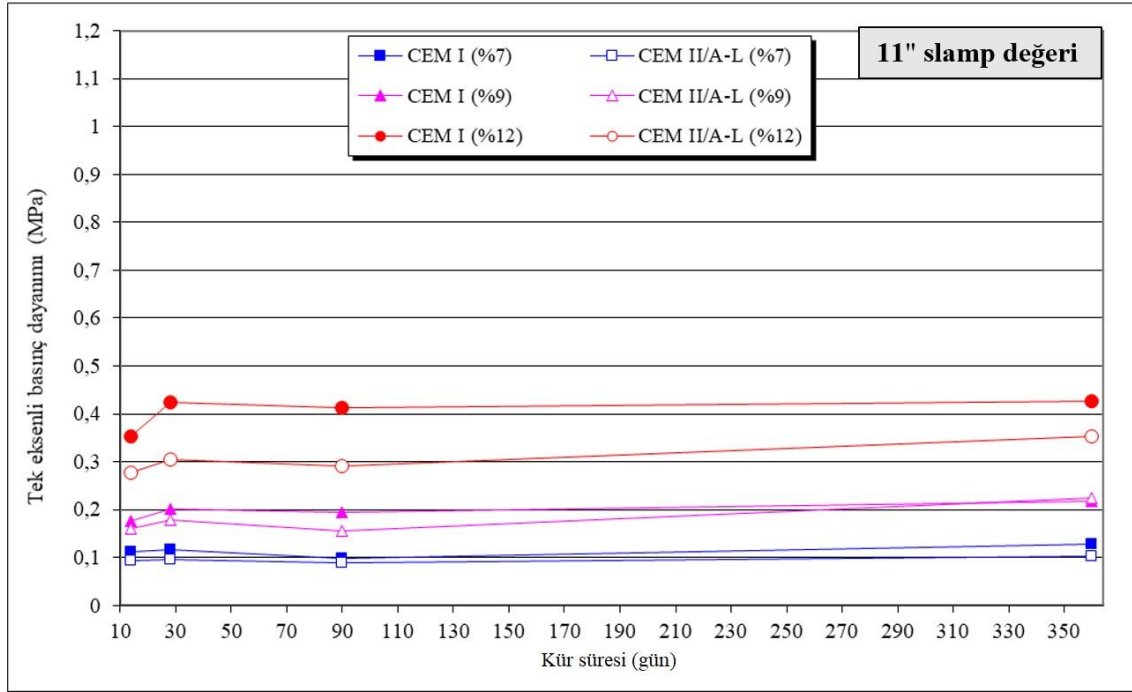
Şekil 19 incelendiğinde, 9,5" slump değerinde hazırlanan ve %7-12 oranında çimento (94-161 kg/m³) içeren numunelerin hiçbirisi 28 günlük kür süresi sonunda istenen $\geq 1,0$ MPa dayanım kazanımını sağlayamamıştır. 28 günde en yüksek (0,768 MPa) dayanımı CEM I 42,5 kullanılarak %12 bağlayıcı oranında hazırlanan numuneler üretmiştir. %65 katı oranında CEM II/A-LL 42,5 N bağlayıcı kullanılarak %7 bağlayıcı kullanılarak hazırlanan numuneler tüm kür sürelerinde 0,2 MPa'nın altında dayanım üretmiştir.



Şekil 19. 9,5" slump değerinde hazırlanan numunelerin 14-360 gün kür süresi sonundaki dayanımları

9,5" slump değerinde hazırlanan numunelerin dayanım sonuçları ile %68 katı oranında hazırlanan numunelerin dayanım sonuçları birbirine oldukça yakındır. Ayrıca numune hazırlama süreçlerinde hem 9,5" slump değerinde hem de %68 katı oranında hazırlanan karışımların akışkanlıklarının dolgunun yeraltı üretim boşluklarına borularla iletilmesi ve yerleştirilmesi açısından oldukça ideal olduğu gözlenmiştir. Ancak 9,5" slump değerinde ve %68 katı oranında hazırlanan numunelerin istenen dayanımı elde etmesi için (28 günde $\geq 1,0$ MPa) 1 m³ dolgu için 161 kg'dan daha fazla (yaklaşık 170-180 kg/m³) çimento içermesi gerektiği anlaşılmaktadır.

11" slump değerinde CEM I 42,5 N ve CEM II/A-LL 42,5 N bağlayıcı kullanılarak %7, %9 ve %12 bağlayıcı (95-162 kg/m³) oranında hazırlanan numunelerin ortalama tek eksenli basınç dayanımı sonuçları Şekil 20'de gösterilmiştir. 11" slump değerinde hazırlanan numuneler 28 günde istenen ≥ 1.0 MPa kriterini sağlayamamıştır. 11" slump değerinde ve %65 katı oranında hazırlanan ve özellikle %7 çimento (85-87 kg/m³) içeren numunelerin genelde 0,1 MPa civarında dayanım ürettiği görülmüştür.



Şekil 20. 11" slump değerinde hazırlanan numunelerin 14-360 gün kür süresi sonundaki dayanımları

11" slump değerinde %7 CEM I 42,5 N çimento oranında hazırlanan numuneler 28 günlük kür süresi sonunda bile yüksek nem içeriğine sahiptir (Şekil 21). 11" slump değerinde ya da %65 katı oranında hazırlanacak macun dolgunun düşük miktarda (85-87 kg/m³) çimento içermesi durumunda yeraltında sıvılaşma (liquefaction) riski ve bunun sonucunda barikat yıkılmaları ve cevher seyreilmeleri ile karşılaşılabilir. Ayrıca macun dolgunun geç dayanım kazanması nedeniyle yeraltı üretim döngüsü muhtemelen uzayacaktır. Bu tür sorunlarla karşılaşmamak ve 28 günde $\geq 1,0$ MPa dayanım kazanımı sağlamak için 11" slump değerinde ve %65 katı oranında hazırlanacak 1 m³ dolgunun en az ≥ 180 kg çimento içermesi gerektiği anlaşılmaktadır. Gerekli çimento miktarının deneysel çalışmalarla belirlenmesinde yarar vardır.



Şekil 21. 11" slump değerinde hazırlanan 28 günlük numunelerin kırılmadan önceki durumları (numuneler oldukça zayıf)

9,5" ve 11" slump değerlerinde hazırlanan ve %7, %9 ve %12 oranında çimento içeren macun dolgu numunelerin palp yoğunlukları ve su/çimento oranları Tablo 7’de verilmiştir. 9,5" ve 11" slump ve %65 katı oranında hazırlanan numunelerin düşük dayanım üretmesi sahip oldukları yüksek su/çimento oranıyla doğrudan ilişkilidir.

