



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



DOKTORA TEZİ

**MADEN TESİS ATIKLARININ YERÜSTÜNDE
DEPOLANMASINDA EN UYGUN TASARIM
KOŞULLARININ BELİRLENMESİ**

Serkan TÜYLÜ

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Maden Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. Ataç BAŞÇETİN

II. Danışman

Prof. Dr. Mostafa BENZAAZOUA

Ocak, 2016

İSTANBUL

Bu çalışma 19/01/2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Maden Mühendisliği Anabilim Dalı Maden Mühendisliği programında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi:

İmza
Prof. Dr. Ataç BAŞÇETİN (Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

İmza
Prof. Dr. İsmail AYDIN (Jüri)
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

İmza
Doç. Dr. Hakan TUNÇDEMİR (Jüri)
İstanbul Teknik Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

İmza
Doç. Dr. Orhan ÖZDEMİR (Jüri)
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

İmza
Doç. Dr. Ömür ACAROĞLU ERGÜN (Jüri)
İstanbul Teknik Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Bu alışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin 27845 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında; lisansüstü öğrenimim sırasında ve tez çalışmalarım boyunca göstermiş olduğu maddi ve manevi her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam ve Tez Danışmanım Prof. Dr. Ataç BAŞÇETİN'e, çalışmam sırasında konu ile ilgili bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım çok değerli hocam ve II. Danışmanım Sayın Prof. Dr. Mostafa BENZAAZOUA'ya, tez çalışmam sırasında maddi ve manevi her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Doç. Dr. İlgin KURŞUN'a, çalışmam sırasında konu ile ilgili bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım çok değerli hocam Doç. Dr. Orhan ÖZDEMİR'e, çalışmalarım boyunca göstermiş olduğu maddi ve manevi her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Araş. Gör. Dr. Deniz ADIGÜZEL'e, çalışmam sırasında İstanbul Üniversitesi Çevre Mühendisliği laboratuvarında ölçüm alabilmemi sağlayan Prof. Dr. Hüseyin SELÇUK hocama ve ölçümler sırasında değerli vaktini ayıran Araş. Gör. Burak YÜZER'e, çalışmam sırasında İstanbul Üniversitesi İnşaat Mühendisliği laboratuvarında ölçüm alabilmemi sağlayan Doç. Dr. Sadık ÖZTOPRAK hocama ve ölçümler sırasında değerli vaktini ayıran Araş. Gör. Sinan SARĞIN'a, çalışmam sırasında konu ile ilgili bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım Çayeli Bakır İşletmeleri A.Ş.'den Sayın Dr. Erol YILMAZ'a, numune ve bilgi sağlama konusundaki yardımları nedeniyle Eczacıbaşı Esan Balya Kurşun-Çinko Madeni Müdürü Ali TÜRKİSTANLI'ya, Yerüstü Tesisler Müdürü Ebrar KÜÇÜKÖNER'e, Müh. Çağlar İNAN'a, Müh. Burak TURHAN'a ve tüm çalışanlarına, gerek arazi gerekse deneysel çalışmalarda yardımlarını aldığım Maden Mühendisi İrfan Serkan BİNEN, Maden Mühendisi Ömer ÇINAR, Eren ODABAŞ, Doğançan UÇARYILMAZ, Kubilay KALABAKTAŞ ve Mustafa ATEŞ'e, deneyler ve analizler konusunda yardımları için İ.Ü. Maden Mühendisliği Bölümünden Araş. Gör. İsmail DEMİR'e, Araş. Gör. Can GÜNGÖREN'e, Araş. Gör. Mert TERZİ'ye, Araş. Gör. Meriç Can ÖZYURT'a, ayrıca bu çalışma boyunca yardımlarını esirgemeyen tüm İ.Ü. Maden Mühendisliği Bölümü Hocalarıma, mesai arkadaşlarıma ve çalışmamın uygulama kısmını destekleyen İstanbul Üniversitesi'ne teşekkürü borç bilirim.

Hayatımın her safhasında olduğu gibi tez çalışma dönemimde de maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen varlıklarıyla hayatımı güzelleştiren annem Melahat TÜYLÜ'ye, babam Ahmet TÜYLÜ'ye, abim Gökhan TÜYLÜ'ye ve sevgili eşim Ayşe Nur ADIGÜZEL TÜYLÜ'ye sonsuz teşekkür eder, en derin şükranlarımı sunarım.

Ocak, 2016

Serkan TÜYLÜ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ	ix
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	xi
ÖZET.....	xiii
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL KISIMLAR	4
2.1. ATIK YÖNETİMİ	4
2.2. MADEN ATIKLARI VE YÖNETİMİ	5
2.2.1. Maden Artıkları Hakkındaki Ulusal ve Uluslararası Mevzuat.....	7
2.2.2. Madencilik Faaliyetlerinden Kaynaklanan Artıkların Çevreye Olan Etkileri.....	15
2.2.2.1. Su Kirliliği	16
2.2.2.2. Stabilizasyon Problemi	25
2.3. MADENCİLİKTE KULLANILAN YERÜSTÜ ARTIK BERTARAF YÖNTEMLERİ	30
2.3.1. Artık Barajları	33
2.3.1.1. Klasik Baraj Tipi	33
2.3.1.2. Set Tipi Barajlar	34
2.3.2. Açık Ocak İçerisinde Depolama	37
2.3.3. Kuru Depolama Yöntemi	38
2.3.4. Maden Tesis Atıklarının Macun Formunda Yerüstünde Depolanması ..	40
2.3.4.1. Yerüstü Macun Malzemesinin Özellikleri.....	42
2.3.4.2. Yerüstü Macun Depolama Tasarım Özellikleri, Endüstriyel Uygulaması ve Avantajları.....	46
2.3.4.3. Yerüstü Macun Depolama Yöntemi ile İlgili Bilimsel Çalışmalar.....	52
3. MALZEME VE YÖNTEM	58
3.1. ÇALIŞMA SAHASI	58
3.1.1. Jeomorfoloji	61

3.1.2. Maden Jeolojisi	61
3.1.3. Cevher Üretimi ve Atık Sahası	62
3.2. YÖNTEM.....	65
3.2.1. Malzeme Karakterizasyonu.....	67
3.2.1.1. Yoğunluk	67
3.2.1.2. Tane Boyut Dağılımı.....	68
3.2.1.3. Spesifik Yüzey Alanı ve Porozite.....	69
3.2.1.4. Atterberg Kıvam Limitleri	70
3.2.1.5. Sıkışabilirlik.....	72
3.2.1.6. Geçirimsizlik.....	74
3.2.1.7. Mineralojik Bileşimi	75
3.2.1.8. Elementel Analiz& Asit Potansiyeli.....	75
3.2.1.9. Artık Boşluk Suyu Analizi	75
3.2.2. Macun Malzemenin Hazırlanması	76
3.2.3. Optimum Depolama Tasarımının Belirlenmesi	79
3.2.3.1. Tabaka Döküm Süreci	82
3.2.3.2. Islanma-Kuruma Süreci.....	90
3.2.3.3. Jeomekanik Testler	91
4. BULGULAR	96
4.1. MALZEME KARAKTERİZASYONU	96
4.1.1. Fiziksel Özellikler	96
4.1.1.1. Yoğunluk	96
4.1.1.2. Tane Boyut Dağılımı.....	97
4.1.1.3. Spesifik Yüzey Alanı ve Porozite.....	98
4.1.1.4. Atterberg Kıvam Limitleri	100
4.1.1.5. Sıkışabilirlik ve Geçirimsizlik.....	101
4.1.2. Mineralojik Kompozisyon ve Kimyasal Özellikler	103
4.1.2.1. Mineralojik Bileşim	103
4.1.2.2. Elementel Analiz& Asit Potansiyeli.....	104
4.1.2.3. Artık Boşluk Suyu Analizi	105
4.2. MACUN MALZEMENİN HAZIRLANMASI	106
4.3. OPTİMUM DEPOLAMA TASARIMININ BELİRLENMESİ	108
4.3.1. Tabaka Döküm Süreci.....	108
4.3.1.1. Sensör Ölçümleri	108

4.3.1.2. Sızıntı Suyu Miktarları ve pH-Ec Değerleri	121
4.3.1.3. Çatlak Yoğunluğu	123
4.3.2. Islanma–Kuruma Süreci.....	125
4.3.2.1. Sensör Ölçümleri	125
4.3.2.2. Sızıntı Suyu Miktarları ve pH-Ec Değerleri	133
4.3.2.3. Çatlak Yoğunluğu	134
4.3.3. Jeomekanik Testler	136
4.3.3.1. Kayma Dayanımının Belirlenmesi.....	137
4.3.3.2. Konsolidasyonun Belirlenmesi	140
4.4. MACUN DEPOLAMA METODUNUN EKONOMİK AÇIDAN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	143
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	155
KAYNAKLAR	162
EKLER.....	174
ÖZGEÇMİŞ.....	177

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2. 1: Atık yönetimi hiyerarşisi.....	4
Şekil 2. 2: Bir açık ocak madeninde oluşabilecek atıklar.....	6
Şekil 2. 3: Bazı metal iyonlarının teorik çözünürlüğü.....	18
Şekil 2. 4: Toplam karbondioksit, bikarbonat ve karbonat miktarı-pH ilişkisi	19
Şekil 2. 5: Düşük ve yüksek alkaliniteli sularda pH'nin zamana bağlı değişimi.....	19
Şekil 2. 6: Yüksek miktarda suyun depolandığı Alaska'da Fort Knox altın madeni artık barajı	33
Şekil 2. 7: Aksu Madencilik Dursunbey, Balıkesir Kurşun - Çinko - Bakır İşletmesi artık barajı inşaatı.....	34
Şekil 2. 8: Yukarı yönde yükseltmeli tasarım.....	35
Şekil 2. 9: Aşağı yönde yükseltmeli set tasarımı.....	36
Şekil 2. 10: Merkezden yükseltmeli set tasarımı	37
Şekil 2. 11: Avustralya'da açık ocak bir altın madeni içerisinde depolama.....	38
Şekil 2. 12: Şili'de Lacoipa altın madeni kuru depolama yöntemi.....	39
Şekil 2. 13: Macun Artık Teknolojisinin yeraltı (solda) ve yerüstü (sağda) uygulaması	40
Şekil 2. 14: Kıvamlandırılmış artıkların özellikleri ve temel kavramların tanımları.....	41
Şekil 2. 15: 20 µm'dan küçük ince tanelerin etkileşimi	43
Şekil 2. 16: İyi bir tane boyu dağılımına sahip olan (a) ve olmayan (b) malzemeden üretilen macundaki bağlayıcı jel görünümü.....	43
Şekil 2. 17: Yerüstü macun depolama tesisi akım şeması	48
Şekil 2. 18: Filtrasyon sisteminin uygulandığı yerüstü macun depolama tesisi akım şeması..	49
Şekil 3. 1: Balya Kurşun-Çinko işletmesi.	58
Şekil 3. 2: Balya Kurşun-Çinko işletmesi yandan görünüşü	63
Şekil 3. 3: Balya Kurşun-Çinko işletmesi katlar arası üretim yöntemi	63
Şekil 3. 4: Balya Kurşun-Çinko işletmesi tesis akım şeması.....	64
Şekil 3. 5: Artık barajlarının görünümü a) ve b) İşletme ömrü biten atık barajları c) Mevcut atık barajı d) Yapımı devam eden atık barajı.....	65

Şekil 3. 6: Tez çalışmasının akım şeması.	66
Şekil 3. 7: TS 1500/2000 Plastisite Kartı.	71
Şekil 3. 8: Beton mikserindeki macun malzeme görünümü.	77
Şekil 3. 9: 25 cm slump değerindeki macun malzeme.....	78
Şekil 3. 10: Artık depolama deney kabini	79
Şekil 3. 11: Farklı konfigürasyonların yer aldığı test kabin tasarımları.	82
Şekil 3. 12: Hacimsel su içeriği (a), kılcal emme basıncı (b), oksijen içeriği (c) sensörleri ve veri kaydedici (d).	84
Şekil 3. 13: Hacimsel su içeriği sensörünün çimentosuz (a) ve çimentolu (b) karışımlar için kalibrasyon eğrileri.	85
Şekil 3. 14: Kapiler su yükselmesinin fiziksel modellenmesi	87
Şekil 3. 15: Sızıntı suyu örneklerinin Ec (a) ve pH (b) cihazları ile ölçümü.	89
Şekil 3. 16: Yağmurlama (damlama) sistemi.	90
Şekil 3. 17: Mekanik testler için numune alımı işlemi.	91
Şekil 3. 18: Kesme kutusu deneyinde c ve ϕ' nin belirlenmesi	92
Şekil 3. 19: Ön konsolidasyon basıncının Casagrande yöntemi ile bulunması	94
Şekil 4. 1: Balya Pb-Zn madeni proses artığı tane boyut dağılımı.	97
Şekil 4. 2: Adsorpsiyon izoterm eğrisi.	98
Şekil 4. 3: Tanelerin boşluk hacimleri (a) ve boşluk yüzey alanları (b).	99
Şekil 4. 4: Standart proktor deneyi sonuçları.	101
Şekil 4. 5: Modifiye proktor deneyi sonuçları.	102
Şekil 4. 6: Balya Pb-Zn madeni proses artığının minerolojik kompozisyonu.	103
Şekil 4. 7: Tasarım 1'deki tabakaların slump ve PKO değerleri.	106
Şekil 4. 8: Tasarım 2'deki tabakaların slump ve PKO değerleri.	107
Şekil 4. 9: Tasarım 3'teki tabakaların slump ve PKO değerleri.	107
Şekil 4. 10: Tasarım 1'deki Tabaka 1'in hacimsel su içeriği ve PKO değerleri.....	108
Şekil 4. 11: Tasarım 2'deki Tabaka 1'in hacimsel su içeriği ve PKO değerleri.....	109
Şekil 4. 12: Tasarım 3'deki Tabaka 1'in hacimsel su içeriği ve PKO değerleri.....	110
Şekil 4. 13: Tasarım 1'deki Tabaka 5'in hacimsel su içeriği ve PKO değerleri.....	111

Şekil 4. 14: Tasarım 2’deki Tabaka 5’in hacimsel su içeriği ve PKO değerleri.....	112
Şekil 4. 15: Tasarım 3’deki Tabaka 5’in hacimsel su içeriği ve PKO değerleri.....	112
Şekil 4. 16: Tasarım 1’deki Tabaka 10’un hacimsel su içeriği ve PKO değerleri.....	113
Şekil 4. 17: Tasarım 2’deki Tabaka 10’un hacimsel su içeriği ve PKO değerleri.....	114
Şekil 4. 18: Tasarım 3’deki Tabaka 10’un hacimsel su içeriği ve PKO değerleri.....	114
Şekil 4. 19: Üç farklı tasarımda döküm süresince gerçekleşen hacimsel su içeriği kaybı...	115
Şekil 4. 20: Tasarım 1’in kılcal emme basıncı değerleri.	116
Şekil 4. 21: Tasarım 2’nin kılcal emme basıncı.	117
Şekil 4. 22: Tasarım 3’ün kılcal emme basıncı.....	118
Şekil 4. 23: Tasarım 1’in oksijen içeriği.....	119
Şekil 4. 24: Tasarım 2’nin oksijen içeriği.....	120
Şekil 4. 25: Tasarım 3’ün oksijen içeriği.....	120
Şekil 4. 26: Üç farklı tasarımın sızıntı suyu miktarı.	121
Şekil 4. 27: Üç farklı tasarımın sızıntı sularının pH değerleri.	122
Şekil 4. 28: Üç farklı tasarımın sızıntı sularının Ec değerleri.....	123
Şekil 4. 29: Üç farklı tasarımın çatlak yoğunluğu değerleri.	124
Şekil 4. 30: Tasarım 1 için ıslama-kuruma sürecindeki hacimsel su içeriği değişimleri.....	125
Şekil 4. 31: Tasarım 2 için ıslanma-kuruma sürecindeki hacimsel su içeriği değişimleri...	126
Şekil 4. 32: Tasarım 3 için ıslanma-kuruma sürecindeki hacimsel su içeriği değişimleri...	127
Şekil 4. 33: Tasarım 1 için ıslanma-kuruma sürecindeki kılcal emme basıncındaki değişimleri.	127
Şekil 4. 34: Tasarım 2 için ıslanma-kuruma sürecindeki kılcal emme basıncındaki değişimleri.	128
Şekil 4. 35: Tasarım 3 için ıslanma-kuruma sürecindeki kılcal emme basıncındaki değişimleri.	129
Şekil 4. 36: Tasarım 1 için ıslanma-kuruma sürecindeki oksijen içeriği değişimleri.....	130
Şekil 4. 37: Tasarım 2 için ıslanma-kuruma sürecindeki oksijen içeriği değişimleri.....	131
Şekil 4. 38: Tasarım 3 için ıslanma-kuruma sürecindeki oksijen içeriği değişimleri.....	132
Şekil 4. 39: Islanma sürecindeki sızıntı suyu miktarları ve pH-Ec değişimleri.....	133

Şekil 4. 40: Tasarım 1 için ıslanma-kuruma sürecindeki çatlak yoğunluğu değişimleri.	134
Şekil 4. 41: Tasarım 2 için ıslanma-kuruma sürecindeki çatlak yoğunluğu değişimleri.	135
Şekil 4. 42: Tasarım 3 için ıslanma-kuruma sürecindeki çatlak yoğunluğu değişimleri.	136
Şekil 4. 43: Tasarım 1 için farklı yüksekliklere göre belirlenen kayma gerilmeleri.	137
Şekil 4. 44: Tasarım 2 için farklı yüksekliklere göre belirlenen kayma gerilmeleri.	138
Şekil 4. 45: Tasarım 3 için farklı yüksekliklere göre belirlenen kayma gerilmeleri.	139
Şekil 4. 46: Tasarım 1 konsolidasyon eğrisi.	140
Şekil 4. 47: Tasarım 2 konsolidasyon eğrisi.	141
Şekil 4. 48: Tasarım 3 konsolidasyon eğrisi.	142
Şekil 4. 49: Yerüstü macun depolama sahası tasarımı.	148

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2. 1: AYGEİY’de yer alan madencilik atıklarının listesi.....	10
Tablo 2. 2: Madencilik endüstrisinde atık sularının alıcı ortama deşarj standartları	17
Tablo 2. 3: AMD riski ve Nötürleştirme Potansiyeli olan mineraller	21
Tablo 2. 4: NNP sonuçlarının değerlendirilmesi.....	25
Tablo 2. 5: Son 10 yılda gerçekleşen büyük artık barajı kazaları	26
Tablo 2. 6: Kil içeriği kriterleri.....	29
Tablo 2. 7: Artık bertarafı için uygulanan bazı temel testler	32
Tablo 2. 8: Yoğunluğa bağlı slamp ve akma gerilmesi değişimleri.....	45
Tablo 2. 9: Artıkların kıvamı, pompa türü, akış özellikleri ve depolama sevi.....	46
Tablo 2. 10: Atık depolama yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları.....	52
Tablo 3. 1: Tane boyut dağılım türleri	69
Tablo 3. 2: Tane boyutlarına göre zemin türleri.....	69
Tablo 3. 3: Islanma-kuruma süreci boyunca malzeme üzerine uygulanan 24 saatlik su miktarları.	91
Tablo 4. 1: Artık malzemesinin helyum piknometre sonuçları.	96
Tablo 4. 2: Üniformluk ve eğrilik katsayı için değerler.	97
Tablo 4. 3: Artık malzemesinin kıvam limit değerleri.	100
Tablo 4. 4: Pb-Zn katı proses artığının elementel analizi.	105
Tablo 4. 5: Pb-Zn artığı proses suyu analizi	105
Tablo 4. 6: Tabaka döküm sürecindeki hacimsel su içeriği değişimleri.	115
Tablo 4. 7: Islanma-kuruma sürecindeki sızıntı suyu miktarları ve pH-Ec değişimleri.....	133
Tablo 4. 8: 2014 yılı flotasyon tesisine beslenen tüvenan cevher miktarları, Pb-Zn konsantre ve tenörleri	143
Tablo 4. 9: Tikinerin Teknik Kapasitesi	145
Tablo 4. 10: Macun tesisinde kullanılacak olan pompanın teknik özellikleri.....	146
Tablo 4. 11: Karıştırma tankının teknik özellikleri ve maliyeti	147

Tablo 4. 12: Macun malzeme yönteminin toplam yatırım maliyeti.	150
Tablo 4. 13: Macun malzeme yönteminin enerji tüketimleri.	151
Tablo 4. 14: Macun malzeme yöntemi için işçi maliyeti.	151
Tablo 4. 15: Macun malzeme yönteminin toplam işletme maliyeti.	153
Tablo 4. 16: Geleneksel atık barajı ile yerüstü macun depolama yöntemlerinin 5 yıllık toplam maliyetleri.	153
Tablo 4. 17: Yerüstü depolama yöntemlerinin maliyet karşılaştırılması.	154

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
Å	: Angström
\$	: A.B.D. Doları
%	: Yüzde
e	: Boşluk Oranı
n	: Porozite
S	: Doygunluk Derecesi
u _a	: Boşluk Hava Basıncı
u _w	: Boşluk Suyu Basıncı
w	: Su Muhtevası
π	: Pi Sayısı
φ	: İçsel Sürtünme Açısı
c	: Kohezyon
σ	: Normal Gerilme
τ	: Kayma Dayanımı
C _c	: Sıkışma İndisi
C _s	: Kabarma İndisi
ΔH	: Oturma Miktarı
ε _v	: Düşey Birim Deformasyonu
ML	: Düşük Plastisiteli Silt
w	: Su Muhtevası
W _L	: Likit Limit
W _p	: Plastik Limit
I _p	: Plastisite İndisi
I _L	: Sıvılık İndisi
°C	: Sıcaklık
μm	: Mikronmetre
mm	: Milimetre
cm	: Santimetre
m	: Metre
km	: Kilometre
mg	: Miligram
gr	: Gram
kg	: Kilogram
t	: Ton
mL	: Mililitre
L	: Litre
cm ³	: Santimetreküp
m ³	: Metreküp
kW	: Kilowatt
Pa	: Pascal
kPa	: Kilopascal
mV	: Milivolt

Kısaltmalar	Açıklama
AMD	: Asit Maden Drenajı
PKO	: Pülpte Katı Oranı
Ec	: Elektriksel İletkenlik
AP	: Asit Potansiyeli
NP	: Nötralizasyon Potansiyeli
NNP	: Net Nötralizasyon Potansiyeli
AKM	: Askıda Katı Madde
TDS	: Toplam Çözünmüş Katı Madde
MAT	: Macun Atık Teknolojisi

ÖZET

DOKTORA TEZİ

MADEN TESİS ATIKLARININ YERÜSTÜNDE DEPOLANMASINDA EN UYGUN TASARIM KOŞULLARININ BELİRLENMESİ

Serkan TÜYLÜ

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Ataç BAŞÇETİN

II. Danışman : Prof. Dr. Mostafa BENZAAZOUA

Günümüzde madencilik sektöründe ortaya çıkan yüksek miktardaki proses artıklarının yerüstünde depolanması çevresel açıdan birçok sorun oluşturmaktadır. Özellikle bazı artıkların içerdiği pirit (FeS_2) ya da protit (FeS) gibi sülfür mineralleri ortamdaki su ve oksijen ile reaksiyona girerek okside olmaktadır. Bu durum pH değerine bağlı olarak ortamın asiditesi ve çözünübilirliğini de değiştirmekte ve literatürde asit maden drenajı (AMD) olarak bilinmektedir. Ayrıca maden işletmelerinde artıklar için geniş depolama alanı ihtiyacı ve artık depolamadaki yüksek maliyetlerin de madencilik sektöründe karşılaşılan diğer önemli sorunlar olduğu görülmüştür. Dahası mevcut artık depolama tekniklerinin bu sorunlara yeterince çözüm getiremediği, verimli ve ekonomik alternatiflerin değerlendirilmesinde de problemler yaşandığı bilinmektedir.

Dünyada yaygın olarak kullanılan proses artıklarının konvansiyonel artık barajlarında depolanması yönteminin, son yıllarda meydana gelen artık barajı kazaları nedeniyle güvenilirliği konusu tartışılmalı hale gelmiştir. Bu nedenle Kanada, Avustralya ve ABD gibi sektördeki lider ülkeler de proses artıklarının su içeriği yüksek bir şekilde depolanmasına sınırlama getirme noktasına gelmişler ve farklı çözüm arayışlarına yönelmişlerdir. Dolayısıyla artıkların yerüstünde daha düşük su içeriğine sahip bir malzeme olarak depolanması yönünde çalışmalar son yıllarda hız kazanmıştır. Bu yönde yapılan çalışmalarda kullanılan yöntemlerden biri de sunulan bu tez çalışmasının temel amacını oluşturan, artıkların “macun” kıvamına getirildikten sonra yerüstünde depolanması yöntemidir. Artıkların bu biçimde depolanmasında en önemli faktörler; bölgenin yağış, rüzgar, nem ve sıcaklık gibi iklim şartlarının macun malzemesini etkilemesi, rehabilitasyon koşulları düşünülerek fiziksel ve jeokimyasal duraylılığını koruması ve en son olarak da topografik koşullardan dolayı malzemenin akışkanlığının

kontrol edilebilmesidir. Bu sebeplerden dolayı depolanacak malzemede aranılan en önemli özellikler; artığın pompalanabilir nitelikte olması, depolandığı alanda kısa sürede kuruması, stabil kalması ve belirli oranda da suya doymun olması olarak söylenebilir. Bahsedilen bu parametreleri sistematik olarak incelemek ve irdelemek için bir akademik çalışmaya ihtiyaç duyulmuştur.

Bu tez çalışması kapsamında Balıkesir-Balya bölgesinde yer alan bir kurşun-çinko yeraltı madeni çalışma sahası olarak belirlenmiştir. Arazinin üretilen artık miktarına göre artık depolama sahaları açısından yetersizliği, metal madeni artıklarının çevresel açıdan doğurabileceği riskler ve bölgenin yağışlı bir iklime sahip olması söz konusu sahanın seçiminde dikkate alınmıştır. Bu çalışmada, ilk olarak ~%20 pülp te katı oranı (PKO) olan artık numunesinin fiziksel ve jeokimyasal özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra 25 cm çökme (slamp) değerine göre farklı PKO (%65-%75) değerlerinde bağlayıcısız ve bağlayıcılı ($\leq$ %2 çimento) karışım reçeteleri oluşturulmuştur. Elde edilen macun malzemeler optimum depolama tasarımı için tabaka tabaka olarak 3 farklı şekilde laboratuvar tipi kabinlerde; (1) bağlayıcısız, (2) en alt tabaka bağlayıcılı ve (3) en alt ve en üst tabakalar bağlayıcılı olarak depolanmıştır. Bu kabinlerin 1., 5. ve 10. tabakalarına yerleştirilen sensörler ile macun malzemenin kılcal emme (matrik emme) basıncı, hacimsel su içeriği, sıcaklık, oksijen içeriği değerleri ölçülmüş, doymunluk derecesi ve çatlak oluşumlarındaki değişimler de zaman ve bölgenin iklimsel koşullarına göre yapılan ıslama-kuruma testlerine bağlı olarak gözlenmiştir. Bu ıslama-kuruma testleri ile depolanan macun malzemenin özellikle yağışlardan nasıl etkileneceği ortaya konulmuştur. Bununla beraber kabinin altından toplanan sızıntı suları da pH ve Ec değerleri açısından jeokimyasal analizlere tabii tutulmuştur. Ayrıca depolanan macun malzemeden en son örnekler alınarak oturma oranları ve kayma dayanımları tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, macun malzeme depolama sisteminde ilk tabakalar döküldükten birkaç gün sonra macun malzemenin kendini sabit bir su seviyesinde tuttuğu anlaşılmıştır. Bunun yanı sıra çimentolu sistemin daha az geçirimsizliğe sahip olması, üst tabakaların doymun kalmasına neden olmuştur. Böylece oksijen difüzyonu minimum ölçüde tutularak AMD riskinin önüne geçilmiştir. Ancak tabakalardaki bu suya doymunluğun özellikle Tasarım 2’de kayma dayanımını düşürdüğü belirlenmiştir. Ayrıca çimentolu tabakaların bulunduğu en alt derinliklerde oturma miktarının diğer katmanlara göre daha fazla gerçekleştiği ölçülmüştür. Bununla beraber Tasarım 3’ün en üst tabakasında yer alan çimentolu karışımın yağmur suları karşısında göçükleri engellediği ve alt tabakalara doğru istenen kohezyonu yakaladığı tespit edilmiştir.

Bu tez çalışması ile maden proses artıklarının, yerüstünde güvenli bir şekilde depolanmasını sağlayan bir tasarım geliştirilerek, sürdürülebilir bir maden üretim sürecine katkıda bulunulmuştur. Artık barajı kazalarına karşı ülkemiz açısından alternatif bu yeni depolama tekniği ile çevre dostu madencilik faaliyeti de sağlanabilecektir. Bu çalışma tüm maden artıklarının da macun şeklinde yer üstünde depolanabilirliğinin gelişmesine ön ayak olacaktır.

Ocak 2016, 195 Sayfa.

Anahtar kelimeler: Artık yönetimi, yerüstü macun depolama, stabilizasyon, AMD, çevresel riskler.

SUMMARY

Ph.D. THESIS

DETERMINATION OF OPTIMUM DESIGN SPECIFICATIONS FOR SURFACE PASTE TAILINGS DISPOSAL

Serkan TÜYLÜ

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Science and Engineering

Department of Mining Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Ataç BAŞÇETİN

Co-Supervisor : Prof. Dr. Mostafa BENZAAZOUA

Disposal of high amount of process tailings of mining industry on surface has created many environmental problems. Especially, the tailings, which contain sulphur minerals such as pyrite (FeS_2) or pyrotite (FeS) affects the acidity and dissolution level of the medium through oxidation after reacting with water and oxygen depending on pH. Furthermore, larger storage area requirement for mine tailings and high costs for disposal processes are other important issues in the mining industry. Unfortunately, it is a well-known fact that conventional disposal techniques are not good enough to solve these problems. Meanwhile, there are some problems on using efficient and economical alternative methods.

A widely used method of storage of process tailings in conventional tailing dams have become controversial due to the tailing dam accidents in recent years. For this reason, leader countries in the sector such as Canada, Australia and the USA are about to limit the disposal of process tailings with high water content, and have been searching for a new solution. Therefore, the studies on the storage of tailings on surface with lower water content have been accelerated in recent years. One of these studies, which is also the main aim of this study, is the method of disposal of tailings on surface as a paste. In this method, the effect of the climatic conditions such as rainfall, wind, humidity, and temperature of the region on the paste material, maintaining of physical and geochemical stability considering rehabilitation conditions, and finally controlling the fluidity of the material due to topographic conditions are the most important factors. For these reasons, the most important features demanded from a disposal material are pumpability, drying in a short time in the disposal area, stability, and saturated with water at a specific extent.

In the scope of this thesis, a Pb-Zn underground mine in Balıkesir-Balya region was chosen as the field of study. The lack of disposal areas according to tailings produced, the environmental risks of metal mine tailings, and the rainy climate of the region were considered while choosing the region in question. In this study, first, physical and geochemical properties of the tailings at 20% solid to pulp ratio were obtained. Second, the mixing properties at the paste was determined as a function of solid to pulp ratios (65-75%) according to 25 cm slump value, in the presence and absence binder ($\leq 2\%$ cement).

The paste materials were stored in a laboratory scale cabin layer-by-layer in order to obtain the optimum storage design in 3 different ways: (1) without binder, (2) with binder in the lowermost layer (3) with binder in the lowermost and upmost layers. Matric suction, volumetric water content, temperature, and oxygen consumption of the paste materials were measured by sensors placed in the 1th, 5th and 10th layers. In addition saturation degree and cracks occurred in the system were observed by wetting-drying tests. Additionally, seepage water collected from the bottom of the cabins was subjected to geochemical analysis (pH and Ec). Finally, the settlement (consolidation) ratio and shear strength of the stored paste material were measured by taking samples.

As a result, in the paste material disposal system, it was understood that a couple of days after the pouring of 1th layers, the paste material kept itself in a stable water level. Furthermore, the cement containing system had less permeability, and this caused upper layers saturated. Thus, AMD risk was precluded by keeping oxygen diffusion at minimum. However, it was determined that water saturation decreased the shear strength especially in Design 2. Moreover, at the deepest layers which contained cement, amount the settlement was more than other layers. It was confirmed that the cement in the uppermost layer of Design 3 obstructed collapse formation therewithal caused by rain water and the cohesion towards the lower layers.

By this thesis, a special design for a safe disposal of mine process tailings on surface was developed, and a sustainable mine production process was revealed. An environmental mining operation can be provided, contrary to tailing pond accidents by this new and alternative storage technique for Turkey. This study leads to develop the disposal of all mine tailings as a paste.

January 2016, 195 Pages.

Keywords: Tailing management, surface paste disposal, stabilization, AMD, environmental risks.

1. GİRİŞ

Hızla gelişmekte olan madencilik sektörü, aynı zamanda çevresel sorunları da beraberinde getirmektedir. Her yıl madenlerden yüksek miktarlarda ortaya çıkan maden tesis atıklarının ya da artıkların depolanması bu sorunların en başında gelmektedir. Özellikle metal madenciliğinde konsantre üretimi sonrasında açığa çıkan ekonomik yönden değersiz ve sülfür içeren artıklar, su ve oksijen ile etkileşime girerek Asit Maden Drenajına (AMD) sebep olup çevreye önemli derecelerde kalıcı zararlar vermektedir. Çevresel açıdan zararlı olabilecek bu tür artıkların, depolanacağı yerdeki izolasyonu (geçirimsiz tabakaların oluşturulması), tesisten nakli, stabilitesi, emniyeti, su ve toprak kalitesi üzerindeki etkileri gibi parametrelere bağlı olarak düzenleme şekli ve kontrolü başlıca dikkat edilmesi gereken hususlardır.

Maden proses artıklarının yerüstünde geleneksel yöntemler kullanılarak (artık barajı vs.) depolanması sırasında oluşan çevresel zararlar yeni teknolojiler ve yöntemler ile önemli bir ölçüde azaltılabilir ve/veya bertaraf edilebilir. Günümüzde genellikle yerüstü artık barajlarına, denizlere, nehirlere, çaylara vb. yerlere boşaltılan metal maden artıklarının, son yıllarda önemi giderek artan depolama yöntemlerinden biri olan “Macun Artık Teknolojisi (MAT)” kullanılarak güvenli bir şekilde depolanabilirliği araştırılmaktadır. MAT’ın yeraltı macun dolgu ve yerüstü macun depolama olarak endüstriyel alanda iki uygulaması mevcuttur. Dünyada MAT ilk olarak 1980’lerin başında Almanya’nın Grund madeninde yeraltında tahkimat amacıyla dolgu şeklinde kullanılmaya başlanmıştır (Hustrulid ve Bullock, 2001; Kesimal ve diğ., 2002). Bu yöntem şu anda başta Kanada olmak üzere birçok gelişmiş ülkenin madencilik faaliyetlerinde uygulanmaya devam etmektedir. Ülkemizde ise bu teknoloji ilk kez 1999 yılında bakır madeni proses artıklarının macun formunda yeraltında depolanması olarak uygulanmaya başlamıştır. Bu tarihten itibaren proses artıklarından oluşan macun malzemesinin yeraltı ve yerüstünde depolanması ile ilgili özellikle bilimsel çalışmalar hız kazanmıştır. Bu çalışmalar yerüstü macun depolamanın, geleneksel artık barajlarında en büyük problemlerden biri olan serbest su miktarının minimize edilebileceğini göstermiştir. Ayrıca daha az parçacık ayrışması yani diğer bir ifade ile daha homojen bir malzemenin oluşması, malzemenin

daha stabil olmasına neden olan jeoteknik özelliklerinin gelişmesini, yerüstü macun malzemesine gerekli olduğu durumlarda bağlayıcının ilave edilmesi ile de oluşturulan macun dayanımı ve duraylılığının artırılmasını ve AMD riskinin azaltılmasını sağlamaktadır. Bu uygulama beraberinde özellikle artık depolama sahası bulunması zor işletmelerde bir yer kazanımı sağlamak ve maliyet yönünden diğer yöntemlere göre uzun vadede daha avantajlı bir yöntem olmaktadır.

Maden proses artıklarının fiziksel ve jeokimyasal dayanımı dikkate alınarak tabakalar halinde üst üste depolanma imkanı sağlayacak tasarım parametrelerinin belirlenmesi bu çalışmanın temel amacıdır. Bu tasarım parametreleri içinde öncelikle artıklardan hazırlanan macun malzemesinin akışkanlığı ve depolama alanında kuruma şartları gelmektedir. Bunun yanı sıra, depolama yapıldıktan sonra, depolanan malzeme içerisinde yerüstü şartları altında su ve oksijen difüzyonunu önlemek diğer önemli bir konudur.

Ayrıca, macun malzemenin kendi ağırlığı altında ya da depolama sahasının daha sonraki kullanım şartlarına bağlı olarak statik veya dinamik yükler altında stabil kalabilmesi için macun malzemenin fiziksel dayanım özelliği kazandırılması projenin diğer amaçlarından biridir. Bu şartları sağlayan bir depolama şekli, çevresel riskleri minimize edebilecek, daha sonraki tekrar kazanım ve kullanım koşullarına uygun bir yöntem olacaktır.

Bu şartlar laboratuvarlarımızdaki mevcut alt yapı ile sağlanmış ve arazideki atmosferik yağmur koşulları ile simüle edilmiştir. Böylece malzemenin yağmurlu iklim koşullarında nasıl davranacağı saptanmıştır. Ayrıca, macun teknolojisinin kullanılması ile öncelikli olarak işletmelerin yaşadığı arazi kullanım problemi de çözülecektir. Bu sayede artık depolama yöntemleri içerisinde maliyetler açısından da önemli bir tasarruf beklenmektedir.

Dünyada yerüstü macun depolama konusunda endüstriyel alanda yer alan çalışmalar daha çok deneme şeklinde gerçekleşmiş, fakat alternatif bir yöntem olarak uygulamaya geçilememiştir (Theriault ve diğ., 2003). Kuru depolama ile ilgili çok sayıda örnek görmek mümkün iken, bu yöntem henüz gerek teorik gerekse endüstriyel boyutta geliştirilememiştir. Bu denemeler bölgesel bazda yapıldığı için, bu yöntemi etkileyen iklimsel koşulların, macun malzemenin fiziksel, jeokimyasal ve reolojik özelliklerine etkileri ve buna bağlı olarak optimum depolama tasarımı için kesin bir model henüz

geliştirilememiştir. Literatürde potansiyel çevresel etkilerin genellikle jeokimyasal (AMD vb.) açıdan kolon, nem hücresi ve küçük ölçekli kabin testleri ile incelendiği görülmektedir (Verburg, 2001 ve 2002; McGregor ve Blowes, 2002; Benzaazoua ve diğ., 2004; Deschamps ve diğ., 2007, 2008 ve 2011; Yılmaz ve diğ., 2014). Yapılan bu çalışmalarda jeokimyasal değişimlerin yanı sıra jeoteknik değişimlerin uzun vadede nasıl gerçekleştiği, iklimsel koşulların özellikle yağmurun etkisinin fiziksel açıdan nelere sebep olabileceği ifade edilmemiştir. Dolayısıyla bu tez çalışması kapsamında, bu konuların ayrı ayrı ele alınması ve değerlendirilmesiyle macun malzemenin yerüstündeki davranışı farklı tasarımlar ile simüle edilmiş ve jeokimyasal özellikleri ile beraber jeoteknik değişimleri ortaya konulmuştur.

Ayrıca bu çalışma ile maksimum artık depolama sağlanarak işletme maliyeti düşük, az yer kaplayan, çevresel açıdan risk oluşturmayan, alternatif bir artık depolama yönteminin ülkemizde endüstriyel anlamda ilk kez kullanılabilmesi için bir ön çalışma oluşturması hedeflenmektedir.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. ATIK YÖNETİMİ

Atık, herhangi bir faaliyet sonucunda oluşan, çevreye atılan veya bırakılan tehlikeli ya da tehlikesiz grubunda yer alan herhangi bir maddedir. Atık yönetimi ise atığın toplanması, taşınması, geri kazanılması, bertaraf edilmesi, bertaraf sahalarının kapatılma sonrası bakımı ve bu tür faaliyetlerin gözetim, denetim ve izlenmesi işlemlerini kapsayan bir faaliyetler bütünüdür. Dolayısıyla atıkların oluşumlarından bertaraflarına kadar çevre ve insan sağlığına zarar vermeden yönetimlerinin sağlanması atık yönetiminin amacını oluşturmaktadır (T.Ç.Ş.İ.M., 2011). Şekil 2.1’de atık yönetimi hiyerarşisi verilmiştir.



Şekil 2. 1: Atık yönetimi hiyerarşisi (T.Ç.Ş.İ.M., 2011).

Şekil 2.1’den de görüldüğü gibi atık yönetiminde öncelikle atığın önlenmesi ya da minimize edilmesi, daha sonra yeniden kullanımı veya geri dönüşümün sağlanması ve en son seçenek olarak da bertaraf edilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda atık yönetimi genel ilkeleri şu şekilde sıralanabilmektedir (T.Ç.Ş.İ.M., 2011):

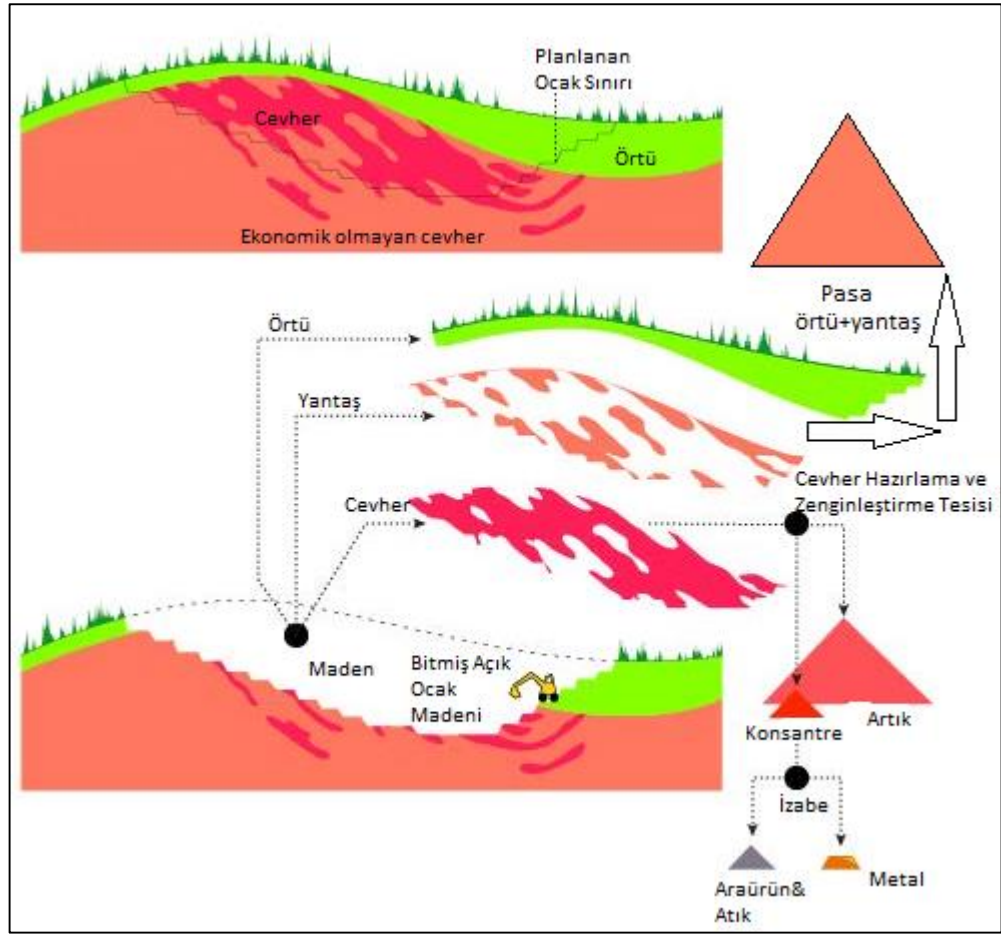
- Atık üretiminin ve atığın zararlılığının önlenmesi ve azaltılması,
- Atığın geri kazanılması veya enerji kaynağı olarak kullanılması,
- Çevre ve insan sağlığına zarar vermeyecek yöntem ve proseslerin kullanılması,
- Atıkların taşıma lisanslı araçlar ile taşınması,

- Atıkların lisanslı bir tesis tarafından bertaraf edilmesi veya geri kazanılması,
- Atıkların en yakın ve en uygun tesiste bertaraf edilmesi,
- Çevre ile uyumlu teknolojilerin kullanılması,
- Atıklardan kaynaklanan zararlardan dolayı ilgili sorumluluklar.

2.2. MADEN ATIKLARI VE YÖNETİMİ

Tüm endüstriyel faaliyetlerde olduğu gibi madenlerin işletilmesi sonucunda da atık oluşmaktadır. Madencilik faaliyetleri sırasında pasa (dekapaj ve yantaş), artık (zenginleştirme sonrası proses atığı) ve izabe sonrasında da oluşan atık şeklinde tanımlanan malzemeler ortaya çıkmaktadır (Şekil 2.2). Bu maden atıkları, uygun olmayan bir şekilde çevreye bırakıldıklarında çevre ve insan sağlığı için tehdit oluşturmaktadır. Özellikle cevher hazırlama ve zenginleştirme tesisi sonrasında ekonomik yönden değersiz atıkların iyi belirlenememiş bir yöntemle depolanması maden işletmesine her gün ekstra mali yük olarak yansımaya ve çevresel risklere sebep olabilir. Maden atıklarını oluşturan artıkları ve pasaları yönetmek için birçok seçenek mevcuttur. Bunlardan en yaygın olarak uygulanan yöntemler şunlardır (BRGM, 2001; MMSD, 2002; Coil ve diğ., 2012):

- Göletler ya da barajların içerisine bulamaç veya çamur halinde artıkların atılması,
- Atık barajlarının inşaatında pasaların dolgu malzemesi olarak kullanılması,
- Atıkların susuzlandırılarak ya da su oranlarının azaltılarak depolanması,
- Yüzey sularına artıkların depolanması (deniz göl, nehir vb.),
- Yeraltındaki boşluklara artık ve pasaların karıştırılarak ya da tek başlarına çimentolu ya da çimentosuz olarak doldurulması.



Şekil 2. 2: Bir açık ocak madeninde oluşabilecek atıklar (Coil ve diğ., 2012).

Maden artıkları, cevher hazırlama ve zenginleştirme sürecinde cevherin ekonomik olarak kazanılmasından sonra geriye kalan, çoğunlukla gang mineraller ve çok az bir miktarda günümüz şartlarında ekonomik değeri olmayan cevher içeren, ince taneli bir son üründür. Diğer bir ifadeyle bu maden tesis artıkları, işlem tipine bağlı olarak yüksek oranda su içerebilen, çok ince taneli pülp kıvamında bir malzeme özelliği gösterir. Bu artıkların, cevher hazırlama ve zenginleştirme tesisinde çeşitli fiziko-kimyasal (flotasyon vb.) yöntemler sonrası kimyasal içerikleri son derece karmaşık olabilmektedir. Ayrıca maden artıkları, üretilen cevherin fiziksel, kimyasal, jeolojik özelliklerine bağlı olarak da değişiklik göstermektedir. Bu nedenle iyi bir atık yönetimini oluşturabilmek için maden artık özelliklerinin uygun bir şekilde belirlenmesi ve davranışlarının anlaşılması önemlidir. Bununla beraber madencilik faaliyeti sonucu ortaya çıkacak olan atıkların nasıl ve nerede bertaraf ya da depolanacağını belirlemek için arazinin fiziksel ve çevresel durumları da değerlendirmelidir. Özellikle çevresel açıdan risk oluşturabilecek artıklar,

güvenli bir şekilde bertaraf edilmesi ya da uzaklaştırılarak tehlike taşımayan şartlarda depolanması gereken malzemelerdir. Bu nedenle bu gibi artıkların tanımlanması, sınıflandırılması, bertarafı ya da depolanması dünyada endüstrinin her alanında hassasiyet ile yaklaşılan bir konudur (Tailsafe, 2004; Journeaux Assoc., 2012).

Artıkların depolanabilmesinde doğru yöntemin seçimi, maliyet, çevresel performans ve depolanan malzemenin dağılma ya da duraylılık riski olmak üzere üç temel faktörün değerlendirilmesi esasına bağlıdır. Aynı zamanda bu parametreler doğrultusunda seçilecek yöntemlerin uygulanabilmesi, çeşitli yasal düzenlemeler içerisinde gerçekleşmektedir (Tailsafe, 2004; Journeaux Assoc., 2012).

2.2.1. Maden Artıkları Hakkındaki Ulusal ve Uluslararası Mevzuat

Ülkemizde 2015 yılına kadar maden atıkları ile ilgili doğrudan bir yasal düzenleme bulunmamaktaydı. Maden atıkları, özelinde ayrı bir yönetmelik yayımlanıp yürürlüğe girene kadar, Atıkların Düzenli Depolanması'na ilişkin yönetmelik hükümlerine tabi olunmuştur. Günümüzde ise Avrupa Birliği'nin 2006/21/EC sayılı Maden Atıklarının Yönetimi Direktifi gereğince, Maden Atıklarının Yönetimi Yönetmeliği'nin ülkemiz mevzuatına uyarlanması ile ilgili çalışmalar yürütülmüş ve Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından hazırlanan "Maden Atıkları Yönetmeliği Taslağı" 13.08.2014 tarihinde görüşlere açılarak duyurulmuştur. Bu sürecin sonunda ise "Maden Atıkları Yönetmeliği" 15 Temmuz 2015 tarihinde 29417 sayılı Resmî Gazete'de yayınlanarak yürürlüğe girmiş ve "macun" kelimesi ilk defa artık bertaraf yöntemi olarak yasal bir düzenlemeye girmiştir (ÇŞB, 2015a). Bu yönetmelikte geçen önemli tanımlar şöyledir;

- Madenlerin zenginleştirilmesi sonucunda ortaya çıkan atıkların depolanmasına yönelik olarak inşa edilen sedde ve arkasında bir rezervuar oluşturan mühendislik yapısına **Atık Barajı**,
- Herhangi bir maden atığı bertaraf tesisinin işletilmesi esnasında, tesis içinde veya dışında çevre ve/veya insan sağlığı için anında veya daha sonra ciddi tehlikeye yol açabilen bir olayı veya birden fazla tehlikeli maddenin sebep olduğu büyük bir yayılım, yangın veya patlama olayına **Büyük Kaza**,

- Madenlerin aranması, çıkarılması, hazırlanması ve zenginleştirilmesi veya depolanması sonucunda oluşan katı veya şlam/sulu çamur şeklinde madde veya malzemeye **Maden Atığı**,
- Depolanan maden atıklarından süzülen ve kaynaklanan her türlü sıvıya **Sızıntı Suyu** denilmektedir.

Ayrıca genel hükümler kısmında yer alan temel iki madde aşağıdaki gibidir;

- Maden atıklarının sürdürülebilir çevre ve insan sağlığı ile sürdürülebilir kalkınma prensipleri göz önünde bulundurularak yönetilmesinde mevcut en iyi teknik ve teknolojilerin seçilmesi ve uygulanması esastır.
- Maden atıklarının depolandığı bertaraf tesislerinin, kapatma işlemlerinin kısa sürede uygun olarak yapılabilmesi ve kullanım ömrünün artırılması amacıyla, atığa susuzlaştırma/kurutma işlemlerinin uygulanmasına öncelik verilir.

Bunlarla birlikte Bakanlıkça sunulan yönetmeliğin Ek-1'inde yer alan Atık Yönetimi Planı aşağıdaki maddeler dahilinde oluşturulması istenmektedir:

1. Tesisin 1/25.000 ölçekli topoğrafik haritadaki yeri, koordinatları,
2. Tesisin vaziyet planı (idari/teknik üniteler 1/5000-1/1000 ölçekli),
3. Cevherin bulunduğu formasyonun jeolojik ve litolojik yapısı, mineralojisi, cevherleşme yapısı (masif, damar tipi, saçınımlı vs.), jeokimyası, cevherin yataklanma şekli ve boyutu ve diğer jeolojik birimlerle olan kontak ilişkisi, alterasyon durumu,
4. Madencilik faaliyetleri sonucu oluşan atıkların fiziksel ve kimyasal özellikleri,
5. Proseste kullanılacak kimyasal maddelerin isimleri ve özellikleri (malzeme güvenlik bilgi formları),
6. Maden atığının ve atıkların depolandığı alanın mineralojik, jeoteknik ve jeokimyasal davranış özelliklerinin belirlenmesi,

7. Maden atığının karakterizasyonu, atığın miktarı ve maden atık bertaraf tesisinin sınıfı,
8. Maden atıklarının geri kazanım, yeniden kullanım ya da maden sahası dışında başka bir sektörde hammadde olarak kullanılması planlanıyor ise, atığın miktarı, atık kodu, proses bilgileri çevresel etkilerine ilişkin bilgiler,
9. Maden atık yönetiminin çevre ve insan sağlığı üzerine muhtemel etkileri, işletme, kapatma ve kapatma sonrasında alınacak önlemler;
 - a. Maden atığı oluşmadan önceki mevcut su ve toprak özelliklerinin incelenmesi,
 - b. Maden atıklarının su kaynakları, hava, toprak ve canlı yaşamı üzerine olabilecek etkileri ve alınacak önlemler,
10. Dahili acil eylem planı,
11. Çevresel izleme planı.