Tablo 7. Farklı slump değerlerinde hazırlanan dolgu karışımlarının su/çimento oranları

Slamp (%)	Palp yoğunluğu (gr/cm ³)	Bağlayıcı oranı (%)	Bağlayıcı miktarı (kg/m ³)	Su/çimento oranı
9,5" slamp	1,98	7	94,37	6,76
		9	121,14	5,26
		12	161,19	3,94
11" slamp	1,88	7	84,92	7,94
		9	109,05	6,18
		12	145,08	4,63

Sülfürlü tesis atığı kullanılarak farklı katı oranları (%65, %68 ve %70) ve slamp değerlerinde (9,5" ve 11") hazırlanan macun dolgu numunelerinin bazılarının yüzeylerinde 360 günlük kür süresi sonunda çatlamların olduğu (Şekil 22 ve 23), özellikle %65 katı oranı ve 9,5" slamp değerleri ile %12 çimento oranlarında daha belirgin olduğu, bunların bir kısmının dayanımının oldukça düşük çıktığı ve ortalama tek eksenli basınç dayanımı değerlerini olumsuz yönde etkilediği görülmüştür.



Şekil 22. 360 günlük kür süresi sonunda bazı numunelerde oluşan çatlamların yakın görünüşü



Şekil 23. 360 günlük kür süresi sonunda bazı numunelerin üst yüzeyinde oluşan çatlamlar

3.3. Bağlayıcı Tipinin Etkisi

Şekil 16-20’de verilen dayanım sonuçları çimento tipleri açısından değerlendirildiğinde, Portland çimentosu (CEM I 42,5 N) ile hazırlanan numunelerin tüm kür sürelerinde Portland kompoze çimento (CEM II/A-LL 42,5 N) ile hazırlanan numunelere kıyasla daha yüksek dayanım ürettiği görülmektedir. Bununla birlikte CEM II/A-LL 42,5 N ile hazırlanan numuneler erken kür sürelerinde daha düşük dayanım kazanımı sağlarken, CEM I 42,5 N ile hazırlanan numunelerle arasındaki dayanım farkının 360 gün kür süresi sonunda azaldığı görülmektedir. CEM II/A-LL 42,5 N çimento %12-

20 oranında puzolanik katkı maddesi içerdiğinden uzun dönemde daha iyi performans göstermiştir. Bunun nedeni puzolanların, çimentonun hidratasyonu sonucu açığa çıkan Portlandit $[(Ca(OH)_2]$ ile reaksiyona girerek ilave C-S-H bağlayıcı jeli oluşturması ile açıklanabilir. Erçikdi (2009)'da benzer şekilde yapmış olduğu çalışmada Portland çimentosu (CEM I 42,5 N) ile hazırlanan macun dolgu numunelerinden daha fazla dayanım elde etmiş olmasına karşın 56 günlük kür süresi sonrasında Portland kompoze çimentosu (CEM II/A-LL 42,5 N) ile hazırlanan numunelerin dayanım kaybının PÇ'ye kıyasla %15 daha az olduğunu belirtmiştir. Dayanım kaybının daha düşük olmasının nedeni PKÇ'nin içinde bulunan mineral katkı maddesinin, ilave bağlayıcı jeli ile ilişkili olduğunu da vurgulamıştır.

3.4. Kil Minerallerinin Etkisi

Fiziksel, kimyasal ve mineralojik analizlerden de görüldüğü üzere atığın 20 mikron altı malzeme miktarı fazla (%57) ve kil içeriği yüksektir. Killerin su tutma özelliğinden dolayı dolgu içerisindeki fazla su hemen drene olmamakta ve dolgu içerisinde hapsedilmektedir. Bu da dolgunun erken kür sürelerinde hala yüksek nem içeriğine sahip olmasına ve geç dayanım kazanmasına neden olmaktadır.

Numunelerde oluşan çatlamların nedeninin öncelikli olarak atığın kil içeriğinin ve ince taneli malzeme miktarının yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Killerin bünyelerinde yüksek su tutma özelliği nedeniyle nem içeriğinin oldukça yüksek olmasından dolayı macun dolgunun erken kür sürelerinde (özellikle 28 güne kadar) daha yavaş dayanım kazanmasına ve ilerleyen kür sürelerinde dolgu içindeki suyun kısmen uzaklaşması ve nem içeriğinin düşmesi sebebiyle numune yüzeyinde büzülme çatlaklarının meydana gelmesine neden olmaktadır (Şekil 22, 23). Bu tür büzülme çatlakları çoğunlukla doygun killerin ilk kuruma safhalarında ortaya çıkmakta olup, çatlakların yoğunluğu, derinliği ve genişliği ortamda var olan kil mineralinin türüne ve oranına göre değişkenlik gösterebilmektedir (Türköz, 2009).

Özellikle numunelerin üst yüzeyinde oluşan büzülme çatlamları nedeniyle çatlaklardan içeriye nüfuz eden oksijenin piritin oksidasyonuna neden olabileceği düşünülmektedir. Şekil 22'de verilen örnek bir numunenin (%68 katı oranı, %9 CEM I 42,5 N, 360 gün) üst yüzeyinde de görüldüğü üzere çatlakların olmadığı numunenin alt kısımlarında sadece kabuk kısmında renklenme olduğu gözlemlenirken iç kısımlarda gözle

bakıldığında renklenme bakımından oksidasyon izlenmemiştir. Buna karşın çatlakların olduğu üst kısımda ise oksijenin numunenin iç kısımlarına kadar nüfuz edebilmiş olmasından dolayı ortamdaki piritin oksidasyonuna neden olduğu düşünülmektedir. Piritin oksidasyona uğraması durumunda dolgudaki dayanım kaybı zamanla daha da artabilir. Çünkü piritin oksidasyonu sonucu açığa çıkan asit (H^+), hidratasyon ürünlerinin ($C-S-H$ ve $Ca(OH)_2$) bağlayıcılık özelliklerini kaybetmelerine ($pH \leq 9,0$) neden olarak dolgunun dayanım ve duraylılığını düşürmektedir. Benzer şekilde piritin oksidasyonu sonucu oluşan sülfat, dolgu içerisindeki portlandit [$Ca(OH)_2$, CH] ve trikalsiyum alüminat [$3CaO.Al_2O_3$; C_3A] ile tepkimeye girerek genleşme özelliğine sahip ikincil jips ($CaSO_4.2H_2O$) ve etrenjit ($3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$) minerallerinin oluşmasına yol açmaktadır. Bu mineraller içsel gerilme oluşturarak dolgunun çatlamasına neden olabilir (Benzaazoua vd., 1999, 2002; Hassani vd., 2001; Kesimal vd., 2004; Fall ve Benzaazoua, 2005; Tariq ve Nehdi, 2007; Erçikdi vd., 2009a,b; Cihangir vd., 2012; Yin vd., 2018; Dong vd., 2019). Dolgu içerisindeki piritin oksidasyona uğraması durumunda asit maden drenajı (AMD) oluşumu ve ağır metal salınımı sonucu yeraltı sularının kirlenmesi problemi ile de karşılaşılabilir.

Atık içerisindeki killerin erken kür sürelerinde dayanım kazanımını geciktirmesi, ilerleyen kür süresinde kuruma ile birlikte büzülme çatlaklarına neden olması, çatlaklardan içeri nüfuz eden oksijenin piritin oksidasyonuna neden olması ve tüm bu nedenlere bağlı olarak dayanım kaybının oluşması nedeniyle atık içerisindeki 20 mikron altı malzeme miktarının hidrosiklon ile %25-35'e getirildikten sonra macun dolgu malzemesi olarak kullanılmasının sonucunda, 20 mikron altı malzeme miktarının azalmasıyla su/çimento oranı azalacak, katı oranı artacak ve dolgu mikroyapısı (düşük porozite vb.) iyileşecektir (Kesimal vd., 2003; Fall vd., 2004; Cihangir vd., 2020). Atık içerisinde azalan kil nedeniyle hem erken ve ilerleyen kür sürelerinde dayanım kazanımının artacağı hem de uzun dönemde nem içeriğinin azalmasıyla oluşan büzülme çatlakları ve piritin oksidasyonu gibi sorunlarla karşılaşılmayacağı ya da daha az karşılaşılacağı düşünülmektedir.

20 mikron altı malzeme miktarının hidrosiklon ile %25-35'e getirilmesi sonucu geride kalacak atık miktarının hazırlanacak dolgu miktarı için yeterli olması gereklidir. Yeterli olmaması durumunda her ne kadar maliyeti arttırsa da atık barajından atık temin edilmesi veya uçucu kül kullanımı alternatif olarak düşünülebilir. Bunların yerine çimento miktarının arttırılması durumunda ise bu çalışmada da gözlemlendiği üzere hidratasyon sonucu daha fazla suyun tüketilmesine ve büzülme çatlaklarının artmasına neden olabilir.

Belirtilen hususlar yeraltında macun dolgu uygulaması sürecinde takip edilerek elde edilecek yerinde (in-situ) sonuçlara ve gözlemlere göre macun dolgu tasarımında değişiklikler yapılabilir.

3.5. Bağlayıcı Oranının Etkisi

%70 katı oranında CEM I 42,5 N kullanılarak %14 bağlayıcı oranında hazırlanan numunelerin 14 ve 28 günlük dayanımları %12 bağlayıcı oranında elde edilen sonuçlarla karşılaştırmalı olarak Tablo 8’de verilmiştir. Tablo 8’de görüldüğü üzere bağlayıcı oranında %2’lik artış ($28,25 \text{ kg/m}^3$) dayanım kazanımında %26-32 oranında artış sağlamıştır. Fall ve Benzaazoua (2005)’da, çimento dozajındaki bu artışın ortamdaki C-S-H jeli miktarında da artış sağlayacağını belirtmiş ve bunun neticesinde asit ve sülfat etkisinin azalarak macun dolgu performansının kısa ve uzun dönemde iyileşmesine neden olacağını göstermiştir. Fakat çimento miktarının artması dolgu performansına olumlu katkı sağlasa da ekonomik olarak olumsuz bir etken olacaktır.

Tablo 8. %70 katı oranında %12 ve %14 bağlayıcı oranında hazırlanan numunelerin dayanımı

Seri Adı	Bağlayıcı oranı (%)	Bağlayıcı miktarı (kg/m^3)	14 Günlük Dayanım (MPa)	28 Günlük Dayanım (MPa)
%70 Katı oranı, CEM I 42.5 N	12	171,49	0,843	0,997
%70 Katı oranı, CEM I 42.5 N	14	199,74	1,118	1,260
Değişim	2	28,25	%32,6	%26,4

Buna ek olarak yukarıda da belirtildiği üzere %70 katı oranında hazırlanan numunelerin akışkanlığı oldukça düşük olup, dolgunun yeraltına borularla nakledilmesinde ve üretim boşluklarına yerleştirilmesinde sorun oluşturabilir.

3.6. Kum İkamesinin Etkisi

Tez kapsamında Tablo 5’te belirtilen dizayn özelliklerinde toplam 72 tane daha ilave numune hazırlanarak dolguda kum, uçucu kül, akışkanlaştırıcı vb. kullanımının macun dolgu dayanımına etkisi incelenmiştir. Numuneler sadece 14 ve 28 günlük kür sürelerinde tek eksenli basınç dayanımına tabi tutulmuş olup, her bir kür süresinde 3 adet numune hazırlanmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen ortalama tek eksenli basınç dayanımı sonuçları karşılaştırmalı olarak aşağıda verilmiştir.

%68 ve %70 katı oranlarında atığa %5-10 oranlarında kum (-4,75 mm) ikame edilerek %9 ve %12 bağlayıcı oranlarında hazırlanan numunelerin 14 ve 28 günlük kür süresi sonundaki ortalama tek eksenli basınç dayanımı sonuçları karşılaştırmalı olarak Tablo 9 ve 10’da verilmiştir. Atığa %5-10 kum ikamesi %68 katı oranında hazırlanan numunelerin dayanımını %4,4-33,8 oranında azaltırken (Tablo 9), %70 katı oranındaki bazı numunelerin dayanımını %1,5-16,5 oranında arttırmasına (Tablo 10) rağmen kumun kırma maliyeti nedeniyle elde edilen sonuçlar ekonomiklik arz etmemektedir. Ayrıca %70 katı oranında hazırlanan karışımların akışkanlığı oldukça düşüktür.

Tablo 9. %68 katı oranında farklı bağlayıcı oranlarında atığa %5-10 kum ikame edilerek hazırlanan numunelerin dayanımı

Seri Adı	Bağlayıcı Oranı (%)	Dizayn özelliği	14 Günlük Dayanım (MPa)	28 Günlük Dayanım (MPa)
%68 Katı oranı, CEM I 42.5 N	9	%100 Atık	0,324	0,366
%68 Katı oranı, CEM I 42.5 N	9	%95 Atık + %5 KUM	0,242	0,302
Değişim			%33,8(-)	%21,2(-)
%68 Katı oranı, CEM I 42.5 N	12	%100 Atık	0,639	0,717
%68 Katı oranı, CEM I 42.5 N	12	%95 Atık + %5 KUM	0,556	0,678
Değişim			%14,9(-)	%5,7(-)
%68 Katı oranı, CEM I 42.5 N	12	%100 Atık	0,639	0,717
%68 Katı oranı, CEM I 42.5 N	12	%90 Atık + %10 KUM	0,612	0,721
Değişim			%4,4(-)	%0,5

Tablo 10. %70 katı oranında farklı bağlayıcı oranlarında atığa %5-10 kum ikame edilerek hazırlanan numunelerin dayanımı