Ülkemizde maden işletmeleri ve atıkları, halen yürürlükte olan ve aşağıda listesi verilen kanun ve yönetmeliklere doğrudan veya dolaylı olarak tabidir (ÇŞB, 2015b):

- Maden Atıkları Yönetmeliği (2015)
- Çevre Kanunu (1983)
- Maden Kanunu (1985 ve 2015)
- ÇED Yönetmeliği (2014)
- Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği (2005)
- Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (2004)
- Toprak Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği (2001)
- Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik (2008)
- Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (2010)

- Madencilik Faaliyetleri İle Bozulan Arazilerin Doğaya Yeniden Kazandırılması Yönetmeliği (2010)
- Bazı Tehlikesiz Atıkların Geri Kazanımı Tebliği (2011)
- Diğer ilgili mevzuat (Su Ürünleri Kanunu (1971) ve Su Ürünleri Yönetmeliği (1995)).

Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmeliğine (AYGEİY, 2008) göre; Ek-I atık sınıflamaları tablosunda madencilik atıkları “Q11 kodu ile hammadde çıkarılması ve işlenmesinden kaynaklanan kalıntılar (örneğin, petrol sahası sloopları, madencilik atıkları ve benzeri)” olarak ifade edilmektedir. Ayrıca Ek-IV’te atık listesi tablosunda 1. sırada madenlerin aranması, çıkarılması, işletilmesi, fiziki ve kimyasal işleme tabi tutulması sırasında ortaya çıkan atıklar yer almakta ve türlerine göre ayrılmaktadır (Tablo 2.1). Yönetmeliğin Ek-IV’ünde verilen Atık Listesinde (A) işaretli atıklar, tehlikeli atık konsantrasyonuna bakılmaksızın tehlikeli atık sınıfına girmektedir. (M) işaretli atıkların tehlikelilik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılacak çalışmalarda, tehlike arz edebilecek oluşumların konsantrasyon değerleri esas alınarak yapılır. Bununla birlikte maden atıkları; “tehlikeli”, “tehlikesiz” ve “inert” atıklar olarak üç sınıfta toplanır (ÇŞB, 2015b).

Tablo 2. 1: AYGEİY’de yer alan madencilik atıklarının listesi (Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik, 2008).

01	(01) MADENLERİN ARANMASI, ÇIKARILMASI, İŞLETİLMESİ, FİZİKİ VE KİMYASAL İŞLEME TABİ TUTULMASI SIRASINDA ORTAYA ÇIKAN ATIKLAR	
01 01	Maden kazılarından kaynaklanan atıklar	
01 01 01	Metalik maden kazılarından kaynaklanan atıklar	
01 01 02	Metalik olmayan maden kazılarından kaynaklanan atıklar	
01 03	Metalik Minerallerin Fiziki ve Kimyasal Olarak İşlenmesinden Kaynaklanan Atıklar	
01 03 04*	Sülfürlü cevherlerin işlenmesinden kaynaklanan asit üretici maden atıkları	A
01 03 05*	Tehlikeli madde içeren diğer maden atıkları	M
01 03 06	01 03 04 ve 01 03 05 dışındaki diğer maden atıkları	
01 03 07*	Metalik minerallerin fiziki ve kimyasal işlenmesinden kaynaklanan tehlikeli maddeler içeren diğer atıklar	M
01 03 08	01 03 07 dışındaki diğer tozumsu ve pudramsı atıklar	
01 03 09	01 03 07 dışındaki alüminyum oksit üretiminden çıkan kırmızı çamur	
01 03 99	Başka bir şekilde tanımlanmamış atıklar	

Tablo 2.1 (devam):

01 04	Metalik Olmayan Minerallerin Fiziki ve Kimyasal İşlemlerinden Kaynaklanan Atıklar	
01 04 07*	Metalik olmayan minerallerin fiziki ve kimyasal işlenmesinden kaynaklanan tehlikeli maddeler içeren atıklar	M
01 04 08	01 04 07 dışındaki atık kaya ve çakıl taşı atıkları	
01 04 09	Atık kum ve killeri	
01 04 10	01 04 07 dışındaki tozumsu ve pudramsı atıklar	
01 04 11	01 04 07 dışındaki potas ve kaya tuzu işlemlerinden kaynaklanan atıklar	
01 04 12	01 04 07 ve 01 04 11 dışındaki minerallerin yıkanması ve temizlenmesinden kaynaklanan ince taneli atıklar ve diğer atıklar	
01 04 13	01 04 07 dışındaki taş yontma ve kesme işlemlerinden kaynaklanan atıklar	
01 04 99	Başka bir şekilde tanımlanmamış atıklar	

Bazı durumlarda atığın tehlikeli, tehlikesiz ya da inert karakterde bir maden atığı olması dikkate alınmaz. Örneğin bir maden artık depolama alanı, kapanmadan sonraki izleme süresi de dahil, kısa veya uzun vadede yapısal bütünlüğü veya işletilmesi ile ilgili bir uygunsuzluk durumunda çevre ve insan sağlığı üzerinde ciddi sorunlara yol açıyorsa yüksek riskli sınıfına girerek değerlendirilir (Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği, 2005).

Bir artık depolama tesisi insan sağlığı ve çevre açısından ciddi tehlike potansiyeli değerlendirmesi aşağıdaki faktörler dikkate alınarak yapılmalıdır (Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik, 2010):

- Tesisin boyutu ve özellikleri,
- Tesisteki atığın miktarı ve niteliği,
- Atık yığının eğim açısı,
- Atık yığın içinde dahili yer altı suyu oluşturma potansiyeli,
- Zeminin duraylılığı, geçirimli yada geçirimsiz tabakaların varlığı, özellikle kil gibi malzemeleri içerip içermediği,
- Topoğrafya,
- Su yollarına, yapı ve binalara yakınlık.

Atık Yönetimi Hakkında AB Müktesebat Rehberi'nde (CPS, 2012) atık yönetimi hakkında aşağıdaki hususlara önemle değinilmektedir:

- Atık yönetimi politikası, atıkların çevre ve sağlık üzerindeki olumsuz etkilerinin azaltılması, enerji ve kaynak verimliliği olan bir Avrupa ekonomisinin teşvik edilmesi amacı ile son otuz yıl içinde geliştirilen eylem planları ve ikincil mevzuatlar yardımı ile Avrupa Birliği (AB)'nde oldukça düzenlenmiş bir çerçeveye dayanmaktadır.
- Atıkların yönetimine ilişkin AB politikasının beş ana hedefi bulunmaktadır:
 - Çevre dostu olan ve daha az atık-yoğun teknoloji ve işlemlerin teşviki ve çevre dostu olup geri dönüşümü mümkün ürünler üretmek yoluyla atıkların önlenmesi;
 - Özellikle hammadde olarak yeniden kullanım ve geri kazanım ile atıkların yeniden işleme tabi tutulmasının teşvik edilmesi;
 - Avrupa düzeyinde bağlayıcı çevre standartlarının (özellikle de mevzuat bağlamında) ortaya konması suretiyle, atık bertarafının iyileştirilmesi;
 - Tehlikeli maddelerin taşınmasına ilişkin hükümlerin sıkılaştırılması;
 - Kirliliğe maruz kalmış arazilerin ıslah edilmesi.
- AB üye devletleri tarafından kabul edilen 2006/12/EC sayılı Atık Çerçeve Yönergesi beş adımdan oluşan atık hiyerarşisini (atığın önlenmesini takiben sırasıyla yeniden kullanım, geri dönüşüm ve geri kazanım, yakma ve son olarak düzenli depolama gibi yöntemler ile atığın bertaraf edilmesi) tesis etmiştir. Ancak, çok parçalanmış ve etkisiz olduğu gerekçesiyle eleştirilen ilgili politika çerçevesi, 2008 yılında gözden geçirilmiş ve AB düzeyinde daha kapsamlı bir atık politikası inşa edilmesi amacı ile 2008/98/EC sayılı Avrupa Parlamentosu ve Konsey Yönergesi kapsamında yeniden düzenlenmiştir. Çerçeve Yönerge, atık üretimi ve yönetiminden kaynaklanan olumsuz etkilerin önlenmesi ve azaltılması ve kaynak kullanımda verimliliğin artırılıp, etkilerin azaltılması yoluyla çevre ve insan sağlığının korunmasına yönelik spesifik tedbirler ortaya koymaktadır. Geri dönüşüm konusunda yeni hedefler tanımlayan Yönerge uyarınca Üye Devletler, evsel ve benzeri atıkların %50'sinin ve inşaat ve yıkım işleri atıklarının %70'inin 2020 yılına kadar geri dönüşümünü temin etmekle yükümlüdür.
- Atığın önlenmesinin veya atık geri dönüşüm veya kazanımın mümkün olmadığı hallerde, atığın yakılması veya son çare olarak düzenli olarak depolanması gerekmektedir. Atık yakma ve düzenli depolama ile ilgili AB yasası, atığın söz

konusu yöntemlerle çevreye en zarar gelecek şekilde yöntemini öngörmektedir. Bu anlamda, AB hukuku belirli atık türlerini yasaklamakta (kullanılmış lastikler vb.), biyobozunur atıkların kademeli olarak azaltılması ve azot oksitler (NO_x), kükürt dioksit (SO_2) ve hidrojen klorür (HCl) gibi bazı emisyon limitlerinin belirlenmesi gibi tedbirleri içermektedir.

- Maden kaynaklarının çıkarılması ve işlenmesinden kaynaklanan atıklar; cevherden, minerallerin ayrıştırılmasından sonra kalan atıkların yanı sıra humus, örtü ve atık kaya gibi materyallerden oluşmaktadır. Madencilik faaliyetlerinden kaynaklanan atık akışları, çevreye karşı fiziksel tehdit oluşturan atıl atıklar ile demir dışı metal madencilik endüstrisi tarafından üretilen ağır metaller gibi tehlikeli atıkları içermektedir. Söz konusu atık akışları, asit ve alkalın drenajı ve atıkların depolanması için inşa edilen barajların çökmesi gibi çeşitli riskler oluşturmaktadır. Aynı zamanda, atık bertaraf tesislerinin kurulması, arazi verimliliğin kaybı, toz ve erozyon oluşumu gibi çevre üzerinde çeşitli olumsuz etkiler yaratmaktadır. Bu bağlamda, AB'nin madencilik atıklarına ilişkin politikası, bertaraf tesislerinde uzun vadeli istikrar sağlanmasını ve madencilik faaliyetlerinin, su ve toprak üzerinde, asit veya alkali drenajı ve ağır metallerin sızması sonucu oluşan olumsuz etkilerini hafifletmeyi amaçlamaktadır.
- Doğal madenleri çıkarma ve işleme endüstrilerinden atıkların yönetimine ilişkin ve 2004/35/EC sayılı Yönergeyi tadil eden 15 Mart 2006 tarihli ve 2006/21/EC sayılı Avrupa Parlamentosu ve Konsey Yönergesi – Avrupa Parlamentosu, Konsey ve Komisyon Bildirimi; yeraltından maden çıkarma faaliyetinde bulunan sanayilerden (madencilik) kaynaklanan atıkların, çevre ve insan sağlığına yönelik risklerin göz önünde bulundurularak yönetimini iyileştirmek amacıyla, birtakım asgari yükümlülükler ortaya koymaktadır. Bu yönerge, özellikle atık geri kazanımını teşvik etmek suretiyle, doğal kaynakların korunmasına katkıda bulunmayı hedeflemektedir.
- Yeraltından maden çıkarma faaliyetlerinden kaynaklanan atıkların içindeki materyaller, maden araştırma, madeni çıkarma ve işleme tabi tutma esnasında imha edilmektedir. Yıllık 400 milyon tondan fazla hacim ile (yılda üretilen toplam atığın %30'una yakın olduğu tahmin edilmektedir), Avrupa Birliği düzeyinde geniş bir atık kolu oluşturmaktadır. Bu doğrultuda, bu yönerge, maden çıkarma

faaliyetlerinden kaynaklanan atıkların, insan sağlığı ve çevreye herhangi bir zarar vermeksizin, gürültü ve kokuya neden olmaksızın, özel önemdeki yerleri ve bölgeleri etkilemeksizin idare edilmesine yönelik olarak, üye devletler tarafından uygun önlemler alınmasını gerektirmektedir. Bu doğrultuda, işletme sahipleri, maden çıkarma faaliyetlerinden kaynaklanan atıkların asgari düzeye indirilmesi, işleme tabi tutulması, geri kazanımı ve bertaraf edilmesine ilişkin atık yönetim planları oluşturmakla yükümlüdür. Yönerge, maden çıkarma endüstrisine ilişkin tüm sektörlerden gelen atıkları kapsamaktadır. Bununla birlikte, bu yönergede yer alan hükümler, önemli çevre ve sağlık sorunlarına veya büyük kazalara neden olması muhtemel sektörleri esas olarak etkilemektedir.

- Yönerge, genel olarak, aşağıda belirtilen hususlara odaklanmaktadır:
 - Atık yönetimiyle ilgili eylemsel hususlar,
 - Toprak ve su kirliliğinin önlenmesi,
 - Atık yönetim tesislerinin istikrarının sağlanması.
- 596/2009/AT sayılı Yönetmelik, 2006/21/AT sayılı Yönerge'nin 12. Maddesini tadil etmekte ve mevcut Yönergenin ikincil derecede önemli olan unsurlarını tadil edecek hükümleri ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, Avrupa Komisyonu, mali garantinin oluşturulması ve denetimler için teknik kılavuzlar gibi verilerin düzenli olarak aktarılması ve uyumlaştırılması için gerekli hükümlerin kabul edilmesi konusunda yetkilendirilmektedir.
- Madencilik faaliyetlerinde cevher artığı ve atık kayanın yönetimi için mevcut en iyi tekniklere ilişkin referans belge, Avrupa Komisyonu'nun "Madencilik Faaliyetlerinin Güvenli Bir Şekilde Gerçekleştirilmesine ilişkin Tebliği" (COM (2000) 664) temelinde Avrupa Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrolü Bürosu (IPPC) tarafından geliştirilmiştir.
- Cevher artığı ve kaya atıklarının daha iyi yönetilmesi için Mevcut En İyi Teknikler Referans Belgesi (BAT Referans Belgesi) hazırlanması fikri, Aznalcollar ve Baia Mare'deki atık barajlarının çökmesi sonucu gündeme gelmiştir. Bu kılavuz belge, cevher artığı ve kaya atıklarının daha iyi yönetilmesinde ve söz konusu faaliyetlerden kaynaklanan çevresel tehditlerin önlenmesinde atık bertaraf tesislerinin uygulaması tavsiye edilen iyi uygulama örneklerini sunmaktadır.

- Tehlikeli maddeleri içeren büyük kazaların sebebiyet verdiği zararların kontrolüne ilişkin AB Yönergeleri (SEVESO II) uyarınca tesis işletmecisi, büyük kazaların önlenmesi için gerekli tüm önlemleri almak ve bu kazaların insan ve çevre üzerindeki etkilerini sınırlamakla yükümlüdür. Bu çerçevede, işletmecinin, gerekli tüm önlemlerin alındığı hususunda yetkili kuruma kanıt sunma yükümlülüğü bulunmaktadır. Aynı zamanda, büyük miktarlarda tehlikeli madde bulunduran işletmeler, bu husus hakkında yetkili mercilere bildirimde bulunmak zorundadır. Söz konusu bildirim, işletmeci, ilgili tehlikeli maddeler ve işletmenin yakın çevresine ilişkin ayrıntıları içermektedir.
- İşletmeciler, tesis bünyesinde bir acil önlem planı oluşturmali; ayrıca dış acil önlem planının hazırlanması için yetkili mercilere bilgilendirmede bulunmalıdır. Ayrıca, bazı spesifik bilgilerden oluşacak bir güvenlik raporu hazırlanmalıdır. Bu raporda, tesisteki tehlikeli maddelere ilişkin güncelleştirilmiş bir envanter de yer almalıdır. Büyük bir kazayı takiben işletmecinin yetkili kurumu bilgilendirme yükümlülüğü bulunmaktadır. Kazanın koşulları, kazaya karışan tehlikeli maddeler konusunda bilgilendirmede bulunmalı, kazanın etkilerinin azaltılmasına ilişkin adımlar konusunda bildirim yapılmalı ve bu tür kazaların yinelenmesinin önüne geçmelidir.

2.2.2. Madencilik Faaliyetlerinden Kaynaklanan Artıkların Çevreye Olan Etkileri

Madencilik faaliyetlerinde depolanma şartlarının en iyi şekilde sağlanması gerekmektedir. Madencilik faaliyetinin başlamasından itibaren işletme sırasında ve sonrasında oluşan çevre problemlerini sınıflandıracak olursak;

- Bitkisel toprağın alınması sonucu oluşan arazi bozulması,
- Açık ocak maden işletmeciliği sırasında yapılan ocak alanında meydana gelen arazi bozulmaları, toz, patlatma ve gürültü emisyonları,
- Pasa ve artık sahalarından kaynaklanan, su ve toprakta oluşabilecek kirlenmeler,
- Cevher hazırlama ve zenginleştirme sonucu havada, toprakta ve suda oluşabilecek kirlenmeler,
- Yeraltı maden işletmeciliğine bağlı olarak ocak çökmeleri ve su birikmesi ile ilgili problemler (T.B.M.M., 2010).

Madencilik faaliyetleri süresince ortaya çıkan atıkların sebep olabileceği en önemli çevresel etkiler, yeraltı ya da yerüstü su kirliliği ve stabilizasyon sorunları olarak adlandırılabilir (Çetiner ve diğ., 2006).

2.2.2.1. Su Kirliliği

Madencilik faaliyetlerinde atık yönetiminde sürdürülebilir, yerinde, doğru ve yeterli tedbirler alınmadığı takdirde çevresel olarak olumsuzluklar görülebilir. Yerüstünde atmosferik koşullara maruz kalan artıklar yer altı sularını kirletebilirler. Serbest yüzey ve yer altı sularının hareketli olması, su kirliliği sorununu önemli kılmaktadır. Kirlilik, doğal akıntılarla ve nehirler yoluyla yüzeyden taşınabileceği gibi, sızıntı ve katmanlar arası emilim yolları ile de yeraltı sularına karışarak taşınabilir. Örneğin, yağmur sularının veya madencilik faaliyetleri sonucu oluşan suların sülfürlü mineral içeriğine sahip artıkların içerisine nüfuz etmesi sülfirik aside ve ortamda metal çözünmesine neden olabilir (Çetiner ve diğ., 2006). Bu yolla oluşan sülfid oksidasyonunu takiben AMD oluşabilir. Ayrıca bu durum düşük pH ortamında çözülebilen ağır metallerin çevreye yayılmasına neden olur ve ağır metal mobilizasyonu gerçekleşir.

Ağır metal ifadesi, periyodik cetvelin üçüncü ya da daha yüksek periyodunda bulunan metaller için kullanılmaktadır. Genel olarak zehirli ve çevre kirliliğine neden olan tüm metaller ağır metal olarak adlandırılmaktadır. Ağır metal tanımı fiziksel özellik açısından yoğunluğu 5 g/cm^3 'ten daha yüksek olan metaller için kullanılır. Bu gruba kurşun, kadmiyum, krom, demir, kobalt, bakır, nikel, civa ve çinko olmak üzere 60'tan fazla metal dahildir. Metallerin ekolojik sistem üzerine etkilerinden bahsederken aslında metalin ait olduğu grubun ele alınması ve bu özelliğin vurgulanması biyolojik etki açısından çok daha anlamlıdır. Ağır metaller, asit yağmurlarının ya da asidik suların metal içerikli endüstriyel atıkları ve toprağın bileşimde bulunan ağır metalleri çözmesi ve dolayısı ile çözünen ağır metallerin ırmak, göl ve yeraltı sularına ulaşmasıyla su kaynaklarına geçerler. Sulara taşınan ağır metaller aşırı derecede seyrelirler ve kısmen karbonat, sülfat, sülfür şeklinde katı bileşik oluşturarak su tabanına çöker ve bu bölgede zenginleşirler. Sediment tabakasının adsorpsiyon kapasitesi sınırlı olduğundan dolayı da suların ağır metal konsantrasyonu sürekli olarak yükselir. Ülkemizde de başta tuz ihtiyacımızı karşıladığımız tuz gölü olmak üzere kapalı göllerimizde yeterli çevresel önlem alınmadığı

ve su havzalarında kontrolsüz sanayileşme yapıldığından dolayı ağır metal konsantrasyonu sürekli yükselmektedir (Kahvecioğlu ve diğ., 2001).

2004 yılı Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliğinde kadmiyum metali, demir ve demir dışı metal cevherleri ve endüstrisi, çinko madenciliği, kurşun ve çinkonun rafine edildiği tesisler, kalsiyum, florür, grafit ve benzeri cevherlerin hazırlanmasını içeren maden sanayi atık sularının alıcı ortama deşarj değerleri Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2. 2: Madencilik endüstrisinde atık sularının alıcı ortama deşarj standartları (Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, 2004).

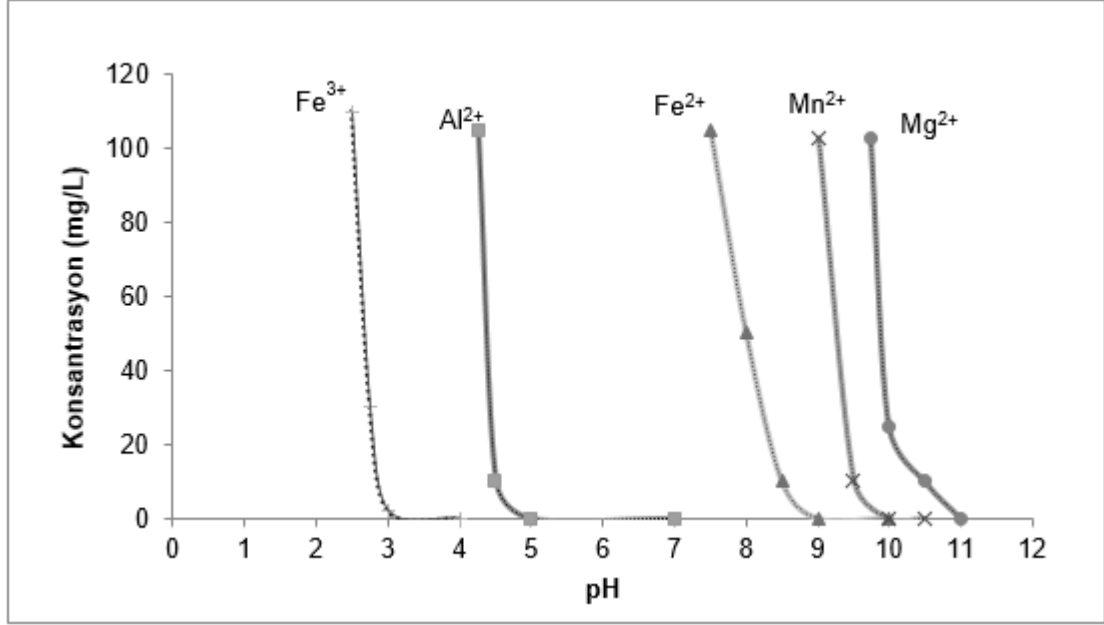
Parametre	Birim	Kompozit numune* 2 saatlik	Kompozit numune* 24 saatlik
Kurşun (Pb)	(mg/L)	0.5	-
Toplam Siyanür (CN ⁻)	(mg/L)	0.1	-
Demir (Fe)	(mg/L)	3	-
Çinko (Zn)	(mg/L)	3	-
Serbest Kükürt (S)	(mg/L)	15	10
Civa (Hg)	(mg/L)	-	0.05
Kadmiyum (Cd)	(mg/L)	-	0,2
Bakır (Cu)	(mg/L)	5	3
Toplam Krom	(mg/L)	2	1
pH	-	6-9	6-9

Not:* Kompozit numune; evsel ve endüstriyel atık sularda belirli zaman aralıklarında atık su debisiyle orantılı olarak alınan karışık numuneyi ifade eder.

Tablo 2.2’de görüldüğü üzere alıcı ortam deşarjı pH değeri 6-9 aralığında istenmektedir. Madenlerde drenaj sularının pH değeri kuvvetli bazikten kuvvetli asidiğe geniş bir aralıkta değişkenlik gösterebilmektedir. Düşük pH hem asiditenin, hem de hidrojen iyon konsantrasyonunun artması demektir. Asidite artışının bir başka sonucu jeokimyasal değişimle ilgilidir. Minerallerin asit ortamında bozulmalarına bağlı olarak alıcı ortama metal salınır. Artan metal konsantrasyonu da suda metal zehirliliğine sebep olur. pH’nin dolaylı etkisi ise metallerin çözünürlükleri ile ilgilidir. Genel olarak metallerin asitli ortamda çözünürlükleri artmaktadır (Şekil 2.3). Başta Fe, Mn ve Al olmak üzere Ca, Mg, Cu, Pb, Zn, Co, As ve Cd gibi metal ve ağır metal iyonları çözeltiye geçmektedir (Karadeniz, 2008).

Sularda hidrojen iyonu konsantrasyon ölçüsü olan pH; bir bileşikteki hidrojen iyonu konsantrasyonunun negatif logaritması olarak tanımlanır ve matematiksel olarak $pH = -\log [H^+]$ şeklinde gösterilir. Suların pH değerleri 0-14 arasında değişir; H^+ iyon artması

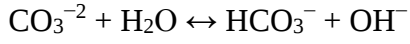
pH'nin düşmesine, H^+ iyonları konsantrasyonunun azalması veya OH^- iyonlarının artması ise pH'nın yükselmesine neden olur. Buna göre oluşturulan pH cetvelinde pH= 0-7 asidik, pH= 7-14 bazik, pH= 7 nötr'dür. pH, suyun korozif veya çökelme eğiliminin önemli bir ölçütüdür. Doğal suların pH değerleri, normal koşullarda 4-9 arasında seyrederek.



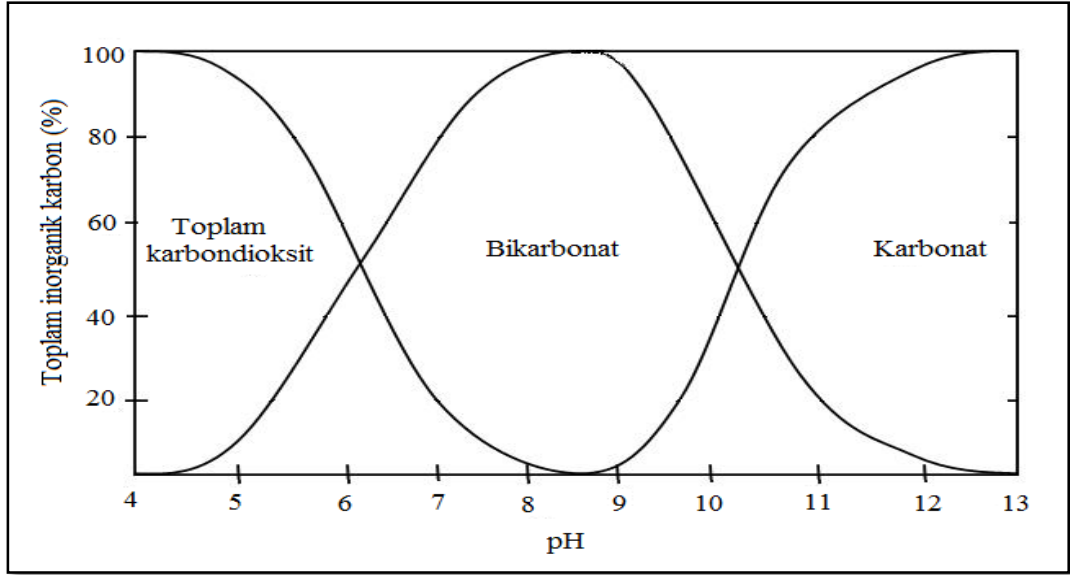
Şekil 2. 3: Bazı metal iyonlarının teorik çözünürlüğü (EPA, 1983).

Sudaki pH, genelde karbonat sistemi ile dengelenmektedir. Buna göre, suda karbondioksit (CO_2), karbonik asit (H_2CO_3), bikarbonat (HCO_3^-) ve karbonat (CO_3^{2-}) iyonları, bir denge halindedir. Bu denge, suyun pH değerini belirler ve etkiler. Dengenin CO_2 'a doğru kayması durumunda pH düşer, CO_3^{2-} 'a doğru kayması halinde ise pH artar. Bir suyun pH'sı suda erimiş olarak bulunan karbonat, bikarbonat ve serbest karbondioksit konsantrasyonuna bağlıdır (Şekil 2.4). Karbondioksitle suyun pH'sı; sıcaklık, tuzluluk ve alkaliniteye bağlı olarak değişir. Alkalinite, korozyon kontrolünde önemli bir parametredir. Alkalinite ölçümleri, atık suların ve çamurların asiditeyi tamponlama kapasitelerinin değerlendirilmesinde kullanılır. Karbondioksit, asidik bir gaz olduğundan, karbondioksitin uzaklaştırılması ile Eşitlik 2.1, 2.2 ve 2.3 bağıntılarına göre suyun pH'sı artar (Topçu, 2013; Dinçer, 2014).



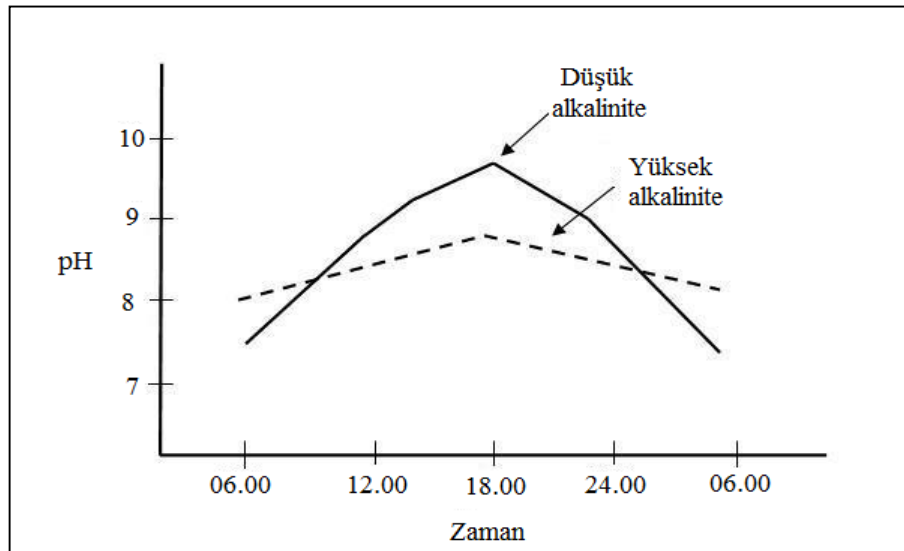


[2.3]



Şekil 2. 4: Toplam karbondioksit, bikarbonat ve karbonat miktarı-pH ilişkisi (Wetzel, 1983; Topçu, 2013).

Doğal sulardaki başlıca bazlar; karbonat ve bikarbonatlardır. Sudaki titre edilebilir yani tepkimeye sokulabilir bazların toplam konsantrasyonu toplam alkalinite olup, litrede bulunan kalsiyum karbonat (CaCO_3) miktarı olarak ifade edilir. Toplam alkalinite, pH-tamponlama kapasitesi veya suların asit nötralizasyon gücü olarak da tanımlanabilir. Yüksek alkaliniteye sahip sular, pH değişimlerine karşı daha stabildir (Şekil 2.5).



Şekil 2. 5: Düşük ve yüksek alkaliniteli sularda pH'nin zamana bağlı değişimi (Topçu, 2013)

Ayrıca sudaki toplam çözünmüş katılar, inorganik tuzları ve az miktarda organik maddeleri içerirler. Buradaki tuzluluk, bir litre sudaki çözünmüş iyonların toplam konsantrsyonudur. Gerek yüzey suları gerekse yeraltı suları, temas halinde oldukları toprak ve kayaç malzemeden mineral çözerler. Çözünmüş ana iyonlar; sodyum (Na^+), potasyum (K^+), kalsiyum (Ca^{+2}), magnezyum (Mg^{+2}), bikarbonat (HCO_3), klor (Cl^-), karbonat (CO_3^{-2}) ve sülfat (SO_4^{-2})'tır. Bu bahsedilen iyonlar, suda elektrik iletimini sağlarlar. Elektrik iletkenliği ise suyun çözünmüş mineral içeriğinin başka bir deyişle tuzluluk derecesinin bir göstergesidir. Birimi $\mu\text{s/cm}$ olup, saf suyun kondüktivitesi 1 $\mu\text{s/cm}$, doğal suların kondüktivitesi 20-1500 $\mu\text{s/cm}$ arasında değişir. Suyun tuzluluğunun artmasına koşut olarak elektrik akımını iletme kapasitesi de artar (Topçu, 2013). Yüksek değerde bu özellik, metal yüzeyler için koroziftir. Dolayısıyla aşırı Toplam Çözünmüş Katı Madde Miktarı (TDS) artık nakil hattı boruları içinde tabakalaşmaya da sebep olabilir.

TDS, suların mineral ve iyon zenginliğini gösteren önemli parametrelerden birisi olup, sularda yüksek oranda TDS bulunması ($>2000 \text{ mg/L}$) hemen her kullanım amacı için suda iyon giderme işlemini gerektiren bir durumdur. Bu tip bir su, endüstriyel veya sosyal su temininde kısıtlı amaçlar haricinde kullanılamamaktadır. İletkenlik ile arasında Eşitlik 2.4, 2.5, 2.6 ve 2.7'de belirtildiği gibi bir orantı vardır (Proses TİM, 2015);

$$\text{TDS mg/L (gr/t)} = 0,50 \times \text{iletkenlik } \mu\text{s/cm} \quad [2.4]$$

Saf sularda;

$$\text{TDS mg/L (gr/t)} = 0,68 \times \text{iletkenlik } \mu\text{s/cm} \quad [2.5]$$

İletkenliği 1000 s/cm'den düşük sularda;

$$\text{TDS mg/L (gr/t)} = 0,75 \times \text{iletkenlik } \mu\text{s/cm} \quad [2.6]$$

İletkenliği 1000 - 4000 s/cm olan sularda;

$$\text{TDS mg/L (gr/t)} = 0,82 \times \text{iletkenlik } \mu\text{s/cm} \quad [2.7]$$

Su kirliliğinde bir diğer önemli konu ise Asit Maden Drenajı (AMD) oluşumu veya oluşma riskidir. Bünyesinde sülfürlü demir minerali (pirit ve pirotin) bulunduran metalik maden sahalarında, maden artıklarının su, oksijen ve mikroorganizmalar yardımı ile sülfürlü mineralleri çözündürüp asiditesini sülfürlük metal iyonlarına bağlı olarak yükseltme olasılığı bulunmaktadır. AMD'ye sebep olan bazı sülfid mineralleri ve buna karşılık asiditeyi nötürleştirme potansiyeli olan bazı mineraller Tablo 2.3'te verilmiştir.

Tablo 2. 3: AMD riski ve Nötürleştirme Potansiyeli olan mineraller (Karadeniz, 2008).

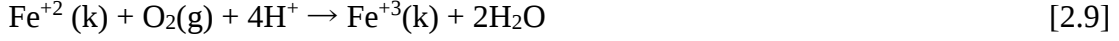
Asit maden drenajına sebep olan bazı sülfid mineralleri				Asiditeyi nötürleştirme potansiyeli olan bazı mineraller			
Mineral	Formülü	Mineral	Formülü	Mineral	Formülü	Mineral	Formülü
Pirit	FeS ₂	Cinnabar	HgS	Kalsit	CaCO ₃	Kaolenit	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
Galen	PbS	Realgar	AsS	Dolomit	CaMg(CO ₃) ₂	Albit	NaAlSi ₃ O ₈
Pirotin	FeS	Orpiment	As ₂ S ₃	Ankerit	CaFeMgCO ₃	Klorit	Mg ₅ Al ₂ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₈
Sfalerit	ZnS	Cobaltite	(Co,Fe)AsS	K-Feldspat	KAlSi ₃ O ₈	Anortit	CaAl ₂ Si ₂ O ₈
Kalkopirit	CuFeS ₂	Chalcocite	Cu ₂ S	Biyotit	K(Mg, Fe) ₃ (Al, Fe)Si ₃ O ₁₀ (OH, F) ₂	Olivin	(Mg, Fe) ₂ SiO ₄
Milerit	NiS	Covellite	CuS	Muskovit	(KAl ₂ (Al ₂ Si ₃ O ₁₀)(OH) ₂	Brusit	Mg(OH) ₂

Yüksek asiditeyle beraber pH düşebilir, çözünmüş metal iyon konsantrasyonu ve suyun taşıdığı askıda katı madde (AKM) miktarı artabilir. Bu durumda gerekli tedbirler alınmadığı takdirde, suların fiziksel ve fizikokimyasal özelliklerini olumsuz etkileyebilmesinin ötesinde bu sularda yaşayan ya da temas eden canlılar zarar görebilir. Asit oluşumunu engelleyebilmek için, oksidasyon reaksiyonunu meydana getiren esas elementler (sülfid, su veya oksijen) üzerine yoğunlaşmak gerekir (Benzaazoua ve diğ., 2000; Dagenais ve diğ., 2005; Karadeniz, 2008).

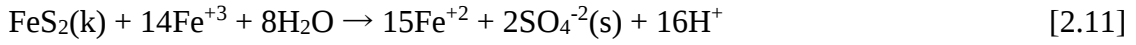
AMD oluşumunda rol oynayan nedenler incelendiğinde, artık malzemesinin bünyesinde bulunan demir sülfür mineralleri öne çıkmaktadır. Bu minerallerin tepkimeye ilgisi diğer minerallerden daha düşük olmasına rağmen ortamda genellikle pirit çok miktarda bulunduğundan nemli ortam şartları altında hava ile temas ettiğinde oksitlenir. Bu tepkime AMD oluşumunun başlangıç adımıdır (Eşitlik 2.8) (Deschamps ve diğ., 2008; Karadeniz, 2008 ve 2011).



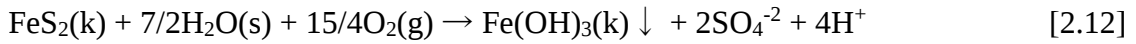
Ardından, Fe^{+2} yükseltgenir (Eşitlik 2.9), tepkime ürünü Fe^{+3} hidrolize uğrayarak $\text{Fe}(\text{OH})_3$ halinde çökelir (Eşitlik 2.10).



Güçlü bir oksitleyici olan Fe^{3+} bir miktar daha piritin oksitlenmesine neden olur ve bir döngü gelişir (Eşitlik 2.11).



Piritin oksitlenmesini kapsayan döngünün ifadesi Eşitlik 2.12'deki toplam tepkimedir.



İleriki aşamalarda mikroorganizmalar, diğer metaller ve ikincil minerallerin katılımıyla farklı mekanizmalar sürece son derece karmaşık bir yapı kazandırır. Öte yandan, değişik aşamalarda hızlandıran, yavaşlatan, engelleyen veya kontrol eden çok sayıda etmen tepkimelerin gidişatını belirler (Karadeniz, 2008 ve 2011).

Genelde demir sülfür, nem ve oksijen ile beraber oksitlenme ürünlerinin meydana gelmesinde doğrudan etkin olanlar birincil, asidi nötürleştiren veya ortaya çıkan ürünlerle tepkimeye girenler ikincil ve nihayetinde taşıma ya da tüketme etkisi gösterenler üçüncül etmenler olmak üzere üç ayrı grupta toplanmaktadır. Buna göre, demir sülfür mineralinin kendi niteliği (mineralojik özellikleri, tipi, oranı, tane boyutu), Fe^{+2} ile Fe^{+3} iyonları arasındaki denge durumu, mikroorganizma varlığı, ortamın pH değeri ve sıcaklığı birincil etmenlerdir. Çözündüklerinde pH değerini yükselten karbonatlar, silikatlar ve bazı oksitli mineraller ikinci gruba dâhildir. Su rejimini belirleyen nem, sıcaklık, yağış ve rüzgâr gibi yerel iklim ve topoğrafya da üçüncül kabul edilen etmenlerdir (EPA, 1994; Environment Australia, 1997; Karadeniz, 2008 ve 2011).

Savunulan bir başka görüş ise, etmenlerin kaynak ve çevresel olmak üzere iki grup olduğu yönündedir. Sülfürlerin ve asit nötürleştirme özelliği taşıyan minerallerin tipi, miktarı ve malzeme içerisinde dağılımıyla beraber kayanın tipi ve dokusu, tane boyutu, tane boyut

dağılımı, boşluk hacimleri, boşlukların aralarındaki ilişki (gözeneklilik ve geçirgenlik), sıkışma ve ayrışma dereceleri dâhilinde sıralananlar kaynak faktörler olarak değerlendirilmektedir. İklim, yağış, havanın nemi, hidrojeolojik koşullar, atık hacmi ve depolama yöntemi ise çevresel ve diğer faktörler olarak ikinci gruba konmaktadır (Paktunç, 1998; Karadeniz, 2008 ve 2011).

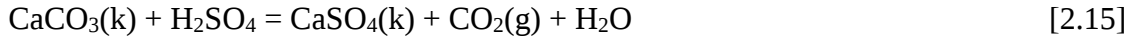
Özellikle artık içerisindeki kükürt oranı tespit edilerek artık malzemesinin asit potansiyeli (AP) değeri bulunur ve AMD riski açısından değerlendirilir. Bu tez çalışmasında asit ve nötrale potansiyelleri modifiye asit baz hesaplama (Acid Base Accounting-ABA) yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. ABA metodunda ilk adım AP değerinin hesaplanmasıdır. Bu yöntem, Coastech Research Inc. araştırmacıları tarafından (1989) Standard ABA testinde bazı değişiklikler yapıldıktan sonra Lawrence (1990) tarafından Modifiye ABA yöntemi olarak yeniden ifade edilmiştir. Burada herhangi bir deneysel işlem söz konusu değildir. Numunedeki kükürt miktarı analizle tespit edilir. AP hesaplanırken; katı fazdaki kükürdün yalnızca disülfid (S_2^{-2}) halinde bulunduğu, kükürdün kaynağının pirit olduğu ve mevcut kükürdün tamamının tepkimeye gireceği, bir başka deyişle, oksitlenerek sülfata dönüşeceği kabul edilmektedir. Ayrıca, tepkime neticesinde her 1 mol kükürdün 4 mol proton iyonu (2 mol asit) meydana getireceği varsayılmaktadır. Bunların dışındaki hipotezler, oksitleyicilerin sadece oksijen ve sudan ibaret olduğu, piritten gelen demirin Fe^{+3} 'e yükseltgendiği, tüm demirin de $Fe(OH)_3$ olarak çökmeye uğradığıdır (Verburg, 2001 ve 2002; Karadeniz, 2008 ve 2011).

Bunun yanı sıra artık sahasının bitkilendirme çalışmasında, madencilik öncesinde, yüzeyden cevher tabakasının hemen altındaki katmana değin, bütün stratigrafik kesimlerde nütürleştirme kapasitesinin tayin edilmesi önerilmiştir. Bu konuyla ilgili çalışmalarda, örtü tabakasındaki asit nütürleştirici malzeme sayısallaştırılmış ve nötralizasyon potansiyeli (NP) terimi geliştirilmiştir. AP ve NP için bulunan değerlerin birimleri aynıdır. Aralarındaki aritmetik farka veya orana bakılarak numunenin asit üreten mi, yoksa tüketen mi olduğu belirlenir (Smith ve diğ., 1974; Karadeniz, 2011).

Asit nötralizasyon reaksiyonları pH 6.4'ün üstünde Eşitlik 2.13'deki, pH 6.4'ün altında ise Eşitlik 2.14 ve 2.15'teki tepkimeler ile gerçekleşmektedir. Buradan anlaşılabacağı üzere AP ve NP değerlerinin birimi $CaCO_3$ olarak gösterilmektedir (David, 2003).



ya da



Buna karşın kükürdün 1 molü 32 gr, CaCO_3 'ın 1 molü 100 gr'dır. Buna göre, kükürdün CaCO_3 'a ağırlıkça oranı 1: 3,125'e eşittir. Numunenin ağırlıkça içerdiği kükürt yüzdesi 3,125 değeri ile çarpıldığında, üretilen asidi nötürleştirmek için gereken CaCO_3 'ın yüzde ağırlığı bulunur. Katsayı 10'la çarpılmak suretiyle ($3,125 \times 10 = 31,25$), yüzde değeri bindeye dönüştürülür. Dolayısıyla, numunenin analizi sonucunda bulunan S değerinin 31,25 katsayısıyla çarpılması, sahadaki asit üretecek malzemenin her tonunu nötürleştirmek için gereken CaCO_3 eşdeğeri t biriminde AP değerini verir. Eğer, mineralojik bileşimdeki tüm S'in değil, sülfütlere bağlı S'in asit üreteceği kabul edilirse, AP'nin hesaplanmasında Eşitlik 2.16 eşitliği kullanılır (Karadeniz, 2008 ve 2011).

$$\text{AP} = \% \Sigma \text{S} \times 31,25 \quad [2.16]$$

Net nötralizasyon potansiyeli (NNP) belirlenirken, ikinci adım NP değerinin saptanmasıdır. Burada da, asit tüketen mineraller doğada tümüyle tepkimeye girer ve asit üretenlerle tüketenlerin çözünme hızları aynıdır gibi bazı varsayımlar söz konusudur. Sonuçların yorumlanması için Eşitlik 2.17 ile NNP hesaplanır.

$$\text{NNP} = \text{NP} - \text{AP} \text{ veya } \text{NNP} = \text{NP}/\text{AP} \quad [2.17]$$

Buradaki numunenin NP'si için, mineralojik bileşimin uygun olması koşuluyla ve sadece karbonatlardan kaynaklanacağı kabul edilirse, toplam karbon analiziyle hesap yapılabilir (Eşitlik 2.18). Tüm karbonun karbonat halinde olduğu ve tamamının çözüneceği varsayıldığında, molekü ağırlıkları kullanılarak ve binde değerine çevrilerek, kgCaCO_3/t biriminden bir NP değeri bulunabilir (Karadeniz, 2011).

$$\text{NP (C)} = \% \text{C} / 83,33 \quad [2.18]$$

Benzer hesaplama, Eşitlik 2.19 ile karbon yerine CO_2 dikkate alınarak da yapılabilir (Karadeniz, 2011).

$$NP (CO_2) = \%CO_2 / 22,73 \quad [2.19]$$

Ayrıca, mineralojik ve kimyasal analiz sonuçlarına göre numunedeki NP'nin kaynağının kalsiyum içeren mineraller olduğu düşünülüyorsa, NP; kalsiyum yüzdesi baz alınarak Eşitlik 2.20 ile hesaplanabilir (Karadeniz, 2011).

$$NP (Ca) = \%Ca / 25,00 \quad [2.20]$$

NP'nin sadece kalsiyum içeren minerallerin değil, onlarla birlikte magnezyum içerenlerin de çözünmesiyle oluştuğu kabul edilirse, her iki mineralin yüzdeleri Eşitlik 2.21 kullanılmak suretiyle hesaplamada kullanılabilir.

$$NP (Ca + Mg) = (\%Ca / 25,00) + (\%Mg / 41,15) \quad [2.21]$$

Verilen Eşitliklerdeki katsayılar, molekül ağırlıklarının farklı kaynaklara göre değişken olması nedeniyle küçük farklılıklar gösterebilir. Burada C:12, O:16, Ca:40 ve Mg:24,3 olarak alınmıştır (Karadeniz, 2011).

Elde edilecek AP ve NP değerlerinin farksal ve oransal sonuçları Tablo 2.4'e göre değerlendirilmiştir (Karadeniz, 2008). Piritten geldiği varsayılan sülfür %9'dan büyük ise test yapmaya bile gerek yoktur, ortam asit üretir (David, 2003).

Tablo 2. 4: NNP sonuçlarının değerlendirilmesi (David, 2003; Karadeniz, 2008).

Modifiye ABA yöntemine göre NNP değeri	Değerlendirme
NP-AP = < -20 kg/t CaCO ₃	Asit üretir
NP-AP = > +20 kg/t CaCO ₃	Asit üretmez
-20 < NP-AP < 20 kg/t CaCO ₃	Belirsiz, Kinetik testler gerekebilir
NP/AP = < 1	Asit üretir
NP/AP = > 3	Bazik üretir
< 1 NP/AP < 3 (Brodie ve diğ., 1991)	Belirsiz
< 1 NP/AP < 4 (Morin ve Hutt, 1994)	Belirsiz

2.2.2.2. Stabilizasyon Problemi

Günümüzde gelişen teknolojiyle beraber daha düşük tenörlü cevherlerin işletilmesi nedeniyle daha fazla miktarda ve çok ince tane boyutunda artık malzeme oluşmaktadır. Bu maden artıkları genellikle büyük çoğunluğu sudan oluşan (pülpte katı oranı %20-35)

çamur şeklinde artık barajlarına deşarj edilir. İnce taneli maden artıkları, fiziksel özellikleri açısından suya doygun olduğunda ve basınca maruz kaldığında çevresini fiziksel ve kimyasal boyutlarda yıkıcı bir etkiye maruz bırakabilecek özellikte çamur akışlarına neden olabilirler.

Artık barajlarındaki kazalar, madencilik faaliyetlerinde meydana gelen çevresel olayların önemli bir kısmını oluşturduğu için depolanan artıkların fiziksel stabilitesi oldukça önemlidir. Ülkemizde de 2011 yılı içerisinde Kütahya'daki Eti Gümüş AŞ'nin gümüş üretme tesisinin artık barajındaki 4 seddenin bağlantısını sağlayan bir duvarın çökmesiyle 25 milyon m³ siyanürlü çamur ile suyun doğaya karışma riski ortaya çıkmıştır. Benzer bir şekilde son 10 yılda dünyada meydana gelen büyük sayılabilecek artık barajı kazalarından bazıları Tablo 2.5'te verilmiştir.

Tablo 2. 5: Son 10 yılda gerçekleşen büyük artık barajı kazaları (USCOLD, 1994; UNEP, 1996; ICOLD ve UNEP, 2001; WISE Uranium Project, 2015).