Seri Adı	Bağlayıcı Oranı (%)	Dizayn özelliği	14 Günlük Dayanım (MPa)	28 Günlük Dayanım (MPa)
%70 Katı oranı, CEM I 42.5 N	9	%100 Atık	0,453	0,502
%70 Katı oranı, CEM I 42.5 N	9	%95 Atık + %5 KUM	0,519	0,585
Değişim			%14,6	%16,5
%70 Katı oranı, CEM I 42.5 N	9	%100 Atık	0,453	0,502
%70 Katı oranı, CEM I 42.5 N	9	%90 Atık + %10 KUM	0,460	0,537
Değişim			%1,5	%7,0
%70 Katı oranı, CEM I 42.5 N	12	%100 Atık	0,843	0,997
%70 Katı oranı, CEM I 42.5 N	12	%95 Atık + %5 KUM	0,810	0,933
Değişim			%4,0(-)	%6,9(-)
%70 Katı oranı, CEM I 42.5 N	12	%100 Atık	0,843	0,997
%70 Katı oranı, CEM I 42.5 N	12	%90 Atık + %10 KUM	0,842	1,041
Değişim			Eşit	%4,4

Benzer şekilde farklı çimento oranlarında ve farklı kum ikamesi oranlarında yapılmış çalışmaların sonucunda atığa kum ikamesi yapmanın macun dolgu dayanımında artış sağladığı gözlenmiştir (Sarı vd., 2023; Güner vd., 2023). Bu artışı sağlayan temel neden kum katkısının macun dolgunun tane boyut dağılımını iyileştirmesi olarak belirtilmesinin yanı sıra kumda bulunan yüksek CaO içeriğinin hidratasyon için uygun pH ortamının oluşmasına ve dayanım artışına katkı sunmaktadır (Güner vd., 2023). Ancak belirli bir seviyeden sonra kum ikame oranını arttırmak dolgu dayanımında dezavantaj sağlamaktadır. Dayanım kazanımındaki bu artışın sınırlanmasının sebebi, ince ve iri taneli malzemeler arasındaki balansın bozularak dolgunun reolojisini olumsuz yönde etkilemesi ve iri tanelerin artışının taze macun dolgu numunesinin ayrışmasına sebep olması olarak açıklanabilir (Sarı vd., 2023).

3.7. Uçucu Kül İkamesinin Etkisi

%68 katı oranında atığa %5-10 termik santralinden temin edilen ince uçucu kül ikamesinin macun dolgu dayanımına etkisi Tablo 11’de, uçucu kül ikamesinin işletme giderleri açısından ekonomiklik analizi ise Tablo 12’de verilmiştir.

Tablo 11. %68 katı oranında atığa %5-10 kül ikame edilerek hazırlanan numunelerin dayanımı

Seri Adı	Bağlayıcı oranı (%)	Dizayn özelliği	14 Günlük Dayanım (MPa)	28 Günlük Dayanım (MPa)
%68 Katı oranı, CEM I 42.5 N	9	%100 Atık	0,324	0,366
%68 Katı oranı, CEM I 42.5 N	9	%95 Atık + %5 KÜL	0,321	0,489
Değişim			%0,9(-)	%33,6
%68 Katı oranı, CEM I 42.5 N	9	%100 Atık	0,324	0,366
%68 Katı oranı, CEM I 42.5 N	9	%90 Atık + %10 KÜL	0,338	0,739
Değişim			%4,3	%102

Tablo 11’de görüldüğü üzere atığa %5 ince kül ikamesinin 14 günlük kür süresinde dayanım kazanımına pozitif yönde bir etkisi yoktur. 28 günlük kür süresi sonunda ise %5 kül ikamesi dayanımı %33,6 artırmıştır. Atığa %10 kül ikamesi 28 gün sonunda dayanımı %102 oranında arttırmıştır. Tablo 11’den anlaşıldığı üzere kül ikamesinin artmasıyla birlikte dayanım kazanımı artmıştır. Benzer şekilde Yılmaz (2019) yapmış olduğu çalışmada sülfürlü maden atığı yerine uygulanan C sınıfı UK ikamesinin oranı arttıkça, çalışmış olduğu her iki bağlayıcı oranında (%7,5-8,5) ve tüm kür sürelerinde numunelerin basınç dayanımlarının arttığını ortaya koymuştur.

Tablo 1’de verilen kimyasal analizinden de anlaşılabacağı üzere uçucu kül C-sınıfı uçucu kül sınıfına girmekte ve kalsiyum içeriği (%27,26) oldukça yüksektir. Uçucu külün dayanıma olumlu etkisi C-sınıfı uçucu külün hem kısmen bağlayıcılık özelliğine sahip olmasından hem de puzolanik özelliğinden kaynaklanmaktadır.

Ayrıca uçucu kül hem taneler arasındaki boşlukları doldurmakta hem de dairesel morfolojik yapısı nedeniyle akışkanlığı arttırarak nihai palp yoğunluğunu düşürmektedir.

Tablo 12. Atığa %10 kül ikamesinin işletme giderleri açısından ekonomik analizi (2021)

A- Yalnız atık- 1 m ³ dolgu için	%	KG	Birim Fiyat	Tutar (TL)	Dayanım	Nihai Palp Yoğ. (kg/m ³)
Atık		1186,33	0,00	0,00	0,717	1982,57
Çimento (CEM I 42,5 N)	12	161,77	0,24	38,82		
Su		634,47	0,00	0,00		
İşletme Gideri (m ³)			0,20	0,20		
TOPLAM		1982,57		39,02		
B- %10 kül ile - 1 m ³ dolgu için	%	KG	Birim Fiyat	Tutar (TL)	Dayanım	Nihai Palp Yoğ. (kg/m ³)
Atık		1086,67	0,00	0,00	0,739	1951,30
Çimento (CEM I 42,5 N)	9	119,4	0,24	28,66		
Kül	10	120,74	0,13	15,70		
Su		624,48	0,00	0,00		
İşletme Gideri (m ³)			0,20	0,20		
TOPLAM		1951,29		44,55		

Termik santralin maden tesisine uzaklığı 110 km olup, uçucu külün 27 tonluk kamyonlarla tesise taşınması söz konusudur. Bu nedenle gerçek taşımacılık maliyetleri dikkate alınarak yapılan ekonomiklik analizinde de görüldüğü üzere atığa %10 oranında uçucu kül ikame edilerek dolgu hazırlanması durumunda 1 m³ macun dolgu yaklaşık 5 TL daha maliyetli olmaktadır (Tablo 12). Ancak uçucu kül ikame oranı arttıkça dayanım kazanımının arttığından birkaç farklı katı oranında atığa %10, %15 ve %20 oranında uçucu kül ikame edilerek numuneler hazırlanabilir ve ekonomiklik analiz ve dayanım sonuçlarına göre macun dolguda uçucu kül kullanılabilirliği tekrar değerlendirilebilir.

Ayrıca macun dolguda CaO içeriği yüksek uçucu kül kullanılması durumunda AMD oluşumunu engelleme açısından faydalı olacaktır. Yılmaz (2019), %7,5 ve %8,5 bağlayıcı oranlarında %5, %10 ve %15 C-sınıfı uçucu kül ikame etmiş olduğu macun dolgu numuneleri hazırlamıştır. C-sınıfı uçucu kül ikamesinin asit oluşumuna etkisini değerlendirmiş ve her iki bağlayıcı oranında da dolgu karışımında kullanılan UK ikamesinin oranı arttıkça uçucu kül içeren numunelerin kontrol numunelerine kıyasla daha düşük miktarlarda asit üretmiş olduğunu belirtmiştir. UK ikamesinin asit oluşumunu engellenmesine sağlamış olduğu katkının yanında uçucu külün pozolanik özellik göstermesi sebebi ile kalsiyum hidroksit ile tepkimeye girerek ilave ikincil hidratasyon ürünü (C-S-H jelleri) oluşmasını sağlamasıdır. Bu durum, yüksek CaO içeriğine sahip olması nedeniyle hem bağlayıcılık özelliğinin hem de asit nötralize etme potansiyelinin var olması ile ilişkilendirilebilmektedir (Türker vd., 2009; Erçikdi ve Yılmaz, 2019).

3.8. Kaba Atık Kullanımının Etkisi

Maden tesisinden gönderilen ve kaba atık olarak adlandırılan atık malzeme (%53) kullanılarak hazırlanan macun dolgu numuneleri de normal atığa kıyasla benzer dayanım üretmiştir (Tablo 13). Ancak ince taneli malzeme ne kadar uzaklaştırılırsa dayanımda artış görülmesi o kadar olasıdır. Fall vd. (2004) ince taneli malzemenin %50'den fazla olmasının sürekli dayanım kaybına neden olduğunu ifade ederken Kesimal vd. (2003)' de en yüksek dayanımın 20 µm altı malzemenin %25 olduğu durumda elde edildiği sonucuna ulaşmıştır.

Tablo 13. Kaba atık kullanılarak %70 katı oranında hazırlanan numunelerin dayanımı

Seri Adı	Atık tipi	Bağlayıcı oranı (%)	-20 µm (%)	14 Günlük Dayanım (MPa)	28 Günlük Dayanım (MPa)
%70 Katı oranı, CEM I 42.5 N	NORMAL	12	57	0,843	0,997
%70 Katı oranı, CEM I 42.5 N	KABA	12	53	0,832	1,022
Değişim				%1.3(-)	%2,5

3.9. Akışkanlaştırıcı Katkısının Etkisi

Akışkanlığın düşük olduğu %70 katı oranında hazırlanan karışıma çimentonun ağırlıkça %1'i kadar akışkanlaştırıcı ilavesi dayanımda belirgin bir artış oluşturmada da akışkanlığı kısmen iyileştirmiştir. Bu yüzden %70 katı oranında akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi kullanımı faydalı olacaktır (Tablo 14).

Tablo 14. %70 katı oranında akışkanlaştırıcı ile hazırlanan numunelerin dayanımı

Seri Adı	14 Günlük Dayanım (MPa)	28 Günlük Dayanım (MPa)
%70 Katı Oranı, CEM I 42.5, %14 bağlayıcı oranı, %100 ince Atık malzeme	1.118	1.260
%70 Katı Oranı, CEM I 42.5, %14 bağlayıcı oranı, %100 ince Atık malzeme, çimentonun %1'i akışkanlaştırıcı	1.280	1.290
Dayanım Değişimi	%14,5	%2.3

Erçikdi (2009)'da yapmış olduğu çalışmalarda akışkanlaştırıcı kullanımının dayanımda artış sağladığını belirtmiş ve dayanıma fayda sağlamasının yanında akışkanlaştırıcının belirli bir hacimdeki yeraltı boşluğuna daha fazla atık malzemenin depolanabilir olacağını, çimento tüketimi ve macun dolgunun işletme giderinin daha düşük olabileceğini belirtmiştir.

4. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, sülfür içeriği yüksek tesis atığı kullanılarak farklı katı oranlarında (%65, %68 ve %70) ve slamplarda (9,5" ve 11") CEM I 42,5 N ve CEM II/A-LL 42,5 N çimentolarla hazırlanan 10x20 cm boyutundaki macun dolgu numunelerinin 14, 28, 90 ve 360 günlük kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları test edilmiştir. Ayrıca atığa %5-10 ikame olarak kum, uçucu kül kullanımı, kaba atık kullanımı ve akışkanlaştırıcı kullanımının dolgu dayanımına etkisini incelemek amacıyla ilave numuneler hazırlanmış ve 14 ve 28 günlük kür süresinde dayanım testine tabi tutulmuştur. Ayrıca deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerin (atık, çimentolar ve uçucu kül) fiziksel, kimyasal ve mineralojik karakteristikleri belirlenmiştir. Deneysel çalışmalarda kriter olarak 28 günde en az ≥ 1.0 MPa dayanım kazanımı ve uzun dönemde duraylılığın (360 günde dayanım kaybının oluşmaması) korunması dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlar özetle aşağıda verilmiştir.

- 1) 28 günde en az ≥ 1.0 MPa dayanım kazanımını ve uzun dönemde duraylılığı (360 günde dayanım kaybının oluşmaması) sadece %70 katı oranında %12 bağlayıcı oranında (172 kg/m^3) CEM I 42,5 N kullanılarak hazırlanan numuneler sağlamıştır.
- 2) 9,5" ve %68 katı oranında hazırlanan numuneler birbirine yakın dayanım kazanımları sağlamış ve CEM I 42,5 N kullanılarak %12 bağlayıcı oranında ($161-162 \text{ kg/m}^3$) hazırlanan numuneler 28 günde 0,7 MPa'dan yüksek dayanım üretmişlerdir. Benzer şekilde 11" ve %65 katı oranında hazırlanan numuneler de birbirine yakın dayanım sonuçları vermiştir. 11" ve %65 katı oranında hazırlanan karışımların akışkanlıklarının çok yüksek olduğu, özellikle %7 bağlayıcı oranında (87 kg/m^3) hazırlanan numunelerin tüm kür sürelerinde oldukça düşük dayanım ($< 0,15 \text{ MPa}$) kazanımı verdiği görülmüştür.
- 3) Atık içerisinde fazla miktarda bulunan ince taneli malzeme ($-20 \mu\text{m}$, %57) ve kil, macun dolgu numunelerinin erken kür sürelerinde düşük dayanım kazanımına neden olmuş ve dayanım kazanımını geciktirmiştir.
- 4) İlerleyen kür sürelerinde ise nem içeriğinin azalmasıyla birlikte bazı numunelerde kısmen bazı numunelerde ise belirgin bir şekilde büzülme çatlaklarının oluşmasına ve dayanım kaybına neden olmuştur.