Tarih	Yer	Cevher Tipi	Kazanın Türü	Sonuçları
4/8/2014	Mount Polley madeni, British Columbia, Kanada	Bakır Altın	Temel yetersizliği nedeniyle artık barajının yıkılması	7.3 milyon m ³ artık, 10.6 milyon su ve 6.5 milyon m ³ boşluk suyu Hazeltine Deresi aracılığıyla Quesnel Gölüne ve komşu Polley Gölüne karışmıştır
2/2/2014	Dan River Buhar İstasyonu, Eden, Kuzey Carolina, ABD	Kömür	27 dönümlük kül atık havuzu altında eski bir drenaj borusunun çökmesi	Toksik kömür külünün yaklaşık 74.400 tonu ve kirlenmiş suyun 100.000 m ³ Dan Nehri'ne akmıştır
15-19/11/2013	Zengezur Bakır Molibden Birliği, Kajaran, Syunik, Ermenistan	Bakır Molibden	Artık boru hattının zarar görmesi	Artıklar, birkaç gün Norashenik Nehri'ne akmıştır
17/12/2012	Eski Gullbridge maden sahası, Newfoundland, Kanada	Bakır	Genişliği 50 m olan baraj seddesinin yıkılması	Güney Brook kasabasının su tüketmemesi önerilmiştir
4/11/2012	Sotkamo, Kainuu ili, Finlandiya	Nikel	Bir huni şeklinde delik ile jips göleti sızıntısı	Kirlenmiş yüz binlerce m ³ atık suyu yakındaki Snow Nehri akmıştır. Nehirdeki nikel, çinko ve uranyum konsantrasyonları on kat artarak organizmalar için zararlı olan değerler aşılmıştır
21/07/2011	Mianyang Şehri, Sichuan, Çin	Manganez	Sağanak yağıştan kaynaklanan heyelanın artık barajına zarar vermesi	Artıklar yollara ve evlere zarar verdiğinden, 272 kişi evlerini terk etmek zorunda kalmış, 200.000 kişinin içme suyunu sağlayan Fujiang Nehri kirlenmiştir

Tablo 2.5 (devam):

4/10/2010	Kolontár, Macaristan	Boksit	Artık barajının yıkılması	700.000 m ³ aşındırıcı kırmızı çamur etrafa dağılmıştır. 10 kişi ölmüş, 120 kişi yaralanmış, yaklaşık 8 km ² sular altında kalmıştır
25/06/2010	Huancavelica, Peru	Altın	Artık barajının yıkılması	21.420 m ³ artık 110 km mesafe ilerleyerek çevreyi kirletmiştir
29/08/2009	Karamken, Magadan bölgesi, Rusya	Altın	Sağanak yağış sonrası artık barajının yıkılması	1 milyon m ³ fazla su, 150.000 m ³ artık ve 55.000 m ³ baraj malzemesi etrafa yayılmıştır. 11 ev çamur akıntısına kapılmış; en az bir kişi ölmüştür
14/05/2009	Xiangxi Özerk bölge, Hunan Eyaleti, Çin	Manganez	Artık barajının yıkılması	Atık barajının yıkılması ile heyelan oluşmuş, evler yıkılmış, üç kişi ölmüş ve dört kişi yaralanmıştır
22/12/2008	Harriman, Tennessee, ABD	Kömür	Seddenin yıkılması	4.1 milyon m ³ küllü çamur yayılmış, kül 1.6 km ² 'lik bir alanı 1.83 metre kadar derinlikle kapatmıştır. Kül ve çamur, enerji hatlarına ve bir gaz hattını zarar vermiştir
8/09/2008	Taoshi, Linfen Şehri, Shanxi eyaleti, Çin	Demir	Yağış sırasında yasadışı bir demir madeninde atık- ürün rezervuarının çökmesi	En az 254 kişi ölmüş ve 35 kişi yaralanmıştır
6/11/2006	Nchanga, Chingola, Zambiya	Bakır	Artık çamuru boru hattının yıkılması	Kafue nehrine yüksek asitli artıklar karışmış ve içme suyunu kirletmiştir
30/04/2006	Shangluo, Shaanxi Eyaleti, Çin	Altın	Barajın altıncı kademelinin yükseltilmesi sırasında atık barajının yıkılması	Toksik potasyum siyanür Huashui nehrine karışarak yaklaşık 5 km kirlenmesine neden olmuştur
14/04/2005	Mississippi, ABD	Fosfat	Mississippi Çevresel Kalite Bölümü ile Görevlilerine göre, normalden daha hızlı bir oranda gölet kapasitesini artırmak için yapılan çalışmaları nedeniyle	Yaklaşık 64.350 m ³ asidik sıvı bitişindeki bataklığa dökülmüş ve bitki örtüsünü öldürmüştür

Yukarı yönde yükseltmeli artık baraj tipleri kısa vadeli düşük maliyetleri nedeniyle geleneksek artık bertarafı metotları arasında en çok tercih edilenidir. Bu metotla artık malzemesine doğru genişleyerek yükseltmenin, yılda 15 m ya da daha yüksek olması durumunda barajın yenilme riski artmaktadır. Hızlı yükseltme, ek çatlak basınçları oluşturduğundan barajın duraylılığını olumsuz yönde etkilemektedir. Artık barajlarında

suyun toplandığı yer ile baraj gövdesi arasındaki daha önce çökmüş malzemenin oluşturduğu genişlik azalırsa barajın yenilme riski artmaktadır (Yıldız, 2014).

Su içeriği fazla olan ince taneli artıkların depolandığı barajlarda zaman zaman sismik yer hareketleri etkili olmakta ve “sıvılaşma” olarak isimlendirilen baraj yenilmeleri meydana gelmektedir. Deprem, depolama alanı yakınlarındaki patlatmalar ya da hareket halindeki ağır iş makinalarının oluşturduğu sismik dalgalar sıvılaşmayı tetiklemektedir. Depolama alanındaki yer altı su seviyesi, depolanan malzemenin duraylılığı üzerindeki en kritik etkidir. Yer altı su seviyesinin yükselmesi artık malzemesinin ve barajların duraylılığını olumsuz yönde etkilemektedir (Yıldız, 2014).

Depolanan ince taneli malzeme sıkışmaya maruz kaldığında (kendi ağırlığında veya dış etkenlerle) hacmini azaltmaya yani oturmaya (konsolide olmaya) eğilim göstermekte, fakat eğer drenaj mümkün değilse, hacim azalması eğilimi boşluk suyu basıncının artması sonucunu doğurmaktadır. Boşluk suyu basıncındaki bu artış ortalama çevre basıncının da artmasına neden olmaktadır. Aynı zamanda boşluk suyu basıncındaki artış ortalama çevre basıncına eşit olduğunda efektif gerilmeler sıfır olmakta ve malzeme mukavemetini tamamen kaybederek sıvılaşmış bir duruma gelmektedir. Dolayısıyla dinamik yüklerin etkisiyle kayma mukavemetinin kaybolması ve sıvı gibi davranması olayına “sıvılaşma” denilmektedir. Malzemenin mukavemetini kısmen veya tamamen kaybetme sebebi, derinlik boyunca boşluk suyu basıncındaki artışa paralel olarak taneler arasındaki temas olarak tanımlanabilecek mevcut efektif gerilme değerinin azalmasıdır. İnce taneli malzemelerin ya da zeminin sıvılaşmasına etki eden faktörleri, malzemenin yapısından ve dış etkenlerden kaynaklanan faktörler olmak üzere iki grupta toplanabilmektedir. Sıvılaşmayı ve stabiliteyi etkileyen faktörler aşağıdaki gibi sıralanabilir (Yıldırım ve Gökaşan, 2013):

a) Malzemenin yapısı

Yapılan gözlemler ve deneyler neticesinde ince tane yapısına sahip artıkların sıvılaşması; malzemenin sıkılık derecesi, tane özellikleri, kil içeriği ve arazideki drenaj şartları gibi faktörlerden etkilendiği bilinmektedir.

- Sıkılık derecesi: Sıkılık derecesi, bir zeminin kuru birim hacim ağırlığının zeminin laboratuvar sıkıştırma (proktor) deneyiyle bulunan maksimum kuru birim

hacim ağırlığına oranı olup, yüzde olarak belirtilir. Sıkılık derecesi %35'ten küçük olan ince taneli artıklar gevşek zeminler gibi davrandığı kabul edilir ve suya doygun olmaları hâlinde, sıvılaşmaya karşı son derece hassas bir yapıya sahiptirler.

- Tane özellikleri: Tane özellikleri olarak bilinen, tane boyutu, şekli ve çapı dağılımı sıvılaşma açısından önemlidir. Tane boyutu küçülen malzemelerin doğru orantılı olarak su tutma kapasiteleri ile beraber sıvılaşma ve kayma riski artmaktadır. Tane şekli açısından bakıldığında ise yuvarlak tanelere sahip malzemelerin köşeli tanelere sahip malzemelere göre daha fazla sıvılaşma tehlikesi taşıdığı düşünülmektedir. Tane çapı dağılımının da sıvılaşma durumu üzerinde etkili olduğu bilinmektedir. Örneğin, hemen hemen her çap aralığında belirli bir miktar tane bulunduran iyi derecelenmiş bir malzeme yapısında, herhangi iç veya dış sıkışma etkisiyle daha küçük çaplı taneler, büyük çaplı taneler arasındaki boşluklara girmeye çalışacağı için boşluk suyu basıncı artışları daha sınırlı kalacaktır. Buna göre, uniform malzemeler sıvılaşmaya karşı oldukça hassas bir yapıya sahiptir.
- Kil içeriği: Kil içeriğinin artması, kohezyonsuz malzemelerde sıvılaşma tehlikesini azaltan bir etkidir (Tablo 2.6).

Tablo 2. 6: Kil içeriği kriterleri (Andrews ve Martin, 2000).

	Likit Limit < %32	Likit Limit $\geq$ %32
Kil içeriği < %10	Sıvılaşma olur	Daha fazla araştırma gerekli
Kil içeriği $\geq$ %10	Daha fazla araştırma gerekli	Sıvılaşma olmaz

- Drenaj şartları: Arazide sıvılaşma oluşumu drenaj şartlarıyla yakından ilişkilidir. Sıvılaşmaya neden olan etken, suyun drene olamaması nedeniyle boşluk suyu basıncında oluşan artışlardır.
- Sismik geçmiş: Geçmişte sıvılaşmaya maruz kalmış malzemelerin, yeni sismik hareketlerle birlikte tekrar sıvılaşma gösterme ihtimalinin büyük olduğu, hem laboratuvar çalışmalarından hem de arazi gözlemlerinden bilinmektedir. Bu nedenle, herhangi bir mühendislik yapısının inşasından önce arazinin sismik

geçmişine bakarak sıvılaşma tehlikesi açısından bir ön bilgi elde edilmelidir (Ansal ve Ögünç, 1981).

b) Sıvılaşmaya ve duraysızlığa neden olan dış etkenler

Arazide sıvılaşmaya ve stabilite problemlerine neden olan etken çoğunlukla sismik dalgalar ve malzemenin yükler altında hareketidir. Bu nedenle, sıvılaşma ve duraysızlık potansiyeli incelenirken, olası depremler ile ilgili özellikler mutlaka göz önünde tutulmalıdır.

- Sıvılaşmaya ve duraysızlığa sebep olacak yüklemenin büyüklüğü: Sıvılaşma, statik veya dinamik yüklerin (deprem, patlatma, ağır iş makinaları vb.) etkisi altında meydana gelebilir.
- Yükleme süresi: Tekrarlı gerilmelerin malzemeye ya da zemine uygulanma süresi uzun sürdüğü takdirde, sıvılaşma ve kayma tehlikesi önemli ölçüde artmaktadır.

Sıvılaşma nedeniyle arazide karşılaşılan başlıca zemin problemleri arasında, yanal akma, akma göçmesi, zemin yüzeyinde çökme-ayırılma, istinat yapılarında stabilite sorunları, şev kaymaları, taşıma gücü kaybı, kum kaynaması sayılabilir (Yıldırım ve Gökaşan, 2013).

Yukarıda bahsedilen bu kütle hareketleri ya da duraysızlık problemleri; yamaç eğimi, jeolojik ve tektonik yapı ile kayaçların zemin özellikleri, kimyasal bileşimi, ayrışma derecesi başta olmak üzere suya, iklim koşullarına, bitki örtüsüne, titreşimlere, aşırı yüklere ve yer çekimi kuvvetine bağlı olarak oluşabilmektedir. Bu problemler, inşa edilen yapıların yenilmelerine neden olup, insanlara ve çevreye zarar verebilmektedir.

2.3. MADENCİLİKTE KULLANILAN YERÜSTÜ ARTIK BERTARAF YÖNTEMLERİ

Madencilikte yeraltına, yerüstüne ve sualtına depolanarak uygulanan artık bertaraf yöntemlerini; atığın türü, uygulanan yöntemin amacı, yeri, yerleşimi, yapım biçimi ve su deşarjı durumuna göre değişik sınıflara ayırmak mümkündür. Geleneksek atık barajları, eski açık ocak çukurları, kuru artık depolama ve macun malzeme olarak depolama başlıca yerüstü artık bertaraf yöntemleridir (Davies ve Rice, 2001; DPI, 2003; Watson, 2010).

Doğru bir bertaraf yönteminin seçimi için, nihai depolama sahasına göre atmosferik koşulların artık malzemesine olası kısa ve uzun vadeli fiziksel, jeokimyasal ve jeoteknik etkilerinin belirlenmesi gerekir.

Maden proses artıklarının özellikleri, cevher mineralojisine bağlı olarak uygulanan zenginleştirme yöntemindeki fiziksel ve kimyasal işlemler ile birlikte büyük ölçüde değişebilir. Bunun için öncelikli olarak, artığın fiziksel ve kimyasal özelliklerinin yanı sıra mineralojik kompozisyonunun tespit edilmesi gereklidir. Daha sonra ise artık malzemesinin özelliklerine göre çevresel etkileri azaltmak ve buna en uygun tasarımı belirlemek için bazı laboratuvar ve pilot tesis testleri yapılır. Saha deneyleri; tesiste susuzlandırma ya da filtrasyon, tam ölçekte pompa çevrimleri, slamp, geçirgenlik ve dayanım (atık barajı izolasyonu ve duvarı, yerinde depolanan malzeme vb.) testleri olarak sıralanabilir. Laboratuvar deneyleri ise; tane boyut dağılımı analizi, kimyasal element içeriği analizi, tane şekli, kompaksiyon eğrileri ve optimum yoğunluk analizi, likit limit analizi, porozite, geçirimsizlik, slump ve su içeriği, çöktürme ve filtrasyon, boru içi akış testleri, akma gerilmesi, basma dayanımı, kesme gerilmesi, proses suyu kalite analizi, vizkozite, sıvılaşma, konsolidasyon, kuruma çatlaklarının yoğunluk analizi, su tutma eğrileri vb. olarak gerçekleştirilmektedir.

Aynı zamanda depolanacak malzemenin davranışlarının simüle edilmesi için laboratuvar ölçekli tanklarda ya da kabinlerde sahanın iklimsel koşulları canlandırılarak laboratuvar ortamında ölçümler ve analizler yapılmaktadır. Ayrıca serbest artık suyunun baraja boşaltılması ve tesise geri beslenmesinde ya da tesiste kazanılmasından sonra gerekli olan pompalama için uygun hacim, bir maden projesinin su dengesini etkileyen önemli bir tasarım parametresidir.

Bu tasarım, depolanan artıkların fiziksel özelliklerine bağlı olmakla birlikte farklı katı konsantrasyonlarda artık laboratuvar testleri ile tahmin edilebilmektedir (Meggyes ve Debreczeni, 2006). Tüm bu testler Tablo 2.7’de detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 2. 7: Artık bertarafı için uygulanan bazı temel testler (Meggyes ve Debreczeni, 2006).

Laboratuvar Testleri	Saha Testleri
Tane boyut dağılımı ve tane şekli analizi	Susuzlandırma (tikiner, filtrasyon vb.)
Kimyasal element içeriği ve minerolojik analizi	Pompa çevrimleri
Kompaksiyon eğrileri ve optimum yoğunluk analizi	Kıvam testleri (slamp vb.)
Likit limit ve sıvılaşma analizi	Geçirgenlik ve dayanım (atık barajı izolasyonu ve duvarı, yerinde depolanan malzeme vb.)
Porozite	
Geçirimsizlik	
Slamp ve su içeriği	
Çöktürme ve filtrasyon	
Boru içi akış testleri	
Vizkozite ve akma gerilmesi	
Basma ve kayma dayanımı	
Proses suyu kalite analizi	
Konsolidasyon (oturma oranı)	
Kuruma çatlaklarının yoğunluk analizi	
Su tutma ve negatif boşluk suyu basıncı eğrileri vb.	

Bir artık depolama tesisi tasarım gereksinimlerini belirlemek için, artıkların aşağıdaki özellikleri tespit edilmiş olması gerekir (EC, 2004):

- Kimyasal kompozisyon (cevher hazırlama ile kimyasal değişimi dahil olmak üzere) ile okside ve mobilize metal içeriği,
- Fiziksel davranışı ve stabilitesi (statik ve sismik yüklerde),
- Basınç ve konsolidasyon oranları altında davranışı,
- Erozyon stabilitesi (rüzgar ve su),
- Yerleşme, kuruma zamanı ve depolamadan sonra yoğunlaşma ya da sıkılaşma davranışı,
- Sert tabaka ya da zemin davranışı (proses atığı üstünde kabuk oluşumu vb.).

Depolama yöntemine göre artıkların mühendislik özellikleri farklılıklar göstermektedir. Bu nedenle, artığın özelliklerini araştırırken aynı zamanda tasarım parametrelerinin (depolama eğim açısı, tane boyutu dağılımı, geri kazanım suyu vb.) tespit edilmesi çeşitli depolama teknikleri sonucunda oluşabilmektedir (SANS, 1998).

2.3.1. Artık Barajları

Artık barajları hem suyun hem de artıkların bir arada toplandığı yapılardır. Artık barajları, kendi içinde klasik barajlar ve setler olmak üzere iki gruba ayrılırlar.

2.3.1.1. Klasik Baraj Tipi

Bu baraj tipi genellikle vadilerde uygulanmakta ve hem maden artıkları hem de maden artıklarının içerdiği yüksek su hacmi ile birlikte depolanmaktadır (Şekil 2.6). Bu nedenle genellikle yüksek hacimlerdeki suyun depolanabilmesi için planlanan işletmelerde kullanılmaktadır.



Şekil 2. 6: Yüksek miktarda suyun depolandığı Alaska’da Fort Knox altın madeni artık barajı (Northern Alaska Environmental Center, 2004).

Bu tür barajlarda herhangi bir depolama faaliyeti başlamadan önce baraj gerçek boyutlarıyla dizayn edilmiş, gerekli hesapları yapılmış ve tam kapasite boyutlarında inşa edilmiş olmalıdır. Dolayısıyla yüksek artık miktarı bulunan işletmeler için benzer bir şekilde yüksek yatırım maliyeti gerekmektedir. Şekil 2.7’de bu atık barajı dizaynına ve inşaatına bir örnek verilmiştir.



Şekil 2. 7: Aksu Madencilik Dursunbey, Balıkesir Kurşun - Çinko - Bakır İşletmesi artık barajı inşaatı (2012).

2.3.1.2. Set Tipi Barajlar

Set tipi yapılar klasik baraj tipinde olduğu gibi maden artıklarının depolanmasında sıkça karşılaşılan yapılardır. Set tipi ile klasik baraj tipinin aralarında bazı temel farklar bulunmaktadır. Set tipi genellikle düz topografyalarda uygulanmaktadır. Artıkların depolanacağı bölgenin etrafı birkaç metrelik bir dolgu seti ile çevrilir. Kapasitenin dolması ile dolgu seti üzerine tekrar dolgu yapılarak kademeli kapasite artışı sağlanır.

Set tipinin klasik barajlardan farkı sonradan yükseltilebilme özelliği sayesinde ilk etapta tam kapasitede inşa edilmesine gerek olmaması ve bu sayede başlangıç maliyetlerinin düşük olmasıdır. Ancak kapasite artışı için her yükseltme yapıldığında kullanılması gereken dolgu malzemesi hacmi artmakta ve maliyetler katlanarak büyümektedir. Yine de başlangıç maliyetlerinin düşük olması ve gerçek maliyetin madenin teknik ömrüne yayılmasına olanak tanınması avantaj olarak kabul edilmektedir.

Set tipi barajlarda üç farklı yöntem bulunmaktadır. Bunlar yukarı yönlü yükseltme, aşağı yönlü yükseltme ve merkezden yükseltme olarak sıralanmaktadır.

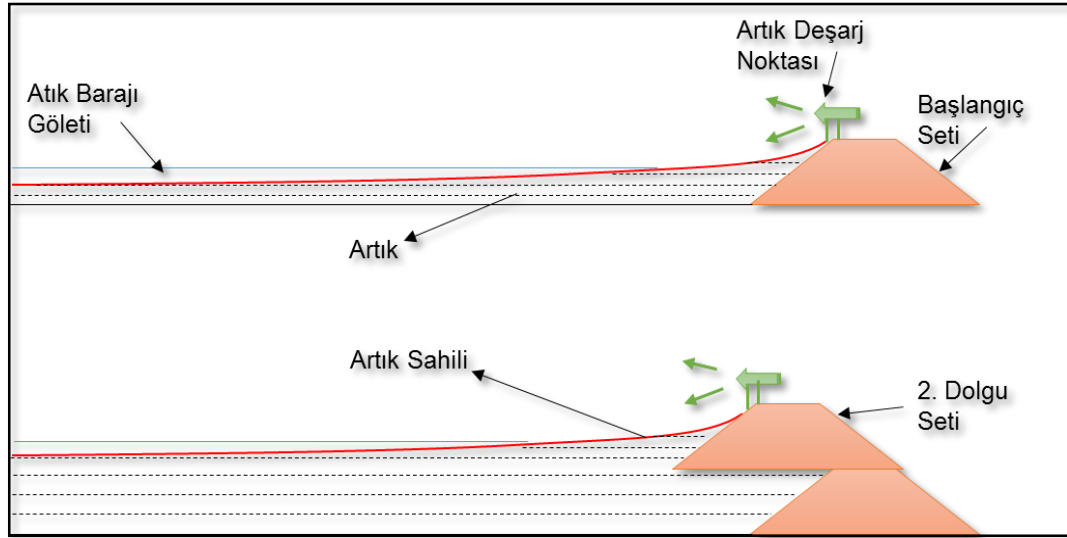
- Yukarı Yönde Yükseltmeli Setler

Yukarı yönde yükseltmeli tasarımlar başlangıç maliyetleri en düşük ve kullanımı en yaygın olan set tasarımlarıdır. Yamuk geometrisine sahip birkaç metrelik bir dolgu ile set oluşturulur. Artıklar boru nakliyatı ile bu dolgu seti üzerinden baraja deşarj edilir. Katı

taneler dibe çökerken sete yakın bir bölgede bir sahil oluşturur. Su ise oluşan artık göletinin iç kısımlarında birikir.

Kapasite artırımına gidileceği zaman mevcut setin üzerine artık çökeline oluşturduğu sahile doğru uzanan aynı geometriye sahip ikinci bir dolgu seti oluşturulur ve tasarım ismini buradan almıştır (Şekil 2.8). Bu tasarımda her yükseltmede aynı miktarda dolgu malzemesi kullanılmakta ancak yeni dolgunun bir kısmı artık çökeline bastığından dayanımında problemlerle karşılaşılabilir. Yine yükseltme tasarımının içe doğru genişlemesinden ötürü kapasite esasında azalarak artmaktadır.

Yaygın ve ekonomik görünen bir tasarım olmasına rağmen aynı zamanda bu tasarım tüm dünyada büyük çevresel felaketlerle sonuçlanan baraj kazalarının en yaygın gerçekleştiği tasarımdır (ICOLD ve UNEP 2001). Davies ve diğ. (2000) yaptıkları çalışmada dünya genelinde 3500'den fazla artık felaketinin %50'sinin bu tasarımdan kaynaklandığını rapor etmişlerdir.



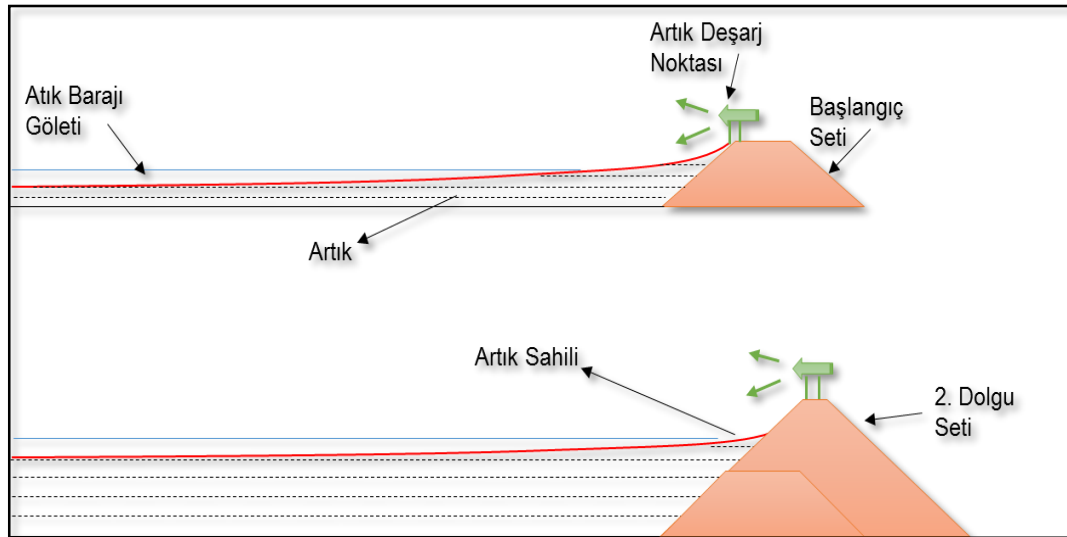
Şekil 2. 8: Yukarı yönde yükseltmeli tasarım (EPA, 1994).

Tasarımda görülen problemlerle ilişkili olarak etkin olan yenilme modu zemin sıvılaşmasına sebep olan statik yüklerdir. Bu durumun başlıca sebepleri artıkların doygunluk derecesine göre değişken olan yoğunluğu, suyun hatalı kontrolü ile artık çökeli sahilinde ve dolguda meydana gelen aşırı doygunluk ve bunların kaçınılmaz bir sonucu olan potansiyel zemin sıvılaşması riskidir.

- Aşağı Yönde Yükseltmeli Setler

Bu tasarım tipi yukarı yönde yükseltmeli setlerdeki riskleri azaltmak için türetilmiştir. Özellikle depremler gibi dinamik yükler altında gerçekleşen yenilmeleri azaltmayı amaçlamaktadır. Ülkemiz de deprem kuşağında bulunan ve sismik olarak aktif bir bölgede yer aldığından bu hususun tasarımlarda dikkatle değerlendirilmesi gerektiği açıktır (ICOLD ve UNEP, 2001).

Bu yükseltme tasarımının yukarı yönde yükseltme set tasarımından farkı yükseltme için eklenen dolgu setinin bir kısmının sağlam zemine diğer kısmının ise önceden inşa edilmiş olan setin üzerine inşa edilmesidir (Şekil 2.9). Bu şekilde gerçekleştirilen yükseltmede her seferinde daha fazla dolgu malzemesi kullanılması gerekmekte bu da kapasite artışına gidildiğinde maliyetleri olumsuz yönde etkilemektedir. Ancak her kapasite artırımıyla birlikte yana doğru genişleyen setin hacmi de yukarı yönde yükseltmeli set tipinin aksine giderek artmakta ve bu da maliyetleri bir nebze olsun telafi etmektedir.



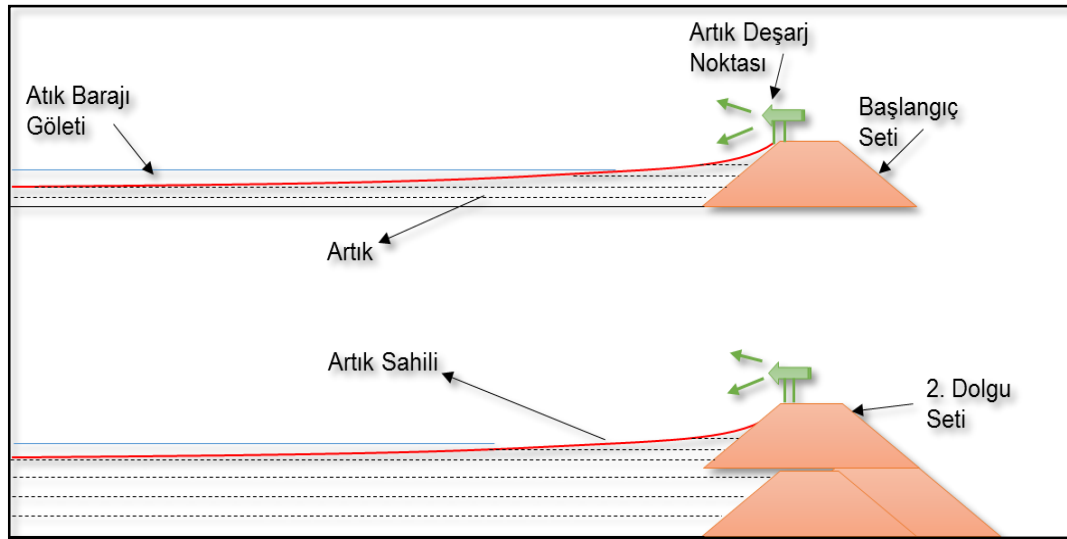
Şekil 2. 9: Aşağı yönde yükseltmeli set tasarımı (EPA, 1994).

Bu tasarımda suyun kontrolü daha kolaydır ve artık çökeli sahiline gereksinim yoktur. Bunun yerine dolgunun içerisine drenaj hattı yerleştirilerek dolgunun aşırı doygunluğa ulaşması önlenmektedir. Bu sayede sıvılaşma riski azaltılabilmektedir. Yine aşırı doygunluğa bağlı sıvılaşma riskini azaltmak için dolgunun iç yüzüne geçirimsiz bir tabaka (jeomembran) serilerek suyun kontrolü de sağlanmaktadır. Tüm bu uygulamalar farklı tip yükler altında dolgu setinin dayanımı artırmaktadır. Bu tasarım klasik barajlara

çok benzer davranış gösterir. Her bir set yapısal olarak artıklardan bağımsız olduğundan neredeyse sınırsız yükseltme sağlanabilir. Ancak en büyük ve önemli dezavantajı maliyetlerinin katlanarak artması ve ekonomik olarak uygulanabilirliği sınırlamasıdır.

- Merkezden Yükseltmeli Setler

Merkezden yükseltmeli setler, yukarı yönde yükseltmeli setler ile aşağı yönde yükseltmeli setlerin bir birleşimidir (Şekil 2.10). Yukarı yönde yükseltmeli setlere göre daha dayanıklıdır ve aşağı yönde yükseltmeli setlere kıyasla daha az dolgu malzemesine gereksinim duyar. Merkezden yükseltmeli tasarım sismik riskler ve inşaa maliyetlerini iyi bir şekilde dengelemektedir (Benckert ve Eurenus 2001; EC, 2004).



Şekil 2. 10: Merkezden yükseltmeli set tasarımı (EPA, 1994).

Bu üç yöntemden en çok yukarı yükseltmeli set tasarımına sahip atık barajları uygulanmaktadır. Bunun sebebi olarak düşük maliyet ve topografyanın kısıtlı oluşu ifade edilebilir. Ancak bu yöntemin çevresel açıdan çok riskli olduğu unutulmamalıdır.

2.3.2. Açık Ocak İçerisinde Depolama

Açık ocak içerisinde depolama nadiren de olsa uygulanan bir yöntemdir. Genel olarak yüksek su içeriğine sahip olan malzemenin ömrünü tamamlamış ve doğal bir havuz görevi görebilecek açık ocak boşluğu içerisinde depolanması olarak izah edilebilir (Şekil 2.11). Yöntemin en büyük avantajı herhangi bir baraj yapımı gerektirmemesidir. Öte yandan

ciddi sakıncaları bulunmaktadır. Bu sakıncaların başında ciddi bir yeraltı suyu kirlenme riski gelmektedir (DME, 1999).

Açık ocak boşluğunun tabanında depolama işlemi başladığında geometrinin en dar kısmının tabanda yer almasından ötürü büyük yükselme hızları görülmektedir. Yine bu anda atmosferik koşullara maruz kalan yüzey alanı minimum olacaktır. Başka bir deyişle artıklar hızla doldurulacak ve kuruma etkisi az olacaktır. Bu da malzemenin dayanımında ve konsolidasyon kalitesinde düşüş ile sonuçlanacaktır (DPI, 2003). Sıvılaştıran artıklar boşluklara sızarak çevresel açıdan ciddi sorunlar doğurabilir. Ocak dolduktan sonra zayıf konsolidasyon sonucu yüzeyde özellikle uzun vade de deformasyonlar görülebilir.



Şekil 2. 11: Avustralya’da açık ocak bir altın madeni içerisinde depolama (Wels ve Zapata, 2010).

2.3.3. Kuru Depolama Yöntemi

Bu yöntemde artıkların su içeriği malzemenin doğal nemine kadar düşürülerek (%85 ve üzeri katı içeriği) depolama yapılır. Böyle bir malzeme artık kuru bir malzemedir ve borular ile nakli mümkün değildir. Bu nedenle malzeme naklinde konveyörler ve kamyonlar gibi makine ve ekipmanlar kullanılır. Yine malzemenin depolama alanına

yerleştirilmesinde ve doymun olmayan sıkıştırılmış bir yığın formu elde edilmesinde makine ve ekipman kullanımı gerekmektedir (Davies ve Rice, 2001). Böyle bir malzeme artık kendi kendini tutabilen ve harici bir destek ünitesine gerek duymayan stabil bir malzemedir (Şekil 2.12).



Şekil 2. 12: Şili’de Lacoipa altın madeni kuru depolama yöntemi (Davies ve diğ., 2010).

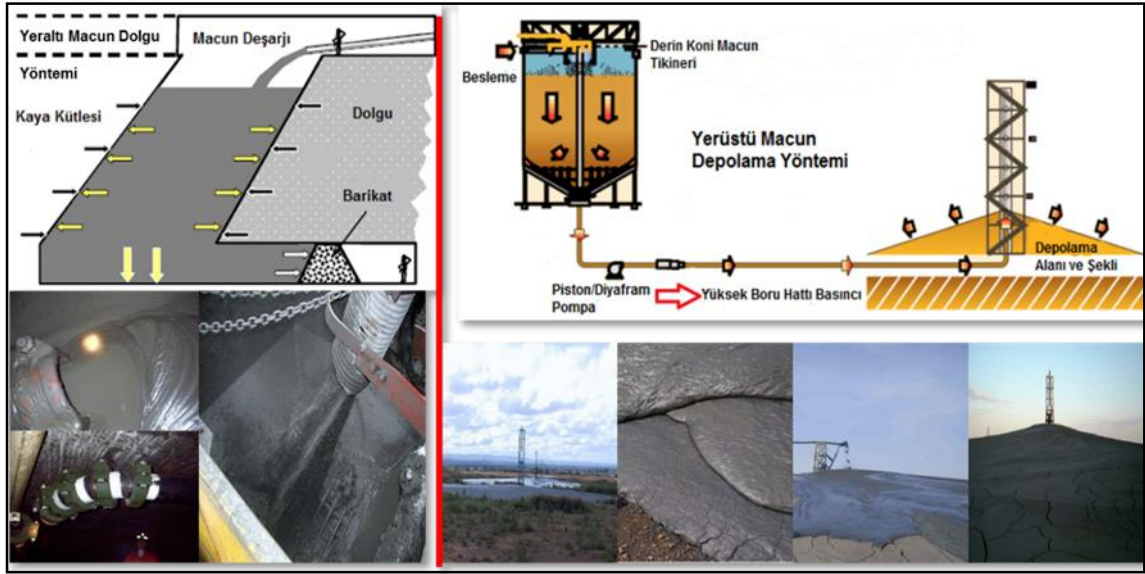
Bu yöntemin başlıca avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Özellikle suyun önem arz ettiği ve tesis performansı üzerine büyük etki yaptığı kurak bölgelerde proses suyunun büyük oranda geri kazanımına olanak tanımaktadır,
- Herhangi bir harici destek ünitesine ihtiyaç olmaması ve malzemenin kendi kendini tutabilir olması sismik olarak aktif bölgelerde önem kazanmaktadır,
- Sızıntı ile yer altı sularının kirlenme riski önlenebilmektedir,
- Filtrasyon ile artık içerisinde proses kimyasalları ayrılmaktadır.

Yöntemin dezavantajlarının başında yüksek proses ve nakliye masrafları gelmektedir. Bir diğer önemli dezavantajı ise oksitlenme ile asit üretme riski olan artıklarda (sülfür içeriği yüksek) doymun olmayan artıkların oksijen difüzyonuna karşı zayıf olması ve asit maden drenajı riski barındırmalarıdır. Bu nedenle sülfürlü artıklarda kullanımı uygun değildir.

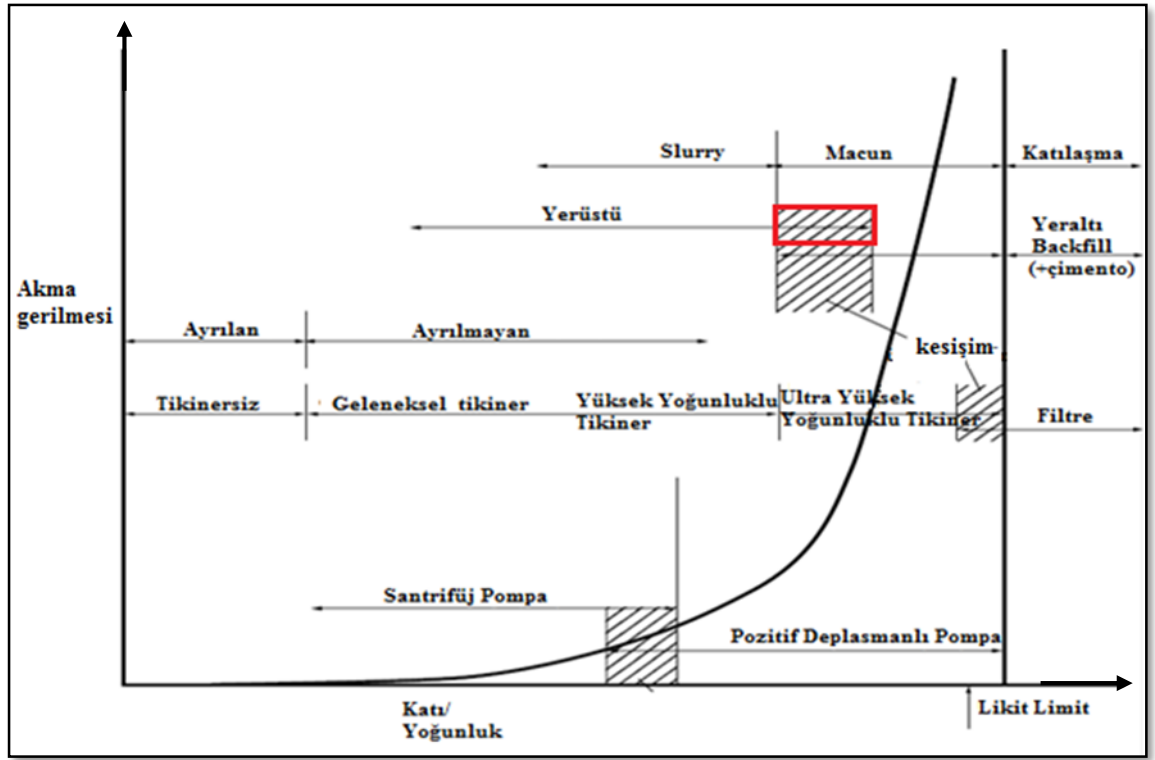
2.3.4. Maden Tesis Atıklarının Macun Formunda Yerüstünde Depolanması

Maden proses atıklarının yerüstünde geleneksel yöntemler kullanılarak (artık barajı vs.) depolanması sırasında oluşan çevresel zararlar, bu yöntemlerin güvenilirliğini sorgulatmış ve alternatif artık bertaraf sistemlerinin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Bununla beraber yeni teknolojilerin madencilik sektörüne hızlı bir şekilde uygulanması, farklı bertaraf yöntemleri ile çevresel sorunların önemli bir ölçüde azaltılabileceğini ya da bertaraf edilebileceğini göstermiştir. Günümüzde genellikle artık barajlarına, denizlere, nehirlere, çaylara vb. yerlere boşaltılan metal maden atıklarının, son yıllarda önemi giderek artan depolama yöntemlerinden biri olan Macun Artık Teknolojisi kullanılarak güvenli bir şekilde yerüstünde depolanabilirliği araştırılmaktadır. Macun Artık Teknolojisinin yeraltı macun dolgu ve yerüstü macun depolama olarak endüstriyel alanda iki uygulaması mevcuttur (Şekil 2.13).



Şekil 2. 13: Macun Artık Teknolojisinin yeraltı (solda) ve yerüstü (sağda) uygulaması (Theriault ve diğ., 2003; Belem ve Benzaazoua, 2008; FLSmidth, 2010).

Macun, cevher hazırlama tesisinden çıkan düşük katı konsantrasyonuna sahip şılamın mekanik olarak susuzlandırılması ile elde edilen kıvamlandırılmış artıklara su katılarak yapılan viskoz bir karışım olarak tarif edilebilir. Bu susuzlandırmada genellikle tikinerler veya tikiner ve filtre kombinasyonları kullanılır. Kıvamlandırılmış artıkların su içeriğine göre pompa türleri ve uygulama alanları değişiklik göstermektedir (Şekil 2.14).



Şekil 2. 14: Kıvamlandırılmış artıkların özellikleri ve temel kavramların tanımları (Jewell ve diğ., 2002).

Şekil 2.14'te görüldüğü üzere, ultra yüksek yoğunluklu tikiner ya da filtrasyon sistemi ile ağırlıkça katı içeriği arttırılmış ve pozitif deplasmanlı pompalar kullanılarak yeraltına ve yerüstüne deşarj edilebilen ayrışmama özelliğine sahip malzeme "Macun" sınıfına girmektedir. Literatür incelendiğinde macun formundaki kıvamlandırılmış bu artıkların ağırlıkça katı içeriklerinin %65-%85 aralığında olduğu ve pompalanabilir bir kıvam değeri olan 180-250 mm slump aralığında uygulandığı anlaşılmaktadır. Bu macun malzeme kütlesi, bir boru hattından nakledilerek boşaltım yapıldığında tane ayrışmasının gerçekleşmediği ve homojen bir yapıda kaldığı görülmektedir. Macun malzeme uygulamalarında genellikle iki tür pozitif deplasmanlı pompa türü vardır. Bunlardan biri yeraltı macun dolgu için kullanılan 250-500 Pa akma gerilmesine sahip hidrolik tahrikli piston pompalardır. Bir diğeri ise yüksek akış hızındaki macun ya da yerüstü macun malzemeler için kullanılan 100-250 Pa akma gerilmesi aralığındaki piston diyaframli pompalardır. Ayrıca yerüstü macun malzeme atmosferik şartlar altında tabakalar halinde depolanarak hızlı bir şekilde kuruması sağlanır. Böylelikle likit limit değerinin üzerine çıkarak dinamik yükler altında sıvılaşma riski azalmaktadır (ICOLD ve UNEP 2001;

Hustrulid ve Bullock, 2001; Aswathanarayana, 2003; Fourie, 2003; DPI, 2003; Welch, 2003; Cooke, 2008).

Bu kapsamda yerüstü macun depolama yöntemi 3 alt başlık altında detaylı olarak verilmiştir:

- Yerüstü macun malzemesinin özellikleri,
- Yerüstü macun depolama tasarım özellikleri, endüstriyel uygulaması ve avantajları,
- Yerüstü macun depolama yöntemi ile ilgili bilimsel çalışmalar.

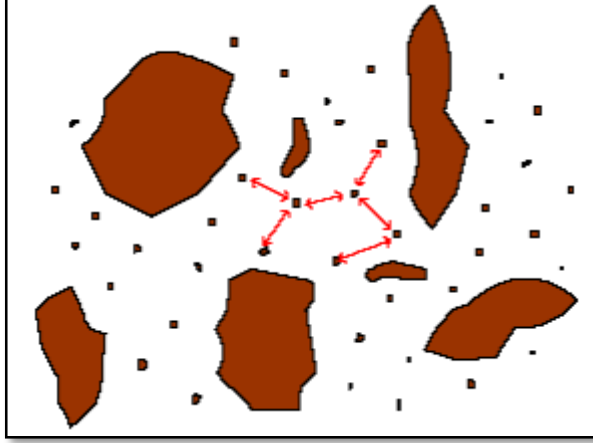
Ayrıca yerüstü macun depolama metodu, çalışma sahasının artık miktarı esas alınarak endüstriyel çapta tesis gereksinimleri yatırım ve işletme maliyetleri açısından hesaplanmıştır. Geleneksel artık barajı maliyetleri ile karşılaştırılarak ekonomik açıdan değerlendirilmiş ve sonuçlar Bölüm 4'te verilmiştir.

2.3.4.1. Yerüstü Macun Malzemesinin Özellikleri

Son yıllarda kullanılan yerüstü depolama yöntemlerine alternatif olarak geliştirilen Macun Teknolojisi, cevher hazırlama tesis artıklarının filtrasyon ya da tikiyer yardımı ile susuzlaştırıldıktan sonra belli bir oranda su ve gerekli görüldüğü yerlerde ilave bağlayıcı malzemeye karıştırılarak pompalanabilir kıvamdaki ince taneli malzeme olarak tanımlanmaktadır (Brackebusch, 1994; Newman ve diğ., 2001; Verburg, 2001).

Macun malzemesi segregasyona uğramadan pompalanabilmesi için yeterli miktarda ince boyutlu tane içermelidir. Literatürde yapılan çalışmalara ve işletme tecrübelerine göre, tipik bir macunun en az ağırlıkça %15'inin 20 µm altında olması gerekir (Brzezinski, 2001; Grabinsky ve diğ., 2002; Verburg, 2002; Theriault ve diğ., 2003; Benzaazoua ve diğ., 2004; Dechamps ve diğ., 2008 ve 2011; Yılmaz ve diğ., 2013 ve 2014; Başçetin ve diğ., 2013; 2014 ve 2015). İnce tanelerin koloidal su tutabilme özelliği sayesinde ayrılmaya uğramayan ve tipik macun akış özelliği gösteren karışımlar sağlanır. Diğer bir ifadeyle bu durum akma gerilimi ile açıklanabilir. Katıların süspansiyonları yeterli katı konsantrasyonlarına getirildiği zaman genellikle 20 µm'dan küçük ince parçacıklar, elektrostatik etkileşim yoluyla taneleri birbirine bağlar (Şekil 2.15). Bu bağın ayrılarak bir akış kazanmasını sağlayan minimum basınç ise akma gerilmesini oluşturmaktadır. Macun uzun süre hareketsiz bırakıldığında çok az sızıntı suyu bırakabilir. Ayrıca uzun

süre duraylılık gösterir ve boru hattı tıkanma riski taşımaz (Kwak ve diğ., 2005; Meggyes ve Debreczeni, 2006).



Şekil 2. 15: 20 µm'dan küçük ince tanelerin etkileşimi (Pastethickassoc, 2015).

İyi bir tane boyutu dağılımına sahip olmayan macun karışımında dayanımın artırılabilmesi için katılması gerekenden daha fazla bağlayıcıya ihtiyaç duyulmaktadır. Diğer taraftan uygun bir dağılıma sahip atıklardan üretilen macunda ise ince taneler, iri taneler arasındaki boşlukları doldurmak suretiyle düşük çimento içeriklerinde yüksek dayanım elde edilebilmektedir (Şekil 2.16) (Yılmaz ve diğ., 2003).



Şekil 2. 16: İyi bir tane boyu dağılımına sahip olan (a) ve olmayan (b) malzemeden üretilen macundaki bağlayıcı jel görünümü (Yılmaz ve diğ., 2003).

Çimentonun rutin olarak ilave edilmediği yerüstü macun depolama sisteminde, pompalama macun depolamasının en önemli parçasını oluşturur. Dolayısıyla, macun malzemenin akışkan kıvamda olması gerekir. Macun malzemesinin kıvam özelliği beton endüstrisinde kullanılan geleneksel *Çökme Konisi Beton Testi* (slamp) uygulanarak belirlenir ve bu değerin yerüstü uygulamalarında 200-250 mm arasında olması

istenmektedir. Bu slamp değeri sürtünme kayıplarını azaltmakta ve macunun büyük tek bir pompa ile 2-3 km mesafelere taşınmasına imkan sağlamaktadır. Yeraltı macun sisteminde ise optimum slamp değeri 150-200 mm arasındadır. Bu durum, taşımada basınç kayıplarını azaltır ve kazanılan dayanımı artırır. Ayrıca belirli bir slamp değerindeki macunun su içeriği ve yoğunluğu ince tane miktarına göre değişmektedir. Tane boyutu inceldikçe ıslanan yüzey alanı artacağından nem içeriği yüksek ve yoğunluğu düşük kalacaktır (Newman ve diğ., 2001; Meggyes ve Debreczeni, 2006).

Katı-sıvı karışımları için sınıflandırma sistemi, katı konsantrasyonu arttıkça karışım sulu çamurdan macun ve kek kıvamına kadar değişiklik göstermektedir. Sulu çamur, susuzlandırma derecesine bağlı olarak, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek yoğunluklu sulu çamurlar olarak sınıflandırılır. Belli bir kıvamın üzerine koyulaştırılan artıklar akış sırasında non-newtonian davranışı gösterdiğinden belirli bir akma gerilmesine sahiptir. Sulu çamurdan macuna geçiş noktası yaklaşık ≥ 100 Pa akma gerilmesi olarak kabul edilmektedir (Cooke, 2008; Spiers, 2010). Macun genelde Bingham plastik sıvısı olarak sınıflandırılmakla birlikte (yüksek viskozitedeyken, akış hızı arttıkça nispeten sabit bir viskozite göstermesi), macunun boru hattı ile taşınması alanındaki tecrübeler, macun akış teorilerinin tam anlaşılır olmadığını göstermiştir. Viskozite zaman veya akış hızına bağlı olarak ya azalmakta ya da artmaktadır. Brackebusch'a (1994) göre birçok macun pseudoplastiktir (artan akış hızı ile birlikte viskozitede azalma eğilimi gösteren maddeler) ve viskozite, yüksek pompalama hızlarında azalır. Bu durum malzemenin pompa ile taşınmasında yararlı bir özellik olup sulu çamur ve macun formundaki artıkların taşınmasında santrifüj ve pozitif yer değiştirme pompalarının kullanılmasına imkan verir. Ayrıca, çok yüksek yoğunluklu macun taşınmasında ise sadece pozitif deplasmanlı (PD) pompalar kullanılabilmektedir (Meggyes ve Debreczeni, 2006). Dolayısıyla herhangi bir macun veya susuzlandırılmış artık depolama sistemi tasarımı ve işletme şartlarının tespiti için malzemenin reolojik özelliklerinin iyi anlaşılması gerekmektedir.

Ayrıca Tablo 2.8'den görüldüğü üzere artık malzemesinin yoğunluğunun doğrudan reolojik özelliklere etkisi vardır. Farklı tür artıkların aynı slamp değerinde olmalarına karşın akma gerilmelerinin farklılıklar gösterdiği belirlenmiştir. Dolayısıyla slamp testi hızlı ve yaklaşık bir çözüm getirir de, malzemenin reolojik özelliklerinin belirlenmesinde reoloji testlerinin yapılmasının daha uygun olduğu ifade edilebilir.

Tablo 2. 8: Yoğunluğa bağlı slamp ve akma gerilmesi değişimleri (Boger ve diğ., 2006).

Değişkenler	Kömür artığı	Altın artığı	Kurşun-Çinko artığı
Yoğunluk (gr/cm ³)	1,45	2,80	4,10
Katı içeriği (% , ağırlıkça)	36	75	75
Çamur yoğunluğu (gr/cm ³)	1,12	1,93	2,31
Slamp yüksekliği (mm)	203	203	203
Akma gerilmesi (Pa)	160	275	330

Artıkların macun formunda depolanması diğer yöntemlere göre daha karmaşık testler ve ön çalışmalar gerektirmektedir. Bu testler artık malzeme karakterizasyon testleri, macun malzeme karışım testleri ve macun malzeme depolama testleri olarak gruplandırılabilir. Bu test grubu temel alınarak bu tez çalışmasında malzeme ve yöntem bölümünde anlatılmıştır.

Macun teknolojisinde amaç, malzeme olarak kontrol altında tutulması ve yönetilmesi oldukça zor olan yüksek su içeriğine, çok ince bir tane boyut dağılımına ve karmaşık kimyasal yapıya sahip olan artıkların malzeme özelliklerinin iyileştirilmesini sağlamaktır. Böylelikle artıkların doğasında yatan tehditlerin ortadan kalkmasıyla, uzun vadede ekonomik, güvenli ve çevre dostu bir şekilde depolanmaları mümkün olmaktadır. Artık, macun malzeme karışımının büyük bir kısmını (ağırlıkça %65-75 oranında) oluşturması nedeniyle, macun malzemenin fiziksel ve jeokimyasal özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. Bu konuda yapılacak testlerle;

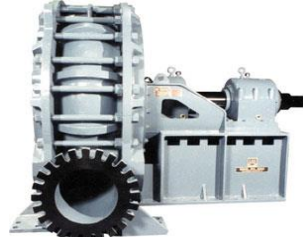
- Tane boyut dağılımı,
- Spesifik yüzey alanı,
- Boşluk oranı,
- Minerolojik kompozisyonu,
- Sülfür içeriği gibi parametreler açısından atığın macun malzeme olarak kullanıma uygunluğu belirlenmektedir (Brackebusch, 1994; Ouellet ve diğ., 1998; Jewell ve diğ., 2002).

Macun teknolojisinin öncülerinden biri olan Robinsky'e (1999) göre, gerçekte bütün cevher hazırlama yöntemleri macun üretimine uygun artıklar oluşturur. Ancak, artıkları macun formunda depolamadan önce jeoteknik ve jeokimyasal karakterizasyonunun yapılması gerekmektedir. Macunun uzun dönem çevresel duraylılığı bu anlamda özellikle önemlidir.

2.3.4.2. Yerüstü Macun Depolama Tasarım Özellikleri, Endüstriyel Uygulaması ve Avantajları

Macun formundaki artıklar serbest bırakıldığı zaman, yoğun kıvamları ve dolayısıyla yüksek viskozite nedeniyle, yüksek boru hattı basıncını sağlayan pompalar yardımı ile ayrışmaya uğramadan uzun mesafeleri kat edebilmektedir. Nihayetinde az bir eğimde akış durmakta ve oluşan eğimin derecesi susuzlandırma ya da kıvam derecesi ile belirlenmektedir. Artıkların kıvamı, pompa türü, akış özellikleri ve depolama şevleri Tablo 2.9’da verilmiştir (Brzezinski, 2001).

Tablo 2. 9: Artıkların kıvamı, pompa türü, akış özellikleri ve depolama şevi (Brzezinski, 2001).

Kıvam	Pompa Tipi	Boru Hattının Sonundaki Akma Gerilmesi	Akış Özellikleri	Depolama Şevi
 Jelleşme noktasının altındaki çamur (konvansiyonel tikiner)	 Santrifüj pompası (düşük boru hattı basıncı)	İhmal edilebilir	İri ve ince fraksiyonun ayrılması	% 0 – 1
 Yüksek yoğunluklu çamur (derin yataklı yada koni tikiner)	  Santrifüj veya piston / diyafram pompa (yüksek boru hattı basıncı)	Düşük-Orta	İnce tabakalarda (50 mm) ayrışma olmayan sığ akış	% 1 – 4
 Macun-yüksek slamp (derin yataklı yada koni tikiner)	 Piston / diyafram pompa (daha yüksek boru hattı basıncı)	Orta-Yüksek	Kalın tabakalarda (>100 mm) ayrışma olmayan fan kanal akışı	% 4 – 8

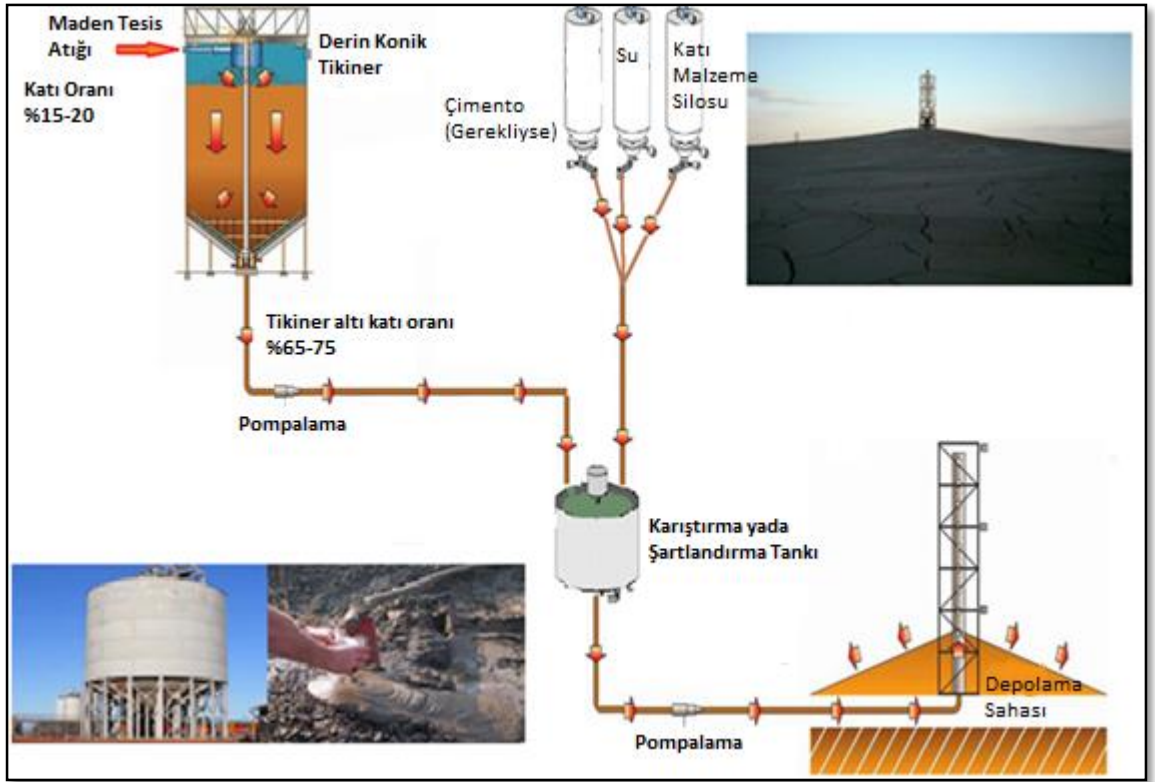
Artıkların kıvamlandırılmasının ardında yatan ana fikir pülp malzemenin az da olsa kendi kendini tutabilen konik yığınlar oluşturmasını sağlamak ve bu sayede setlere veya istinat duvarlarına gelen yükleri azaltmaktır. Artıkların deşarjı genellikle topografik olarak yüksekte olan noktalardan veya düz arazilerde boşaltım kulelerinden gerçekleştirilir. Bu sayede yığın açıları 1 ile 3,5⁰ arasında elde edilebilir. Bu a ılar yığının kendi kendine drene olabildiğini sağlarken aynı zamanda reklamasyon açısından da kolaylıklar sağlar (ICOLD ve UNEP 2001).

Ilıman iklimlerde %2-6'lık bir eğime ulaşılmak istenmektedir. Bu eğim derecesi erozyonu önleyecek yeterlidir ve bitki örtüsü için yeterli drenajı da sağlar. Kurak iklimlerde, daha dik eğimler tasarlanabilir. Susuzlandırılmış artıkların ayrışmama özelliği, katıyı oluşturan tanelerin birbirlerine bağlanmasını sağlayarak hem erozyon hem de tozlaşma potansiyelini azaltır (Robinsky, 1999; Meggyes ve Debreczeni, 2006).

Yerüstü macun depolama yönteminin endüstriyel uygulama  rneği

Artıkların daha yoğun kıvamlara susuzlandırılmaları ile daha stabil artıklar oluşturmak mümkündür. Dolayısıyla cevher zenginleştirme artıklarının macun formunda yerüstünde depolanması çökelme göleti ya da artık barajları gereksinimini de ortadan kaldırıır. Bunun için tesis çıkışı artıklardan, proses suyunun çoğu uzaklaştırılarak duraylı hale getirilir. Tikinerlerde çökelen katı, tikinerin altından alınırken üstten alınan su tesise geri beslenir. Tikinerlerde p lpdeki katı oranı arttırılan artıklar piston diyaframlı ya da pozitif deplasmanlı pompalar yardımı ile önce karıştırma tankına daha sonra ise depolama sahasına deşarj edilir. Karıştırma tankında artık malzeme, depolama sahası mesafesine pompalanabilir macun kıvamına dönüştürülmektedir. Burada gerekli görülen miktarlarda su ve katı malzeme ilave edilebilmekte, ayrıca depolama tasarımına göre de ağırlıkça katı oranının $\leq \%2$ 'si kadar  imento bağlayıcısı katılabilmektedir (şekil 2.17).

Macunun bileşenleri olan proses atık malzemesi, su ve eğer gerek görülürse bağlayıcı ( imento, puzolan v.b) boru nakliyatı için uygun homojen bir karışım elde edilecek şekilde harmanlanmalıdır. Bu açıdan macun tesisleri beton santrallerine benzemektedir. Bileşenler hassas ve isabetli şekilde tartılmalı ve hızla karışım prosesine verilmelidir. Beton uygulamalarında kullanılan karıştırıcılar macun teknolojisi için de uygundur (Yılmaz ve diğ., 2003).



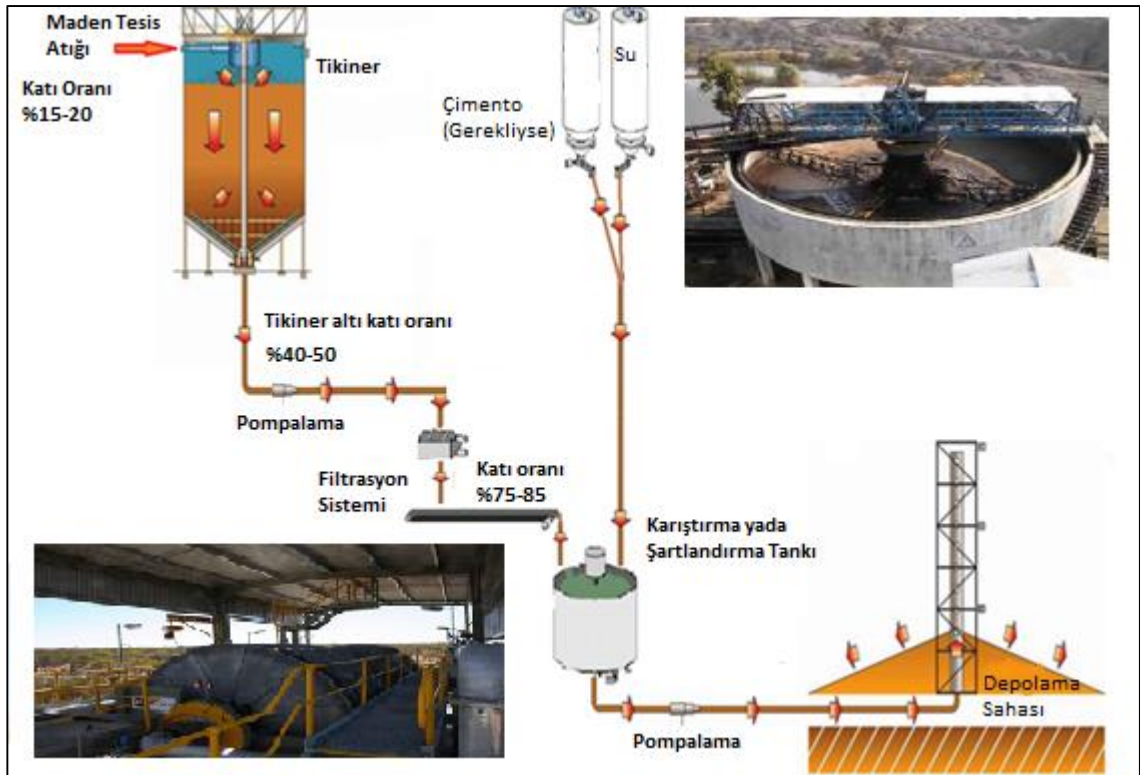
Şekil 2. 17: Yerüstü macun depolama tesisi akım şeması (Brzezinski, 2001; Theriault ve diğ., 2003; FLSmidth, 2010).

Macun tikinerleri kullanılmadığı durumlarda ise konvasyonel tikenerlerden sonra filtrasyon uygulanarak arzu edilen yüksek katı içeriğinde malzeme elde edilebilmektedir (Şekil 2.18). Ancak filtrasyon sisteminin özellikle bakım ve enerji tüketimleri açısından yüksek işletme maliyeti olması nedeniyle derin konik macun tikenerleri bu bağlamda tercih sebebi olmakta ve giderek yaygınlaşmaktadır.

Macun teknolojisindeki artık depolama alanları tesis yakınlarında bir vadi ya da düz bir alan olabilir. Bir vadide eğimli bir artık alanı oluşturmak için susuzlandırılmış artık, vadinin tavanından ya da tepenin bir yamacı boyunca deşarj edilir. Artık, vadi boyunca bir eğimle karşılaşınca kadar akacaktır veya alternatif olarak küçük bir baraj sayesinde durdurulur. Düz alanlarda, susuzlandırılmış artık yapay rampa veya tepe şeklinde boşaltılarak serilir veya artık konisi oluşturulur.

Macunun yerüstü depolanmasında akış özelliklerinin, boşaltma noktasından sonra malzemenin yeterince dağılımını sağlayacak şekilde düzenlenmesi gerekir. Eğer malzeme yüksek katı içeriğine sahipse, akmaya karşı direnci yüksek olduğundan, yayılım

göstermeyecek, boşaltma noktasının altında direk yığın oluşturacaktır. Diğer taraftan, katı içeriği çok düşük olursa, geniş alanlara yayılacak ve istenilen yığın açısını oluşturmayacaktır. Su içeriği arttıkça kuruma da uzun zaman alacak, aynı zamanda macun karışımını oluşturan malzemelerin karışımdaki oranları, macun malzemenin fiziksel, jeokimyasal ve reolojik özelliklerini önemli derecede etkileyecektir. Bu nedenle bu özellikleri sağlayan bir karışım reçetesinin hazırlanması şart olup, bu sayede dayanımı yüksek, uygun bir tasarımın daha düşük bir maliyetle elde edilmesi mümkün olacaktır.



Şekil 2. 18: Filtrasyon sisteminin uygulandığı yerüstü macun depolama tesisi akım şeması (Theriault ve diğ., 2003).

Bir macun tesisi için ilk adım, atığın fiziksel ve kimyasal özellikleri ile beraber macun malzemenin nakledileceği atık sahası mesafesi dikkate alınarak oluşturulacak karışım oranlarının belirlenmesidir. Elde edilen veriler ışığında susuzlandırma yöntemi (tikiner, filtrasyon vb.), bağlayıcı ve katkı maddeleri miktarı, pompa tipi ve kapasitesi, bileşenlerin kesikli veya sürekli karıştırılması gibi tasarım prosedürleri hesaplanır (Benzaazoua ve diğ., 2004; Deschamps ve diğ., 2011; Yılmaz ve diğ., 2014). Bu hesaplamalarda, macun

malzemenin yerüstünde uygulanabilmesi için bazı temel parametrelerin sağlanması gerekmektedir:

- Atık malzemesinin tane boyut dağılımına göre 20 µm altı içeriğinin %15 veya daha yüksek olması,
- Macun malzeme karışımındaki pülpte katı oranı (PKO) değerinin ağırlıkça %65-75 olması,
- Eğer macun malzeme karışımında kullanılacaksa, bağlayıcı miktarının ağırlıkça katı oranının $\leq$ %2 olması,
- Slamp değerinin 25 cm (10") olması gerekir.

Bu parametrelerden, macun malzeme PKO değerinin %75'in üzerine çıktığı zaman uzun mesafelere pompalanabilmesi ve depolama şevi için istenen slamp değerinin yakalanamadığı bu konuda yapılan çalışmalarda belirtilmiştir (Brzezinski, 2001; Benzaazoua ve diğ., 2004; Meggyes ve Debreczeni, 2006; Deschamps ve diğ., 2011; Yılmaz ve diğ., 2014). Ayrıca, çimentonun maliyeti arttırması nedeniyle çok gerek görülmedikçe macun karışımı içerisine katılması istenmemektedir. Dolayısıyla artığın fiziksel ve kimyasal yapısına göre bağlayıcı oranı belirlenmeli ve oluşturulacak olan macun malzeme karışımına sürekli mi yoksa ara ara mı katılacağı en uygun depolama tasarımlarına göre tespit edilmelidir.

Ayrıca Landriault ve diğ., (1996) tarafından açıklandığı gibi macun karışımı hazırlamak için iki temel tesis tasarımı vardır: Bunlar; sürekli karışım sistemi ve kesikli karışım sistemidir. Sürekli sistemler düzenli kalibrasyonu muhafaza etmek için daha fazla bakımı, sabit slamplı macunu üretmek için nem içeriğini ve tutarlı tane boyu dağılımını gerektirmektedir. Bu sistemin en büyük dezavantajı işlemler sürekli olarak yapıldığından bir arıza durumunda olaya hemen müdahale etmek zor olmaktadır. Bu durum kesikli sisteme sahip tesislerde ise meydana gelmemektedir. Kesikli sistemlerde su ilavesi ve besleme ölçümleri için kalibrasyona ihtiyaç duyulmaktadır Eğer sistem istenilen slamp değerinde macun karışımı vermiyorsa hazırlanan karışım deşarj edilmez. Sistem gözden geçirilerek tekrardan macun karışımı üretilmektedir. Bu sistemde işlemin her aşamasına kolaylıkla müdahale edilmektedir (Yılmaz ve diğ., 2003).

Macun teknolojisinin geleneksel yöntemlere göre avantajları

Yerüstü macun bertarafının avantajları çevresel fayda, güvenlik ve ekonomik fayda olarak sınıflandırılabilir:

- Yatırım maliyetlerinin azalması (büyük barajların inşası gerekmemekte),
- Jeoteknik ve jeokimyasal stabilizasyon sağlanarak güvenliğin artması,
- Halkın negatif algısının azalması,
- Su kaynaklarının korunması (su tasarrufu),
- Atık bertaraf alanının küçülmesi,
- Toprak ve yeraltı suyu kirlenmesinin önüne geçilebilmesi,
- Diğer maden atıkları ile birlikte bertaraf imkanının olması ve bunun sonucu kapatılması ve izlenmesi gereken atık alanı sayısının azalması,
- Diğer atıkları da kabul etme imkanı ile ilave gelir sağlanabilmesi,
- Çok az sızıntı suyu oluşumu sayesinde su tutma yapılarının boyutunu küçültmesi,
- Reklamasyon şartlarında iyileşme sağlanması,
- Tanelerin ayrışmasının önlenmesi,
- Eğimli ve çatlak atık yüzeyi sayesinde yağmur suyunun kolay ve hızlı drenajının sağlanması,
- Ayrıca sahada oluşturulan macun malzemeye yerleştirilen sensörler bağlantısı ile sızıntı sularının jeokimyasal ve pH değerleri AMD açısından değerlendirilerek macun malzemenin risk oluşturulabilecek çevresel etkileri sürekli kontrol altında tutulabilmektedir.

Ayrıca hidrolik bağlayıcıların ilave edilerek, yerüstü macun malzemedeki durabilite ve asit nötralizasyon potansiyeli güçlendirilebilecek, çimento katkısı macun malzeme içindeki ağır metal kirleticileri duraylı kılacaktır. Macun teknolojisinin bilinen diğer bertaraf yöntemleri ile avantaj ve dezavantajları Tablo 2.10’da verilmiştir.

Tablo 2. 10: Atık depolama yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları.

Metot	Avantajları	Dezavantajları
Atık Barajı	• Atıklar genellikle sulu proseslerle oluşturulur • Boru hatlarıyla hidrolik nakliye yapılabilir	• Sebep olduğu çevresel etkiler • Atık barajından ötürü oluşan kazalar
Su ve Deniz Altında Depolama	• Atığın olduğu gibi denize veya nehre boşaltımı sebebiyle basit ve kolay	• Sığ alanlara olan yakınlık • Deniz veya nehir tabanında oluşan tahribat • Atığı su üstüne çıkmaması ve su içinde dağılmaması için gereken yoğunluk ve ısı kontrolü • Denizdeki doğal yaşamı ve insan sağlığını tehdit eden potansiyel riskler
Kuru Atık Depolama Yöntemi	• Sızıntı olasılığının az olması • Atıkların yoğun biçimde kümelenmesi • Atık barajlarına nazaran uzun soluklu etkilerinin daha az olması	• Yatırım maliyeti fazla • Gerektiğinde, özellikle kuru iklimlerde, suyun kullanılması gerekliliği
Atıkların Beraber Depolanması Yöntemi	• Alışlagelmiş yöntemlere göre masrafı daha az • Alışlagelmiş yöntemlere göre depolamanın az yer kaplaması	• İnce ve kalın atıkların optimum verimle karıştırılması için kontrollü biriktirme stratejisi izlenmesi
Macun Teknolojisi	• Yatırım maliyeti az • Güvenli • Depolama alanının fazla olmaması • Su tasarrufu • Toprak ve yer altı sularının kirlenmesi olasılığının azalması • İşletmenin sorumluluğunun, ödemesi gereken depolama harcı ve sigorta priminin azalması • Macun atığının dolgu malzemesi olarak yeniden kullanılabilirliği	• Macun hale getirme işlemi ekstra maliyet çıkarabilir • Alışlagelmiş depolama tekniklerinden daha ileri olmasından dolayı altyapı ve teknolojik bilgi gerekliliği

2.3.4.3. Yerüstü Macun Depolama Yöntemi ile İlgili Bilimsel Çalışmalar

Yerüstü macun depolama ile ilgili çalışmalar, teknolojik yeniliklerin getirdiği kolaylıkların madencilik endüstrisine adaptasyonu ile beraber 2000’li yıllarda başlamış olup, yapılan bu çalışmalar hakkındaki bilgiler şu şekildedir.

Verburg (2001 ve 2002) tarafından yapılan bu konudaki çalışmada, artık depolamada macun teknolojisinin kullanımı, potansiyel çevre faydaları ve jeokimyasal karakterizasyonu için gereksinimleri araştırılmıştır. Bu kapsamda macun malzeme üzerinde su ve hava olmak üzere iki farklı ortama maruz bırakılan nem hücresi testleri yapılmıştır. Ayrıca laboratuvar testlerinden sonra iklimsel şartlar altındaki değişimleri

gözlemlemek için lizimetrelili arazi çalışmalarının görüntüleri ve kesit planları verilmiştir. Sonuç olarak macun teknolojisinin, maden atıkları hakkındaki negatif kamuoyu algısını değiştirebileceği ve madencilik sektöründe alternatif bir artık bertaraf yöntemi olabileceği hususunda büyük umut vaat ettiği ortaya konulmuştur.

McGregor ve Blowes (2002) tarafından yapılan bu çalışmada, sülfid taşıyan maden artıklarını içeren çimentolu tabakaların çimentosuz tabakalara göre fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. Artığın boşluk suyu pH (Orion Ross 910700) ve Eh (Orion 96-7800) kombinasyon elektrotları, elementel içeriği indüktif eşleşmiş plazma kütle spektrometresi (ICP / MS), yoğunluklar Micromeritics 1305 modeli çoklu hacim piknometresi ile ölçülmüştür. Jeokimyasal hesaplamalar kütle-çeşitleme transfer programı MINTEQA2 kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca mineralojik incelemede, yansıyan ve iletilen ışık mikroskobu, simultane diferansiyel termal ve termogravimetrik analiz (DTA, TGA) ve X-ışını difraksiyonu (XRD) kullanılmıştır. Araştırmadaki çimentolu tabakaların kütle yoğunluğu, çevresindeki çimentosuz tabakalara göre %9 ile %29 arasında değişen bir artış göstermiştir. Aynı zamanda da poroziteleri % 8 ila % 18 arasında azalmıştır. Sonuç olarak bu tabakalarda çimento kullanımının, sülfid taşıyan maden artıklarının depolanmasında çevresel açıdan oluşabilecek zararları azaltıcı bir etkiye sahip olduğu ortaya konulmuştur.

Slottee ve diğ. (2003) yaptığı bu çalışmada, artık depolama konusunda, derin koni macun tikiner sistemlerinin tasarımını ve uygulamasını incelemişlerdir. Bu çalışma sonunda malzemenin ağırlıkça %75 PKO'ya kadar susuzlandırılabilirdiği ve macun tikiner sistemlerinin yerüstü artık depolamada kullanımının uygunluğu ortaya konulmuştur.

Theriault ve diğ. (2003) yaptığı bu çalışmada, Tanzanya Bulyanhulu Altın Madenindeki artıkların yerüstünde macun formunda depolanmasını incelemişlerdir. Söz konusu tesisteki yerüstü macun malzemesinin 25 cm slump değerinde %73 PKO içeriğinde dual pistonlu pozitif pompalar yardımı ile yaklaşık 1.6 km mesafe sonrasında yerüstünde depolandığı belirtilmiştir. Zenginleştirme tesisinden çıkan artıkların önce filtrasyon ile susuzlaştırılıp bant konveyörler yardımı ile macun tesisine beslendiği, sonra su katılarak macun kıvamına getirilip pompalarla atık sahasına deşarj edildiği ifade edilmiştir. Bu atık sahasının topoğrafyası %2'lik eğime sahip olduğundan 120 m aralıkla 12 m yüksekliğinde 5 deşarj kulesi yapılmıştır. Ayrıca bu kuleler, malzemenin 10:1

(yatay:dikey) eğiminde akması için konumlandırılmıştır. Bunun dışında yüzeyden aşağıya doğru 30 cm'lik macun malzemenin ilk beş gün içinde 5-20 kPa dayanım kazandığı ve birkaç aylık kuruma süresinden sonra kayma dayanımının 60 kPa'a çıktığı arazi tipi vane ile ölçülmüştür. 0.5 m kalınlığından az macun tabakalarının depolanmasında, ilk kuruma çatlaklarının görünmesi için minimum 3 gün ve üzerinde yürüyebilmek için ise yaklaşık 5 gün gerektiği ifade edilmiştir. Depolanan macun malzeme tabakasının yüzeyinin yakınında ölçülen negatif boşluk suyu basıncı, birkaç gün içinde yaklaşık 4-20 kPa arasında kılcal emme basıncı değerlerinin değiştiği ve bir kaç hafta sonra ise 80 kPa değerine kadar çıktığı tansiyometrelerle gözlemlenmiştir. Sonuç olarak bir altın madeni artık malzemesinin endüstriyel anlamda yerüstü macun malzeme olarak depolanabilirliği ortaya konulmuştur.

Crowder 2004 yılında yapmış olduğu doktora çalışmasında plastik olmayan artıkların yerüstü macun bertarafında depolanmasını, konsolidasyonunu testi ile incelemiştir. Bu kapsamda, ince taneli altın artıklarının sıkışma indisinin 0,35'ten daha büyük değerler aldığı hesaplanmıştır.

Benzaazoua ve diğ. (2004) yaptığı bu çalışmada, yerüstü macun depolamasının davranışını simule eden bir laboratuvar çalışması yapmıştır. Küçük ölçekli bir laboratuvar modelini, macun malzemenin fiziksel, jeokimyasal ve akış davranışlarını incelemek için geliştirmişlerdir. Sonuç olarak, literatüre göre hazırlanan macun malzeme üzerindeki çatlak oluşumlarını fotoğraf analizi yaparak incelemiş ve tabaka çatlak yoğunluklarının %4'ü geçmediği ifade edilmiştir.

Kwak ve diğ. (2005) yaptığı bu çalışmada, macun formundaki artıkların yerüstü depolaması için akış davranışları incelenmiştir. Bu çalışma su içeriğinin, yüksek katı madde içeren artıkların ve kaolinit macunların akış davranış ve çökeltme geometrisini nasıl etkilediğini araştırmaktadır. Sonuç olarak su içeriği arttıkça akma gerilmesinin azaldığı ve farklı su içeriklerinde malzemenin çökeltme açılarının değiştiği belirlenmiştir.

Landriault ve diğ. (2005) yaptığı bu çalışmada, yoğunlaştırılmış artıklar ve macun teknolojisinin endüstriyel atık depolamada kullanımı araştırılmış ve alternatif bir yöntem olabileceği vurgulanmıştır.

Bussiere (2007) tarafından yapılan bu çalışmada, metal madenlerindeki sert kaya artıklarının hidrojeoteknik özelliklerini ve yeni geliştirilen depolama yöntemleri incelenmiştir. Sonuç olarak bu tür artıkların düşük plastisiteli silt sınıfında olduğu ve permeabilite katsayılarının 10^{-4} - 10^{-6} cm/sn arasında değiştiği ortaya konulmuştur.

Simms ve diğ. (2007) yaptığı bu çalışmada, Bulyanhulu madenindeki macun artıklarındaki buharlaşmanın modellenmesi incelenmiştir. Bulyanhulu altın madenindeki macun malzemeye ilgili hem laboratuvar hem de arazide buharlaşma çalışmaları yapılmıştır. Laboratuvar çalışmaları, 10 cm kalınlıkta 1mx2m ölçülerinde geniş ölçekli ve 20 cm kalınlığında 20 cm çapında bir kolon testini kapsamaktadır. Bu testler sırasında hacimsel değişim, çatlak derecesi, kılcal emme basıncı, su içeriği ve kuruma oranını kapsayan ölçümler izlenmiştir. Saha çalışmalarında ise gravimetrik su içeriği ölçümleri yapılmış ve kendi ağırlığında konsolidasyonun ve hacimsel değişimin permeabiliteye etkisi incelenmiştir.

Deschamps ve diğ. (2007, 2008, 2011) yaptığı bu çalışmada, macun artıklarının depolama tasarımlarının çevresel açıdan etkileri incelenmiştir. Bu çalışmanın temel amacı, yerüstü macun atıklarının jeokimyasal özelliklerine bağlayıcı etkisini araştırmaktır. Çimentosuz ve çimentolu tabakalardan oluşan farklı depolama tasarımlarında 9 adet liç kolonları hazırlanmış ve bu karışımlarda çimento %0-2 arasında değişen oranlarda kullanılmıştır. Sonuç olarak, çimento ilavesinin çevresel açıdan büyük risk oluşturan AMD'yi azaltıcı etkisi olduğu ortaya konulmuştur. Ayrıca 2011 yılında yaptığı çalışmada, sülfürlü artıkların yerüstünde macun olarak depolanması laboratuvar ölçekli fiziksel bir model kullanılarak incelenmiştir. Bu araştırmada, sülfürlü macun artıkları 9 tabakadan oluşan laboratuvar tipi bir kabin (2 m x 0.5 m) içerisinde incelenmiştir. 4 hafta boyunca 40 L su dökülerek sistem ıslatılmış ve toplam 14 ıslama-kuruma döngüsü sırasında hacimsel su içeriği takip edilmiştir.

Palkovits ve diğ. (2007) yaptığı bu çalışmada, maden kaya atıklarının macun teknolojisi kullanılarak yerüstünde depolanabilirliğini sürdürülebilir madencilik açısından değerlendirilmiştir.

Simms ve diğ. (2008) yaptığı bu çalışmada, Bulyanhulu altın madeni artıklarının macun formunda yerüstü depolanması kuruma özellikleri açısından incelenmiş ve 50 cm kalınlığında dökülen macunun yüzeyinde 3 gün sonra ilk kuruma çatlakları belirlenmiştir.

Cooke ve diğ. (2008) yaptığı bu çalışmada, yoğunlaştırılmış artıklar ve macun sistemleri için pompa hattı dizaynı incelenmiştir. Sonuç olarak Slurry tipi malzeme (PKO %30-%50) için maksimum 200 Pa akma gerilmesine kadar santrifüj pompa kullanılması, macun malzeme için ise yer altı dolgu (PKO %75-%85) sistemlerinde 250-500 Pa, yerüstü depolama (PKO %65-%75) sistemlerinde 100-250 Pa akma gerilmesi aralığında piston diyaframlı pozitif deplasmanlı pompalar kullanılması gerektiği belirtilmiştir.

Henriquez (2008) yüksek lisans tezi ve daha sonra Henriquez vd. (2009) yaptığı bu çalışmada, altın madeni macun artıklarının çoklu tabakalı depolanmasıyla ilgili olarak dinamik görüntüleme ve modelleme konuları incelenmiştir. Bu çalışmada, kanal ve eksenel akışlardaki macunun çoklu tabakalı depolanmasının, dinamik olarak görüntülenmesi yapılmış ve macun malzemenin akma gerilmesi ve viskozite değerleri tespit edilmiştir.

Fisseha (2008) yapmış olduğu yüksek lisans tezi çalışmasında çok tabakalı depolamada doymun olmayan macun artıklarının akış davranışını incelemiştir. 1,5 m x 1,5 m plan görünümünde laboratuvar ölçekli deneysel çalışmalar yürütmüştür. Bu kapsamda buharlaşma, çatlak etkisi, kuruma süresini simüle etmiştir.

Saleh-Mbemba ve diğ. (2010) yaptığı bu çalışmada, düşük plastisiteli artıkların kuruma ve büzülme testleri ile ön modelleme konusu incelenmiştir. Salfate (2011) yürütmüş olduğu yüksek lisans çalışmasında ince tabakalı yerüstü macun artıklarının depolanmasında boşluk oranlarının tahmin edilmesini çalışmıştır. Bu kapsamda kendi ağırlığında konsolide olmasını, buharlaşmasını ve drene olmasını incelemiştir.

Yılmaz ve diğ. (2010, 2013, 2014) yaptığı çalışmalarda, yerüstü macun artık depolamasının hidrojeoteknik ve jeokimyasal karakterizasyonu ve yerinde koşulların sülfidik macun artık davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. 3,37 gr/cm³ yoğunlukta, %49 porozitede, %18,6 sülfür içeren ve düşük plastisiteli silt sınıfına giren artık malzeden yaklaşık %75 PKO değerinde macun oluşturmuştur. Birinin en alt tabakası çimentolu (katı ağırlıkça %2) diğerinin tamamı çimentosuz 10 cm tabaka kalınlığında 7 günde bir

dökülmek üzere toplamda üst üste 10 tabaka hacimli sahada iki ayrı havuz ($\text{Ç} \times \text{U} \times \text{Y} = 8\text{m} \times 15\text{m} \times 2\text{m}$) oluşturmuş ve bazı tabakalara hacimsel su içeriği, kılcal emme basıncı ve oksijen sensörleri yerleştirmiştir. Sonuç olarak, macun malzemeyi suya doygun ($\text{Sr} > 85\%$) hale getiren çimentolu tabakanın hacimsel su içeriğinin arttığı ve daha az emme basıncına sahip olduğu ortaya konulmuştur. Ayrıca, yüksek Sr değerinin tabakalar arasında oksijen geçişine engel olduğu ve asit üretimini azalttığı belirtilmiştir.

Başçetin ve diğ. (2012, 2013, 2014, 2015a, 2015b, 2015c) yaptığı çalışmalarda, Pb-Zn artıklarının macun teknolojisi ile beraber yerüstünde depolanabilirliğini incelemişlerdir. Bu kapsamda sızıntı suyu alabilecekleri 200 cm x 70 cm x 100 cm boyutlarında laboratuvar ölçekli kabinler kullanmışlardır. Sonuç olarak Pb-Zn artıklarının tane boyut dağılımı ve mineralojik kompozisyonu açısından macun malzemeye uygunluğu tespit edilmiştir. Ayrıca tabakaların sızıntı suları AMD açısından değerlendirilmiş, tabaka çatlak yoğunlukları ve jeoteknik davranışları araştırılmıştır.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde, macun depolama yöntemi için uygun bir endüstriyel tasarımın henüz ortaya konulamadığı görülmüştür. Literatürde artıkların potansiyel çevresel etkilerinin genellikle jeokimyasal (AMD, ağır metal mobilizasyonu vb.) açıdan kolon, nem hücresi ve küçük ölçekli kabin testleri ile incelendiği görülmektedir (Verburg, 2001 ve 2002; McGregor ve Blowes, 2002; Benzaazoua ve diğ., 2004; Deschamps ve diğ., 2007, 2008 ve 2011; Yılmaz ve diğ., 2014). Bu tez çalışması kapsamında ise macun malzemedeki jeokimyasal değişimlerin yanı sıra jeoteknik değişimlerin de uzun vadede nasıl gerçekleştiği ve iklimsel koşulların etkileri ele alınmıştır. Ayrıca macun malzemenin yerüstündeki davranışı farklı tasarımlar ile simüle edilerek en uygun depolama tasarım ortaya konulmuştur. Bu çalışma ile maksimum artık depolama sağlanarak işletme maliyeti düşük, az yer kaplayan, çevresel açıdan risk oluşturmayan, alternatif bir artık depolama yönteminin ülkemizde endüstriyel anlamda ilk kez kullanılabilmesi için bir ön çalışma oluşturması hedeflenmektedir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. ÇALIŞMA SAHASI

Bu çalışmada, Marmara Bölgesi içinde Balıkesir-Çanakkale ve Balıkesir-Gönen devlet karayolları kavşağında, Balıkesir il merkezinin 49 km kuzeybatısındaki Balya İlçesi sınırları içinde yer alan Balya Kurşun-Çinko madeni çalışma sahası olarak belirlenmiştir (Şekil 3.1). Arazinin üretilen artık miktarına göre depolama sahaları açısından yetersizliği, metal madeni artıklarının çevresel açıdan doğurabileceği riskler ve bölgenin yağışlı bir iklime sahip olması söz konusu sahanın seçiminde dikkate alınmıştır. Bölge kış ayları yağmurlu, yaz ayları ise sıcak ve kurak geçen ılıman ile soğuk arası bir iklime sahiptir.



Şekil 3. 1: Balya Kurşun-Çinko işletmesi.

Dünyanın büyük kurşun-çinko maden yataklarından birine sahip olan Balya Cumhuriyet tarihi madenciliğinin başlangıç noktası olarak gösterilebilir.

Balya maden yatağının işletme geçmişi çok eskidir. Özellikle 20. yy'da oldukça hareketli ve sorunlu bir süreç yaşandığı anlaşılmaktadır. Balya madeninin antik çağlardan beri zaman zaman kurşun madeni olarak ve özellikle de içerdiği yüksek gümüş metali için işletildiği, günümüze kadar gelen yeraltı ve yerüstü kalıntılarından anlaşılmaktadır.

Perikles zamanından 1940'lara kadar işletilen, 16. ve 17. yy'de Marmara Bölgesinin çok önemli işletmelerinin kurulduğu Balya Madenleri'nin Romalılar döneminde 'Christian Madenleri' olarak anıldığı ve 1800'lere kadar da yöre halkı tarafından işletilmiş olduğu bilinmektedir. Bilinen en eski yazılı belge, Bursa Mahkeme sicillerinde bulunmakta ve 1544 tarihini taşımaktadır. 1651 tarihinde Kütahya Eyalet Mutasarrıflığı'nın Balya Kadısı'na yazdığı bir yazıda ise madenin Padişah'ın malı olduğu ve Bali Bey'in madende idare amirliği yaptığı belirtilmektedir (Avcı, 2010). Ancak, ilk düzenli işletme 1839-1849 yılları arasında, hangi ülkede kurulu olduğu ve sahipleri bilinmeyen "Balya Maden İşletmeleri" adlı bir şirket tarafından yapılmıştır. 1868'de "Reiser" adında bir Alman yurttaşı tarafından alınan işletme hakkı da "Laurium" adlı bir başka şirkete devredilmiştir. Bu kuruluş, 17,5 km²'lik sahada maden arama, işletme, mevcut cüruflardan yararlanma hakkı elde etmiştir. 1878 yılında ise "Riol" adlı bir Fransa yurttaşı Balya'da maden aramak ve işletmek için 99 yıllık bir "İşletme İmtiyazı" almıştır. Bu sahadaki işletmede o zaman %97,5 Pb ve 2,06 gr/t Ag ve 5-6 gr/t Au elde edilmekte olduğu bildirilmektedir. 1892 yılında da "Societe des Mines de Balya Karaydın" (Balya-Karaaydın Madenleri AŞ) kurulmuştur. Bu Fransız şirketi, bölgede en yoğun ve uzun süreli çalışan şirkettir. 1940 yılında madenin Bakanlar Kurulu kararı ile kapatılmasına kadar bu sahada fiilen işletmecilik yaptıkları bilinmektedir. Şirket, üretimini Balya ile sınırlı tutmayarak; Mancılık'ta kömür, Patlak'ta kurşun, çinko ve demirle karışık manganiz madenlerinde arama ve işletme ayrıcalığını kazanmıştır. Şirket Balya'da 1901 yılında kurduğu santralde Mancılık'tan ürettiği kömürü yakarak elektrik elde etmiş ve kendi gereksiniminden artan enerjiyi yerel yönetime vererek ilçenin aydınlanmasını sağlamıştır. İşletme, Birinci Dünya Savaşı'ndan önce dünyanın en büyük maden işletmelerinden biri iken 1913 yılında üretiminde doruğa ulaşmış ve o yıl ~14.000 t kurşun ve çinko üretmiştir (Kovenko, 1940). Balya Karaaydın Madenleri AŞ, 1904-1913 yılları arasında ortaklarına %12'den %357'ye ulaşan oranlarda kâr payı dağıtmıştır. I. Dünya Savaşı sırasında çalışmasını durduran şirket, 1920 yılı sonlarına doğru çalışmalarına yeniden başlamıştır. 1921'de külçe kurşun üretimi 8.345 t olurken, Kurtuluş Savaşı sırasında 3.400 t'ye düşmüştür. 1927'deki külçe kurşun üretiminin 8.054 t, 1928'de 7.140 t olduğu bildirilmektedir. Bu şirketin sahadan yaklaşık 4.000.000 t tüvenan cevher ve bundan da 400.000 t metal kurşun ürettiği tahmin edilmektedir (Avcı, 2010).

Balya’da iki flotasyon ve bir de izabe tesisinin kurulduğu bilinmektedir. İşletmenin son dönemlerinde flotasyonlardan biri çalıştırılmış; izabe tesisi 1930’da kapatılmıştır. 1929’da, 1900 kW gücünde yeni bir santral kurulmuştur. Günde üç vardiya çalışan flotasyon tesislerinin günlük kapasitesinin 250 t dolayında konsantre çinko ve 50 t dolayında konsantre kurşun olduğu tahmin edilmektedir (Akyol, 1978).

Birinci Dünya Savaşı sonrasında oluşan ekonomik bunalım bu şirketi de etkilemiş, 1927 yılında Arı Kuyu’da çıkan ocak yangını sonucu 500.000 TL zarar edince, devletçe 200.000 lira yardım edilerek şirketin çalışmasına önayak olunmuştur. 1932 yılında faaliyetlerini durdurarak ayrılma tehdidinde bulunan şirkete yine devletçe yardımda bulunularak üretimini sürdürmesi sağlanmıştır. Bu yardımlar çerçevesinde düşünülebilecek bir başka önlem de 1935 yılında çıkarılan kısa bir kanunla işletmeci şirketin yurtdışından getireceği akaryakıttan gümrük vergisi alınmaması olabilir. İşletme 1935 yılına kadar tam kapasite ile çalışmıştır. 1933-1934 yıllarında üretim üç misli artmış ve buna karşılık 1935-1939 yılları arasında cevher yataklarının fakirleştiği gerekçesiyle madende tasfiye hazırlıkları yapılmış ve 1939 yılında üretime son verilmiştir. Tesis 1940 yılında Bakanlar Kurulu Kararı ile kapatılmıştır (Avcı, 2010). Fakat maden ocakları kapatılmış olmasına karşın Fransız şirketi, 1950 yılına kadar sahada tasfiye çalışmalarını sürdürmüş; bu arada, flotasyon artıklarından bir bölümünü daha işlemiştir. Tasfiye edilen şirketin tesislerindeki malzemeler, Bolkardağı, Keban Simli Kurşun, Ergani Bakır ve Soma Kömür işletmelerine gönderilmiştir. Balya Madenlerinin tasfiyesi, bir anlamda Etibank’ın, hatta TKİ’nin de temelini atılmasına katkıda bulunmuştur.

1960 yılında bir Türk şirketi olan “Rasih ve İhsan Madencilik Şirketi” sahada önce arama ruhsatı ve sonra 1970’te de 10 yıllık işletme ruhsatı ile faaliyet göstermiştir. Bu şirket, sahada Fransız şirketinden kalan ve ekonomik maden içeren pasaları değerlendirmek üzere rödövansla Mutlu Akü firmasının bir kuruluşu olan “Mutlu Türker İzabe Şirketi”ne vermiştir. Türker İzabe Şirketi bölgeye 50 t/gün kapasiteli bir kurşun-çinko flotasyon tesisi kurmuştur. Daha sonra, Rasih ve İhsan Şirketi ruhsat hakkını yitirdiğinden 1979 yılında saha devletçe Etibank’a verilmiştir (Avcı, 2010). Günümüzde ise bu saha Eczacıbaşı Esan Endüstriyel Hammaddeler San. Tic. A.Ş.’ye bağlı olarak işletilmektedir.

3.1.1. Jeomorfoloji

Balya çevresi, Kocaçay boyunca, birbirinden boğazlarla ayrılmış değişik özellikte havzalardan oluşmaktadır. Yöre, Alt-Orta Miyosen'den bu yana birçok evrede ve birçok etkenin etkisiyle gelişmiş, değişik yer biçimlerinden oluşmaktadır (Koç, 2001; Avcı, 2010). Çevredeki dağların yükseltileri 889 m'ye kadar ulaşmaktadır. Maden sahasının çevresindeki plato ise, 400 m dolayındadır. Maden ocakları ve yakın çevresindeki yükseltiler 150-550 m arasında değişmektedir (Koç, 2001; Avcı, 2010). Balya çevresinde, genellikle kireçsiz kahverengi orman toprakları yaygındır. Volkanik kayaların geniş yüzeylemelerinin olması ve yamaç eğimlerinin yüksek oluşu toprak kalınlığının artışı engellemektedir.

3.1.2. Maden Jeolojisi

Balya yöresinde, yabancı bloklar oluşturan Permien yaşlı kireçtaşı, Triyas yaşlı miltaşı-kumtaşı çakıltası ardalanması ve Tersiyer yaşlı volkanitlerden kurulu bir jeoloji yapısı bulunmaktadır. Kireçtaşları iki ayrı konumda görülmektedir. Bunların bir bölümü, kendilerinden daha genç Triyas tortullarının içinde bloklar biçiminde yer alırken; bir bölümü de, Triyas istifinin üzerine taşınarak yerleşmiş durumda durmaktadır.

Kıltaşı-miltaşı-kumlu kireçtaşı ardalanmasından oluşan Triyas'ın tavanında da bir tavan çakıltası tabakası yer almaktadır. Tersiyer ise volkanitlerle temsil edilmektedir. Bunlar çok altere dasit ve riolitlerden oluşmaktadır. Volkanik etkinliklerin KD-GB doğrultusunda uzanan faylarla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Bu kaya istifi Kırmızı Tepe'den geçen KD-GB uzanımlı "Büyük Fay" ile kesilmektedir. Düşeye yakın duruşlu bu fayın cevherleşmeyi de yönlendirdiği düşünülmektedir.

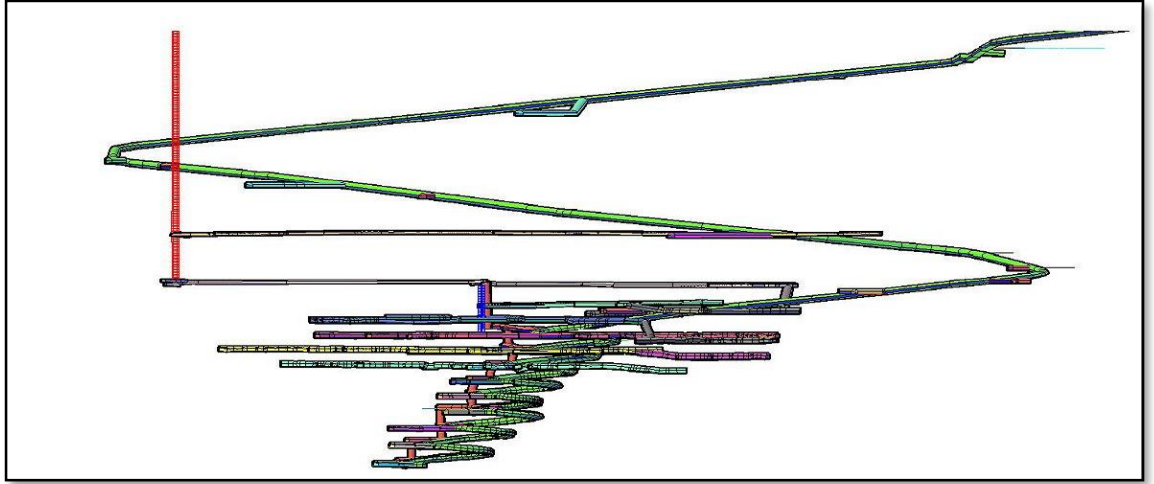
Cevher oluşumu genellikle dasit-kireçtaşı dokanağında kontakt pirometasomatik ve kireçtaşının çatlaklarında hidrotermal damar türündendir. Damar türü cevher yataklarından, dasit çatlaklarında olanlar realgar, orpiment, galenit, sfalerit ve pirit; kireçtaşının çatlaklarına yerleşmiş olanlar galenit, sfalerit, antimonit, pirit, realgar ve orpiment birlikteliklerinden oluşmaktadır. Yalnızca pirit damarları, piritli sfaleritli galenitli damarlar, orpimentli realgarlı damarlar ve çok az da sfaleritli antimonit damarları ile karşılaşılabilir. Skarnlardaki kontakt türü cevher daha zengindir. Bunlar, dasitle kireçtaşlarının dokanaklarında oluşmuştur. Dokanak zonlarında skarn mineralleri gelişmiştir. Karşılaşılan başlıca cevher mineralleri magnetit, pirit, pirotin, arsenopirit,

kalkopirit, markazit, tetrahedrit, galenit ve sfalerittir. Ayrıca, altere dasitlerin içinde saçılmış cevherleşmeler de vardır. Saçılmış olarak pirit, galenit ve sfalerit mineralleri izlenmektedir. Bunların ekonomik önemi yoktur (Akyol, 1977; Avcı, 2010).

Balya yöresindeki cevher yatakları yaklaşık 8 km²'lik bir alanda yayılan birkaç alana dağılmış durumdadır. Bunlar, üç ana grupta toplanmaktadır: Balya Sahası, Darıdere Sahası ve Bahçecik Sahası. Son iki sahada cevherleşme olasılığı jeolojik olarak belirlenmiş olmakla birlikte, henüz sondajlı araştırma yapılmamıştır. Balya Sahası ise beş alt bölümden oluşmaktadır: Arı, Orta, Sarısu, Koca ve Karaca Sahaları. Arı ve Orta Sahaları'nda MTA tarafından sondajlı araştırmalar yapılmıştır (Akyol, 1980; Avcı, 2010). Arı-Orta kesimi, yüzeyden 200-700 m derinlikler arasında yayılmaktadır. Doğrultu boyunca da 450 m yayılmaktadır. Sarısu ve Hastane Tepe yatakları daha sığda gelişmiştir. Hastane Tepe yatağı 180 m ve Sarısu Yatağı da 400 m derinliğe kadar inmektedir. Yataklarda damar eğimi en az 45° ve KB yönlüdür (Kanpolat, ve Cengiz, 1985; Avcı, 2010).

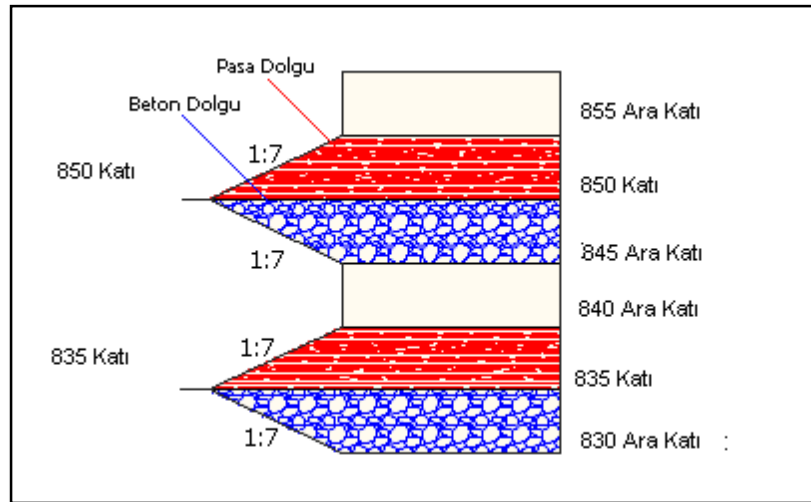
3.1.3. Cevher Üretimi ve Atık Sahası

Balya Kurşun-Çinko Yeraltı Madeni'nde kes-doldur madencilik yöntemi uygulanmaktadır. Yerüstünden 1206 kotundaki girişten spiral olarak 1:7 eğime sahip rampa ile inilmektedir. Rampaya dik sürülen ve düşey mesafeleri 15 m olan çapraz katlardan cevhere ulaşmak amacıyla cevher yatağı doğrultusunda doğu ve batı yönünde galeriler sürülerek üretim gerçekleştirilmektedir. Kes-doldur üretim yöntemi gereği üretilen bölge doldurularak bir üstündeki 5 m'lik kısım üretilmeye başlanır. Üretimin tam mekanize olması ve yeraltında kullanılan ekipmanın boyutları gereği; ana rampa ve üretim galerilerindeki galeri boyutu 5x5 metre olarak belirlenmiştir. Üretim galerisinin pasa içerisinde ilerlemesi durumunda ise bu boyut 5x4 metreye düşmektedir. Balya yeraltı Kurşun-Çinko İşletmesinin yandan görünüşü Şekil 3.2'de görülmektedir. Kırmızı ile gösterilen bölge Kuyu-1'in Fransız galerisine bağlantısı ve aynı zamanda havalandırma kuyusudur (Avcı, 2010).



Şekil 3. 2: Balya Kurşun-Çinko işletmesi yandan görünüşü (Avcı, 2010).

Cevher üretimi ana kat galerisinde tamamlandıktan sonra galeri eğime başlanan noktaya kadar %8 lik beton dolgu ile doldurulur. Dolgusu tamamlanan ana katın 5 m yukarısı olan ve rekup ile aynı kotta bulunan 1. ara kat galerisinde üretim tamamlandıktan sonra galeriye pasa dolgu yapılır. 2. ara kat üretim galerisi rekupun 5 m yukarısında 1:7 eğimle sürülür ve üretim faaliyetleri tamamlandıktan sonra dolgusuz bırakılır (Şekil 3.3). Boş bırakılan 2. ara kat galerisinin tavanıyla bir alt kottaki rekuptan girilen ve üretim faaliyeti tamamlanan 2. ara kat galerisi arasında 15 m’lik düşey mesafe vardır.