- 5) Katı oranının %65'ten %70'e çıkmasıyla karışımlara ilave edilen bağlayıcı miktarı %15,7 oranında artarken dayanım sonuçları %100 oranında artış göstermiştir. Atık içerisindeki ince malzeme ve kilin uzaklaşması katı oranında ve dayanım kazanımında artış sağlayarak 1 m³ dolgu için gerekli çimento miktarında da azalma sağlayacaktır.
- 6) Atığa ikame olarak %5-10 oranında kum kullanılması dayanım ve ekonomiklik açısından bir katkı sağlamamıştır.
- 7) Atığa ikame olarak %10 oranında uçucu kül kullanımı 28 günlük kür süresi sonunda dayanımda %100 oranında artış sağlamıştır. Ancak yapılan ekonomik analizde uçucu külün nakliye masrafı nedeniyle uçucu kül kullanılarak 1 m³ macun dolgu hazırlamak yaklaşık %10 daha maliyetlidir.
- 8) Akışkanlığın düşük olduğu %70 katı oranında hazırlanan karışıma çimentonun ağırlıkça %1'i oranında akışkanlaştırıcı ilavesi dolgunun akışkanlığının iyileşmesine katkı sağlamıştır.
- 9) Kullanılan bağlayıcılar açısından CEM I 42,5 N ile hazırlanan numunelerin tüm kür sürelerinde daha yüksek dayanım kazanımı sağladığı görülmüştür. CEM II/A-LL 42,5 N ile hazırlanan numuneler ise özellikle erken kür sürelerinde daha düşük dayanım kazanımı sağlamış, ilerleyen kür sürelerinde ise nispeten daha iyi sonuçlar vermiştir.
- 10) İstenen dayanım (28 günde en az ≥ 1.0 MPa) ve duraylılık (360 günde dayanım kaybının oluşmaması) kriteri için mevcut tesis atığı ve CEM I 42,5 N çimento kullanılarak farklı katı oranlarında ve slamplarda hazırlanacak 1 m³ macun dolgunun en az 170-180 kg/m³ bağlayıcı içermesi gerektiği anlaşılmıştır.

5. ÖNERİLER

Bu tezde, sülfür içeriği yüksek tesis atığı kullanılarak farklı katı oranlarında ve akışkanlıkta, farklı çimento oranı ve tipinde numunelere ek olarak kum ilavesi, uçucu kül katkısı, akışkanlaştırıcı katkısının etkilerini tespit etmek içinde macun dolgu numuneleri hazırlanmıştır. 14, 28, 90 ve 360 günlük kür sürelerinde dayanım değerlerine göre sonuçlar çıkarılmıştır. Bu sonuçlara göre yapılan önerilerin özeti aşağıda verilmiştir.

- 1) %70 katı oranında hazırlanan karışımların akışkanlığının düşük olduğu, borularla nakli ve yeraltı üretim boşluklarına yerleştirilmesi esnasında herhangi bir sorunla karşılaşmamak için %70 katı oranında hazırlanan karışımlara akışkanlaştırıcı ilavesinin yararlı olacağı değerlendirilmiştir.
- 2) Macun dolgunun hazırlanması için yeterli atık malzeme kalması durumunda atık içindeki 20 µm altı malzeme miktarının hidrosiklonla %25-35'lere getirildikten sonra atığın dolgu malzemesi olarak kullanılmasının yararlı olacağı ve bahsedilen olası sorunları engelleyeceği düşünülmektedir.
- 3) Uçucu külün, atığa %15 ve %20 ikame edildiği oranlarda da deneysel çalışmalar tasarlanarak yeniden dayanım testlerinin yapılmasında ve ek olarak güncel bir şekilde yeniden ekonomiklik analizi yapılmasında yarar vardır.
- 4) Macun dolgu tesis çıkışından ve boru hattı çıkışından (dolgunun yeraltı üretim boşluklarına döküldüğü nokta) düzenli olarak numune alınarak dayanım testlerinin yapılması ve yeraltı üretim boşluklarına yerleştirilen macun dolgudan da düzenli bir şekilde karot numunesi alınarak zamana bağlı dayanım değişiminin incelenmesi önerilmektedir.
- 5) Ülkemiz Maden Atıkları Yönetmeliği'nin 15. madde 3. bendinde de belirtildiği üzere yeraltı üretim boşluklarına yerleştirilecek olan macun dolgunun çevresel açıdan yeraltı sularına etkisini belirlemek amacıyla laboratuvarında statik ve kinetik testlerin yapılması önerilmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Akgül, Ç.M., & Yoncacı, S. (2021). Türkiye Kömür Yakıtlı Termik Santral Uçucu Külleri, Emsal Matbaa, Ankara.
- Alp, I., Deveci, H., Yılmaz, E., Yılmaz, A. O., & Kesimal, A. (2003). Investigation of the Potential Use of the Quarry Product from Taşhane-Terme as Trass Raw Material in Cement Industry. In Proceedings of the International Symposium on Industrial Minerals and Building Stones, Istanbul, Turkey (pp. 553-559).
- ASTM C 39, (2002). Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens, Annual Book of American Standard of Testing Materials Standards, Revision 3.
- ASTM C 219-07a, (2007). Standard Terminology Relating to Hydraulic Cement, Laurentian University.
- ASTM C 494, (2008). Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, Laurentian University.
- ASTM C 618, (2000). "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, Annual Book of ASTM Standard, No. 04.02
- ASTM C 618-08a, (2009). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, Laurentian University.
- Belem T, & Benzaazoua M. (2008). Design And Application Of Underground Mine Paste Backfill Technology, Geotechnical And Geological Engineering, 26, 147-174.
- Benzaazoua M, Ouellet J, Servant J, Newman P, & Verburg R. (1999). Cementitious Backfill With High Sulphur Content; Physical, Chemical and Mineralogical Characterization, Cement And Concrete Research, 29(5), 719-725.
- Benzaazoua M, Belem T, & 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., & Belem, T. (2004). A Contribution to Understanding The Hardening Process of Cemented Pastefill. Minerals Engineering, 17(2), 141-152.
- Benzaazoua, M., Fiset, J. F., Bussière, B., Villeneuve, M., & Plante, B. (2006). Sludge recycling within cemented paste backfill: Study of the mechanical and leachability properties. *Minerals Engineering*, 19(5), 420-432.
- Bloss, M. L., & Revell, M. B. (2001). Mining with paste fill at BHP Cannington. In Minefill 2001: 7 th International Symposium on Mining with Backfill (pp. 209-221).