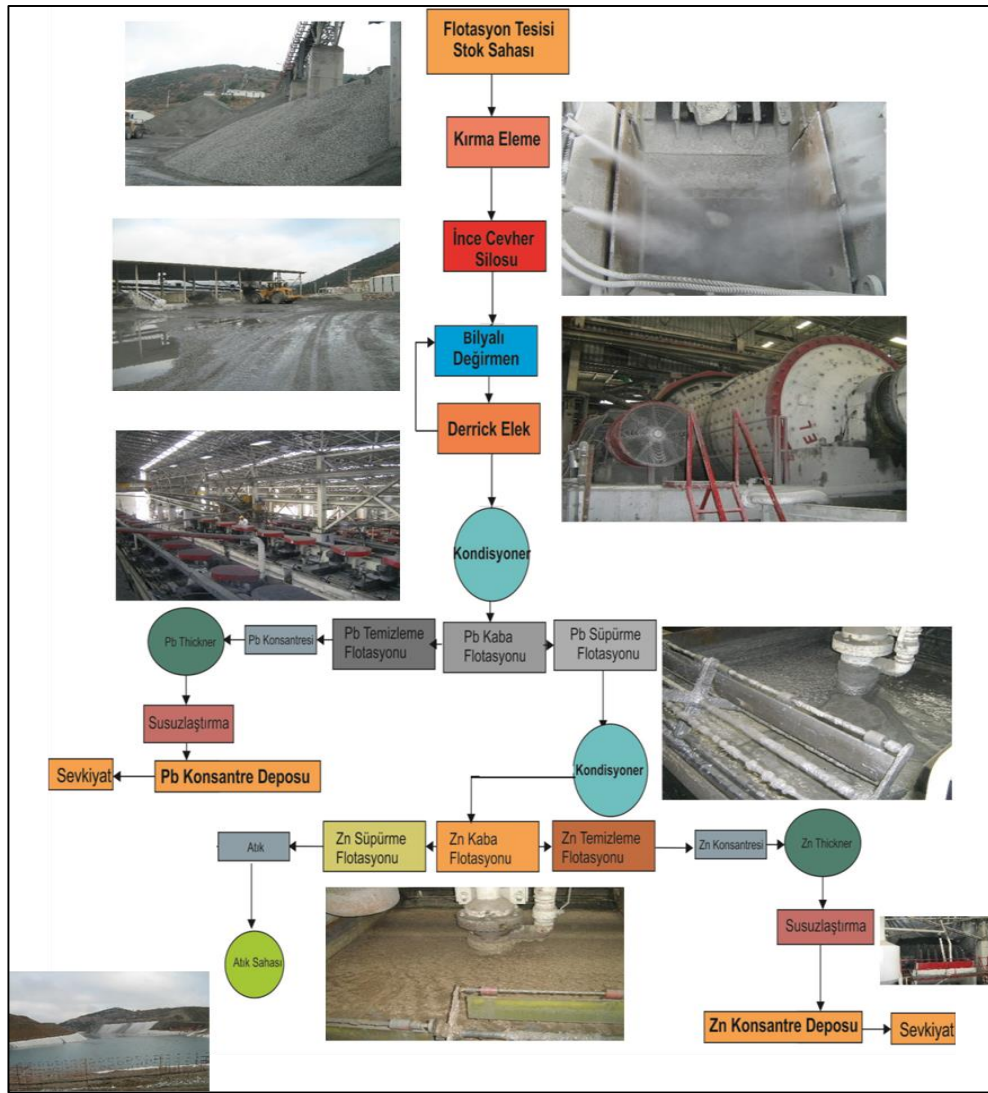


Şekil 3. 3: Balya Kurşun-Çinko işletmesi katlar arası üretim yöntemi (Avcı, 2010).

Bu yöntem kapsamında tahkimatta dolgu malzemesi olarak agrega ve çimento (%8) karışımı kullanılmakta ve dolgunun 28 gün sonundaki dayanımı 2–5 MPa arasında olması

beklenmektedir. Karışımın slump değeri ~11–12 cm olduğundan dolgu malzemesi yerleştirilirken pompalama işlemi oldukça zor ve maliyetli olmaktadır. Bu nedenle malzeme kamyon ile taşındıktan sonra dozer ile boşluğa sıkıştırılmaktadır.

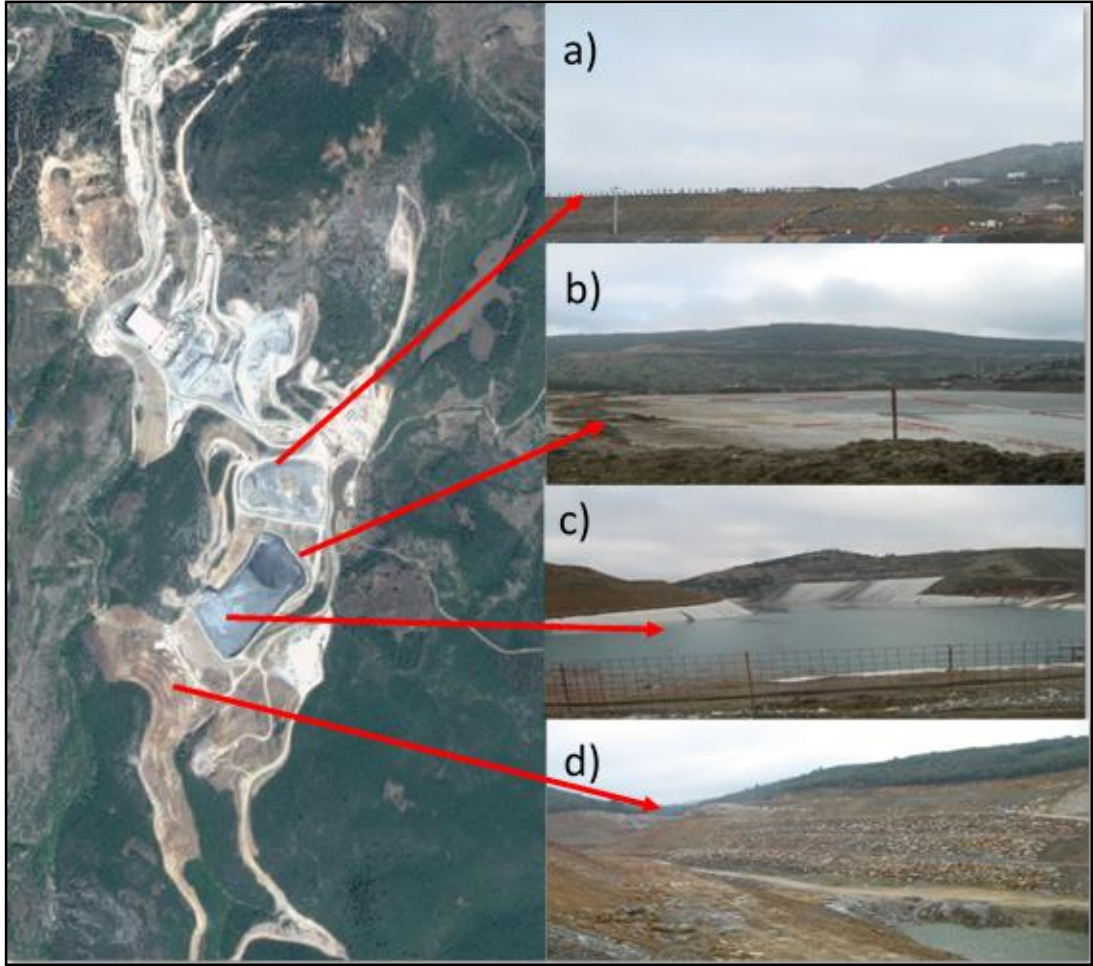
Yeraltından çıkarılan tüvenan cevherin zenginleştirme süreci ise kırma, öğütme, flotasyon ve filtreme işlemlerini içermektedir (Şekil 3.4). Zenginleştirme tesisine günlük olarak beslenen ~3.900 t cevherden ~400 t konsantre elde edilmektedir. Geriye kalan ~3.500 t atık malzemesi (PKO: ~%20) atık barajına boşaltılmaktadır.



Şekil 3. 4: Balya Kurşun-Çinko işletmesi tesis akım şeması (Avcı, 2010).

Kurşun-Çinko yeraltı madeninde ikisi kapanan, biri kullanılan ve biride inşaatı devam eden olmak üzere toplam 4 atık sahası mevcuttur (Şekil 3.5). Kapanan atık sahalarının

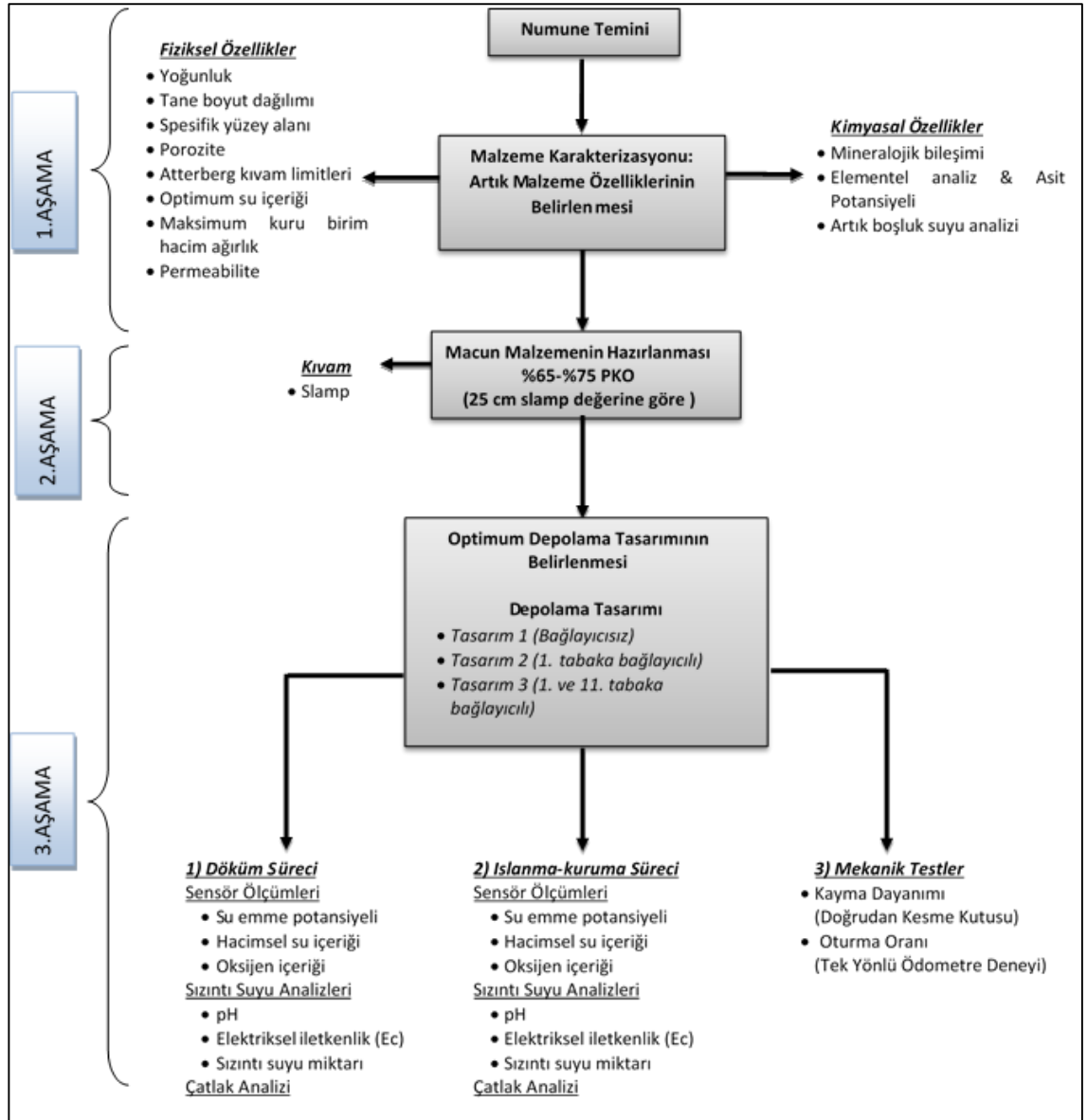
ilkinde tesiste mevcut olan filtrasyon sistemi kullanılarak kuru depolama yöntemi uygulanmış, ancak yüksek maliyeti nedeniyle bu yöntemden vazgeçilmiştir. Günümüzde ise, mevcut kullanılan ve inşaatı devam eden barajların birleştirilmesi ve yeni atık sahası alanları planlanmaktadır.



Şekil 3. 5: Artık barajlarının görünümü a) ve b) İşletme ömrü biten atık barajları c) Mevcut atık barajı d) Yapımı devam eden atık barajı.

3.2. YÖNTEM

Bu çalışmada yerüstü macun depolama yöntemi kullanılarak Kurşun-Çinko madeni proses artıklarının depolanması laboratuvar ortamında simüle edilmiştir. Bu kapsamda gerçekleştirilecek olan deney ve analiz programı Şekil 3.6'daki akım şemasında detaylı olarak görülmektedir.



Şekil 3. 6: Tez çalışmasının akım şeması.

Şekil 3.6’da görüldüğü gibi numune temini aşamasında ilk olarak söz konusu tesisten filtrasyon işlemi uygulanmış ve pülp te katı oranı ~%75-80 aralığında olan proses artığı malzeme, plastik variller içinde laboratuvara getirilmiştir. Malzemenin oksitlenmesini önlemek amacıyla malzeme ~15-20 cm kalınlığında bir su tabakasıyla örtülerek malzemenin oksijenle temas etmesi önlenmiş ve varillerin ağzı kapatılmıştır. Bu kapsamda çalışma 3 temel aşamadan oluşmaktadır:

1. Malzeme karakterizasyonu: Artık malzeme özelliklerinin belirlenmesi,
2. Macun malzemenin hazırlanması,

3. Optimum depolama tasarımının belirlenmesi: Bölgenin iklim şartları simüle edilerek fiziksel, kimyasal ve jeomekanik parametreler açısından en uygun tasarımın tespit edilmesi.

3.2.1. Malzeme Karakterizasyonu

Artık malzemenin fiziksel, kimyasal ve jeokimyasal özellikleri uygulanacak artık depolama yöntemleri için çok önemlidir. Bu özelliklerin belirlenmesi hem artığın macun malzeme olarak kullanımı, hem de karışım tasarımı açısından önem arz etmektedir. Bu nedenlerle macun yapımında kullanılacak artık malzemesini karakterize etmek için maden proses atığının fiziksel, kimyasal ve jeokimyasal özellikleri ile beraber mineralojik bileşimi de bu çalışma kapsamında araştırılmıştır. Maden artıkları fiziksel özellikleri açısından zemin yapısına uygun olduğundan dolayı malzeme özelliklerinin belirlenmesi aşamasında zemin standartlarına göre değerlendirilmiştir (Benzazoua ve diğ., 2004; Yılmaz ve diğ., 2014).

3.2.1.1. Yoğunluk

Artık malzemesinin kuru yoğunluğu, macun malzeme karışım yoğunluğunu doğrudan etkilemektedir. Bu fiziksel etki, efektif gerilmelerin oluşturduğu yük altında malzemenin konsolide olması ve zamanla değişen boşluk oranları ile ilişkilidir. Dolayısıyla, doygunluk derecesi (S), boşluk oranı (e), su içeriği (w) ile yoğunluk değerleri arasında bir ilişki bulunmaktadır (Eşitlik 3.1). Bu çalışma kapsamında boşluk oranlarının belirlenmesi aşamasında artık malzemesinin zemin gibi ince taneli bir yapıya sahip olmasından dolayı bu ilişki kullanılmıştır (Bowles, 1996; Kayabalı, 2002; Budhu, 2007).

$$\rho_w S e = w \rho_s V_s \quad [3.1]$$

ρ_s : Tane yoğunluğu

w : Su içeriği

S : Doygunluk derecesi

e : Boşluk oranı

ρ_w : Suyun yoğunluğu

V_s : Tanelerin hacmi

Artık malzeme tane yoğunluğunun macun malzeme üzerindeki bir diğer etkisi de karışıma katılacak çimento miktarının belirlemesidir. Macun malzeme karışımı içerisine

bağlayıcı ilavesi malzemenin dayanımını arttırmaktadır. Ancak kullanılan bağlayıcı miktarının artması ile birlikte malzemenin ekonomikliği de azalmaktadır. Bu nedenle yerüstü macun depolama çalışmalarında katı malzeme içerisindeki ağırlıkça çimento oranının %2 değerini geçmemesi önerilmektedir (Benzaazoua, 2004; Yılmaz, 2010).

Bu çalışma kapsamında, artık malzemenin yoğunluk değeri helyum piknometre sistemi kullanılarak belirlenmiştir. Helyum piknometre sistemi diğer yoğunluk belirleme yöntemlerine göre en doğru sonuçları vermektedir. Helyum piknometresi, Arşimet'in akışkan taşması prensibini ve Boyle Kanunu'nu kullanarak hacim ve gerçek yoğunluğu bulmayı amaçlar. Ölçümlerin doğruluğunun maksimum olması için taşan akışkan, tüm gözeneklere girebilen ve reaktif olmayan bir gaz olmalıdır. Bu nedenle, küçük atomik boyutları ve ideal gaz olarak davranışı nedeniyle helyum gazı kullanılmaktadır (Balcı, 2011).

3.2.1.2. Tane Boyut Dağılımı

Malzemelerdeki mukavemet ve akışkanlık gibi özellikler, malzemelerin içindeki tane boyu karakteristiklerine bağlıdır. Macun teknolojisinin, geleneksel artık depolama yöntemlerine göre en önemli ayırt edici özelliklerinden birisi karışımın tane boyut dağılımıdır. Macun malzemesi su tutabilmesini ve taneler arasında ayrışma olmadan akışkanlığını sağlayacak miktarda ince boyutlu tane içermelidir. Literatür çalışmaları ve işletme tecrübelerine göre, macun yapımında kullanılacak artık malzemesi en az ağırlıkça %15'inin 20 μm altında olması gerekmektedir. Ayrıca homojen ya da heterojen bir yapıdaki tane boyut dağılımının, malzemenin drenaj, konsolidasyon ve dayanım özelliklerini de etkilediği belirtilmiştir (Benzazoua ve diğ., 2004). Bu çalışma kapsamında artık malzemesinin tane boyut dağılımı lazer partikül boyut analiz cihazı ile ASTM D421 ve D422 standartlarına göre belirlenmiştir.

Bir malzemenin optimum tane boyut dağılımına sahip olup olmadığı literatürde genellikle üniformluk (C_u) ve eğrilik katsayılarına (C_c) göre değerlendirilmektedir. İyi bir tane boyut dağılımına sahip malzemeler için C_u değeri 4-6 ve C_c değeri ise 1-3 arasında değişmektedir (Tablo 3.1). Bu çalışma kapsamında üniformluk ve eğrilik katsayı değerleri Eşitlik 3.2 ve Eşitlik 3.3 kullanılarak hesaplanmıştır (TS 1500; TS 1900-1).

Tablo 3. 1: Tane boyut dağılım türleri (TS EN ISO 14688-2).

Dağılım Türü	C_u	C_c
Çoklu dağılım	> 15	$1 < C_c < 3$
Normal dağılım	6-15	< 1
Uniform dağılım	< 6	< 1
Kesikli dağılım	Genellikle yüksek	Genellikle $< 0,5$

$$C_u = (D_{60}) / (D_{10}) \text{ (üniformluk katsayısı)} \quad [3.2]$$

$$C_c = (D_{30})^2 / ((D_{10}) \times (D_{60})) \text{ (süreklilik ya da eğrilik katsayısı)} \quad [3.3]$$

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

Bu çalışmada, artık malzemenin boyut dağılımı kullanılarak zemin türü belirlenmiştir. Tablo 3.2'de farklı zemin standartlarına ve zemin sınıflama yöntemlerine göre tane boyut karşılıklarına gelen zemin türleri verilmektedir. Türk standardının özellikle silt (0,075 – 0,002 mm) ve kil ($< 0,002$ mm) boyutlarında, Amerika Devlet Karayolu ve Taşımacılık (AASHTO) standartları ile aynı olduğu Tablo 3.2'den görülmektedir.

Tablo 3. 2: Tane boyutlarına göre zemin türleri (ASTM D422, AASHTO T-11 & AASHTO T-27, TS 1500).

Zemin Türü	USCS Sembol	Tane Boyu Oranı (mm)				
		USCS	AASHTO	USDA	MIT	TS
Çakıl	G	76,2 – 4,75	76,2 – 2	> 2	> 2	60 - 2
Kum	S	4,75- 0,075	2 – 0,075	2 – 0,05	2 – 0,06	2 – 0,075
Silt	M	İnce Taneler	0,075 – 0,002	0,05 – 0,002	0,06 – 0,002	0,075 – 0,002
Kil	C	$< 0,075$	$< 0,002$	$< 0,002$	$< 0,002$	$< 0,002$

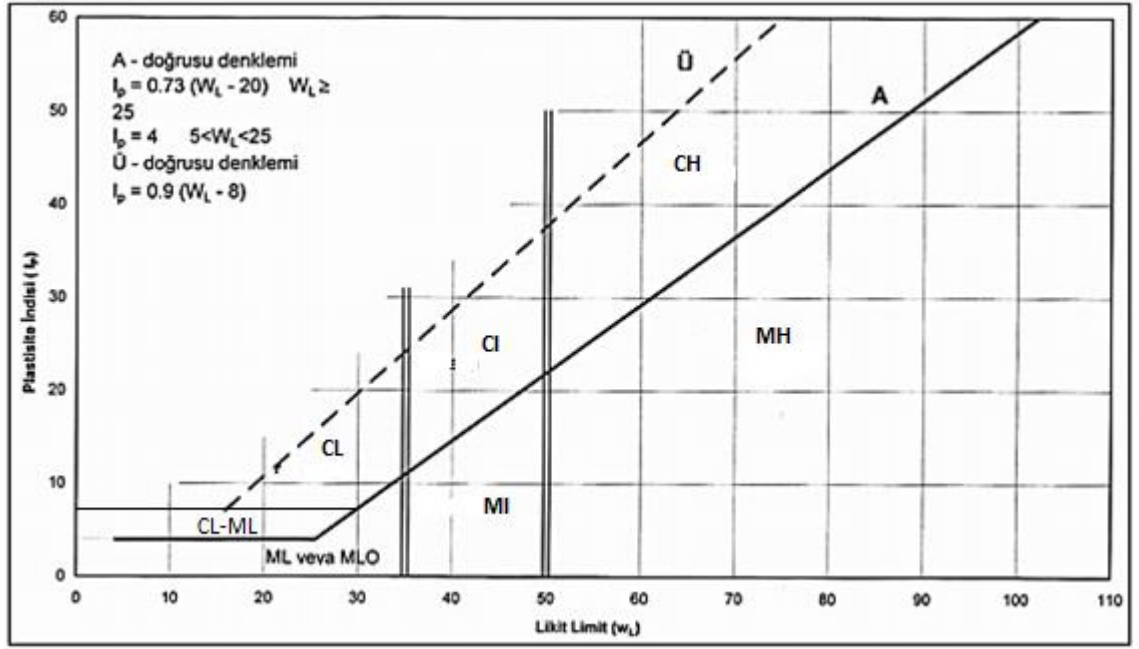
3.2.1.3. Spesifik Yüzey Alanı ve Porozite

Spesifik yüzey alanı, malzemenin belli ağırlığı ve hacmindeki yüzey miktarı olarak tanımlanır ve cm^2/gr veya m^2/kg birimi ile gösterilir. İnce taneli malzemenin tanımlanmasında tane boyutu, tane şekli, serbestleşme boyutu ve özgül yüzey alanı gibi parametreler kullanılmaktadır. Kimyasal zenginleştirme, flotasyon, kurutma, filtrasyon gibi işlemlerde bir ürünün teknolojik durumunu ifade ederken özgül yüzey alanının bilinmesi onun tane boyutunun bilinmesi kadar önemlidir. Bunun nedeni olarak, tanenin

kendisini çevreleyen bir madde ile temas ettiği yüzey alanı ne kadar büyük olursa etkileşim ve tepkime olasılığı da o kadar büyük olmaktadır. Spesifik yüzey alanı değeri, tanelerin iç ve dış yapısına bağlı olarak değişmektedir. Tanelerin gözenekli bir yapıya sahip olması durumunda malzemenin spesifik yüzey alanı ve su tutma kapasitesi artmaktadır. Bu durum, macun malzemenin hacimsel su içeriği ve dayanımını doğrudan etkilemektedir. Tanelerdeki gözeneklilik, malzemenin boşluk durumunu yansıtır ve boşluk hacmi; hava ve sudan oluşur. Malzemedeki boşluk hacminin, tüm hacme oranı ise porozite olarak tanımlanır, n ile gösterilir ve ondalık veya yüzde bir sayı olarak ifade edilir. Porozite, daima 1 (%100)'den küçüktür. Tanelerin kendi ağırlığında ya da dışardan uygulanan bir kuvvet karşısında birbirine yaklaşması ile bu boşluklar azalabilmektedir. Ancak boşluklarda bulunan suyun kaçacak yeri kalmadığı zaman, boşluk suyu basıncını oluşturmakta ve taneleri birbirinden uzaklaştırarak stabilizasyon problemi doğurmaktadır. Bu nedenle spesifik yüzey alanı ve porozite zamanla oluşacak olan konsolidasyonla ve sıkışmalarla doğrudan ilişkilidir. Bu çalışma kapsamında spesifik yüzey alanı ve boşluk hacmini belirlemek için ODTÜ MERLAB'a çok noktalı BET (Brunauer, Emmet ve Teller) analizleri yaptırılmıştır. BET yöntemi, kullanılan (genelde sıvı azot) gaz moleküllerinin ulaşabildiği tüm alanı ölçebilmektedir. Ayrıca yerüstü macun depolama kıvamına uygun olarak hazırlanmış olan malzemenin, porozite değeri ölçülürken kap kullanılarak belirlenmiştir (TS 1900; Ulusoy ve diğ., 2004).

3.2.1.4. Atterberg Kıvam Limitleri

Macun malzeme açısından karışımı oluşturan artık malzemenin kıvam limitleri (sıvılaşma ve büzülme sınır değerleri) macun malzemenin stabilitesini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle çalışma kapsamında da artık malzemenin TS 1900-1 ve TSE CEN ISO TS 17892-12 deney standartına göre likit limit, plastik limit, büzülme limiti, sıvılık indisi (I_L) ve plastisite indisi değerleri belirlenmiştir. Artık malzemenin plastik özellikler taşıyıp taşımadığı plastisite indisiyle gösterilir. Plastisite indisi arttıkça artık malzeme katılaşmaktadır. Şekil 3.7'de gösterilen, birleştirilmiş zemin sınıflama sistemindeki plastisite kartından likit limit ve plastisite indisi okunarak malzemenin sınıflaması yapılmıştır (Önalp, 2004).



Şekil 3. 7: TS 1500/2000 Plastisite Kartı.

Likit Limit (w_L): Malzeme su karışımının plastik halden sıvı hale dönüştüğü su muhtevası olarak tarif edilir.

Plastik Limit (w_p): Su karışımının malzemeye şekil verdiği ve bunu çatlamadan aldığı ve bu şekli değiştirmede en düşük su muhtevası olarak tarif edilmiştir.

Büzülme Limiti (w_s): Malzemenin yarı katıdan katıya dönüştüğü alt su muhtevasına büzülme limiti denilmektedir.

Plastisite İndisi (I_p): Malzeme-su karışımının plastik özellikler taşıdığı su muhtevaları plastisite indisiyle gösterilir (Eşitlik 3.4). Likit limit ve plastik limit bir birine eşit olsa plastisite indisi “0” olur. Bu zeminin sıvı olduğunu gösterir.

$$I_p = w_L - w_p \quad [3.4]$$

Bir zemin örneğinin doğal su içeriğinin kıyaslanmasında kullanılan indis sıvılık (likitlik) indisi (I_L) denir ve Eşitlik 3.5’teki gibi ifade edilir.

$$I_L = \frac{w_n - w_p}{I_p} \quad [3.5]$$

w_n =Doğal su muhtevası olup,

$I_L < 0$ ise; kuruluk ya da kesmeye maruz kaldığında kırılğan bir çatlak oluşması,
 $0 < I_L < 1$ ise; malzemenin plastik gibi davranması,
 $I_L > 1$ ise; malzemenin kesmeye maruz kalması halinde viskoz bir sıvı gibi danranması beklenir (Bowles, 1996; Kayabalı, 2002; Budhu, 2007).

3.2.1.5. Sıkışabilirlik

Malzemenin sıkışabilirliği, içeriğinde su varken taneler arası mesafenin alabileceği optimum yakınlık olarak ifade edilebilir. Bu yaklaşma sonucu birim hacme düşen tane miktarı artarak daha stabil ve su geçirgenliği (permeabilitesi) daha düşük bir malzeme ortaya çıkmaktadır. Sıkışabilirlik, zemin iyileştirmelerinde kullanılan mekanik stabilizasyon veya yoğunlaştırma anlamına gelen kompaksiyon olarak da ifade edilebilir. Kompaksiyon, mekanik enerji uygulamak süratiyle zemin yoğunluğunun artırılması işlemidir. Kompaksiyon eğrilerinde, kuru birim hacim ağırlık değerleri belli bir su içeriğine kadar yükselmekte ve arkasından su içeriği artmasına rağmen düşmektedir. Bunun nedeni olarak, su içeriklerine bağlı olarak partiküller arası su katmanı oluşmasıdır. Bu durum partiküllere bir çeşit yağlama etkisi yaparak onlara hareket kolaylığı sağlar ve daha sıkı şekilde olmayı engeller. Su içeriğinin belli bir noktaya erişmesinden sonra yoğunlukta herhangi bir artış oluşmaz. Bu noktadan sonra partiküllerin yerini su almaya başlar (Bowles, 1996; Kayabalı, 2002; Budhu, 2007).

İnce taneli ve kohezyonlu malzemeler laboratuvarda ağırlık ve tokmak düşürmek süratiyle statik olarak sıkıştırılmaktadırlar. Kohezyonlu malzemelerin sıkıştırılması ile ilgili, R.R. Proctor 1930'ların başlarında Los Angeles Su İşletmeleri için barajlar yaptığı sırada sıkıştırmanın prensiplerini geliştirmiş ve Engineering News Record'da bir dizi makale şeklinde yayınlamıştır (Proctor, 1933; Kayabalı, 2002). Proctor'un geliştirdiği standart laboratuvar sıkıştırma deneyi Proctor Deneyi olarak bilinmektedir. Macun malzeme açısından da karışımı oluşturan artık malzemenin sıkışabilirlik değerleri macun malzemenin stabilitesini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle çalışma kapsamında artıkların optimum su içeriğinin ve maksimum kuru birim hacim ağırlığının tayini için TS-1900-1'e göre Modifiye Proctor Deneyi yapılmıştır. Deneyde 45'cm den serbestçe düşen 4.5 kg'lık bir tokmak kullanılmaktadır. Sıkıştırma üç tabakada, her tabakaya 25 darbede elde edilir.

Sıkıştırılmış malzemenin yaş birim ağırlığı, γ (g/cm³), her numune için Eşitlik 3.6'daki formülden hesaplanır.

$$\gamma = (W_2 - W_1) / V \quad [3.6]$$

Burada;

W_1 : kalıbın ağırlığı, gr

W_2 : kalıbın ve sıkıştırılmış zeminin ağırlığı, gr

V ise kalıbın hacmidir, cm³.

Zeminin kuru birim hacim ağırlığı, γ_k (g/cm²), Eşitlik 3.7'deki formülden hesaplanır.

$$\gamma_k = \frac{100\gamma_{yas}}{100 + w} \quad [3.7]$$

burada, w zeminin su içeriği %, γ_{yas} ise yaş birim ağırlıktır.

Bir seri deney sonucunda elde edilen kuru birim ağırlık (γ_k) ve bunlara karşılık olan su içeriği değerleri, bir grafik kağıdı üzerine işlenir. Elde edilen noktalar arasında düzgün bir eğri geçirilir ve eğri üzerindeki maksimum değer bulunur.

Karşılaştırma amacıyla, aynı grafik üzerine, $V_a = 0$, % 5, % 10 hava boşluğu yüzdeleri gösteren eğriler, Eşitlik 3.8'deki formülün yardımıyla çizilir:

$$\gamma_k = \frac{1 - \frac{V_a}{100}}{\frac{1}{\gamma_s} + \frac{w}{100}} \quad [3.8]$$

Burada; V_a hava boşluğu yüzdesi, γ_s ise özgül ağırlıktır (bağıl yoğunluktur).

Kuru birim hacim ağırlık-su içeriği eğrisinden elde edilen maksimum kuru birim ağırlık t/m³ olarak, 0.01 gr hassasiyetle verilir. Kuru birim hacim ağırlık-su içeriği eğrisinde, maksimum kuru birim ağırlığa karşılık olan su içeriği, optimum su içeriği olarak ve % 5' ten küçük değerler için 0.2 yakınlıkla, % 5 ile % 10 arasındaki değerler için 0.5 yakınlıkla, % 10'dan yüksek, değerler için de en yakın tam sayıya yuvarlatılarak verilir (TS 1900).

3.2.1.6. Geçirimsizlik

Geçirimsizlik, zeminin içerisinde suyun akışını ifade eden bir zemin özelliği olup hız boyutundadır. Geçirimsizlik, akım koşulları yanında suya doymuş zeminlerde yük altındaki oturma miktarını ve şevlerin stabilitesi gibi zeminin mekanik özelliklerini de etkiler. Ayrıca, dolgu baraj tasarımında kullanılan zeminin permeabilitesi, çok büyük önem taşımaktadır. Zemin mekaniğinde önemli bir etkiye sahip olan geçirimsizliği etkileyen başlıca faktörler şunlardır (Önalp, 2002):

- Tane boyutları
- Tane yapısı
- Tane dağılımı (D_{10})
- Boşluk oranı (e)
- Zeminin suya doymuşluk derecesi (S_r)

Artık malzemesinin permeabilite (su geçirgenliği) değeri TSE CEN ISO TS 17892-11 ve ASTM D 5084 standardında belirtilen düşen seviyeli deney yöntemi ile belirlenmiştir. Böylece artık sahasında depolanması düşünülen malzemenin serbest su yüzeyleri karşısında nasıl davranacağı tespit edilmiştir.

Laboratuvarda artık numunesi önce etüvde 24 saat kurutulduktan sonra numunenin optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri için Proktor Kompaksiyon deneyi yapılmıştır. Daha sonra numune maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri ve optimum su muhtevasında sıkıştırılarak permeabilite kabına yerleştirilmiştir. Numune Permeabilite kabına alt ve üstüne filtre kağıdı konularak yerleştirilmiş ve üst kapağı kapatılarak vidaları iyice sıkıştırılmıştır. Kalıp, numuneyle beraber su içine konularak 24 saat doymuş hale gelmesi için bekletilmiş ve 24 saat sonunda doymuş hale gelen numune kalıpla beraber permeabilite düzeneğine yerleştirilmiştir. Kalıp ve düzeneğin bağlantıları yapıldıktan sonra zamana bağlı olarak boru içindeki su değişimleri okunmuştur. Daha sonra elde edilen veriler Eşitlik 3.9 kullanılarak permeabilite katsayısı hesaplanmıştır.

$$k = 2.3 \times a \times L / (A \times t) \times \log(h_2/h_1) \quad [3.9]$$

$$A = \pi D^2 / 4$$

$$a = \pi d^2 / 4$$

k = Permeabilite katsayısı (cm/sn)

a = Cam borunun en kesit alanı (cm²)

L = Numunenin boyu (cm)

A = Numunenin en kesit alanı (cm²)

t = Deney süresi (sn)

h_2 = Cam borudaki son su seviyesi

h_1 = Cam borudaki ilk su seviyesi

D = Permeabilite kalıbının çapı (cm)

d = Cam borunun çapı (cm)

3.2.1.7. Mineralojik Bileşimi

Artık malzeme içeriğindeki asit maden drenajı riski taşıyan minerallerin tespiti için malzemenin mineralojik bileşimi XRD (X-ray difraktometresi) yöntemi ile belirlenmiştir. Deneysel hataları en aza indirmek için deney iki farklı laboratuvarında (İstanbul Üniversitesi İleri Analizler Laboratuvarı'nda (İAL) ve Maden Tetkik Arama (MTA) Müdürlüğü) yaptırılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

3.2.1.8. Elementel Analiz& Asit Potansiyeli

Bu çalışmada artık malzemesinin elementel içeriği duyarlılığı daha yüksek olan ICP-MS yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Böylece artık malzemedeki çevresel açıdan risk oluşturabilecek element ve oranları tespit edilmiştir. Özellikle artık içerisindeki kükürt oranı tespit edilerek modifiye asit baz hesaplama (Acid Base Accounting-ABA) yöntemi ile malzemenin asit potansiyeli (AP) değeri bulunmuştur.

3.2.1.9. Artık Boşluk Suyu Analizi

Zenginleştirme tesisinde kırma ve öğütmeden sonra flotasyon işleminden geçen cevherden geriye %20 PKO oranında artık çamuru kalmaktadır. Bu malzemenin pH, iletkenlik, yoğunluk, bulanıklık, alkalinite, askıda katı madde miktarı, çözünmüş oksijen ve SO₄²⁻ değerleri UV cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Malzemenin ince tane miktarının yüksek olması nedeniyle su tutma kapasitesi yüksektir. Dolayısıyla artık boşluk suyu, macun malzeme oluştururken karışımdaki su oranının büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Bu analiz değerleri ile karışım suyunun macun malzeme üzerindeki AMD oluşturma riski açısından uygunluğu konusunda fikir edinilmiş ve gerektiği durumlarda karışım suyu oranları arttırılmıştır.

3.2.2. Macun Malzemenin Hazırlanması

Bu tez çalışmasında kullanılan macun malzeme, Kurşun-Çinko proses artıklarının tesiste kullanılan su ile karıştırılmasından elde edilmiştir. Macun malzeme hazırlanırken bağlayıcı malzemenin macun malzeme karışımlarına etkisinin araştırılması amacıyla bazı konfigürasyonlarda bağlayıcı olarak TS EN 197-1 standardına uygun olarak üretilen CEM I 42.5 Portland Çimentosu (PÇ) kullanılmıştır. Çimentonun özellikleri EK-IV'te verilmiştir. Bu bölümde 3 farklı kabin konfigürasyonundaki macun tabakalarının 25 cm'lik slump değeri baz alınarak yapılan hazırlık aşamaları verilmiştir.

Bu çalışma kapsamında katı-su oranı ilişkisi 25 cm slump değerine göre belirlenmektedir. Ayrıca bağlayıcısız ve ~%2 çimento bağlayıcısı katılarak hazırlanan karışımlarda katı-su oranı belirlenmeye çalışılmıştır. Slump testinde deney sırasında oluşabilecek hata oranı, deneyi yapan kişilerin dikkatine ve malzeme yapısına doğrudan bağlıdır. Aynı orandaki karışımların birbirine yakın sonuçlar göstermesi, malzemenin homojen bir yapı sergilediğinin kanıtı olarak algılanabilir.

TS EN 12350-2 standardına göre slump (çökme) deneyi ile hazırlanan bağlayıcısız ve bağlayıcılı macun karışım malzemesinin katı-su içeriği ya da reçetesi her döküm öncesi karışımdan numune alınarak su içeriği analizi yapmak suretiyle belirlenmiştir. Macun malzeme oluşturulmadan önce varil içinde çökmüş malzemenin slump değeri yaklaşık 5-8 cm aralığında değiştiği tespit edilmiştir. Yerüstü macun malzeme özellikleri açısından literatürde kabul edilen 25 cm slump değerini veren PKO, yapılan ön slump deneyleri ile belirlenmiştir. Buna göre farklı su içeriklerinde hazırlanan macun malzeme üzerinde slump testleri yapılmıştır ve aşağıdaki ilk karışım sonuçları bulunmuştur.

- 34200 gr atık malzemesine 3420 gr (ağırlıkça %10) tesis suyu eklenerek 28 cm slump değeri,
- 30000 gr atık malzemesine 2400 gr (ağırlıkça %8) tesis suyu eklenerek 26,5 cm slump değeri,
- 30000 gr atık malzemesine 1800 gr (ağırlıkça %6) tesis suyu eklenerek 25 cm slump değeri yakalanmıştır. Bu oranda birkaç kez daha slump deneyi yapılarak elde edilen sonuçların 24.5-25.5 arasında değiştiği belirlenmiş ve her bir bağlayıcısız macun malzeme hazırlanmasında bu oran temel alınmıştır.

Daha sonra, bağlayıcısız macun malzeme tabakaları, kısaca aşağıdaki adımları takip ederek oluşturulmuştur:

- Varillerin üst kısımlarında biriken tesis (proses) suları ayrı bir kaba alınır,
- Varil içerisinde kalan malzeme temiz bir alana dökülerek kürek yardımı ile yaklaşık 10 dk kadar karıştırılır,
- Numune ve varilin üst kısmından alınan tesis suyu hazırlanan karışım reçetesine uygun olarak tartılır,
- Numune bir beton mikserine döküldükten sonra 5 dk mikserde karıştırılır,
- Tesis suyu mikser içerisindeki malzemeye yavaş bir şekilde eklendikten sonra yeniden 5 dk mikser karıştırılır (Şekil 3.8),
- Mikserde oluşturulan malzeme slump deneyine tabi tutulur (Şekil 3.9),
- Deney sonucu 25 cm slump değeri yakalanmışsa, macun malzeme deney kabinlerine dökülür,
- Eğer 25 cm slump değeri yakalanamamış ise başa dönülerek yeni bir karışımda tesis suyu azaltılarak ya da artırılarak yeni numunelerle slump kriteri oluşturulana kadar slump deneyi tekrar edilir ve karışım oranları revize edilir.



Şekil 3. 8: Beton mikserindeki macun malzeme görünümü.



Şekil 3. 9: 25 cm slump değerindeki macun malzeme.

Çimentolu tabakalarda macun karışımındaki katı oranının yaklaşık %2'si kadar bağlayıcı katılmaktadır. Bu bağlamda 2'inci ve 3'üncü kabinde yer alan çimentolu tabakaların hazırlanışı için aşağıdaki adımlar takip edilmiştir.

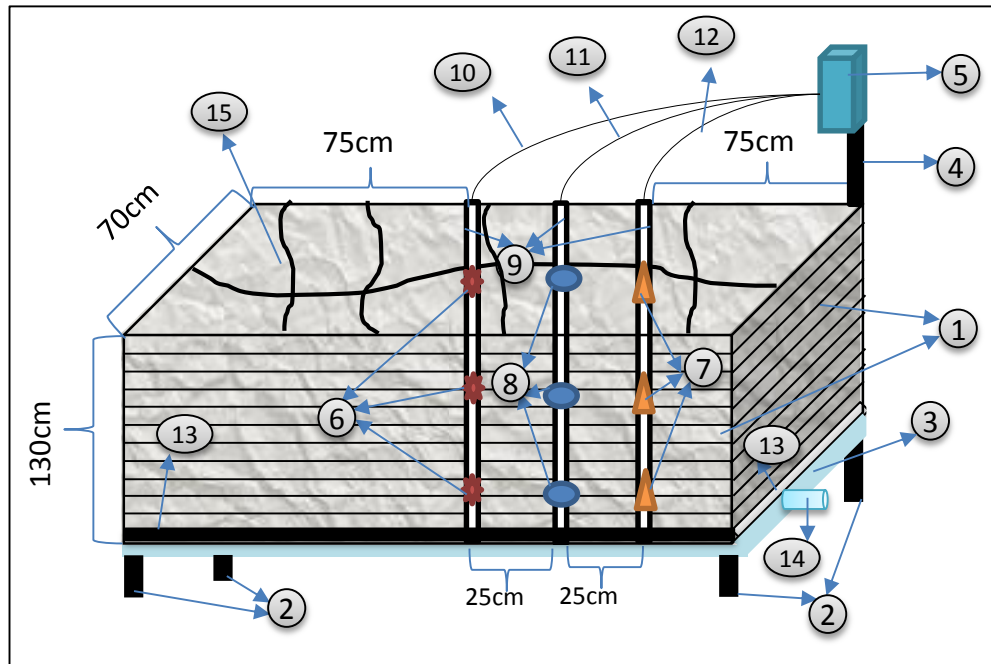
- Varil içerisindeki proses atığının su içeriği (yaş/kuru) 1'inci kabin testlerine göre yaklaşık olarak %32 (~%75 PKO) olduğu belirlenmiş ve bu değer üzerinden karışım oranları verilmiştir.
- Varilden alınan atık numunesine çimento ve tesis suyu ilave edilerek mikserde daha önce belirtilen süreler dahilinde karıştırılmıştır.
- Çimentolu macun malzeme, slump değerine (25 cm) uygun olarak bağlayıcılı her bir tabaka için hazırlanmış ve kovalar yardımı ile kabinlere dökülmüştür.

Macun karışımında kullanılacak malzemelerin özellikleri belirlendikten sonra, bu çalışma kapsamında macun malzeme için ağırlıkça püplte katı oranı %65-75 arasında olacak şekilde karışımlar hazırlanmıştır. Macun malzemesinin bileşenleri olan proses artık malzemesi ve su, boru nakliyatı için uygun homojen bir karışım elde edilecek şekilde karıştırılmıştır. Numunelerin hazırlanma sıcaklığı 22 ± 3 °C 'dir. Bu karışımın uzak mesafelere pompalanabilmesi için yerüstü macun depolamada kabul edilen 25 cm slump değerinde olması için slump deneyleri yapılmış ve en uygun PKO değeri belirlenmiştir.

3.2.3. Optimum Depolama Tasarımının Belirlenmesi

Macun malzemenin laboratuvar ortamında depolama koşullarının simüle edilebilmesi amacıyla yapılan çalışmalar, döküm süreci, ıslanma-kuruma süreci ve macun malzemenin jeomekanik testleri (kesme dayanımı ve oturma oranı) olarak üç aşamada tamamlanmıştır. Buna göre toplam 11 tabaka için depolama süreci 88 gün, ıslanma kuruma süreci ise 232 gün sürmüştür ve sonra toplamda 320 gün kabinde kalan macun malzemenin kesme dayanımı ve oturma oranının belirlenmesi amacıyla kabinden numuneler alınıp deneyler yapılmıştır.

Bu çalışma kapsamında, macun artık malzemesi davranışlarının tam olarak anlaşılabilmesi için, macun artık malzemesinin yerüstünde depolanmasını simüle etmemize izin verecek laboratuvar tipi deneysel macun artık kabini tasarlanmıştır. Şekil 3.10’da tasarlanan deney kabini verilmektedir. Ayrıca bu çalışma kapsamında kullanılan laboratuvar ölçekli deney kabini ve uygulama metodu için patent başvurusunda bulunulmuştur (TPE, 2015/11883; TPE, 2015/11880).



Şekil 3. 10: Artık depolama deney kabini (TPE, 2015/11883)

Şekil 3.10’da deney kabini test sistemi verilmektedir. Şekildeki parçalar numaralandırılmış olup, karşılıkları aşağıda gösterilmiştir:

1. Gövde: Macun malzeme davranışını gözlemlememizi sağlayan şeffaf ve dayanıklı pleksiglas malzemeden yapılmış gövde.

2. Taşıyıcı Ayaklar: Maksimum 6 t malzemeyi taşıyacak kapasitede taşıyıcı ayaklar.

3. Sızıntı Suyu Toplama Haznesi: Macun malzeme sızıntı suyunun kabindeki oluk ve kanalların yardımıyla belli bir yere toplanmasını sağlayacak alt tabla.

4. Veri Kaydedici (Data Logger) Taşıyıcı Ekipmanı: Kabin üzerinde monte edilmiş veri kaydedici taşıyıcı ekipman.

5. Veri Kaydedici (Data Logger): Sensörlerden anlık olarak alınan verilerin kaydedilmesini sağlayan veri kaydedici.

6. Oksijen Sensörleri: Macun malzemedeki Asit Maden Drenajı (AMD) oluşumunu başlatan oksijenin miktarını anlık olarak devamlı ölçülebilmesi amacıyla kullanılan sensörler.

7. Su Emme Potansiyeli Sensörleri: Macun malzemeyi oluşturan tabakaların su emme potansiyellerinin anlık olarak devamlı ölçülmesi amacıyla kullanılan sensörler. Malzemenin su emme potansiyelinin yüksek olması ortamdan alacağı su miktarını arttıracak ve üstündeki tabakaların daha çabuk kurummasına yol açacaktır. Böylece macun malzemedeki çatlak oluşumu miktarı artacak ve içeriye oksijen girişi hızlanacaktır. Bu nedenle macun malzemenin su emme potansiyellerinin bilinmesi önem arz etmektedir.

8. Hacimsel Su İçeriği ve Sıcaklık Sensörleri: Macun malzemenin hacimsel su içeriği ve sıcaklık değerlerinin anlık olarak devamlı ölçülmesi amacıyla kullanılan sensörler. Bu sensörler çevresindeki ortamın dielektrik geçirgenliğini kullanarak malzemenin nem ve sıcaklık değerini ölçer. Macun malzemenin su içeriğinin belirlenmesi AMD oluşumu ve dayanım özellikleri açısından büyük önem arz etmektedir.

9. Ölçüm Sensörleri Taşıyıcı Yuvalar: Ölçüm sensörlerinin yüksekliklerinin ayarlanabilmesini ve veri kaydediciyle bağlantılı olan kablolarının malzeme içerisinde olmamasını sağlayan yuvalar. Böylece sensörler istenilen tabakalara yerleştirilebilmekte ve ayrıca kolayca sökülüp takılabilmektedir.

10. Oksijen Sensörleri Veri Kabloları:

11. Hacimsel Su İçeriği ve Sıcaklık Sensörleri Veri Kabloları:

12. Su Emme Potansiyeli Sensörleri Veri Kabloları:

13. Jeotekstil Filtre: İnce boyutta olan artık malzeme kaybının önlenmesi amacıyla kullanılan jeotekstil filtreler.

14.Sızıntı Suyu Toplama Musluğu: Gerek ıslanma-kuruma döngülerinde gerekse macun malzemenin her tabaka dökümünde ortamda oluşacak sızıntı sularının toplanması amacıyla kullanılan sızıntı suyu toplama musluğu. Böylece sızıntı sularının miktarları ve kimyasal özellikleri belirlenebilir.

15.Macun Malzeme: Toplam 11 tabaka şeklinde deney kabini içerisine depolanan macun malzeme.

Bu tasarım ile artık malzemesinin macun formunda yerüstünde depolanma koşulları hızlı, kolay ve az bir maliyetle laboratuvar ortamında simüle edilebilecektir. Böylece farklı bağlayıcı içerikleri, farklı iklim koşulları ve farklı depolama konfigürasyonlarının macun malzeme davranışları üzerindeki etkileri laboratuvar ortamında kolayca gözlemlenebilecek, dolayısıyla saha uygulamasına geçilmeden önce en uygun tasarım koşulları belirlenebilecektir.

Bu tasarımda tasarlanan deney kabini içerisinde macun malzeme tabaka tabaka şeklinde depolanmalı ve bu tabakalar oluşturulurken, bir önceki tabaka kür süresinin tamamlanması ve stabilitesini kazanması amacıyla ortamın sıcaklık ve nem değerlerine bağlı olarak beklendikten sonra diğer tabakalar dökülmelidir. Kabin yüksekliği belirlenirken, kabinin içerisine dökülecek macun malzeme tabaka kalınlığı (maksimum 10 cm) ve tabaka sayısı (maksimum 11 adet) dikkate alınmış ve kabin yüksekliği güvenlik payının da bırakılmasıyla beraber 130 cm olarak tasarlanmıştır. Macun malzemenin oksijen, su emme potansiyeli, su içeriği ve sıcaklık değerlerinin anlık olarak ölçülebilmesi amacıyla kabin içerisine ölçüm sensörleri yerleştirilmiştir. Ölçüm sensörlerinin kabin içerisinde istenilen yüksekliklere monte edilebilmesi amacıyla sensör yuvaları yapılmıştır. Böylece sensörler istenilen tabakalara yerleştirilebilmektedir. Her ölçüm sensöründen toplam 3'er adet yerleştirilmiş ve sensörler kolayca sökülüp takılabilen bir sistem üzerine oturtulmuştur. Ayrıca iklim koşullarının simule edilmesi amacıyla macun malzemenin depolanması sonrasında ıslanma-kuruma döngüleri yapılmalıdır.

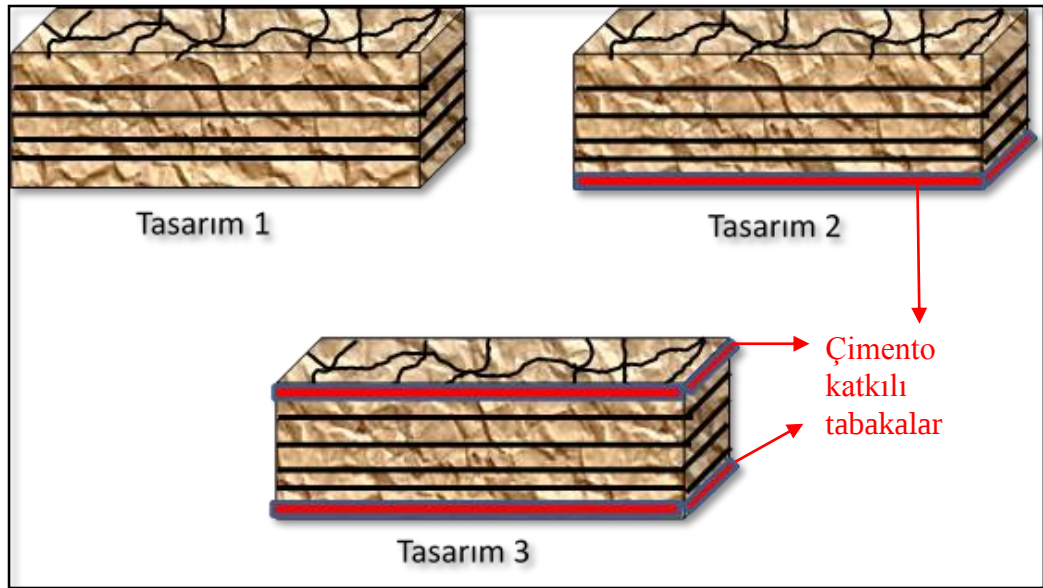
Deney kabininde depolanan macun malzemenin en üstteki tabakası kuruduktan sonra depolanma yerindeki iklimsel koşullar dikkate alınarak ıslanma-kuruma döngüleri gerçekleştirilmelidir. Böylece macun malzemenin iklimsel değişimlerden nasıl

etkileneyeceği laboratuvar ortamında gözlemlenebilir. Bu kapsamda bölgeye ait mevsimsel ortalama yıllık sıcaklık ve yağış verileri kullanılarak, macun malzeme üzerinde belirli periyotlarda ıslanma – kuruma döngüleri yapılmalıdır.

Herbir macun tabakasının dökümü veya ıslanma-kuruma döngülerini takiben tabakalardan sızan sular kabinin alt kısmında bulunan drenaj olukları yardımıyla toplanmalı, pH, Eh, ve Ec değerleri ölçümü yapılmalıdır. Böylece sızıntı suyundaki ağır metal hareketliliği ve AMD oluşumu hakkında bilgi edinilecektir. Bununla beraber, bu suların çevresel açıdan bir risk oluşturup oluşturmadığı belirlenecek ve doğal ortamda oluşacak olan yağmur sularının tabakalardan sızması halinde meydana gelebilecek durum laboratuvar ortamında simüle edilebilecektir. Ayrıca gerek ıslanma-kuruma döngülerinde gerekse macun malzemenin her tabaka dökümünde ortamda oluşacak sızıntı suyu miktarları zamana bağlı olarak da belirlenebilecektir.

3.2.3.1. Tabaka Döküm Süreci

Bu çalışma kapsamında öncelikle bütün tabakaları bağlayıcısız olan Tasarım 1 (referans kabini), sonrasında ise bazı tabakaları çimento bağlayıcılı (katı içeriğinin ağırlıkça $\leq$ %2'si kadar) olan Tasarım 2 ve Tasarım 3 depolama tasarımları gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.11).



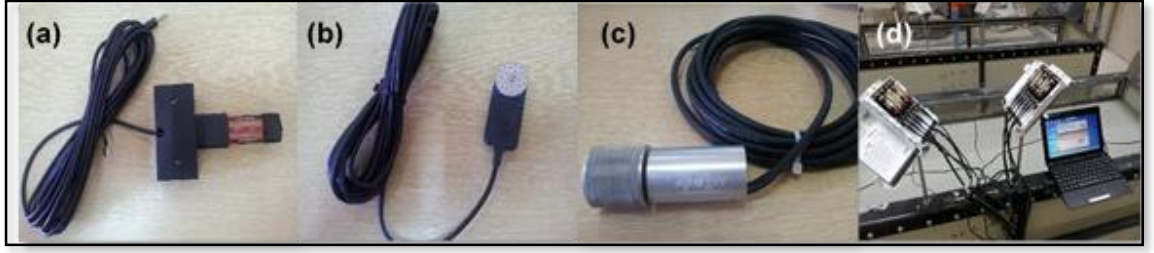
Şekil 3. 11: Farklı konfigürasyonların yer aldığı test kabin tasarımları.

Tasarım 1, tamamen bağlayıcısız macun artık malzemesinden oluşan tabaka tabaka doldurulmuş olan deney kabinidir. Bu deney kabini farklı konfigürasyonların denendiği diğer deney kabinleri için bir kontrol örneğidir. Dolayısıyla bu kabine “referans kabini”de denilebilir.

Tasarım 2’nin sadece en alt tabakası (1. tabaka) bağlayıcılı macun artık malzemesinden ve üstünde yer alan diğer tabakalar ise bağlayıcısız macun artık malzemedan oluşmaktadır. Birinci tabakadaki çimento yapısı ile alkali bir ortam oluşturularak, boşluk suyu pH değerinin yüksek tutulması ve asit oluşumu ya da metal mobilizasyonunun önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Bununla birlikte çimentolu yapının diğer parametreler üzerinde de etkili olduğu deney sırasında gözlemlenmiştir. Bu durum bulgular bölümünde detaylı olarak incelenmektedir. Aynı zamanda bağlayıcı olarak kullanılan malzemenin taneler arasındaki bağı güçlendirerek en alt tabakaya binecek fazla yükler karşısında macunun stabilitesi arttırılmıştır.

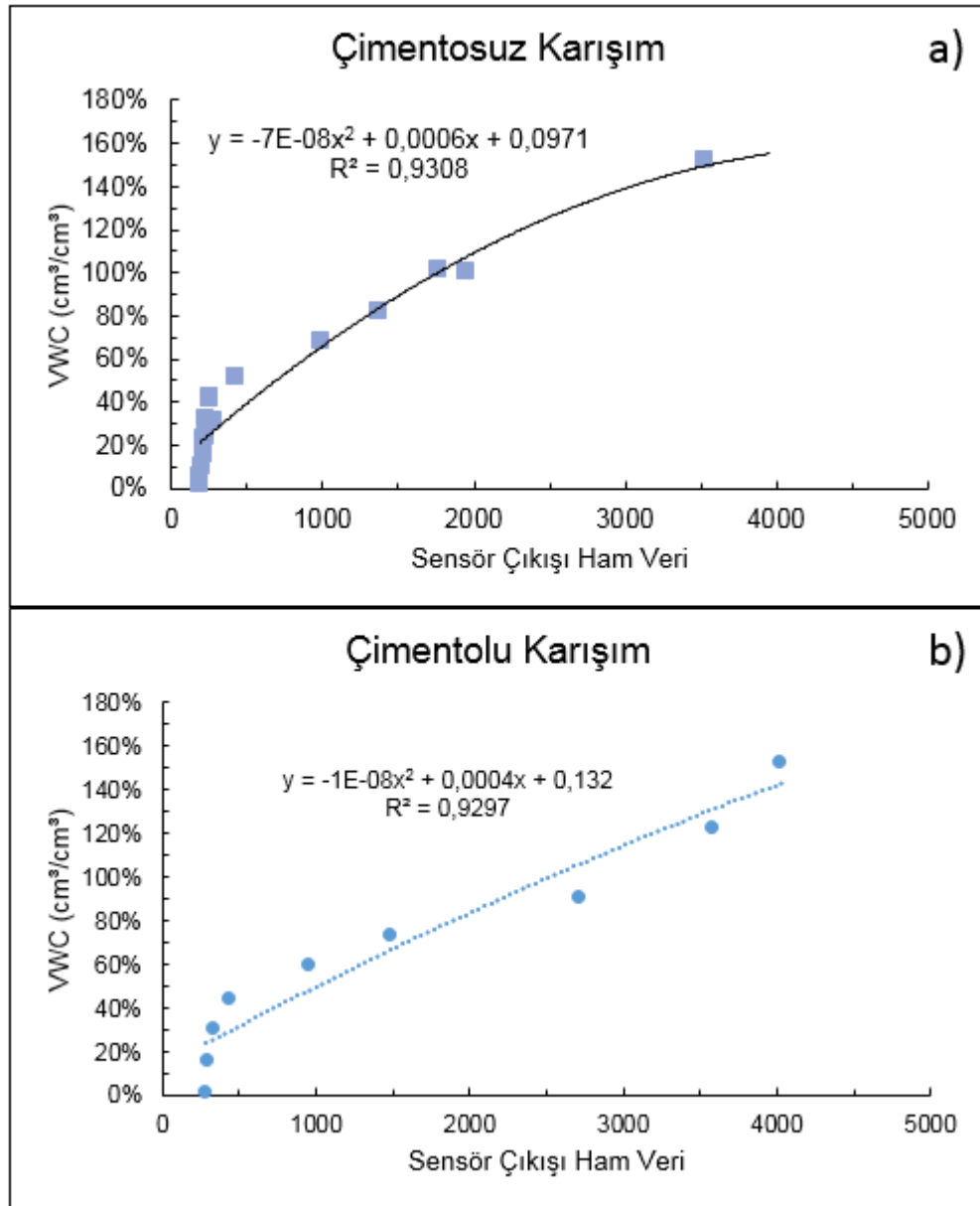
Tasarım 3’ün 1. ve 11. tabakaları bağlayıcılı macun malzeme ve arada kalan diğer tabakalar ise bağlayıcısız macun malzeme olarak dökülmüştür. Böylece depolanan sahanın en üst tabakasının stabilitesi daha fazla arttırılarak maden kapandıktan sonra yapılacak olan reklamasyon çalışmalarına yardımcı olabileceği düşünülmüştür. Ayrıca serbest yüzey sularının temas edeceği en üst tabakadaki yüksek pH değeri AMD riskinin azaltılmasına katkı sağlayacağı düşünülmüştür.

Tasarlanan bu deney kabinleri içerisinde macun malzeme tabaka tabaka şeklinde depolanmıştır. Kabinlerin içine dökülen macun malzemenin tabaka yüksekliği, macunun arazide yayılım genişliği ve literatürde yapılan çalışmalar dikkate alınarak her bir tabaka için 4 cm olacak şekilde belirlenmiştir (Benzaazoua ve diğ., 2004; Dechamps ve diğ., 2008 ve 2011). Kabin içerisinde toplam 11 adet tabaka üst üste gelecek şekilde depolanması planlanmış ve bu tabakalar oluşturulurken, bir önceki tabaka kür süresinin tamamlanması ve stabilitesini kazanması amacıyla hacimsel su içeriği kaybının gerçekleşmediği zamana kadar beklenmiştir. Ayrıca her bir kabinin 1., 5. ve 10. tabakalarına hacimsel su içeriği, kılcal emme basıncı ve oksijen içeriği değerlerini saptayan 3 farklı sensör yerleştirilmiştir. Bu sensör türleri ve yardımcı ekipmanları şöyledir (Şekil 3.12);



Şekil 3. 12: Hacimsel su içeriği (a), kılcal emme basıncı (b), oksijen içeriği (c) sensörleri ve veri kaydedici (d).

Hacimsel su içeriği sensörü (%): Macun malzeme içerisinde su miktarının belirlenmesi ve buna bağlı olarak malzemenin doygunluk derecesinin hesaplanması amacıyla bu çalışmada Decagon 5TM hacimsel su içeriği sensörü kullanılmıştır (Şekil 3.12a). Doymunluk derecesi %100'den büyük olan macun malzemelere oksijen difüzyonu gerçekleşmemekte ve asit maden drenajının önüne geçilebilmektedir. Ancak macun malzemelerin doymun olması beraberinde stabilizasyon problemlerine neden olabilmektedir. 5TM, kapasitans/frekans teknolojisi kullanır ve toprak veya diğer malzemelerin dielektrik sabitini ölçerek hacimsel su içeriğini (VWC) belirler. Çoğu toprakta ve topraksız malzemelerde, sinyal filtreleme ile tuzluluk ve dokusal etkileri minimize eder ve ölçümleri daha hassas yapar. Fabrika kalibrasyonlarına mineralli topraklar, saksı toprakları, kaya yünü ve perlit dahildir. Ancak bu tez çalışmasında Pb-Zn artıklarından oluşan macun malzemenin bağlayıcısız ve bağlayıcı olmak üzere 2 türü için ayrı ayrı kalibrasyon yapılmıştır (Şekil 3.13). Bu kalibrasyonlardan elde edilen denklemler, sensörden alınan ham verilere uygulanarak çevrilmiş ve sonuçlara yansıtılmıştır (Decagon Devices, 2015).



Şekil 3. 13: Hacimsel su içeriği sensörünün çimentosuz (a) ve çimentolu (b) karışımlar için kalibrasyon eğrileri.

Kılcal emme basıncı sensörü (kPa): Zeminin toplam emme basıncının, kılcal emme (matrik emme) ve osmotik emme (eriyik emme) olarak isimlendirilen iki bileşenden oluştuğu varsayılabilir (Eşitlik 3.10):

$$\psi = (u_a - u_w) + \Pi \quad [3.10]$$

Burada;

ψ = Zeminin toplam emme basıncı (kPa)

$(u_a - u_w)$ = kılcal emmeyi,

Π = osmotik emmeyi göstermektedir.

Buharlaşıma olmadan, zemin içindeki boşluk suyunu çıkartmak için gerekli olan enerjiye, kılcal emme gerilmesi denilmekte ve $(u_a - u_w)$ olarak gösterilmektedir. Burada, u_a hava basıncı, u_w negatif boşluk suyu basıncıdır. Osmotik basınç, boşluk suyu içindeki eriyik tuzların saf su ile olan osmotik basınç farkı olarak tarif edilmektedir. Zeminin toplam emmesini, osmotik basınç baskın olmadığı zaman tanımlamak daha kolay olmaktadır. Çözünmüş tuz miktarının az olduğu durumlarda osmotik basınç ihmal edilmektedir (Önalp, 2002; Tekinsoy, 2002; Kayadelen, 2005).

Kılcal emme gerilmesi, zeminlerin su ile temasa geçtiğinde boşluklardan suyun yükselmesi olarak bilinen kapilarite olayı ile tanımlanmaktadır. Su, herhangi bir katı ile temasa geçtiğinde, yüzey gerilim kuvvetlerinin etkisi ile temas noktalarında bir serbest enerji açığa çıkarır. Bu serbest enerji, Şekil 3.14’de gösterildiği gibi suyun kapiler olarak yükselmesine neden olur. Suyun kapiler olarak yükselmesi şekilde gösterildiği gibi modellenmektedir (Fredlund ve Rahardjo, 1993). Atmosfer koşullarında, cam tüp içinde yüzey geriliminden dolayı yukarı hareket eden su kütlelerini dengede tutan kuvvetler eşitlenerek Eşitlik 3.11 yazılmaktadır (Kayadelen, 2005).

$$2\pi r T_s \cos \alpha = \pi r^2 h_c \rho g \quad [3.11]$$

r = kapiler tüpün yarı çapı (m)

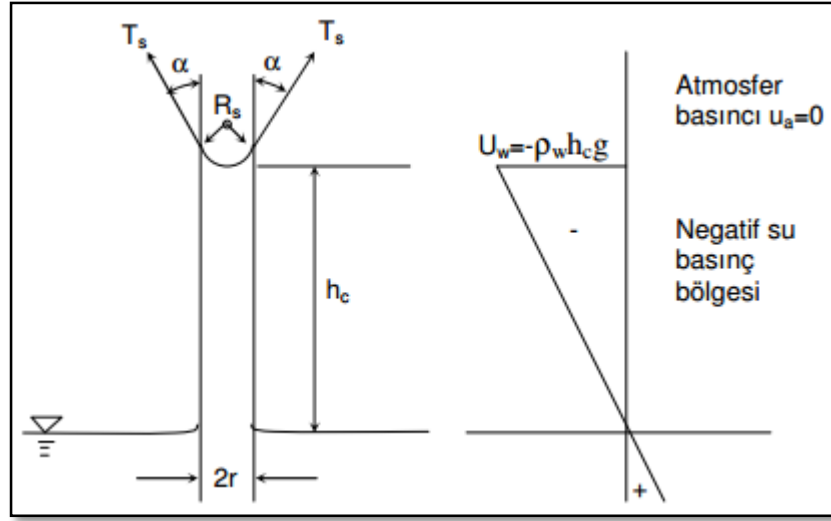
T_s = suyun yüzey gerilimi (N/m)

α = değme açısı veya temas açısı ($^\circ$)

h_c = kapiler yükseklik (m)

g = yerçekimi ivmesi ($9,81 \text{ m/s}^2$),

ρ = yoğunluk (g/cm^3).



Şekil 3. 14: Kapiler su yükselmesinin fiziksel modellenmesi (Fredlund ve Rahardjo, 1993; Kayadelen, 2005).

Eşitlik 3.11 düzenlediğinde tüp içindeki suyun yükseleceği maksimum yükseklik Eşitlik 3.12’den bulunur (Kayadelen, 2005).

$$h_c = \frac{2T_s}{\rho_w g R_s} \quad [3.12]$$

R_s = tüp içindeki suyun yaptığı menüsküs yarıçapı ($r/\cos\alpha$),

Öte yandan kılcal emme gerilmesi yüzey gerilimi cinsinden, Eşitlik 3.13’deki gibi verilmektedir (Fredlund ve Rahardjo, 1993; Kayadelen, 2005).

$$(u_a - u_w) = \frac{2T_s}{R_s} \quad [3.13]$$

Bu Eşitlikteki R_s , değme açısının (α) sıfır olduğu bir zeminin gözenek yarıçapı olarak kabul edilmektedir. Eşitlik 3.13’e göre, gözenek yarıçapı küçük olan zeminlerin emme gerilmesi daha büyük olmaktadır (Kayadelen, 2005).

Macun malzeme tabakalarında oluşan kılcal emme basıncı, çatlakların oluşmasına ve genişlemesine yardımcı olmaktadır. Dolayısıyla bu çatlaklar nedeniyle macun malzemelerin yapısında stabilizasyon problemleri gerçekleşmektedir. Bu nedenle çalışma

kapsamında malzemelerin kılcal emme basıncını ölçmek amacıyla MPS-1 kılcal emme sensörü kullanılmıştır. Mühendislikte daha çok zemin su potansiyelinden ziyade zeminin su emişi kullanılır. Zemin su potansiyeli, zemin su emişinin negatifi olup genel olarak bu sensörde kavram olarak bu kullanılır. Düşük enerji gereksinimi bu sensörün kalıcı bir şekilde zemine gömülmesine ve datalogger veya manuel olarak periyodik şekilde bilgi sağlaması açısından verimlidir. Ölçüm aralığı -10 ve -500 kPa arasında olup kalibrasyon gerekmemektedir (Şekil 3.12b).

Zemin içindeki suyun durumunu betimleyen iki basit teori vardır: Biri zemin su içeriği ya da birim zemindeki su miktarı, diğeri ise zemin su potansiyeli ya da zemindeki suyun enerji durumudur. Zemindeki su dengesini açıklarken su muhtevası önemli bir yer kaplamasına rağmen, suyun ne kadarının içeri veya dışarı hareket ettiğini ya da ne kadarının depolandığını hesaplamak için su potansiyelini kullanmak, su muhtevasını kullanmaktan daha çok tercih edilir. Bu durum zeminde veya zeminden başka bir ortamda suyun nasıl hareket ettiğini görmek açısından avantaj sağlar. Ayrıca su potansiyeli, zeminin suya müsait olma durumunu ve zemin gerilimini ölçmekte kullanılabilir (Decagon Devices, 2015).

MPS-1 sensörü katı kalıbın su potansiyelini ölçmek için elektrik geçirgenliği özelliğini kullanır. Havanın, katı seramiğin ve suyun elektrik geçirgenliği sırasıyla 1, 5 ve 80'dir. Yani bu demektir ki gözenekli seramik disklerin elektrik geçirgenliği su miktarına büyük ölçüde bağlıdır. Böylece seramik disklerin elektrik geçirgenliğini ölçerek geniş aralıktaki su içeriklerinin hesaplanabileceği sonucuna da ulaşılabilir (Decagon Devices, 2015).

Oksijen içeriği (%): Macun malzemede AMD'yi oluşturan parametrelerden biri olan oksijen değerinin ölçülmesi için Apogee SO-100&200 galvanik hücre tipinde bir oksijen sensörü kullanılmıştır (Şekil 3.12c). Bu sensörde kurşun anot, altın katot, asit elektrolit ve bir flor reçinesi membran bulunur. Oksijen konsantrasyonunun ölçümü, elektrodlar arasındaki akım akışının oranıdır. Bir iç köprü direnci, O₂'ye doğru orantılı bir mV çıkış değeri sağlamak için kullanılır. Polarografik oksijen sensörleri aksine, galvanik bir güç kaynağına gerek yoktur. mV çıkışı havadaki oksijenin kısmi basıncına cevap vermektedir (Apogee Instruments Inc., 2013).

Malzeme içerisinde ölçülen milivolt (mV) değeri yüzdece O₂'ye çevrilir. Sensörden alınan ham veri sonuçlarından 2,5 mV çıkarılarak düzeltme uygulanır. Daha sonra atmosferdeki oksijen konsantrasyonumuz olan % 20,95 baz alınarak mV olarak okunan değer %O₂'ye dönüştürülmesi Eşitlik 3.14'teki denklemden yararlanılarak hesaplanmıştır. Örneğin, açık havada ölçülen sensör değeri (A) 52,7 mV, macun malzeme içindeyken alınan anlık sensör okuması (B) yaklaşık 50 mV ise,

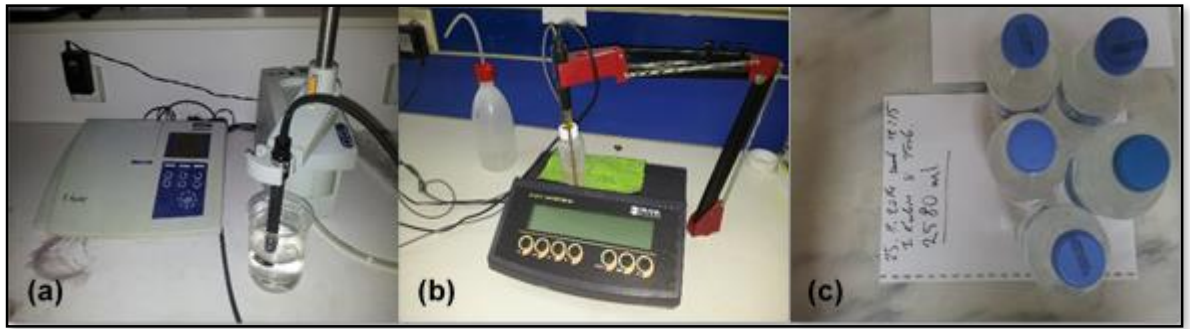
$$= (20,95/(A-2,5)) \times B - (20,95/(A-2,5)) \times 2,5 \quad [3.14]$$

$$= (20,95/(52,7-2,5)) \times 50 - (20,95/(52,7-2,5)) \times 2,5$$

$$= \%19,82 \text{ O}_2 \text{ olarak bulunur.}$$

Veri kaydedici: Decagon Em50 veri kaydedici ile dakikalık olarak kaydedilen ölçümler kullanılmıştır. Veri kaydedicinin 5 sensör ve 1 tane bilgisayar bağlantı noktası bulunmaktadır. Ayrıca 36000 veri kapasitesi olup 26 gün boyunca dakikalık olarak verileri kaydetme özelliğine sahiptir. 5 adet AA türü piller ile uzun bir süre çalışmaktadır (Şekil 3.12d).

Sızıntı suyu analizi: Depolanan macun malzeme içerisinde süzülerek drene olan sular, kabinin alt bölgesinde bulunan çıkıştan toplanmıştır. Bu sızıntı suları dönemsel olarak gruplandırılıp etiketlenerek miktarları, pH ve Ec değerleri ölçülmüştür (Şekil 3.15).

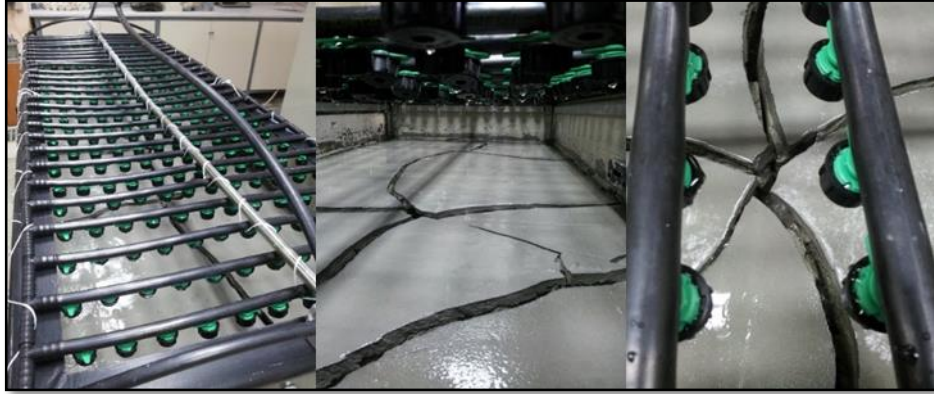


Şekil 3. 15: Sızıntı suyu örneklerinin Ec (a) ve pH (b) cihazları ile ölçümü.

Çatlak analizi: Bu çalışma kapsamında macun artık malzemesinin yüzey çatlak analizi de yapılmıştır. Buna göre ImageJ 1.47v paket programı kullanılarak her bir tabakanın 8. gün çatlak yoğunluğu değeri belirlenmiştir.

3.2.3.2. Islanma-Kuruma Süreci

Kabinde depolanan macun malzeme tabakalarının kuruyup optimum hacimsel su içeriğinde stabil kalmasından sonra, Meteoroloji Genel Müdürlüğünden elde edilen bölgeye ait yıllık yağış verileri kullanılarak numunenin getirildiği bölgenin yağış rejimi test kabinine göre hesaplanıp simule edilmiştir. Alınan veriler içerisinde maksimum değerler ile risk analizi oluşturulurken, ortalama değerler ile ıslama-kuruma döngüsel testleri yapılmıştır. Toplam 232 gün süren ıslanma-kuruma sürecinde, ilk olarak malzemenin optimum su içeriği değerine ulaşması için 117 gün kuruma sürecine bırakılmış, daha sonra bölgesel risk analizi için bölgede oluşabilecek son 50 yılın en yüksek günlük yağış miktarı baz alınarak belirlenen su miktarı, 24 saat içerisinde saatlik periyotlar halinde kabin içerisindeki macun malzeme üzerine damlama yöntemi ile uygulanmıştır (Şekil 3.16).



Şekil 3. 16: Yağmurlama (damlama) sistemi.

Daha sonra hacimsel su içeriğinin stabil kaldığı zamana kadar beklenmiştir. Kuruma süresini takiben, bölgeye ait ortalama günlük yağış miktarları baz alınarak belirlenen su miktarları 8 günlük periyotlarda 4 kez uygulanmıştır. Depolama sürecinde yapılan su içeriği, kılcal emme basıncı, oksijen içeriği, sızıntı suyu ölçümleri ve çatlak analizleri ıslanma-kuruma döngüsel testleri süresince de yapılmıştır. Tablo 3.3'te görüldüğü üzere ıslanma-kuruma süreci boyunca, bölgesel risk analizi için 24 saat boyunca saatlik periyotlarla bütün kabin alanına uygulanan toplam yağış miktarı 180 L, 8 günlük periyotlarda 4 kez uygulanan ortalama yağış miktarları ise 35 L olarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3. 3: Islanma-kuruma süreci boyunca malzeme üzerine uygulanan 24 saatlik su miktarları.

Zaman		Yağmurlama (ıslama) Su Miktarı (L)
117. gün	Bölgesel risk analizi	180
144. gün	Ortalama yağış miktarı	35
152. gün	Ortalama yağış miktarı	35
160. gün	Ortalama yağış miktarı	35
168. gün	Ortalama yağış miktarı	35
Toplam		320

3.2.3.3. Jeomekanik Testler

Islanma-kuruma çevrimlerinden sonra son aşama olan mekanik testler kapsamında malzemenin stabilitesinin tespiti amacıyla kayma dayanımı ve oturma oranı belirlenmiştir. Kabin içerisinde tabakalar halinde depolanan macun malzemenin tabaka yüksekliklerine göre üzerine gelen yükler farklı göstermektedir. Bu yüklerle göre de macun malzemenin sıkışabilirliği ve buna bağlı olarak stabilizasyon değerleri değişmektedir. Farklı tabakalardaki malzemenin jeomekanik davranışını belirlemek için farklı derinliklerden örnekler alınmıştır. Dolayısıyla mekanik testler için kabin yüksekliği yukarıdan aşağıya doğru sırasıyla, 0 cm - 15 cm (üst), 15 cm - 30 cm (orta) ve 30 cm - 44 cm (alt) şeklinde sınıflandırılmıştır. Daha sonra mekanik testler için numuneler alınmıştır (Şekil 3.17).

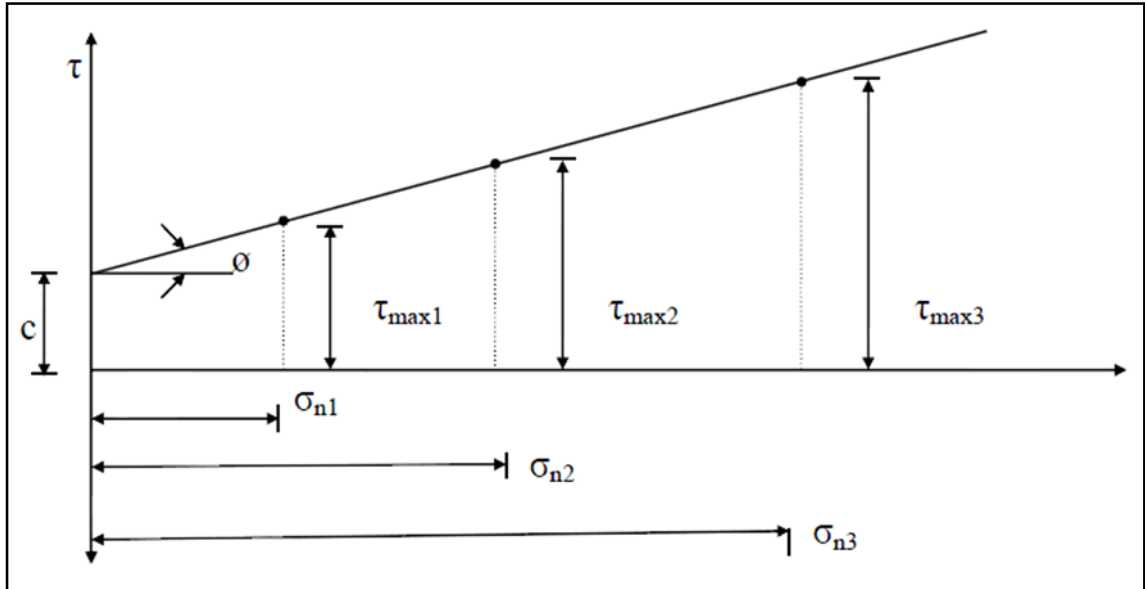


Şekil 3. 17: Mekanik testler için numune alımı işlemi.

Malzeme üzerine gelen yük veya gerilme, deformasyonların kabul edilemeyeceği düzeye kadar arttırılırsa o malzeme için yenilme ifadesi kullanılabilir. Bu durum malzemenin dayanımını göstermektedir. Aynı zamanda dayanım, malzemenin

katlanabileceği maksimum veya nihai gerilme demektir. Bu çalışma kapsamında depolanan malzemenin stabilizasyonu hakkında bize en iyi fikri verecek olan konulardan biri kayma dayanımıdır. Macun malzemenin kayma dayanımı TSE CEN ISO TS 17892-10 ve TS 1900-2 standartlarına göre direkt kesme kutusu deneyi yapılarak belirlenmiştir. Malzemede kayma meydana gelmesi için, olası bir kayma düzlemi boyunca kayma direncinin aşılması gerekmektedir. Genel kayma belli bir kayma düzlemi üzerine etkileyen normal ve kayma gerilmelerinin ortaklaşa etkisi sonucu ortaya çıkmaktadır. Zeminin kayma direnci kesme kutusu deney aleti ile bulunmaktadır.

Kabin içerisinde kürü tamamlanmış numune silindirik hazne içine alındıktan sonra kenarları çelik ince spatulla alt ve üst yüzeyleri tıraşlanarak düzeltilmiştir. Macun malzemesinin üzerine 2, 6, ve 12 kg'lık düşey yük (normal yük) uygulanmıştır. Normal yük uygulanan numune su dolu hazne içinde 24 saat süre ile konsolidasyona bırakılmış ve ardından zamana bağlı yanal yük uygulanarak oluşan deplasmanlar ölçülmüştür. Kesme kutusu deneyinde her bir normal yük (2, 6, 12 kg) için ayrı ayrı kesme gerilmeleri elde edilir. Bunu takiben, elde edilen kesme (kayma) gerilmelerinden maksimum kesme gerilmesi (her bir normal yük için ayrı ayrı) belirlenir ve bu değerlere bağlı olarak kırılma zarfı çizilir (Şekil 3.18).



Şekil 3. 18: Kesme kutusu deneyinde c ve ø' nin belirlenmesi (Güzel, 2005).

Kesme kutusu deneyi sonucunda belirlenecek kesme (kayma) direnci, zeminler için kaymaya yol açan normal ve kayma gerilmelerinin ortak etkisini göz önüne alan Mohr-Coulomb hipotezinin (Eşitlik 3.15) kullanılması sonucunda elde edilen ϕ ve c parametreleri yardımı ile bulunur (Uzuner, 1998; Güzel, 2005).

Kayma direncini veren bağıntı ise şöyledir:

$$\tau = c + \sigma_n \times \tan\phi \quad [3.15]$$

τ = Kayma direnci (kg/cm²)

c = Kohezyon (kg/cm²)

σ_n = Kayma yüzeyine etkiyen normal gerilme (kg/cm²)

ϕ = İçsel sürtünme açısı (kayma direnci açısı, °)

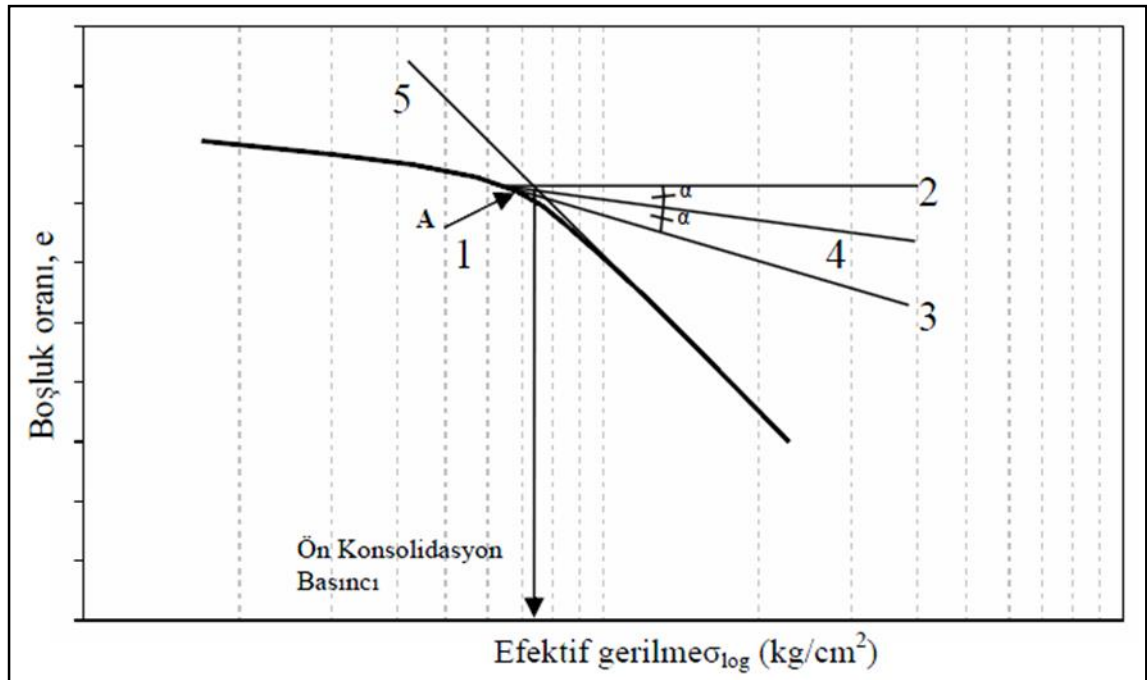
Kayma dayanımının yanı sıra kabin içerisine tabakalar halinde üstü üste dökülen macun malzemede zamana bağlı olarak oturmalar meydana gelmektedir. Bu oturmaların belirlenmesi macun malzemeye uygulanacak olan reklamasyon çalışmaları açısından büyük önem arz etmektedir. Dolayısıyla macun malzemenin oturma oranı ve yük altındayken zamana bağlı değişimi TSE CEN ISO TS 17892-5 ve TS 1900-2 standartlarına göre tespit edilmiştir. Bu deney yanal deformasyonları örselenmiş olan suya doymun veya kısmen doymun bir zeminin alt ve üst yüzeyinde drenaj imkanı sağlayarak düşey yük altında konsolidasyon miktarı ve hızının tespitinin kapsar (Güzel, 2005).

Konsolidasyon, geçirgenliği düşük, tamamıyla suya doymun zeminlerin taneler arasındaki boşluk suyunun zemin içinden dışarıya sızmasıyla meydana gelen kademeli bir hacim azalmasıdır. Suya doymun ince taneli bir zemin düşey yönde yüklemeye tabi tutulduğu zaman, yükün meydana getirdiği düşey gerilme zemin içerisindeki boşluk suyu basıncı tarafından karşılanır. Zamanla efektif gerilmenin artarak boşluk suyu basıncının azalmasıyla zemin içerisindeki su zemin dışına sızmaya başlar ve zemin hacminde kademeli bir azalma oluşur. Boşluk suyunun sızması, sabit bir gerilme altındaki zeminin hacmindeki azalmanın durmasına kadar devam eder. Bu durumda zemin tamamıyla konsolide durumdadır (Güzel, 2005).

Konsolidasyon deneyi sonucu logaritma efektif gerilmeye karşılık boşluk oranı çizgisi çizilir. Şekil 3.19’da görüldüğü gibi zeminin geçmişte etkisi altında kaldığı maksimum efektif gerilme ya da ön konsolidasyon basıncı bulunur (Güzel, 2005).

Eğri çizilirken;

1. Göz kararı ile boşluk oranı – efektif konsolidasyon basıncı eğrisinin en küçük yarıçap değerine sahip olduğu veya maksimum eğilme veya bükülme noktası (A noktası) belirlenir,
2. Bu noktadan geçecek yatay bir doğru çizilir,
3. Bu noktadan geçen ve eğriye teğet bir çizgi çizilir,
4. Bu iki doğrunun açılışını yapan doğru çizilir,
5. Boşluk oranı – efektif konsolidasyon basıncı eğrisinin doğrusal kısmı açı ortay doğrusu ile çakışacak şekilde uzatılır. Kesişme noktasından dikey olarak efektif konsolidasyon basıncı eksenine indirdiğimizde bulacağımız değer numunemizin geçmişte görmüş olduğu en yüksek efektif gerilme değerini verecektir.



Şekil 3. 19: Ön konsolidasyon basıncının Casagrande yöntemi ile bulunması (Casagrande 1936; Güzel, 2005).

Şekil 3.20'deki bakir sıkışma eğrisinin eğimi sıkışma indisi (C_c) olarak tanımlanır (Eşitlik 3.16). Aynı eğimin yükler kaldırıldıktan sonraki eğimi ise kabarma indisi (C_s) olarak ifade edilir. Bununla birlikte oturma mikranın (ΔH), ilk yüksekliğe (H) oranı düşey birim deformasyonunu (ϵ_v) vermektedir.

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log \sigma_2 - \log \sigma_1} = \frac{\Delta e}{\log \frac{\sigma_2}{\sigma_1}}$$

[3.16]

Burada;

C_c : Sıkışma indisi (cm^2/kg)

Δe : Boşluk oranı farkı

$\sigma_{\log}$: Efektif gerilme (kg/cm^2)

4. BULGULAR

4.1. MALZEME KARAKTERİZASYONU

Macun teknolojisinin tasarımında en önemli unsurlardan biri atıkların sahip olduğu malzeme karakterizasyonudur. Atık sahip olduğu fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri macun depolama tasarımının belirlenmesinde etkili olan unsurlardır. Bu nedenle depolama tasarımı ve uygulamasına geçmeden önce bu özelliklerin detaylı çalışmalarla belirlenmesi gerekmektedir. Aşağıda bu çalışmada kullanılan numuneler üzerinde yapılan malzeme karakterizasyon çalışmasının sonuçları verilmiştir.

4.1.1. Fiziksel Özellikler

4.1.1.1. Yoğunluk

Macun malzemesinin temel bileşeni olan artığın sahip olduğu yoğunluk, macun malzemesinin yoğunluğunu doğrudan etkilemektedir. Dolayısıyla aralarındaki bu doğru orantılı ilişki macun malzemenin kendi ağırlığında konsolide olma süresini hızlandırabilmekte ya da yavaşlatabilmektedir. Malzemenin tane boyut dağılımının yanı sıra yoğunluğu; pompalanabilme özelliklerinden olan pompa kuvvetini ve nakil boru çaplarını doğrudan etkilemektedir. Böylece artığın yoğunluğu ile ilişkili macun malzemenin nakil sırasında boru içindeki çökme hızlarının neden olabileceği pompa ve boru tıkanmalarının çeşitli hesaplamalarla önüne geçilebilmektedir. Artık malzemesinin yoğunluğu helyum piknometre analizi ile bulunmuş ve sonucu Tablo 4.1’de gösterilmiştir.

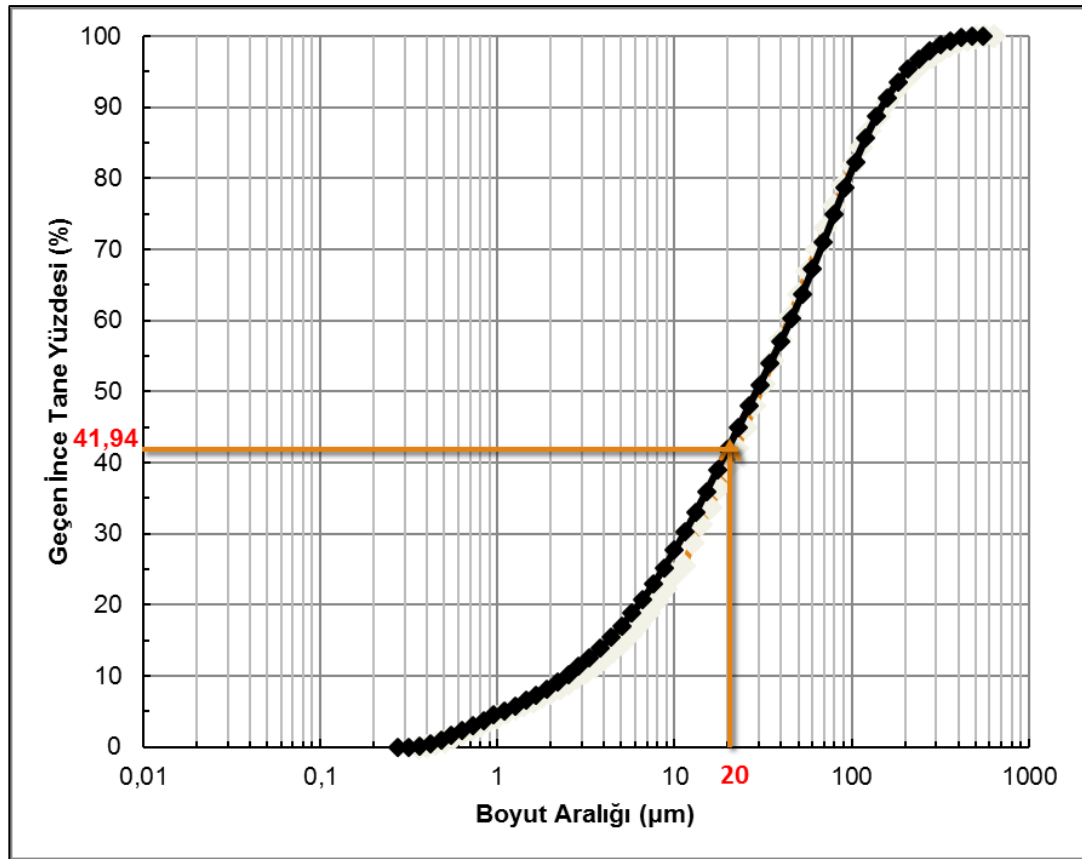
Tablo 4. 1: Artık malzemesinin helyum piknometre sonuçları.

Örnek	Ortam Sıcaklığı (°C)	Ağırlık (g)	Hacim (c ³)	Yoğunluk (g/c ³)
Kurşun-Çinko Proses Artığı	24,7	6,614	2,0975	3,1533

Tablo 4.1’deki kuru yoğunluk analizine göre yoğunluk değeri 3’ün üzerinde çıkan artık malzeme, döküm için katı içeriği %65-75 arasında hazırlanan yerüstü macun malzemenin yoğunluğu ise yaklaşık 2,1 gr/cm³ seviyelerine kadar düşmektedir. Ayrıca özgül ağırlıkları genellikle 3’ün üzerinde olan metal içerikli minerallerinde artık içerisinde önemli sayılabilecek bir varlığı olduğu söylenebilmektedir.

4.1.1.2. Tane Boyut Dağılımı

Kurşun-Çinko proses artıklarının tane boyut dağılım aralığı 0,316 μm ile 549,541 μm olarak belirlenmiştir. Macun karışımlarının tane boyut dağılımlarında istenen 20 μm 'dan daha ince tane oranı en az %15 olması gerekliliği Bölüm 2.3.4'te belirtilmiştir. Numuneler üzerinde yapılan tane boyut dağılımı analizinde bu değer %41,94 olarak belirlenmiştir. Artık malzemesinin tane boyu dağılımı TS 1500 standardına göre %8'i kil, %72'si silt ve geriye kalan %20'lik kısmı ince kum boyutlarından oluştuğu görülmektedir (Şekil 4.1).



Şekil 4. 1: Balya Pb-Zn madeni proses artığı tane boyut dağılımı.

Bir malzemenin üniformluk (C_u) ve eğrilik katsayıları (C_c) için gerekli olan D_{10} , D_{30} ve D_{60} değerleri ile birlikte ortalama tane boyutu ve genel dağılımı hakkında ön fikir oluşmasını sağlayan D_{50} ve D_{90} parametreleri Tablo 4.2'de verilmiştir.

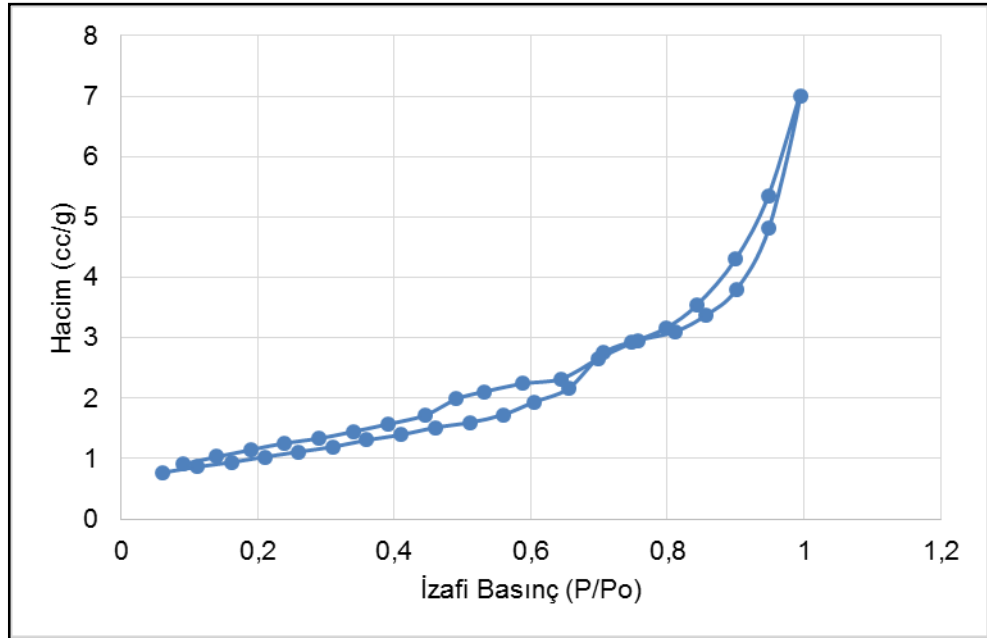
Tablo 4. 2: Üniformluk ve eğrilik katsayı için değerler.

	D_{10}	D_{30}	D_{50}	D_{60}	D_{90}
Tane Boyutu (μm)	2,830	11,482	33,167	45,709	169,096

Tablo 4.2’deki veriler Eşitlik 3.2 ve Eşitlik 3.3 kullanılarak artığın üniformluk katsayısı 16,15 ve eğrilik katsayısı 1,02 olarak hesaplanmıştır. Bu durumda artığın tane boyut dağılımı TS EN ISO 14688-2 standardına göre homojen bir dağılıma sahip “çoklu dağılım” sınıfına girmektedir. İyi derecelenmiş bir tane boyutu dağılımına sahip artığın, boşluk oranı ve geçirgenlik katsayısı değerlerinde azalma olması beklenir.

4.1.1.3. Spesifik Yüzey Alanı ve Porozite

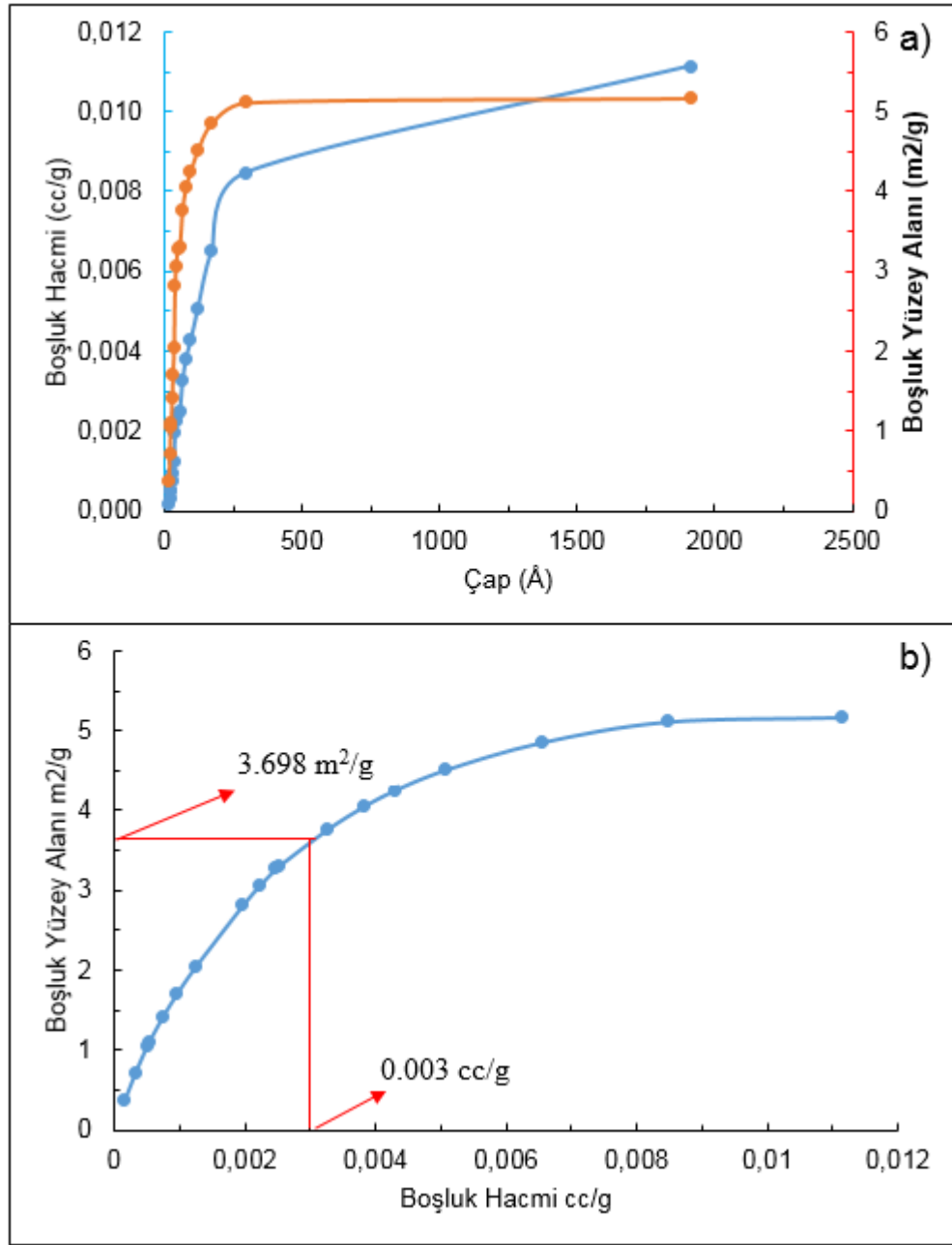
Çok noktalı BET (Brunauer, Emmet ve Teller) analizi kapsamında adsorbsiyonun gerçekleştiği Pb-Zn madeni proses atığının adsorbent ve nitrojenin absorbat olarak kullanılması sonucu oluşan adsorpsiyon izoterm eğrisi Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4. 2: Adsorpsiyon izoterm eğrisi.