- Brackebusch FW. (1994). Basics of Paste Backfill Systems. *Miner Eng.* 46(10), 1175-1178.
- Chambers, D. M., & Higman, B. (2011). Long Term Risks of Tailings Dam Failure. Center for Science in Public Participation, Bozeman, Montana, 1-21.
- Cihangir, F. (2011). Aktifleştirilmiş Yüksek Fırın Cürufunun Macun Dolguda Bağlayıcı Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Cihangir F, Ercikdi B, Kesimal A, Turan A, & Deveci H. (2012). Utilisation of Alkali-Activated Blast Furnace Slag in Paste Backfill of High-Sulphide Mill Tailings: Effect of Binder Type And Dosage. *Minerals Engineering*, 30, 33-43.
- Cihangir, F., & Akyol, Y., (2018). Mechanical, Hydrological and Microstructural Assessment of The Durability of Cemented Paste Backfill Containing Alkali-Activated Slag. *International Journal of Mining Reclamation and Environment*, 32(2), 123-143.
- Cihangir F, & Akyol Y. (2020). Effect of Desliming of Tailings on the Fresh And Hardened Properties of Paste Backfill Made from Alkali-Activated Slag, *Advances in Materials Science and Engineering*, Article ID 4536257, 11 S.
- De Souza, E., Archibald J.F., & Dirige A.P. (2003). "Economics and Perspectives of Underground Backfill Practices in Canadian Mines", Proc. I05th Annual General Meeting of the Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Montreal, Quebec, May,
- Dong Q, Liang B, Jia L, & Jiang L. (2019). Effect of Sulfide on The Long-Term Strength of Lead-Zinc Tailings Cemented Paste Backfill, *Construction and Building Materials*, 200, 436-446.
- Erçikdi, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H., & Alp, İ., (2008a). Drenaj Koşullarının Macun Dolgu Dayanımına Etkisi. *Madencilik*, 47(2), 15-24.
- Erçikdi, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H., & Alp, İ., (2008b). Doğal Pozolan Özelliklerinin Macun Dolgunun Dayanım Ve Duraylılığına Etkisi. *Yerbilimleri Dergisi*, Hacettepe Üniversitesi, 29(1), 25-35.
- Erçikdi, B. (2009). Mineral ve Kimyasal Katkı Maddelerinin Macun Dolgu Performansına Etkisinin Araştırılması. K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Erçikdi B, Kesimal A, Cihangir F, Deveci H, & Alp I. (2009a). Cemented Paste Backfill of Sulphide-rich Tailings: Importance of Binder Type And Dosage. *Cement & Concrete Composites*, (31), 268-274.
- Erçikdi B, Cihangir F, Kesimal A, Deveci H, & Alp I. (2009b). Utilization of Industrial Waste Products As Pozzolan Material in Cemented Paste Backfill of High Sulphide Mill Tailings. *Journal of Hazardous Materials*, 168(2-3), 848-856.

- Ercıkıdı, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H., & Alp, İ. (2010). Effect of Natural Pozzolans as Mineral Admixture on the Performance of Cemented-paste Backfill of Sulphide-rich Tailings. *Waste Management & Research*, 28(5), 430-435. <https://doi.org/10.1177/0734242X09351905>
- Erçıkıdı, B., Cihangir, F., Kesimal, A., & Deveci, H., (2012). Tesis Atıklarının Yönetiminde Macun Dolgu Teknolojisi. *Madencilik Türkiye*, 24, 70-75.
- Erçıkıdı, B., Külekçi, G., & Yılmaz, T. (2015). Utilization of Granulated Marble Wastes and Waste Bricks As Mineral Admixture in Cemented Paste Backfill of Sulphide-rich Tailings. *Construction and Building Materials*, 93, 573-583.
- Erçıkıdı B, Cihangir F, Kesimal A, & Deveci H. (2017). Practical Importance of Tailings For Cemented Paste Backfill, *Paste Tailings Management*, Editorler (Yılmaz E, Fall M), S. 7–32, Springer, Berlin, Germany.
- Erçıkıdı, B., & Yılmaz, T., (2019). Çimentolu Macun Dolgunun Dayanım ve Mikroyapı Özellikleri; C-Sınıfı Uçucu Külün Etkisi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 21(61), 15-23.
- Erçıkıdı B, Cihangir F, & Koç E. (2022). Maden Atıkları İçin Alternatif Depolama Yöntemi: Çimentolu Macun Dolgu, Sıfır Atık, ss.227-244. Ankara: T.C. Çevre, Şehircilik Ve İklim Değişikliği Bakanlığı.
- Fall M, Benzaazoua M, & Ouellet S. (2004). Effect Of Tailings Properties on Paste Backfill Performance. *Proceedings of the 8th International Symposium on Mining With Backfill*, Beijing, China, 193-202.
- Fall M, & Benzaazoua M. (2005). Modelling The Effect of Sulphate on Strength Development of Paste Backfill And Binder Mixture Optimization. *Cement And Concrete Research*; 35(2), 301-314.
- Fall, M., & Samb, S. (2006). Influence of Curing Temperature on Strength, Deformation Behaviour and Pore Structure of Cemented Paste Backfill Properties at Early Ages. *Constr Build Mater*,
- Gay F, & Constantiner D. (1998). Additives for Improving Paste Backfill Mixes, In: *Tailings and Mine Waste'98*. P. 159-166.
- Grice, T. (1998). Underground Mining with Backfill. *2nd Annual Summit & Mine Tailings Disposal Systems*, Brisbane, Nov, 696, 24-25.
- Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar, M., S., & Demir, İ. (2009). Uçucu Kül Bölüm II: Kimyasal, Mineralojik ve Morfolojik Özellikler, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5(2), (33-42).
- Guner, N. U., Yılmaz, E., Sari, M., & Kasap, T. (2023). Cementitious Backfill with Partial Replacement of Cu-rich Mine Tailings by Sand: Rheological, Mechanical and Microstructural Properties. *Minerals*, 13(3), 437.

- Hassani, F. P., Ouellet, J., & Hossein, M. (2001). Strength development in underground high-sulphate paste backfill operation. CIM bulletin, 94.
- Henderson A, & Revell MB. (2005). Basic mine fill materials. In: Handbook on mine fill, Australian Centre for Geomechanics, 179p.
- Henderson A, Revell MB, Landriault D, & Coxon J (2005). Paste fill. In: Handbook on mine fill. Australian Centre for Geomechanics, Perth, p 1–179.
- Huynh, L., Beattie, D. A., Fornasiero, D., & Ralston, J. (2006). Effect of Polyphosphate and Naphthalene Sulfonate Formaldehyde Condensate on The Rheological Properties of Dewatered Tailings and Cemented Paste Backfill. Minerals Engineering, 19(1), 28-36.
- Kesimal A, Ercikdi B, & Yilmaz E. (2003). The Effect of Desliming by Sedimentation on Paste Backfill Performance. Minerals Engineering; 16, 1009-1011.
- Kesimal A, Yilmaz E, & Ercikdi B. (2004). Evaluation of Paste Backfill Test Results Obtained from Different Size Slumps with Varying Cement Contents for Sulphure Rich Mill Tailings. Cement and Concrete Research; 34(10), 1817-1822.
- Kesimal, A., Yilmaz, E., Ercikdi, B., Alp, I., & Deveci, H. (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.
- Klein K., & Simon D. (2006). Effect Of Specimen Composition on the Strength Development in Cemented Paste Backfill, Canadian Geotechnical Journal, 43(3).
- Koroğlu, Ç. (2007). Ağaçlı-Bolluca (İstanbul) Yöresi Seramik Killerinin Malzeme Özelliklerinin Araştırılması. İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Lamm, S. (2021). Empirical Raman Calibration of Chlorite Minerals. Kansas State University, Department of Geology College of Arts and Sciences, Master Thesis, Kansas.
- Landriault, D. (1995, May). Paste Backfill Mix Design for Canadian Underground Hard Rock Mining. In 97th Annual General Meeting of CIM. Rock Mechanics and Strata Control Session. Halifax, Nova Scotia (pp. 239-238).
- Landriault, D. (2001). Backfilling in Underground Mining, In: W.A. Hustrulid (Eds.), Underground Mining Methods Engineering Fundamentals and International Case Studies, SME, 15p.
- Landriault, D. (2006). They said “It will never work”—25 years of paste backfill 1981–2006. In: The 9th international seminar on paste and thickened tailings, Limerick, p 277–292.

- Le Roux, K., Bawden, W. & Grabinsky, M. (2004). Liquefaction Analysis of Early Age Cemented Paste Backfill. *Proceedings Minefill 2004. 8th International Symposium on Mining with Backfill*, Beijing, China, pp. 233–241.
- Le Roux K-A, Bawden, WF., & Grabinsky MW (2005). Field properties of cemented paste backfill at the Golden Giant mine. *Mining Technol* 114(2):65–80.
- Li T, Singh U, Coxon J, Grice TG, & Sainsbury D. (2002). Development And Application of Paste Fill Using Dry Tailings. *First International Seminar on Deep And High Stress Mining*, Perth, , 10s.
- Razavi, S. M., & Hassani, F. (2007). Preliminary Investigation into Gel Fill: Strength Development And Characteristics of Sand Paste Fill with Sodium Silicate. In *ARMA Canada-US Rock Mechanics Symposium*. (Pp. ARMA-07).
- Romero, E., Della Vecchia, G., & Jommi, C. (2011). An Insight into the Water Retention Properties of Compacted Clayey Soils. *Géotechnique*, 61(4), 313-328.
- Sari, M., Yilmaz, E., & Kasap, T. (2023). Long-term Ageing Characteristics of Cemented Paste Backfill: Usability of Sand as a Partial Substitute of Hazardous Tailings. *Journal of Cleaner Production*, 401, 136723.
- Stone DMR. (1993). The Optimization of Mix Designs For Cemented Rockfill. In: *Proceedings of Fifth International Symposium on Mining With Backfill, MINEFILL'93*, Johannesburg, SA IMM, s. 249–253.
- Tariq A, & Nehdi M. (2007). Developing Durable Paste Backfill from Sulphidic Tailings. *Waste and Research Management*, 160(4), 155–166.
- Türkel S, & Felekoğlu B. (2004). Aşırı Dozda Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı Kullanımının Taze Ve Sertleşmiş Betonun Bazı Özellikleri Üzerine Etkileri. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi*, 6(1), 77-89.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., & Yeğinobalı, A., (2009). Türkiye’de Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, *TÇMB*, Ankara.
- Türköz M. (2009). Sıkıştırılmış Şişen Killerin Mikroyapısal Değişiminde Şişme-Büzülme Çevrimin Etkisi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22 (1), 77-91.
- Yılmaz, E., Kesimal, A., Erçikdi, B., & Alp, İ., (2003). Determination of the optimum cement content for the paste backfill samples . *The 18th International Mining Congress and Exhibition of Turkey* (pp.119-125). Antalya, Turkey.
- Yılmaz, T. (2013). Numune Boyutunun Macun Dolgu Dayanımına Ve Ultrasonik P- Dalga Hızına Etkisi. *K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Trabzon.

- Yılmaz, T., Erçikdi, B., & Deveci, H. (2018). Utilisation of Construction and Demolition Waste As Cemented Paste Backfill Material for Underground Mine Openings. *Journal of Environmental Management*, 222, 250-259.
- Yılmaz, T. (2019). Asit Nötralize Edici Malzemeler Kullanılarak Sülfürlü Atıklardan Duraylı Macun Dolgu Üretiminin Araştırılması. K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Yin S, Shao Y, Wu A, Wang Y, & Chen X. (2018). Expansion and Strength Properties of Cemented Backfill Using Sulphidic Mill Tailings, *Construction and Building Materials*, 165, 138-148.
- Yumlu, M. (2001). Backfill practices at Çayeli Mine. *Proceedings of the 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey, IMCET*, Ankara, 333-339.
- Yumlu, M. (2020). Macun Dolgu Metoduna İlişkin Genel Çerçeve Ve Uluslararası Uygulamalar, Macun Dolgu Tahkimat Sisteminin Teknik, Çevresel ve Mevzuat Açısından Değerlendirilmesi Çalıştayı, Türkiye Madenciler Derneği, 26 Ağustos, Ankara.
- URL-1. (2024, Mayıs 9). <https://www.sistemel.com/proje/hisarcik-espey-yeni-atik-baraji/> adresinden alınmıştır.
- URL-2. (2024, Mayıs 9). <https://ekolojibirligi.org/etiket/kilickaya-baraji/> adresinden alınmıştır.
- URL-3. (2024, Mayıs 10). <https://www.aykutozdemir.com.tr/insaat/slump-cokme-deneyi-nedir-nasil-yapilir.html> adresinden alınmıştır.
- URL-4. (2024, Haziran 18). https://abs.cu.edu.tr/Dokumanlar/2016/IMZ110/839006282_kil_ve_kil_mineralleri.pdf adresinden alınmıştır.
- URL-5. (2024, Haziran 21). https://buyukansiklopedi.com/Min%C3%A9ral_argileux adresinden alınmıştır.
- URL-6. (2024, Haziran 21). https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/81641/mod_resource/content/0/10.%20Haf%20Toprak-%20%20Kolloidler.pdf adresinden alınmıştır.
- URL-7. (2024, Haziran 21). <https://jeogenc.net/klorit-ve-ozelligi.html> adresinden alınmıştır.
- URL-8. (2024, Haziran 21). <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/klorit> adresinden alınmıştır.

ÖZGEÇMİŞ

Taha Yavuz DEVECİ, İlköğrenimini Pendik Süreyyapaşa İlköğretim Okulu'nda tamamladıktan sonra lise eğitimini 2015 yılında Pendik Gülizar Zeki Obdan Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2016-2017 öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2020 yılında dönem ikincisi olarak bu bölümden mezun oldu. 2021 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. 2021 yılından itibaren Karadeniz Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.