Şekil 4.2’de görülen adsorpsiyon izoterm eğrisi, adsorplama gücü çok düşük olan katılardaki adsorpsiyon izoterm tipine uymaktadır.

Çalışma kapsamında yapılan çok noktalı BET analizi sonuçlarına göre tanelerin boşluk hacimlerindeki ve boşluk yüzey alanlarının çaplarına göre değişimleri Şekil 4.3a ve Şekil 4.3b verilmektedir.



Şekil 4. 3: Tanelerin boşluk hacimleri (a) ve boşluk yüzey alanları (b).

Şekil 4.3'ten de görüldüğü gibi, tane çapı 296,5 Å'den ve boşluk hacmi de 0,008 cc/g'dan sonra boşluk yüzey alanı 5 m²/g'dır ve bu yüzey alanın çap ile boşluk hacmindeki artışa rağmen kayda değer olarak değişmediği görülmektedir. Çok noktalı BET analizi denkleminde göre tanelerin spesifik yüzey alanı 3,698 m²/g ve bu yüzey alanına karşılık gelen boşluk hacmi değeride ~0,003 cc/g olarak hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında laboratuvar da gerçekleştirilen kabin deneylerinde her bir tabaka 4 cm kalınlığında dökülmüş ve bir tabaka dökümünde ~100 kg artı k malzemesi kullanılmıştır. Buna göre

bir tabakadaki tanelerin ortalama boşluk hacmi 300 cm^3 'tür. Ancak artık malzemeyi suyla karıştırarak elde edilen yerüstü macun malzemede ise ölçülü kap yöntemine göre porozite $\sim\%53$ çıkmaktadır. Dolayısıyla hava+su'dan oluşan karışım içindeki boşluk hacminin toplam hacmin yarısını oluşturduğu anlaşılmaktadır. Bu durum aynı zamanda macun malzemenin $\%100$ doygunluk derecesi için $\%53$ hacimsel su içeriğinin yeterli olduğunu ifade etmektedir. Doymunluk derecesi $\geq\%100$ olan macun malzemelere oksijen difüzyonu gerçekleşmemekte ve asit maden drenajının önüne geçilebilmektedir. Ancak macun malzemelerin bu derecede doymun olması durumunda stabilizasyon problemlerinin oluşabileceği düşünülmektedir.

4.1.1.4. Atterberg Kıvam Limitleri

Atterberg kıvam limit deneylerine göre elde edilen sonuçlar Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4. 3: Artık malzemesinin kıvam limit değerleri.

Likit Limit			
Kap No	S-1	S-2	S-3
Kap Ağırlığı (gr)	19,10	20,10	19,90
Darbe Sayısı	30	24	10
Kap+Yaş Num. (gr)	51,60	78,00	80,40
Yaş Numune (gr)	32,50	57,90	60,50
Kap+Kuru Num. (gr)	46,60	69,20	70,20
Kuru Numune (gr)	27,50	49,10	50,30
Su Ağırlığı (gr)	5,00	8,80	10,20
Su Muhtevası (%)	18,18	17,92	20,28
Likit Limit	18,18	17,92	20,28

Plastik Limit		
Kap No	S-4	S-5
Kap Ağırlığı (gr)	10,70	11,50
Kap+Yaş Num. (gr)	12,20	16,70
Yaş Numune (gr)	1,50	5,20
Kap+Kuru Num(gr)	12,00	15,90
Kuru Numune (gr)	1,30	4,40
Su Ağırlığı (gr)	0,20	0,80
Su Muhtevası (%)	15,38	18,18
Plastik Limit	15,38	18,18

Sonuçlar	
Likit Limit	18,40
Plastik Limit (ort.)	16,78
Büzülme Limiti	16
Plastisite indeksi	1,62
Sınıflama	ML

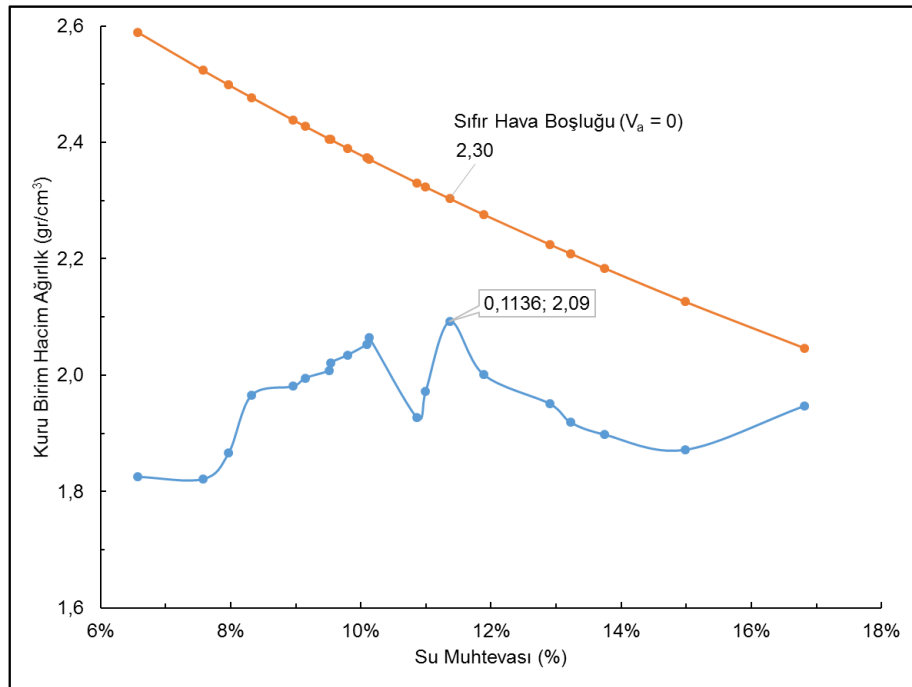
Likit Limit

Su Muhtevası (%)

Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sisteminde yer alan plastisite kartına göre, artık malzemesinin düşük plastisiteli silt sınıfına girdiği belirlenmiştir. Ayrıca tane boyut dağılımının %72'si silt boyutunda olması bu zemin sınıfına ait olduğunu göstermiştir. Killere göre siltli malzemeler daha düşük kohezyon göstermekte ve sıvılaşma riski taşımaktadırlar. Ayrıca malzemenin bu özelliği öncelikli olarak bir zemin davranışı gösterdiği ve malzeme üzerinde zemin standartlarının uygulanabileceğini göstermektedir. Buda özellikle macunun mekanik davranışının belirlenmesinde büyük kolaylık sağlayacaktır. Bu kapsamda malzemenin özellikle dinamik yükler altındaki davranışının araştırılmasının önemli olduğu düşünülmektedir.

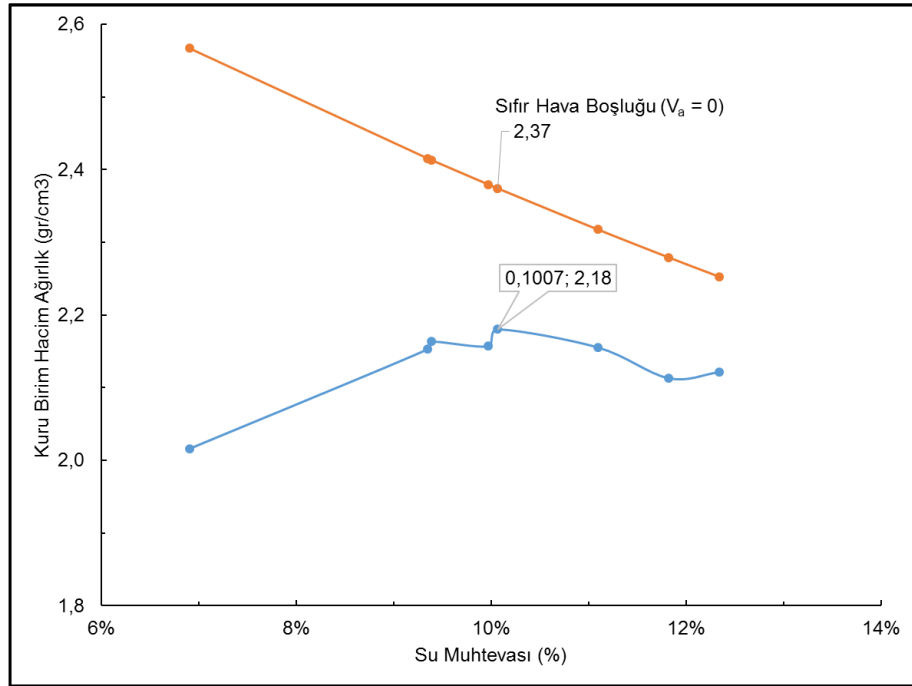
4.1.1.5. Sıkışabilirlik ve Geçirimsizlik

Artık malzemesinin optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı değerlerinin belirlenebilmesi amacıyla standart ve modifiye proktor deneyleri yapılmıştır. Buna göre standart proktor deney sonuçları Şekil 4.4'te ve modifiye proktor deney sonuçları ise Şekil 4.5'te verilmektedir.



Şekil 4. 4: Standart proktor deneyi sonuçları.

Şekil 4.4'ten görüldüğü üzere artık malzemesine standart proktor deneyi yapılarak optimum su muhtevası %11 ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı ise 2,09 olarak bulunmuştur.



Şekil 4. 5: Modifiye proktor deneyi sonuçları.

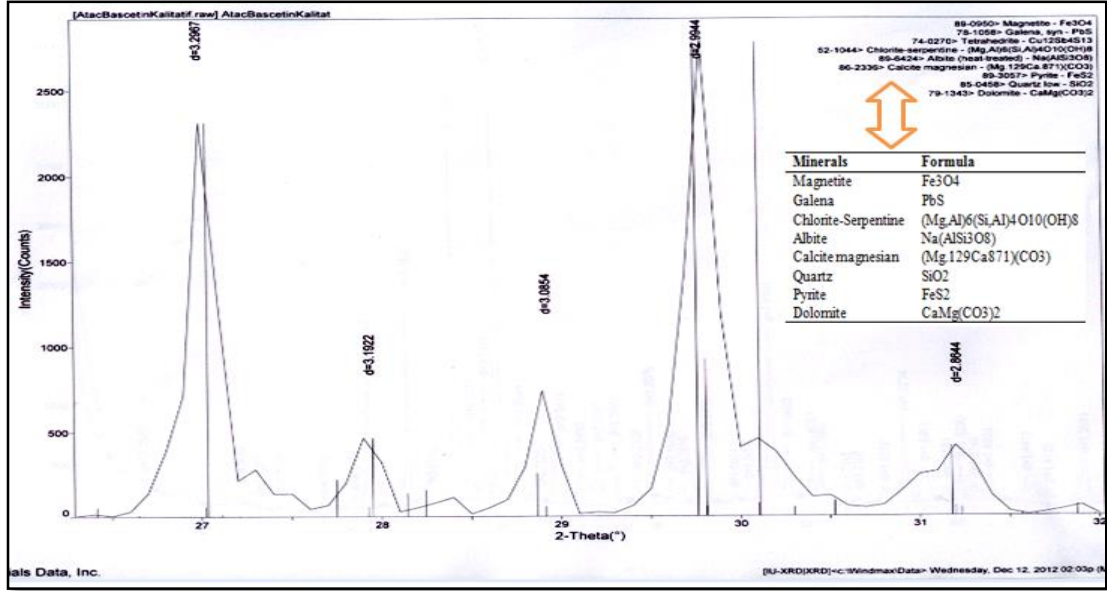
Artık malzemesinin modifiye proktor deneyi sonuçları ise optimum su muhtevası %10 ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı $2,18 \text{ gr/cm}^3$ bulunmuştur (Şekil 4.5).

Modifiye ve standart proktor deney sonuçları arasında büyük bir farkın oluşmadığı görülmektedir. Sıkıştırılan artık malzemenin yaklaşık optimum hacimsel su içeriği standartta ~ 35 , modifiyede ise $\sim 31,5$ olmaktadır. Sabit sıkıştırma enerjisi altında taneler arasındaki mesafe azalırken optimum su içeriği ve permeabilite değerleri minimuma düşmektedir (Kayabalı, 2002). Dolayısıyla sıkıştırma enerjisinin artması halinde özellikle ince taneli artık malzemesinde boşluk oranı daha da azalarak maksimum kuru birim hacim ağırlığa ulaşılması sağlanılmıştır. Bu kapsamda uygulanan modifiye proktor deney sonuçlarına göre belirlenen optimum su muhtevasındaki artışın permeabilite (hidrolik geçirgenliği) katsayısı $4,27963 \times 10^{-6} \text{ cm/sn}$ olarak bulunmuştur. Casagrande'ye (1938) göre bu permeabilite katsayısına sahip çok ince kumlar, organik ve inorganik siltler ve kum-silt-kil karışımları kötü drenaj (orta geçirimli) sergilemekte, dolayısıyla baraj ve seddelerin geçirimsiz bölümlerinde kullanılabilmektedirler.

4.1.2. Mineralojik Kompozisyon ve Kimyasal Özellikler

4.1.2.1. Mineralojik Bileşim

XRD analizi ile belirlenen artık malzemesinin mineralojik kompozisyonu Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4. 6: Balya Pb-Zn madeni proses artığının mineralojik kompozisyonu.

Ayrıca aynı numunelerin başka bir XRD analiz sonucuna göre, öncelikli olarak kalsit (CaCO₃) ve kuvars (SiO₂) daha sonra ise sırasıyla feldspat grubu mineralleri (albite Na(AlSi₃O₈)), pirit (FeS₂), kil grubu mineraller ve mika grubu minerallerin artığın içerisinde yer aldıkları belirlenmiştir. Ayrıca kil grubu minerallerin varlığı, atığın tane boyu dağılımına göre %8 kil boyutunda malzeme barındırdığı sonucunu desteklemektedir. Bu sonuca göre artık malzemesinin taşıdığı ağır metal mobilizasyonunu engelleyebilme ve malzemeyi doygun bir halde tutabilme özelliğinin olduğu söylenebilir. Artıkta yer alan mika grubu minerallerinden muskovit “(KAl₂(Al₂ Si₃ O₁₀) (OH)₂” ve biyotit “(K(Mg, Fe)₃AlSi₃O₁₀(F, OH)₂”, ortamda oluşan asiditeyi nötürleştirme potansiyeli olan bazı minerallere örnek olarak verilebilir.

Şekil 4.6’ya göre; manyetit, Fe₃O₄ formülüyle gösterilen demir mineralidir. Ferro-ferrik oksit olarak da bilinen manyetit ayrıca demir 2-3 oksit olarak da adlandırılır. Bu da demirin iki farklı değerliğe aynı anda (Fe⁺² ve Fe⁺³) sahip olabilme özelliğine sahiptir. Artıkta yer alan demir içerikli bir diğer mineral piritin ise, oksitleyici ortama maruz

kalmasıyla tepkimeler oluşur ve ortamdaki AMD riski artabilir. Üç değerlikli demir iyonları, demir sülfürlerle tepkiyerek ortama yeniden artı iki iyonlu demirlerin salınmasına neden olabilmektedir. Ayrıca, asitli koşullar altındaki piritin oksitlenmesi başlar başlamaz hidrojen iyonlarından, kullanılan oksijenin indirgenmesiyle oksit iyonlarını nötürleştirmek için gerekli olan miktardan fazlası üretilir. Dolayısıyla, iki değerlikli demir iyonlarının üç değerli demire oksitlenmesi başlayıncaya kadar çözelti giderek daha çok asitleşebilmektedir.

Pirit, pirotin gibi demir minerallerinin oksitlenmesiyle asiditesi yükselen drenaj suları, bünyesinde karbonatları barındıran kayalarla temas ettiğinde onları çözündürmektedir. Bu sırada asit tüketimiyle ortam pH'si yükselme eğilimine girer. Ortamın nötürleşmesinde en etkin mineraller kalsit ve dolomittir. Bu iki mineralinde artık malzeme içerisinde yer aldığı XRD analiz sonuçlarında görülmektedir. Artık malzeme içerisinde yer alan diğer bir mineral ise albit minerali olup, artıktaki bulunan sodyum (Na) ağırlıklı bir feldspat mineralidir. Kalsit ve dolomit türü karbonatların asitli ortamı yüksek nötürleştirme potansiyeline karşın, daha yavaş çözünen albitler (plajioklaslar) ve K-feldspatlar gibi kayaç oluşturan bazı mineraller, karbonatlara oranla AMD riskine karşı daha güçlü tampon kapasitesine sahiptir (Karadeniz, 2008).

4.1.2.2. Elementel Analiz& Asit Potansiyeli

Artık malzemesinin ICP-MS cihazı ile yapılan elementel analiz sonuçları Tablo 4.4'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre artık malzeme içerisinde en fazla %36 değeri ile kuvars minerali bulunmaktadır. CaO ise, cevher zonunun yan kayacının kireçtaşı olması ve flotasyon işleminde şist ve piritin çöktürülmesinde ve pülpün pH değerini ayarlama kireç kullanılmasından dolayı %23 değeri ile katı artığın içerdiği en yüksek değerlerden biri olarak gözükmektedir. Demirin ağırlıklı olarak piritten, alüminyumun albitten geldiği ifade edilebilmektedir. Kızdırma kaybı değerlerine (LoI) bakıldığında ise organik maddeler ve uçucu bileşiklerin artık malzemesinin yaklaşık %12'sini oluşturduğu belirlenmiştir. Ağır metallere olan Cu, Pb, Zn, As ve Cd değerlerinin EPA'da belirtilen maksimum değerleri (sırasıyla 110, 110, 270, 33 ve 4) aştığı tespit edilmiştir. Bu orandaki metallere, çevresel açıdan toprak ve sular üzerinde önemli oranda toksisite oluşturmaları beklenir (Su kirliliği yönetmeliği, 2004; Simşek ve diğ., 2012).

Tablo 4. 4: Pb-Zn katı proses artığının elementel analizi.

Temel Oksitler (%)										
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Cr ₂ O ₃
36.19	8.08	13.58	2.54	23.26	0.20	2.45	0.29	0.08	0.38	0.010
Baz ve Değerli Metaller (ppm)										
Mo	Cu	Pb	Zn	Ni	As	Cd	Sb	Bi	Ag	Au
5.7	217.2	1500.1	1548	29.4	601.8	8.2	23.6	26.5	3.7	0.055
	Ba	Co	Rb	Sn	Sr	V	W	Zr	Hg	
	404	15.7	76.4	11	191.3	62	44.6	76.8	0.37	
Nadir Toprak Elementleri (ppm)										
La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er
30.4	57.2	6.00	20.9	3.86	0.99	3.37	0.54	2.87	0.55	1.62
			Tm	Yb	Lu	Y	Sc			
			0.27	1.58	0.23	17.2	7			
Radyoaktif Elementler (ppm) ve Diğer Değerler (%)										
Th	U						TOT/C	TOT/S	LOI	Sum
9.0	6.4						3.16	7.49	12.4	99.48

ICP-MS analizinden elde edilen %7,49 S değeri ile artık numunelerinin asit potansiyeli (AP) Modifiye ABA yöntemi kullanılarak 234,0625 kg CaCO₃/t belirlenmiştir. Ayrıca, mineralojik ve kimyasal analiz sonuçlarına göre, numunedeki NP'nin kaynağının Ca ve Mg içeren mineraller olduğu düşünülmektedir. Bu kapsamda NP, her iki mineralin yüzdeleri Eşitlik 2.18'te kullanılmak suretiyle yaklaşık 0,9921 hesaplanmıştır. NNP değerinin Tablo 2.4'te verilen aralıklara göre NP/AP = < 1 ve NP-AP = < -20 kg/t CaCO₃ olduğu hesaplanmış ve artık malzemenin bu sonuçlara göre Bölüm 2'de belirtilen sınıflamaya göre asit üretebileceği belirlenmiştir.

4.1.2.3. Artık Boşluk Suyu Analizi

%20 PKO oranındaki Pb-Zn artığının filtrasyon sonucu ortaya çıkan proses ve boşluk suyunun Ultraviyole-Visible spektrofotometre (UV-Vis) cihazı ile analiz değerleri Tablo 4.5'de verilmiştir.

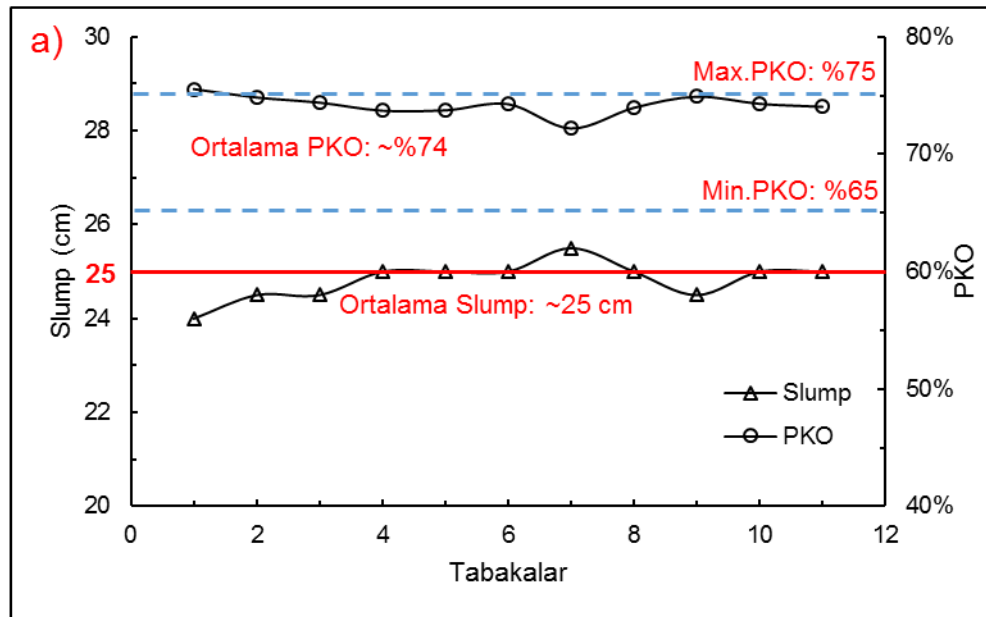
Tablo 4. 5: Pb-Zn artığı proses suyu analizi

pH	11,83
İletkenlik (mS/cm)	3,668
Yoğunluk (gr/ml)	1,0004
Bulanıklık (NTU)	16,85
Alkalinite (mg/L OH ⁻)	4317,92
AKM (mg/L)	2,106
Çözülmüş Oksijen (mg/L)	27,53
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	679,18
SO ₃ ²⁻ (mg/L)	118,21

Su kirliliği kontrolü yönetmeliğindeki (2004) Tablo 4.7’de yer alan maden sanayi atık sularının alıcı ortama deşarj standartlarına göre Askıda Katı Madde (AKM) değerleri aşılmamaktadır. Ancak pH değeri 9’un üzerinde olduğundan dolayı alıcı ortam için sakıncalı sayılmaktadır. Ayrıca Eşitlik 2.1’e göre 3,668 mS/cm Ec değerine karşılık Toplam Çözülmüş Madde (TDS) değeri 1834 mg/L (gr/t) olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla suda yüksek oranda TDS değeri (>2000) bulunmadığı ve artık boru hatlarının iç çeperinde çözünen katı partiküllerin tabakalaşmaya neden olmayacağı söylenebilir.

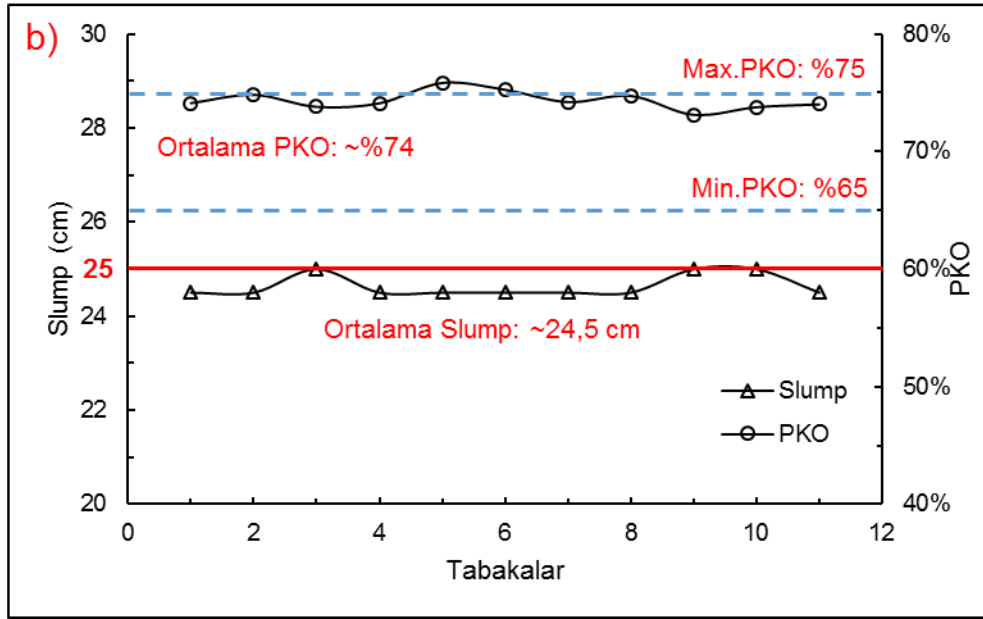
4.2. MACUN MALZEMENİN HAZIRLANMASI

Yerüstü macun depolama yöntemi için oluşturulan macun malzemelerin 3 farklı kabin tasarımındaki her bir tabakaya ait slump değerleri ve toplam kütledeki su içerikleri Tasarım 1 için Şekil 4.7’de, Tasarım 2 için Şekil 4.8’de ve Tasarım 3 için ise Şekil 4.9’da verilmiştir.



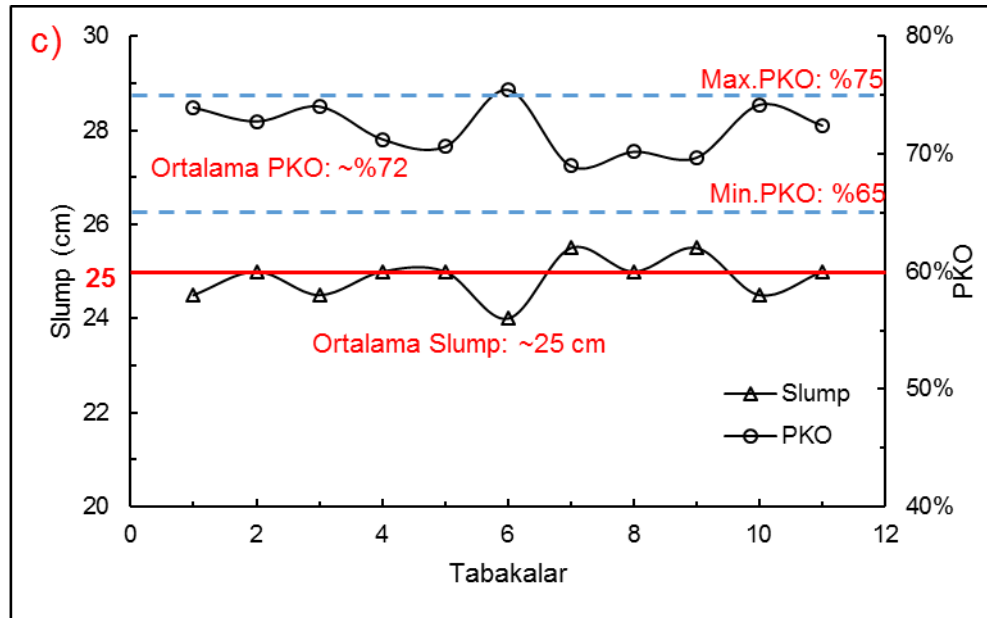
Şekil 4. 7: Tasarım 1’deki tabakaların slump ve PKO değerleri.

Referans kabini olarak hazırlanan Tasarım 1’deki tabakaların ortalama PKO değeri ~%74 ve ortalama slump değeri 25 cm belirlenmiştir (Şekil 4.7).



Şekil 4. 8: Tasarım 2’deki tabakaların slump ve PKO değerleri.

Yalnızca ilk tabakası çimento katkılı olarak hazırlanan Tasarım 2’deki tabakaların ortalama PKO değeri ~%74 ve ortalama slump değeri 24,5 cm belirlenmiştir (Şekil 4.8).



Şekil 4. 9: Tasarım 3’teki tabakaların slump ve PKO değerleri.

Sadece ilk ve son tabakası çimento katkılı olarak hazırlanan Tasarım 3’teki tüm tabakaların ortalama PKO değeri ~%72 ve ortalama slump değeri ~25 cm belirlenmiştir (Şekil 4.9).

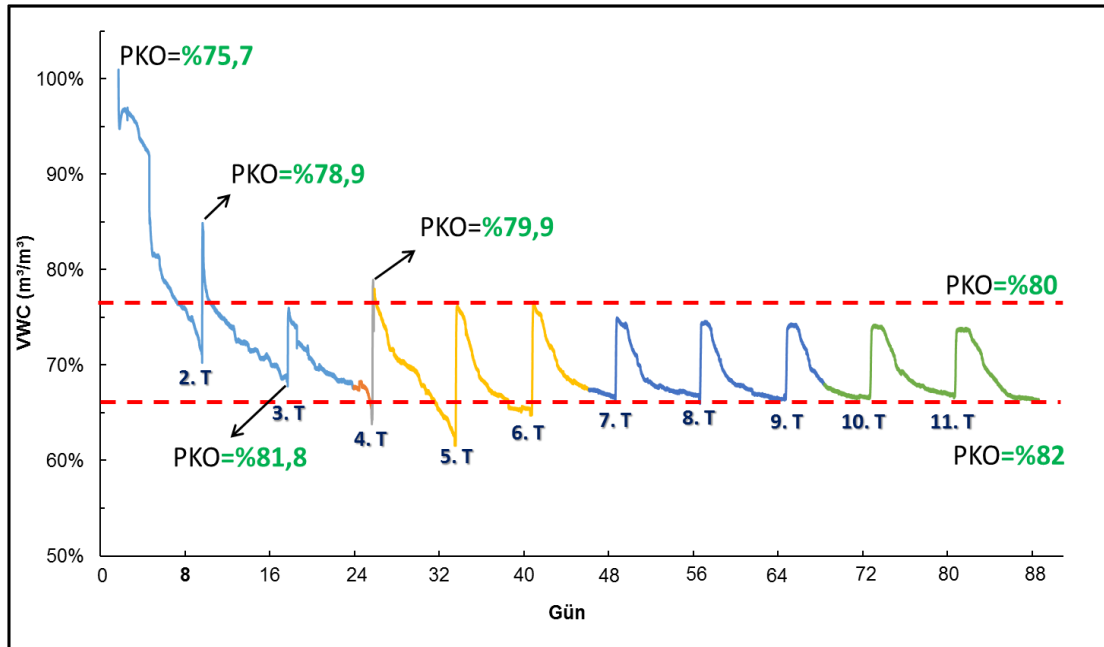
Dökümleri gerçekleştirilen üç tasarımın slamp ve PKO değerleri arasındaki benzerlikler Şekil 4.7, 4.8 ve 4.9’da gösterilmiştir. Macun malzeme hazırlanırken yaş proses artıkları kullanıldığı için tabakaların PKO ve slamp değerleri arasında önemsiz sayılabilecek oranda farklar oluşmuştur. Buna göre yerüstü macun depolama yönteminde macun malzeme tabakalarında istenen ~25 cm slamp değeri ve %65-%75 arasında olması istenen PKO değerlerinin bu çalışmada kapsamında sağlandığı belirlenmiştir.

4.3. OPTİMUM DEPOLAMA TASARIMININ BELİRLENMESİ

4.3.1. Tabaka Döküm Süreci

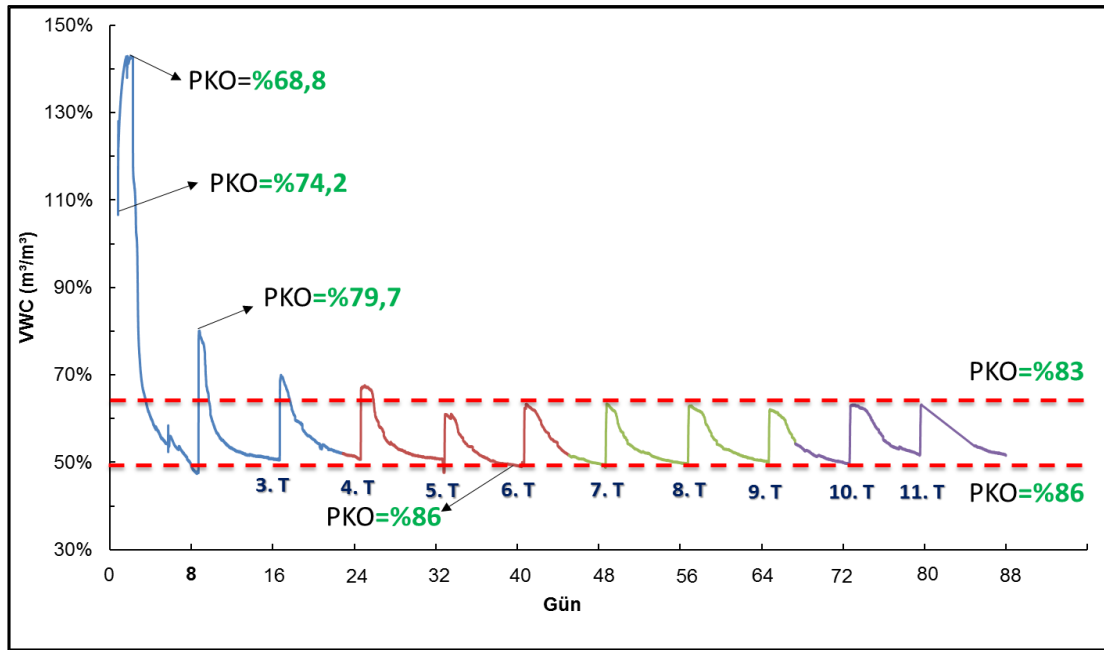
4.3.1.1. Sensör Ölçümleri

Laboratuvar ortamında hazırlanan üç depolama kabininin hazırlıkları tamamlandıktan sonra üç farklı tasarıma ait macun malzeme dökümlerine başlanmıştır. Bu kapsamda, öncelikle macun malzemenin tabakalar halinde dökümü sırasında üç farklı tasarımda ölçülen sensör değerleri (hacimsel su içeriği, kılcal emme basıncı ve oksijen içeriği) 1., 5. ve 10. tabaka sıralarına göre verilmiştir. Buna göre üç farklı tasarım için yapılan hacimsel su içeriği ölçümlerine göre; 1. tabakalardaki hacimsel su içeriği ve buna bağlı olarak hesaplanan PKO değerlerinin değişimleri Şekil 4.10, 4.11 ve 4.12’de verilmiştir.



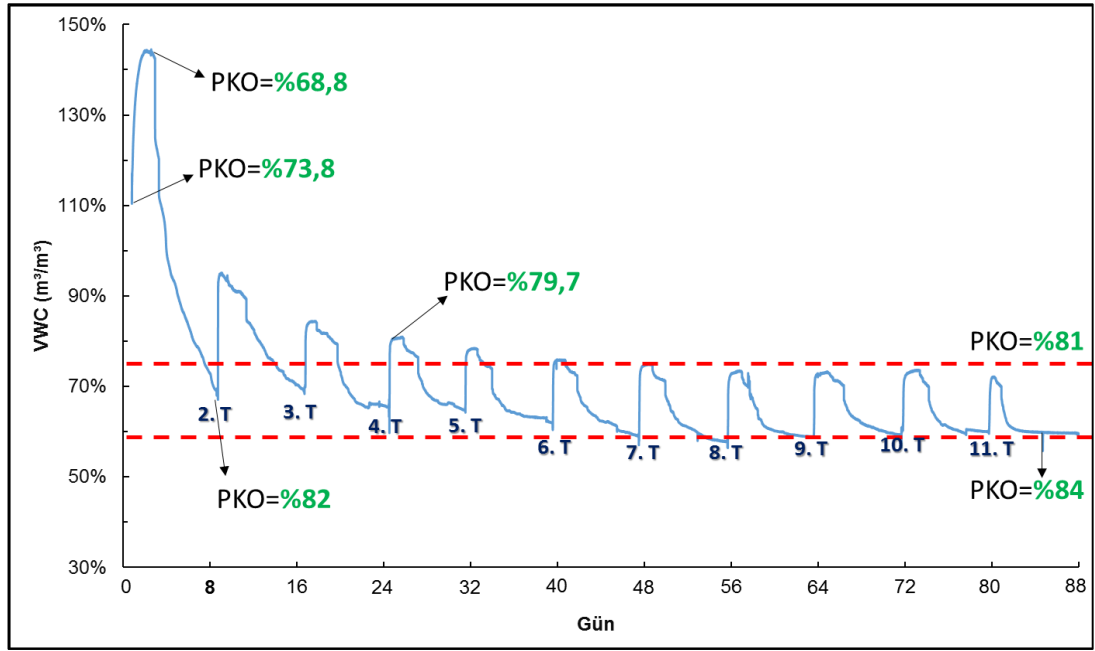
Şekil 4. 10: Tasarım 1’deki Tabaka 1’in hacimsel su içeriği ve PKO değerleri.

Şekil 4.10'daki Tasarım 1'in 1. tabakasındaki PKO, ilk dökümde yaklaşık %75,7 iken 88 gün sonra yaklaşık %82'ye çıktığı görülmektedir. 40. günden sonraki dökümlerde bağlayıcısız macun depolama sistemindeki en alt tabakanın yaklaşık %80,7-82,7 PKO aralığında stabil (durağan) kaldığı belirlenmiştir. Şekil 4.11 ve 4.12'de ise bağlayıcılı (çimentolu) macun malzemeden oluşan Tasarım 2 ve Tasarım 3'ün 1. tabakalarının hacimsel su içeriği davranışı verilmiştir. Bu iki tasarımın 1. tabakalarında benzer bir eğilimin olduğu ve 32.günden itibaren her bir tabaka dökümünden sonra sabit bir aralığa geldiği açıkça görülmektedir.



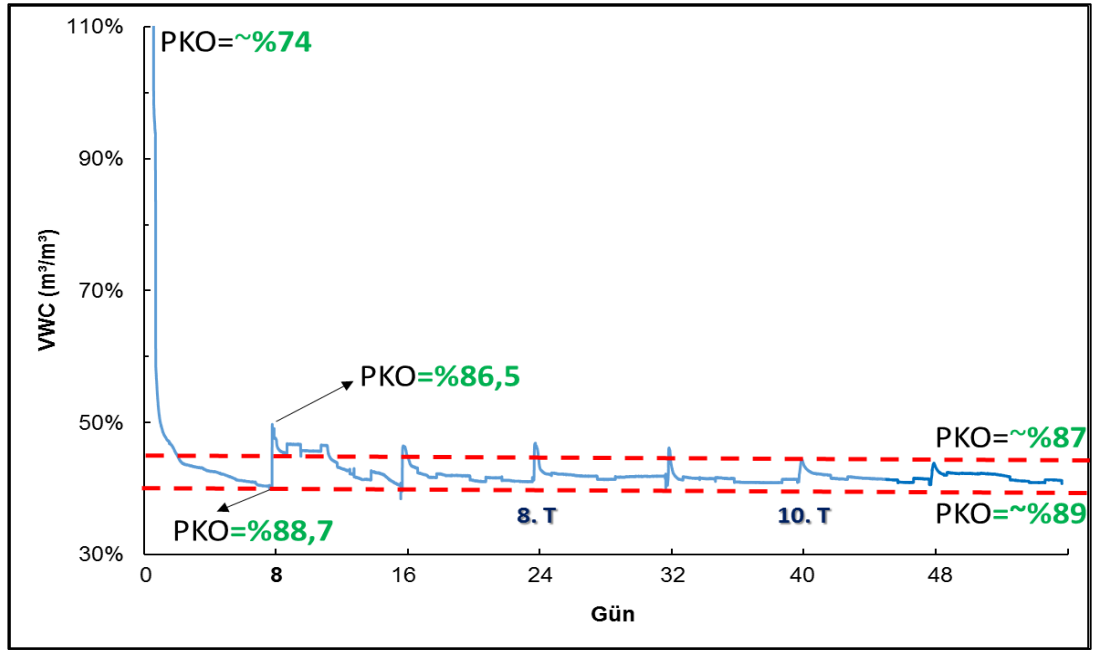
Şekil 4. 11: Tasarım 2'deki Tabaka 1'in hacimsel su içeriği ve PKO değerleri.

Şekil 4.11 ve 4.12'de görüldüğü üzere, ~%35'lik hacimsel su içeriği artışı gerçekleşmektedir. 5. tabaka dökümlerinden sonra Tasarım 2'nin %83-%86 PKO ve Tasarım 3'ün ise %83-%86 PKO aralığında stabil kaldığı belirlenmiştir. Macun malzemenin belirli bir süre geçtikten sonra özellikle üzerindeki yüklere bağlı konsolide olmasıyla beraber hidrostatik dengede kaldığı görülmektedir (Şekil 4.10, 4.11 ve 4.12). Bu durumun özellikle toplam tabaka döküm süresinin yarısından sonra gerçekleştiği izlenmiştir.



Şekil 4. 12: Tasarım 3’deki Tabaka 1’in hacimsel su içeriği ve PKO değerleri.

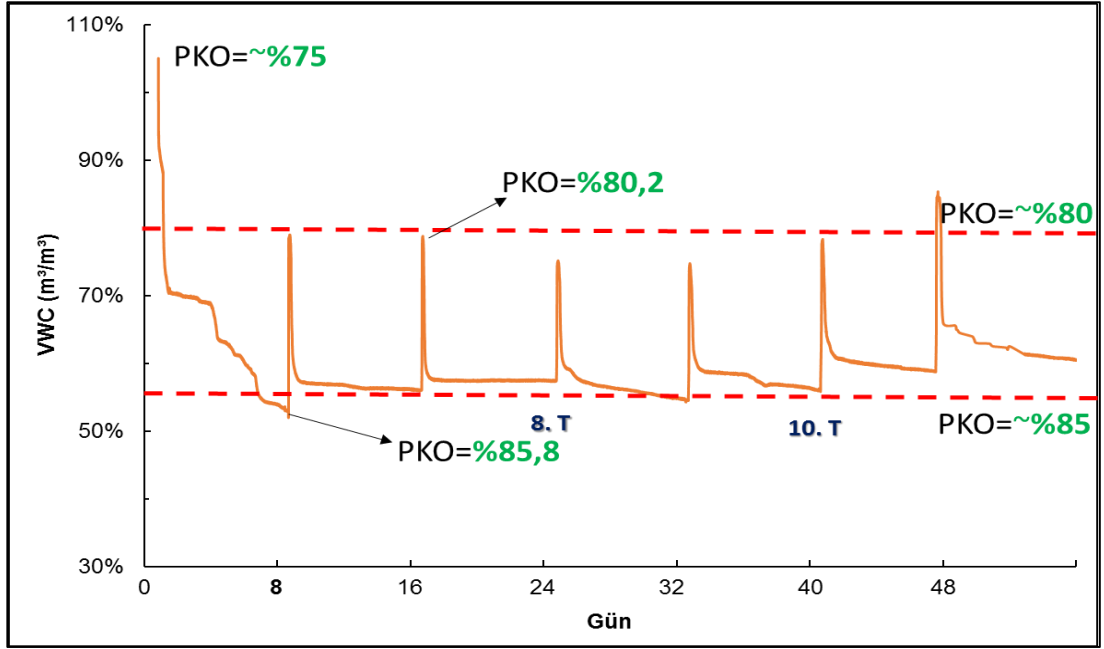
Tasarım 2 ve Tasarım 3’teki ilk tabaka dökümlerinden sonra oluşan hacimsel su içeriği artışının en önemli sebeplerinden birinin çimentonun hidrotasyon sırasında oluşturduğu C-S-H jellerinin hacimsel artışı ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Ayrıca ortamdaki sülfatların kalsiyum silikatlar (C-S-H) üzerine etkimesi sonucu 15 molekül su içeren Tomasit (thaumasite) tuzu da oluşabilir ve genişleyerek malzemenin yumuşamasına neden olabilir. Birde Portland çimentosu ile oluşturulan karışımlar sülfatlı sularla karşılaştığında trikalsiyum alüminat (C3A), kalsiyum sülfatla (CaSO_4) birleşerek etrenjite dönüşmektedir. Candlot tuzu adı da verilen bu madde kapladığı büyük hacim nedeniyle malzemeyi çatlatır ve parçalanmasına neden olabilir. Ancak Tasarım 2 ve Tasarım 3’ün Tasarım 1’e göre daha yüksek PKO değerlerinde stabil kalmasından dolayı, tomasit ve etrenjit tuzlarından ziyade az sayılabilecek oranda katılan çimentonun sonucu C-S-H jellerinin oluştuğu ve sonra taneler arasında katı bir bağ kurduğu düşünülmektedir. Böylece kılcal çatlakları yapısında oluşturarak, daha büyük çatlakların oluşmasını önlemekte ve üst tabakaların Tasarım 1’e göre daha doymun kalmasını sağladığı, her bir tasarımın 5. tabakalarına ait hacimsel su içeriği sensör ölçümlerinin verildiği Şekil 4.13, 4.14 ve 4.15’de görülmektedir.



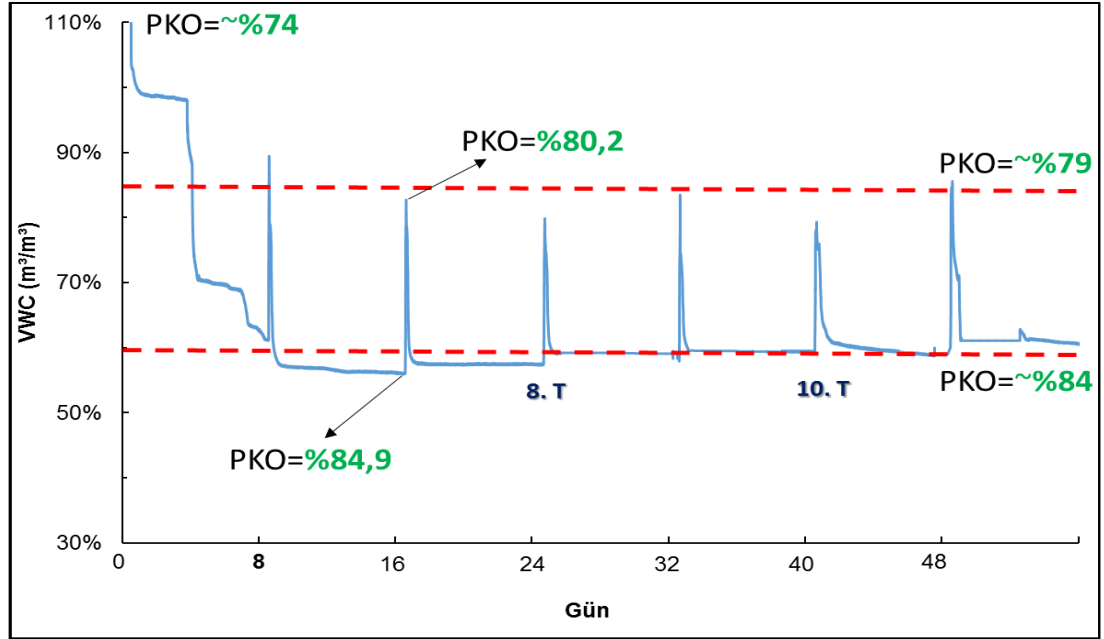
Şekil 4.13: Tasarım 1'deki Tabaka 5'in hacimsel su içeriği ve PKO değerleri.

Şekil 4.13'de görüldüğü üzere Tasarım 1'deki 5. tabakanın, ilk dökümün ardından yaklaşık %87-89 PKO aralığında sabit kaldığı görülmektedir. Tasarım 2 ve Tasarım 3'teki 5. tabakaların ise en alt tabakalarının çimentolu olmasından dolayı birbirlerine benzer bir davranış gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 4.14 ve Şekil 4.15). Bu iki tasarımın Tasarım 1'e göre yaklaşık %4 daha az PKO değerine sahip olması, 5. ve altında yer alan diğer tabakaların daha doygun kaldığını ifade etmektedir.

Şekil 4.14 ve 4.15'deki grafiklerden görüldüğü üzere 5. tabaka dökümünden sonraki her bir tabaka dökümü ve kuruma süresi boyunca hacimsel su içeriğinin yaklaşık olarak %25'lik bir aralıkta değiştiği belirlenmiştir. Tasarım 1'e göre bu aralık 5 kat daha büyüktür. Dolayısıyla Tasarım 2 ve Tasarım 3'teki her bir macun tabaka oluşturulmasından sonra oluşan sızıntı sularının çok daha fazla alt tabakalara nüfuz ettiği anlaşılmaktadır.



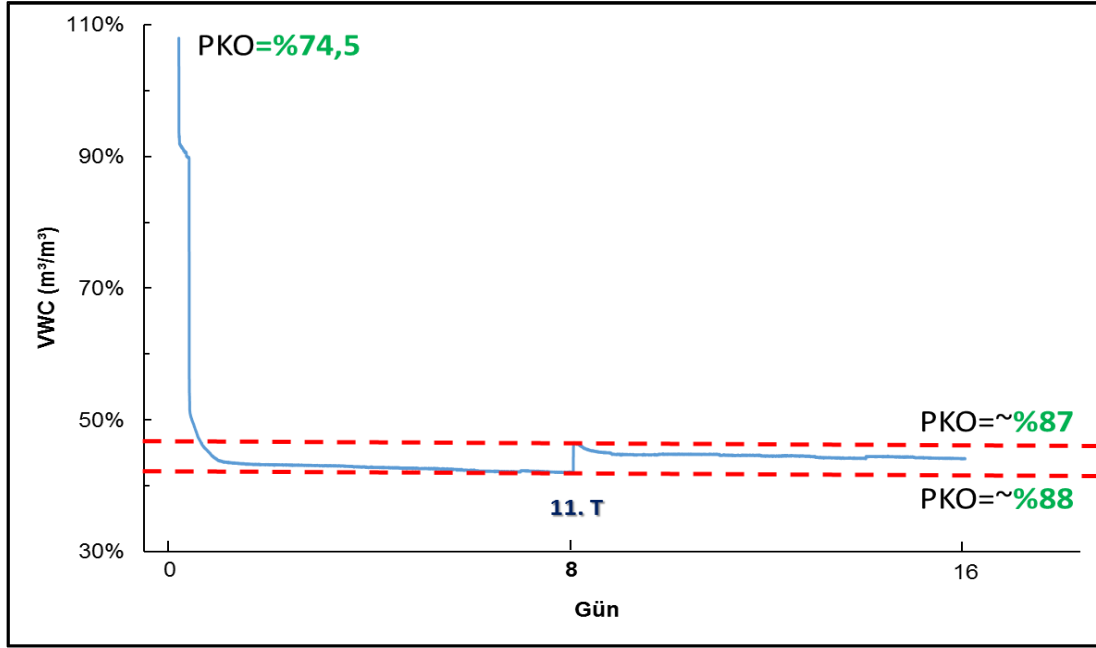
Şekil 4. 14: Tasarım 2'deki Tabaka 5'in hacimsel su içeriği ve PKO değerleri.



Şekil 4. 15: Tasarım 3'deki Tabaka 5'in hacimsel su içeriği ve PKO değerleri.

Çalışma kapsamında deneyleri gerçekleştirilen 3 farklı tasarıma sahip kabin deneylerindeki 10. tabakaların hacimsel su içeriklerinde belirgin farklılıklar oluşmadığı ölçülmüştür (Şekil 4.16, 4.17 ve 4.18). Kısa bir süre içerisinde bu üç kabindeki 10.

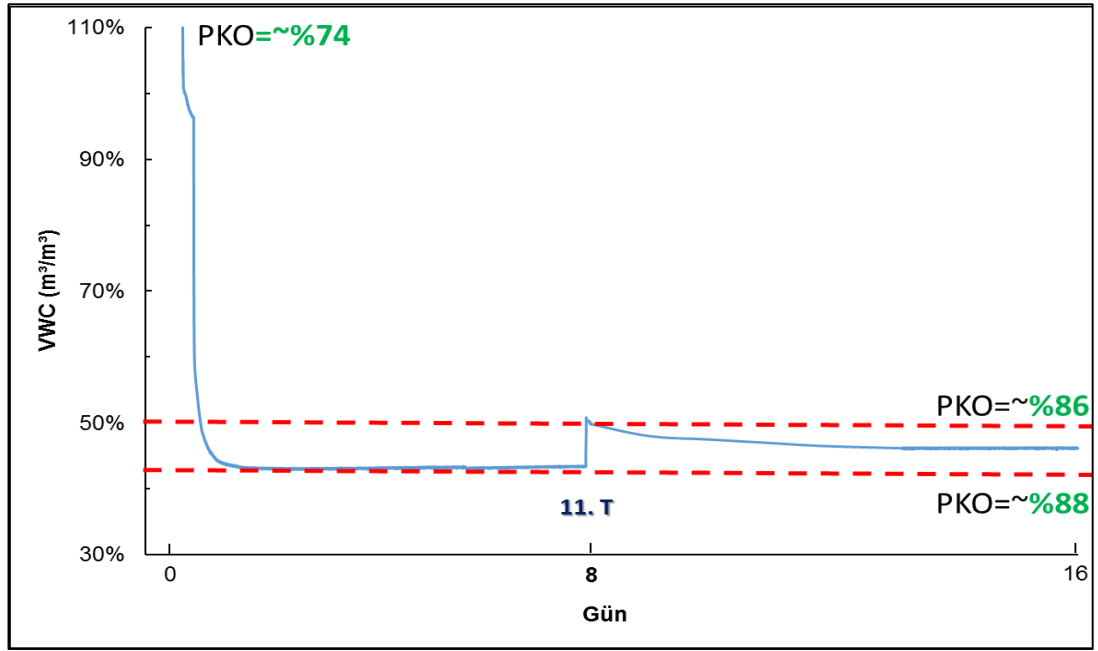
tabakaların optimum su içeriğine bağlı olarak PKO değerinin giderek %90'lara yaklaştığı belirlenmiştir.



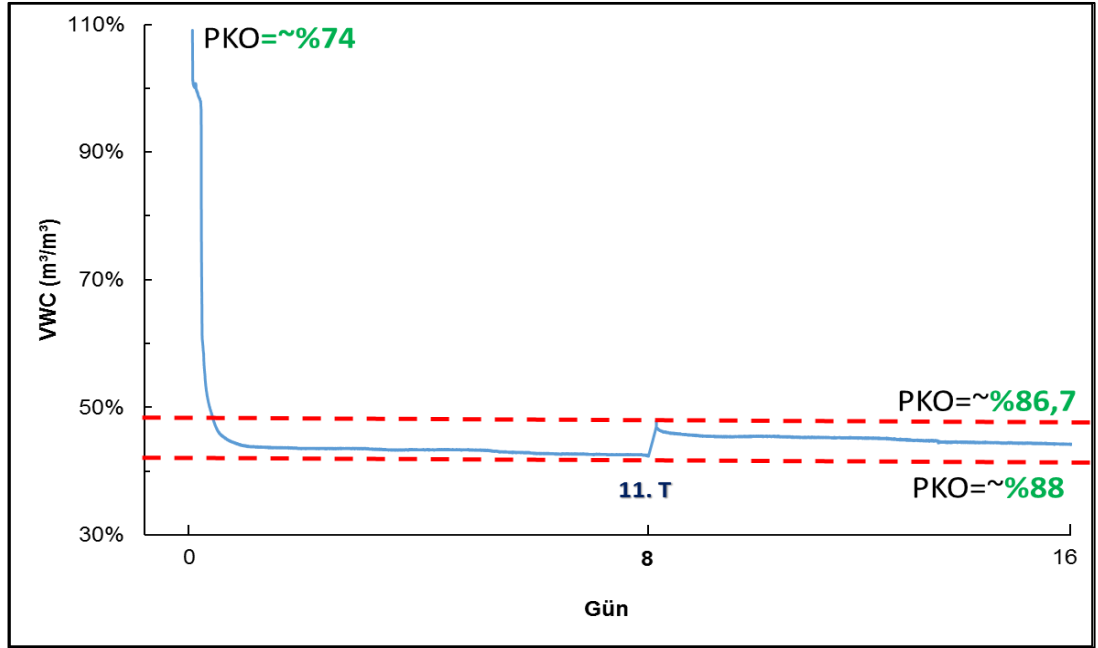
Şekil 4. 16: Tasarım 1'deki Tabaka 10'un hacimsel su içeriği ve PKO değerleri.

Şekil 4.16'dan görüldüğü üzere, Tasarım 1'deki 10. tabaka PKO değerinin ~%87-88 aralığında 16 gün boyunca kaldığı belirlenmiştir. Aynı zaman zarfında Tasarım 2'deki 10 tabaka PKO değeri ~%86-88 ve Tasarım 3'teki 10 tabaka PKO değerinin ise ~%87-88 aralığında değiştiği ölçülmüştür (Şekil 4.17 ve 4.18).

Tasarım 1 ve Tasarım 2'nin 11. tabaka döküldükten yaklaşık 2 saat içerisinde 10. tabakaların hacimsel su içeriği Tasarım 1'de %4,5 ve Tasarım 2'de %6,5 yükseldiği Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de görülmektedir. Ancak Tasarımın 3'te ise hacimsel su içeriği 11. tabaka döküldükten yaklaşık 9 saat içerisinde ~%5,5 artmıştır (Şekil 4.18). 11. tabakaya ait sızıntı suyu geçişinin Tasarım 3'te bu tabakanın çimento katkılı olmasından dolayı uzun zaman diliminde gerçekleştiği ifade edilebilmektedir.



Şekil 4. 17: Tasarım 2'deki Tabaka 10'un hacimsel su içeriği ve PKO değerleri.



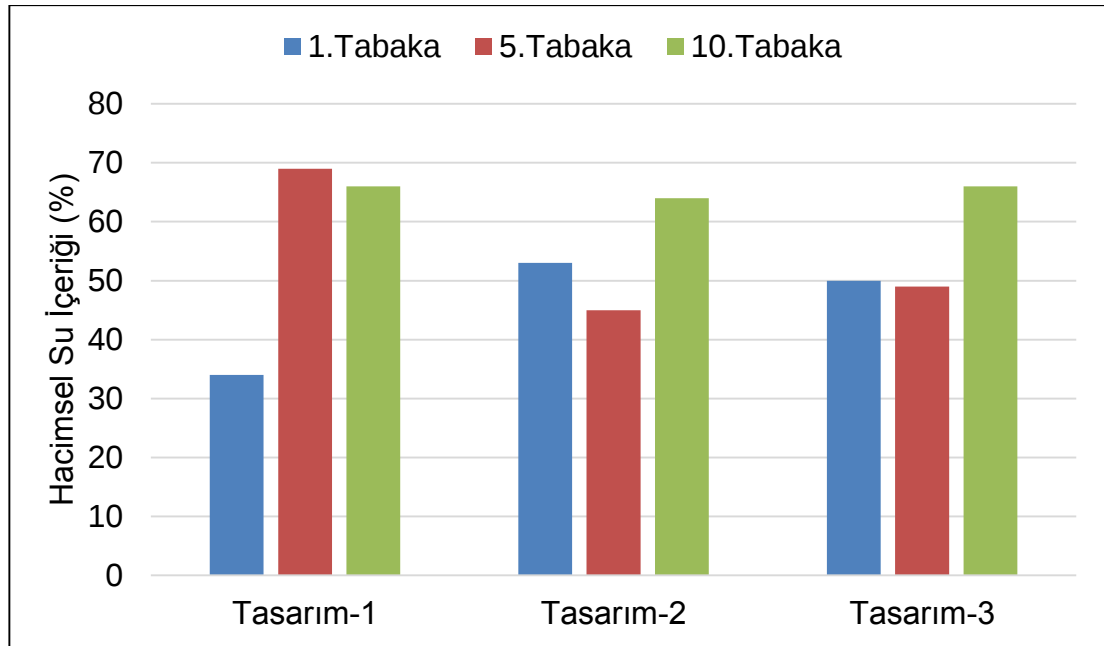
Şekil 4. 18: Tasarım 3'deki Tabaka 10'un hacimsel su içeriği ve PKO değerleri.

11 tabakanın döküm süreci boyunca 1., 5. ve 10. tabakalardaki hacimsel su içeriği değişimleri Tablo 4.6'da ve Şekil 4.19'da verilmiştir. Buna göre Tasarım 1'de 1. tabakanın hacimsel su içeriği kaybı 5. tabakada yaklaşık iki katına çıkmakta ve sonrasında değer önemli ölçüde değişmediği belirlenmiştir. Tasarım 2 ve Tasarım 3 ise, 1.

tabakalarının çimento katkılı olması nedeniyle oluşan hidratasyonun sonucu olarak Tasarım 1'in 1. tabakasına göre ~%16 daha fazla hacimsel olarak su kaybetmişlerdir. Ancak bu çimentolu tabakalar diğer tabakalara göre daha sıkı bir yapı oluşturmaları sebebiyle 5. tabakalarındaki su kaybının daha az olmasını sağlamışlardır. Sensörlerin yer aldığı 10. tabakalarda, alt tabakalardan en üst tabakalara doğru doygunluğun azalması ve yer çekimi kuvvetinin yüksekliğe bağlı olarak alt tabakalara doğru su geçişlerini hızlandırması nedeniyle çimentolu tasarımlar ile çimentosuz tasarımların 10. tabakalarındaki su içeriklerinin birbirine yakın değerlerde olduğu gözlenmiştir.

Tablo 4. 6: Tabaka döküm sürecindeki hacimsel su içeriği değişimleri.

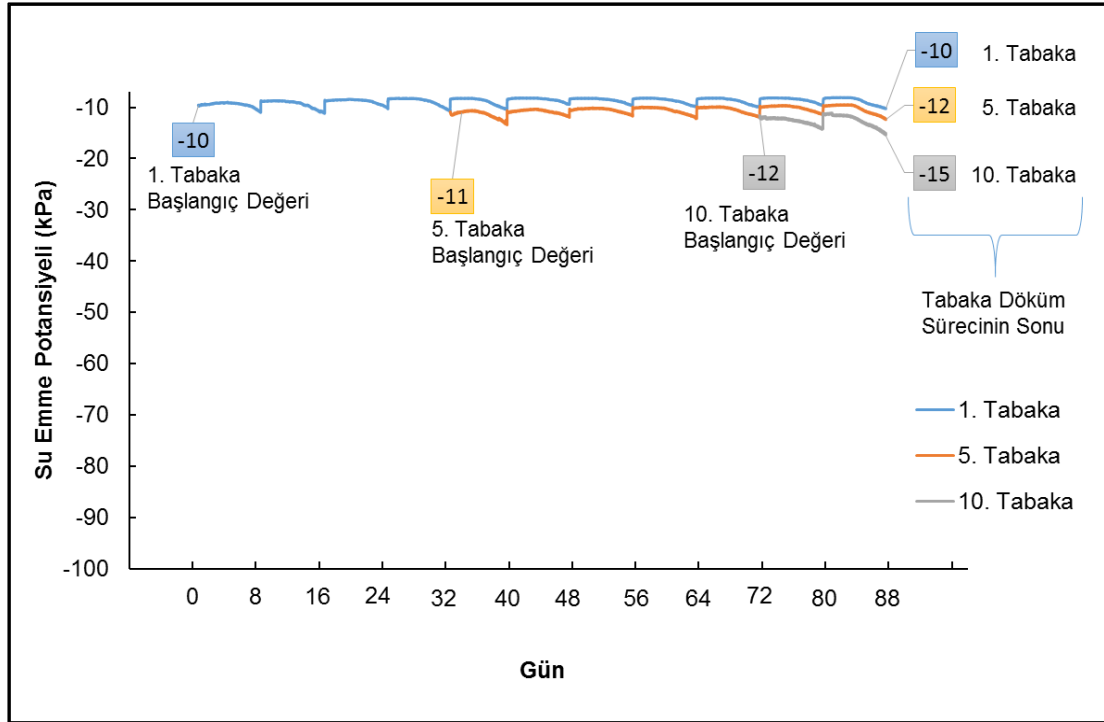
	Hacimsel Su İçeriği (%)								
	1.Tabaka			5.Tabaka			10.Tabaka		
	0.Gün	88.Gün	Hacimsel Su Kaybı	0.Gün	88.Gün	Hacimsel Su Kaybı	0.Gün	88.Gün	Hacimsel Su Kaybı
Tasarım-1	~100	~66	34	~110	~41	69	~110	~44	66
Tasarım-2	~105	~52	53	~105	~60	45	~110	~46	64
Tasarım-3	~110	~60	50	~110	~61	49	~110	~44	66



Şekil 4. 19: Üç farklı tasarımda döküm süresince gerçekleşen hacimsel su içeriği kaybı.

Üç farklı tasarımın 1., 5. ve 10. tabakalarındaki hacimsel su içerikleri jeoteknik açıdan incelendiğinde, depolama sırasında üzerine gelen yükler nedeniyle sıvılaşma ve kayma gerilmesi açısından en fazla risk taşıyan 1. tabakaların hızlı bir şekilde konsolide ve drene olduğu Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de görülmektedir. 1. tabakaların su içeriği değerinin Tasarım 1’de %18 (PKO ~%82), Tasarım 2 ve 3’te yaklaşık %14 (PKO ~%86) değerinde sabit kaldığı ve malzemenin sıvılaşma sınırı (likit limit) olarak belirlenen toplam hacimdeki %16,6 (PKO ~%83,4) su içeriği değerine Tasarım 1’de yaklaşıldığı, Tasarım 2 ve Tasarım 3’te ise bu değer altına düştüğü belirlenmiştir. Ayrıca tabaka sayısı arttıkça macun malzemenin tabakalar arasındaki kılcal emme basıncının da etkisi görülmüş ve üç farklı tasarımdaki 10. tabakaların döküm süresinin sonuna kadar ~%88 PKO değerinde stabil kaldığı tespit edilmiştir.

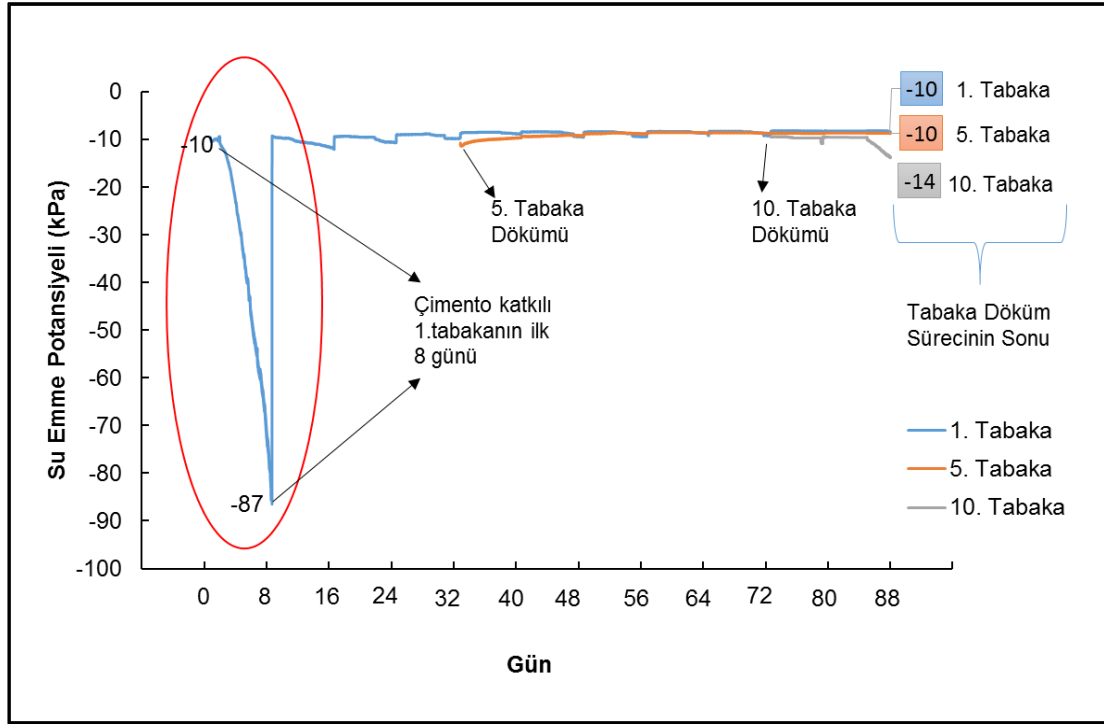
Macun malzeme tabakalarında gerçekleşen kılcal emme basıncının sonuçları 1. Tasarım için Şekil 4.20’de, 2. Tasarım için Şekil 4.21’de ve 3. Tasarım için ise Şekil 4.22’de verilmiştir.



Şekil 4. 20: Tasarım 1’in kılcal emme basıncı değerleri.

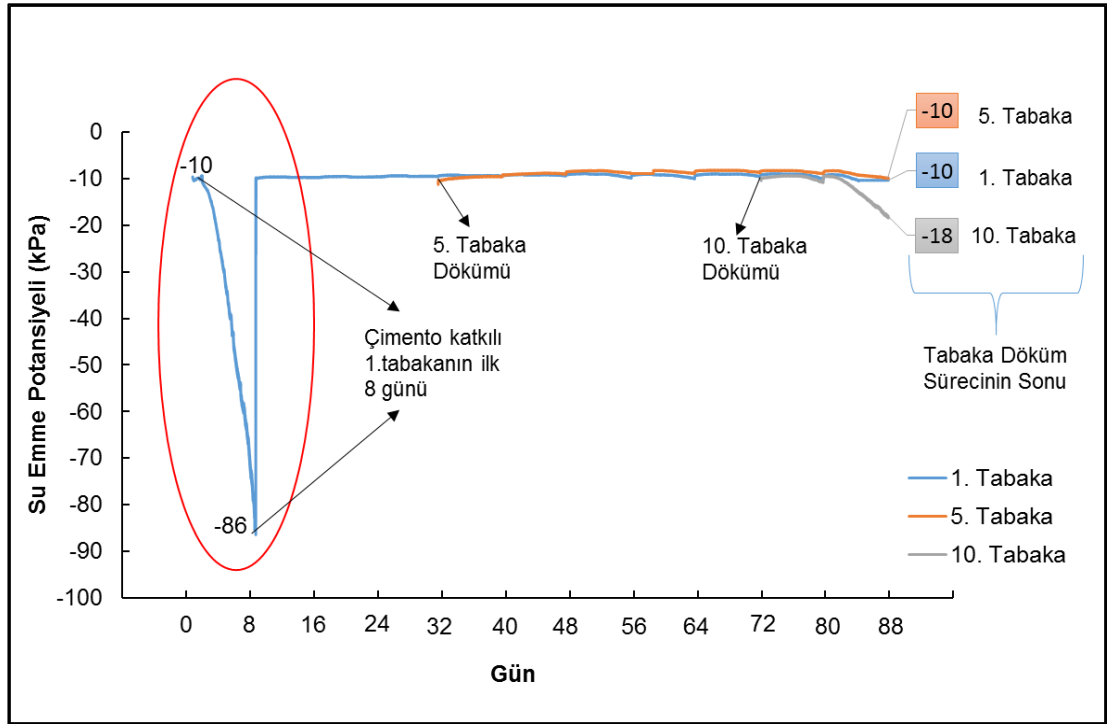
Tasarım 1’in 1. tabaka kılcal emme basıncı değerinin (-10 kPa), 11 tabakanın döküm süresinde değişmediği Şekil 4.20’de görülmektedir. 5. ve 10. tabakalardaki hacimsel su

içeriklerinin aynı olmasına rağmen kılcal emme basıncı değerlerinde az da olsa bir artış olduğu ölçülmüştür. Kılcal emme basıncının kapiler yükseklik ile doğru orantılı olarak bağlı olması nedeniyle bu artışın olduğu söylenebilmektedir.



Şekil 4. 21: Tasarım 2'nin kılcal emme basıncı.

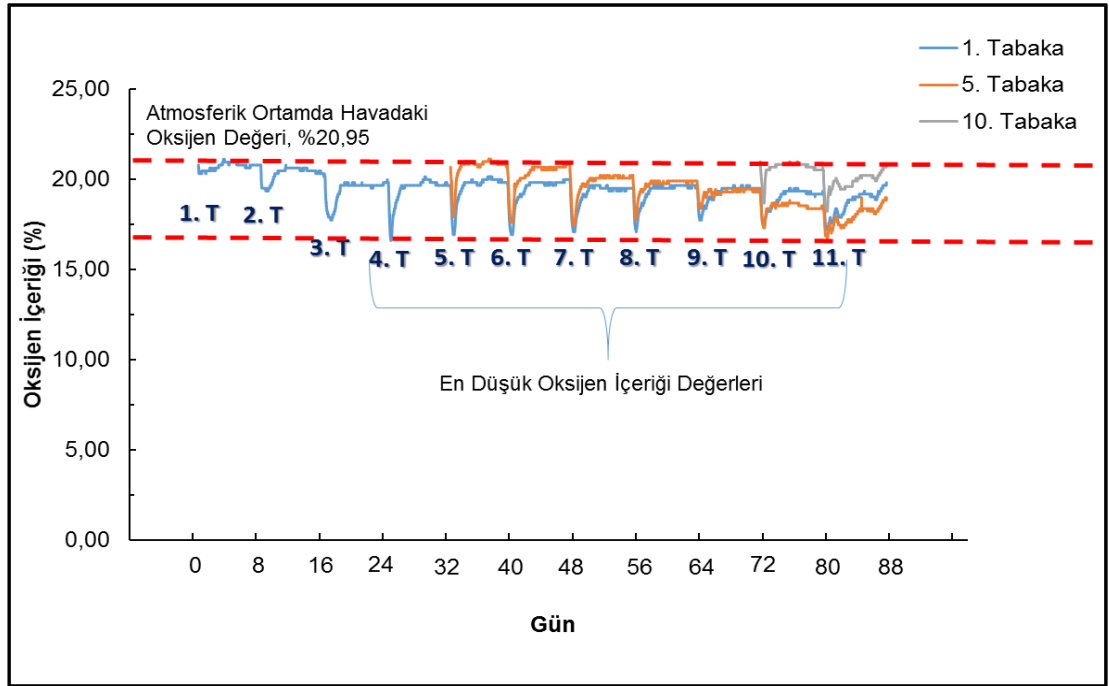
Tasarım 2'de ise 1. tabakanın çimentolu olmasından dolayı ilk döküm sırasında oluşan hidratasyon kaynaklı su emme isteğine bağlı olarak tabaka içerisindeki basıncın -10 kPa'dan -87 kPa'a kadar yükseldiği Şekil 4.21'de görülmektedir. Ancak ikinci döküm ile birlikte 1. tabakanın -10 kPa'da kaldığı ve değişmediği belirlenmiştir. 5. tabaka ise Tasarım 1'dekinin aksine kılcal emme basıncı etkisine döküm sürecinin sonuna kadar girmemiştir. Dolayısıyla Tasarım 2'deki 1. ve 5. tabakalar döküm süresinde %100 doygunluk sınırı olan ~%50 hacimsel su içeriğinin altına düşmeyerek bu tabakalarda su emme gerilmelerinin oluşmasına izin vermedikleri ölçülmüştür. Buna karşın 10. tabakanın kılcal emme basıncı ise üzerine 11. tabaka döküldükten 6 gün sonra artmaya başlamış ve döküm sonunda -14 kPa değerine ulaşmıştır. Burada da hacimsel su içeriğinin ~%46'lara düşmesinin etkili olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4. 22: Tasarım 3'ün kılcal emme basıncı.

Tasarım 3'teki kılcal emme basıncı değerlerinin hemen hemen Tasarım 2'deki tabalar gibi davrandığı Şekil 4.22'de gösterilmektedir. Ancak Tasarım 3'ün 11. tabakasının çimentolu olması ve bir süre sonra oluşan kılcal çatlaklı yapıların 10. tabaka üzerinde kalarak kurumayla beraber tane yüzey gerilimlerini arttırması nedeniyle diğer tasarımların 10. tabakalarına göre kılcal emme basıncı değerinin daha fazla olduğu düşünülmektedir. Ayrıca 10. tabakanın kılcal emme basıncı, 11. tabaka döküldükten 3 gün sonra artmaya başlamış ve döküm sonunda -18 kPa değerine ulaşmıştır.

Bu sonuçların yanı sıra oksidasyon için önemli bir parametre olan tabaka oksijen içerikleri ile ilgili sonuçlar Tasarım 1 için Şekil 4.23, Tasarım 2 için Şekil 4.24 ve Tasarım 3 için ise Şekil 4.25'te verilmiştir.

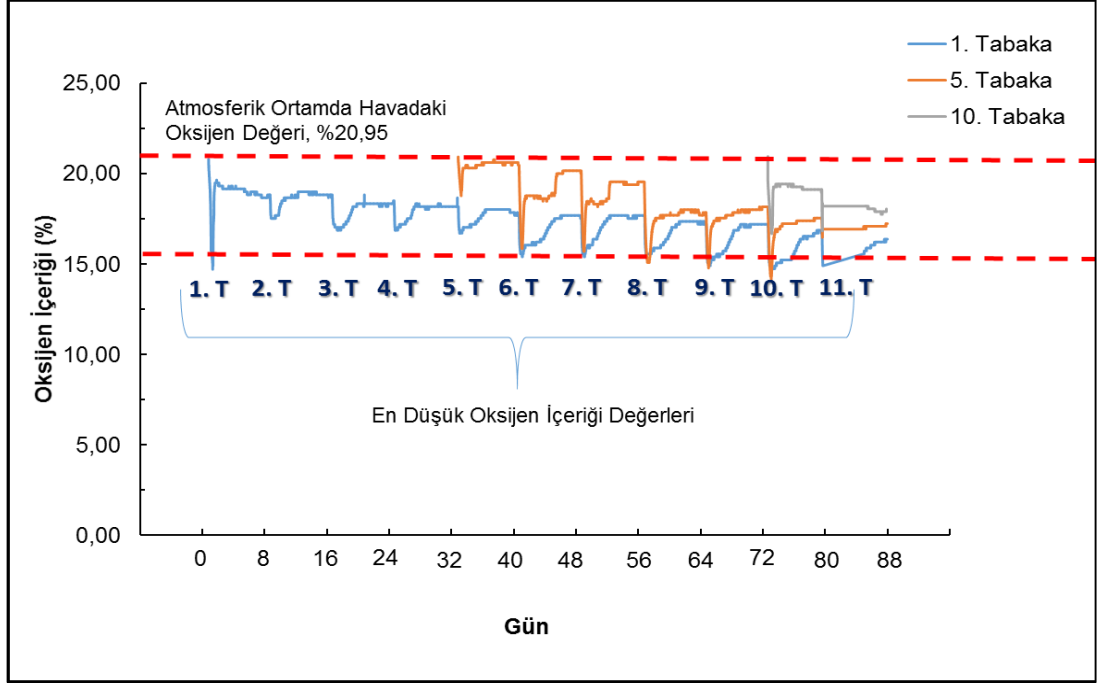


Şekil 4. 23: Tasarım 1'in oksijen içeriği.

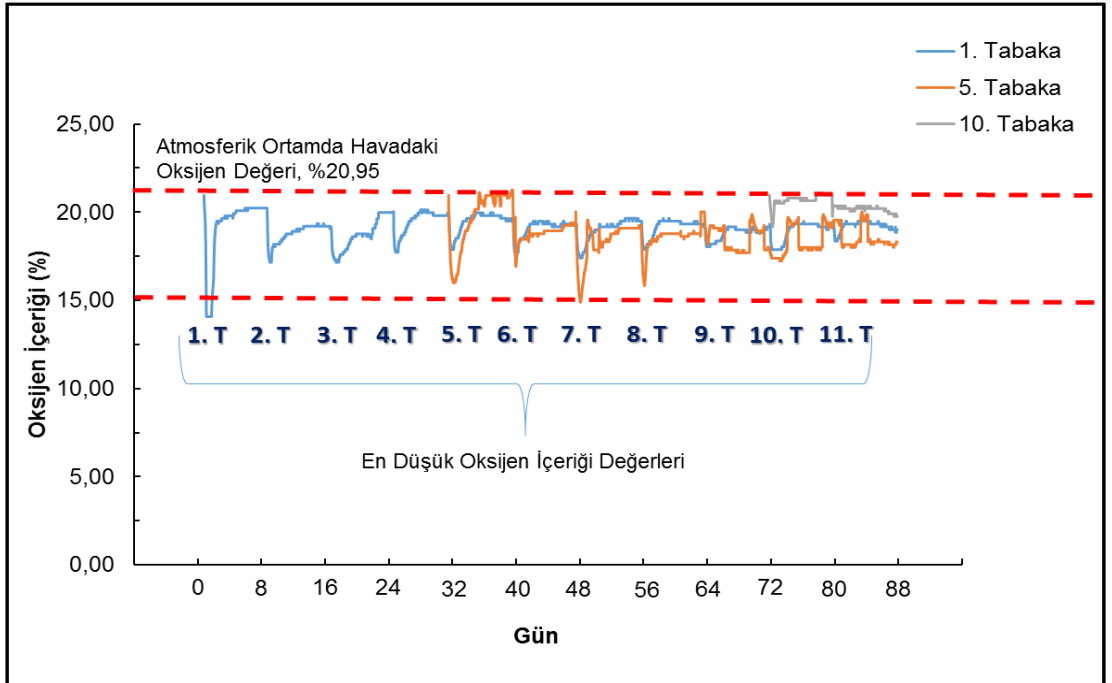
Şekil 4.23'teki Tasarım 1'e göre en alt tabaka ilk dökümden kısa bir süre sonra çatlamalara bağlı olarak havadaki oksijen ile temasa geçtiği anlaşılmaktadır. Ancak 3. tabaka dökümü ile beraber her bir tabaka dökümünden sonra 1. tabaka içeriğindeki oksijenin %17,5-16,5 aralığına kadar düştüğü ve 8 günlük kuruma sürecinde tekrar artışa geçerek %19,8 seviyelerinde kaldığı ölçülmüştür. Bunun sebebi olarak sızıntı sularının bir süreliğine tabaka içerisinde kalması ile beraber suya doymun olan macun malzemenin hava ile temasını kesmesi şeklinde düşünülmektedir.

5. tabaka oksijen içeriğinin son tabaka dökümüne kadar azalma eğilimi gösterdiği ve en düşük değer olarak ~%17 seviyelerine indiği tespit edilmiştir. Bu eğilimde, altında yer alan 4 tabaka ile üstüne dökülen 6 tabaka arasında kalarak havadaki oksijen ile temasının kesildiği anlaşılmaktadır. 10. ve 11. tabaka dökümlerinde ise, 10. tabaka oksijen içeriğinin birbirine çok yakın değerler arasında değiştiği ölçülmüştür. Ancak ~%18 seviyelerine düşen oksijen içeriğinin 16 gün sonra havada yer alan %20,95'lik oksijen değerine doğru yaklaştığı Şekil 4.23'ten görülmektedir. Ayrıca bu yükseliş 1. ve 5. tabakalarda da benzer bir şekilde gerçekleşmektedir. Bu yükselişe, tabakaların su emme potansiyelleri ile beraber tanelerinin yüzey gerilmelerindeki artışa bağlı olarak macun

malzeme yüzeyinden iç kısımlara doğru oluşan çatlakların sebep olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4. 24: Tasarım 2'nin oksijen içeriği.

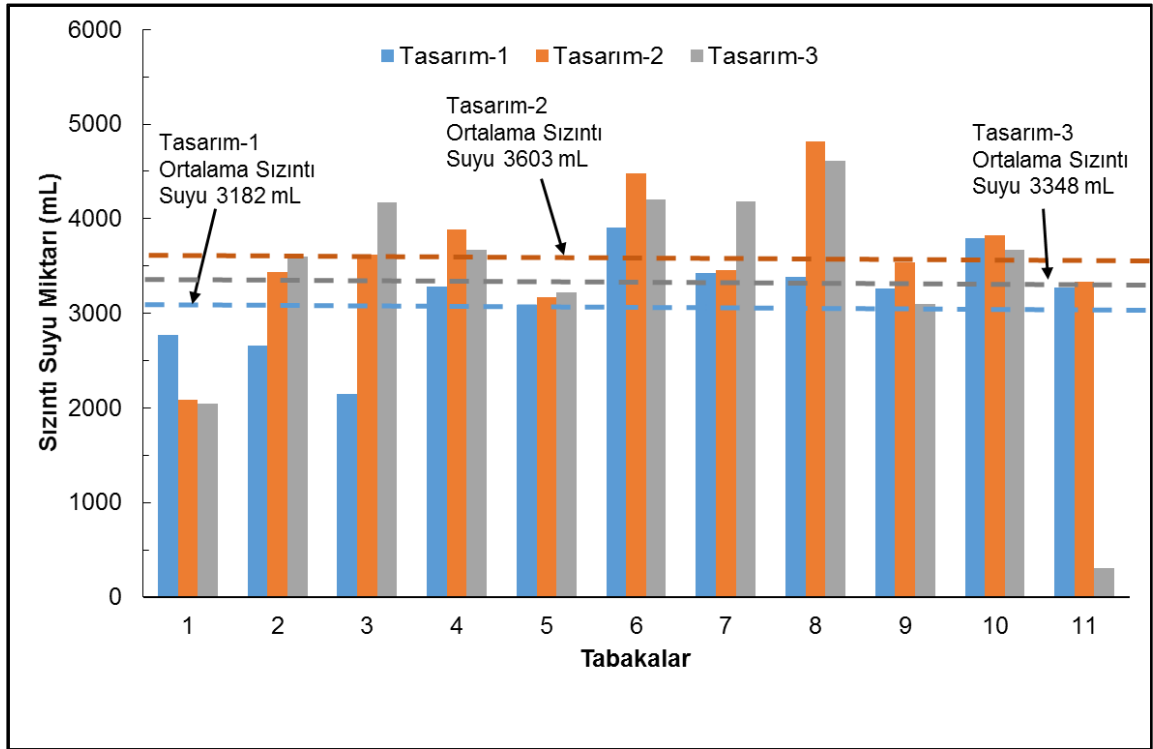


Şekil 4. 25: Tasarım 3'ün oksijen içeriği.

Şekil 4.24 ve 4.25’te görüldüğü üzere, Tasarım 2 ve 3’ün 1. tabakaları çimento içerikli olduğundan ilk dökümden sonra ikisinin de oksijen içerikleri %14 seviyelerine kadar ani bir düşüş gerçekleştirmektedir. Bu iki tasarımdaki ölçümleri gerçekleştirilen 1., 5. ve 10. tabakaların döküm sürecinin sonunda da oksijen içeriği değerlerinin %20,95’in altında kalarak hava ile temasının gerçekleşmediği anlaşılmaktadır.

4.3.1.2. Sızıntı Suyu Miktarları ve pH-Ec Değerleri

Tabaka döküm sürecinde ölçümü yapılan diğer önemli bir parametre ise sızıntı suyudur. Bu kapsamda her bir tabaka dökümünden sonra laboratuvar ölçekli kabinin alt tarafından toplanan sızıntı suyu miktarı ve pH-Ec değerleri ölçülmüştür. Üç farklı tasarıma ait sızıntı suyu miktarları Şekil 4.26’da verilmiştir.

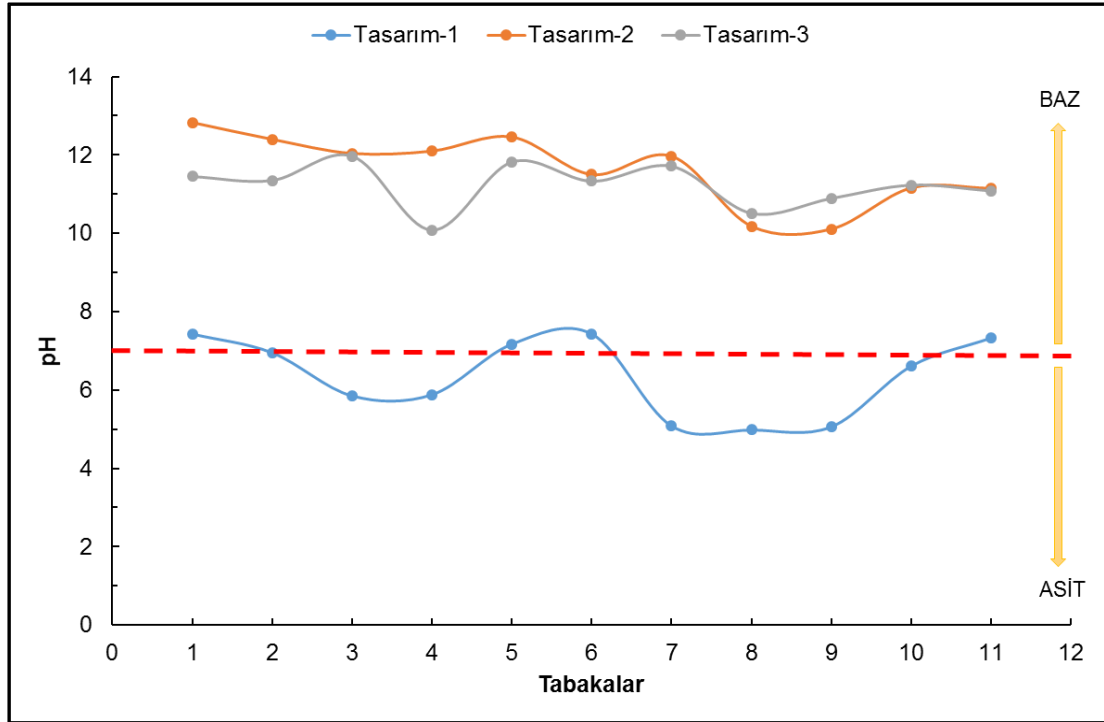


Şekil 4. 26: Üç farklı tasarımın sızıntı suyu miktarı.

Şekil 4.26’da görüldüğü üzere üç farklı tasarımın sızıntı suyu miktarlarının ortalaması 3000 mL’nin üzerinde gerçekleşmiş ve birbirine yakın değerler ölçülmüştür. Ancak Tasarım 3’deki 11. tabakanın sızıntı suyu miktarı ~350 mL olarak gerçekleşmiştir. Bu tabakanın çimento katkılı olmasından dolayı kuruma ile beraber tabaka yapısında kılcal çatlakların oluştuğu görülmüştür. Bu çatlaklar, aynı tabakanın altında yer alan 10. tabakanın kılcal emme basıncı artmasında etkili olmuştur (Şekil 4.22). Bu etki kendini

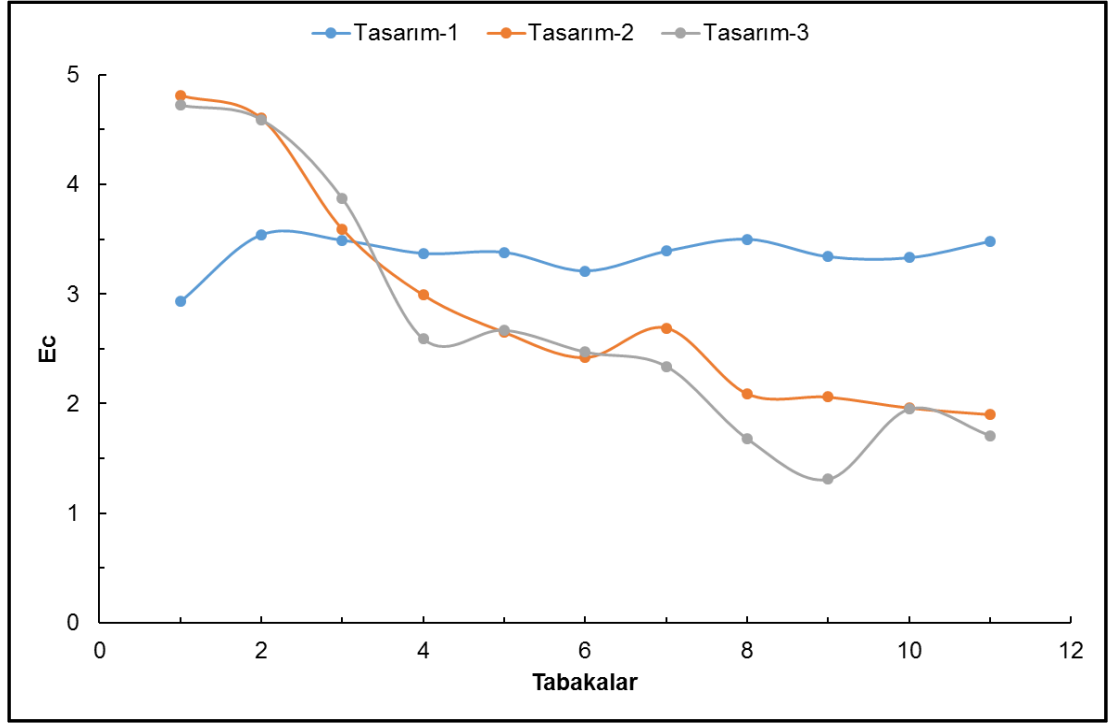
kapiler kuvvet olarak göstermiş ve sızıntı suyunun büyük bir kısmının üst tabakada kalarak buharlaşma yoluyla ortamdan uzaklaşmasını sağladığı düşünülmektedir. Böylece en üst tabakadaki kuruma süresi yavaşlamış ve çatlakların genişlemesinin önüne geçilmiştir. Bu durum çatlak analizinde açıkça görülmektedir. Ayrıca kapiler kuvvetin efektif gerilmeyi düşürmesi, en fazla düşey birim deformasyonun Tasarım 3'te gerçekleşmesine neden olmuştur (Şekil 4.48).

Her bir tabaka dökümünden sonra toplanan sızıntı sularının pH ve Ec değerleri ölçülmüş, pH değerleri Şekil 4.27'de ve Ec değerleri Şekil 4.28'de verilmiştir.



Şekil 4. 27: Üç farklı tasarımın sızıntı sularının pH değerleri.

Tasarım 1'in pH değerlerinin çoğunlukla 7'nin altına düştüğü Şekil 4.27'de gösterilmektedir. Buna karşın Tasarım 2 ve 3'ün en alt tabakalarının çimento katkılı olması, tabaka içerisinde alkali silis reaksiyonları oluşturmuş, sonrasında alkali mineralleri çözdürdükleri ve bir bariyer görevi üstlenerek pH değerlerinin 10'un altına düşmesine izin vermedikleri anlaşılmaktadır.

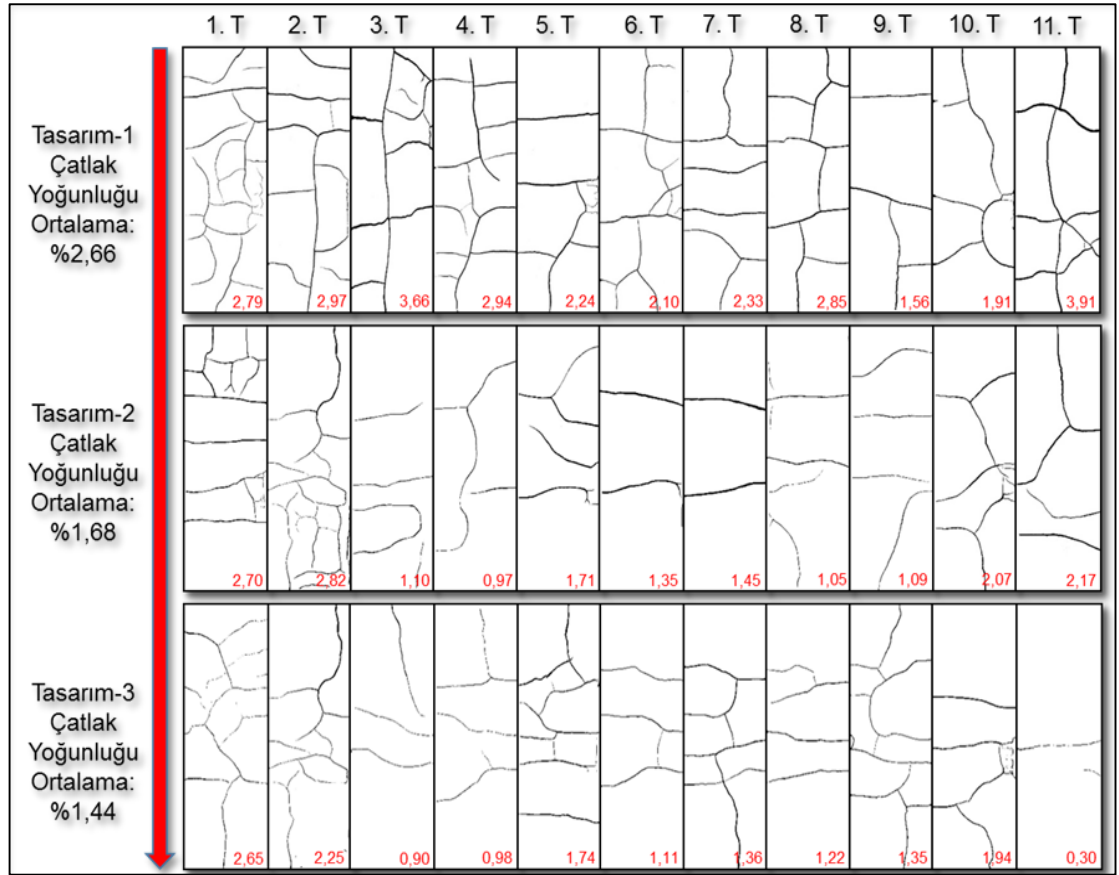


Şekil 4. 28: Üç farklı tasarımın sızıntı sularının Ec değerleri.

Şekil 4.28’de ise Tasarım 1’in Ec değerlerinin ilk dökümden sonra 3’ün üzerinde kaldığı ve sonraki her dökümde birbirine yakın değerlerde devam ettiği görülmektedir. Tasarım 2 ve 3’te ilk tabakadan sonra Ec değerlerinin bir düşüş eğilimine girdiği ve Tasarım 1’e göre iyon çözünmesinin azaldığı belirlenmiştir. Sonuç olarak çimento katkısı, sızıntı suyunun pH değerlerini bazık ortamda tutmuş, düşük pH değerlerinde oluşabilecek AMD ve ağır metal mobilizasyonu risklerini minimize ettiği anlaşılmaktadır. Bunun yanı sıra çimentolu tasarımlarda çözünen iyon miktarlarının azalması bu tezi desteklediği söylenebilmektedir.

4.3.1.3. Çatlak Yoğunluğu

Bu tez çalışması kapsamında her bir tabaka dökümünden ve kuruma sürecinden sonra fotoğraflar çekilmiş ve Image-proses programında analiz edilmiştir. Üç tasarımın her bir tabakasına ait sonuçlar ve tasarımların ortalaması Şekil 4.29’da verilmiştir.



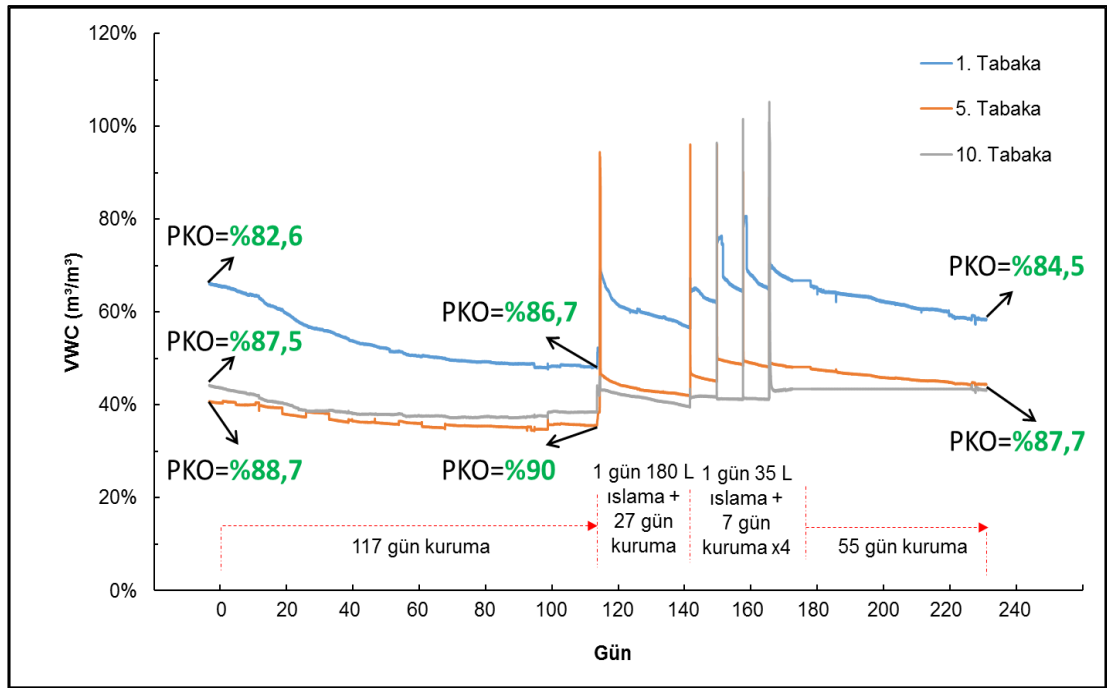
Şekil 4. 29: Üç farklı tasarımın çatlak yoğunluğu değerleri.

Şekil 4.29'daki çatlak yoğunluklarının tabakalar üzerindeki dağılımları incelendiğinde, Tasarım 1'deki tabaka çatlaklarının yüzeyin geneline dağıldığı, Tasarım 2 ve 3'teki çatlakların ise 2. tabakadan sonra tabakaların orta kısmında yoğunlaştığı görülmektedir. Tasarım 2 ve 3'teki bu benzerlik, Tasarım 3'ün çimento katkılı 11. tabakasına kadar sürmüş ve bu tabaka %0,30 çatlak yoğunluğu ile en düşük değeri almıştır. Çimentolu tabakanın alt tabakalarındaki nem içeriği sayesinde hızlı bir kuruma gerçekleşmemiş ve çok küçük sayılabilecek orta kısımda kılcal bir çatlak oluşmuştur. Bu durum, yerüstü macun depolama yönteminde kullanılan konik stoklama geometrisinde yağmur sularının yüzeyden hızlı bir şekilde drene olmasına yardımcı olmaktadır. Ayrıca çimentolu tabakaların kılcal çatlaklar oluşturarak diğer tabakalara bariyer görevi gördüğü ve bununla beraber su kaybını yavaşlattıkları söylenebilmektedir.

4.3.2. Islanma–Kuruma Süreci

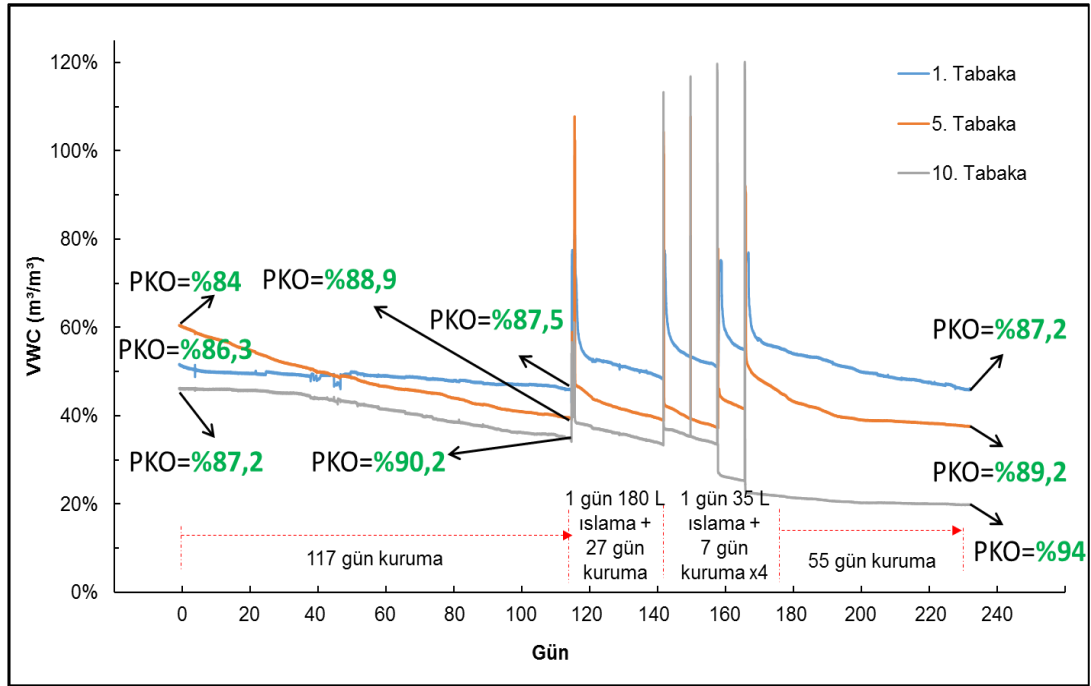
4.3.2.1. Sensör Ölçümleri

Islama-kuruma süreci boyunca uygulanan kuruma (117 gün), bölgesel yağış risk analizi (1 gün 180 L ıslama + 27 gün kuruma), ardından 8 günlük 4 periyottan oluşan ıslama-kuruma (1 gün 35 L ıslama + 7 gün kuruma) ve son olarak 55 günlük kuruma deneyleri kapsamında toplamda 232 gün boyunca ölçülen 1., 5. ve 10. tabaka hacimsel su içeriği değerleri Tasarım 1 için Şekil 4.30, Tasarım 2 için Şekil 4.31 ve Tasarım 3 için Şekil 4.32’de verilmiştir.



Şekil 4. 30: Tasarım 1 için ıslama-kuruma sürecindeki hacimsel su içeriği değişimleri.

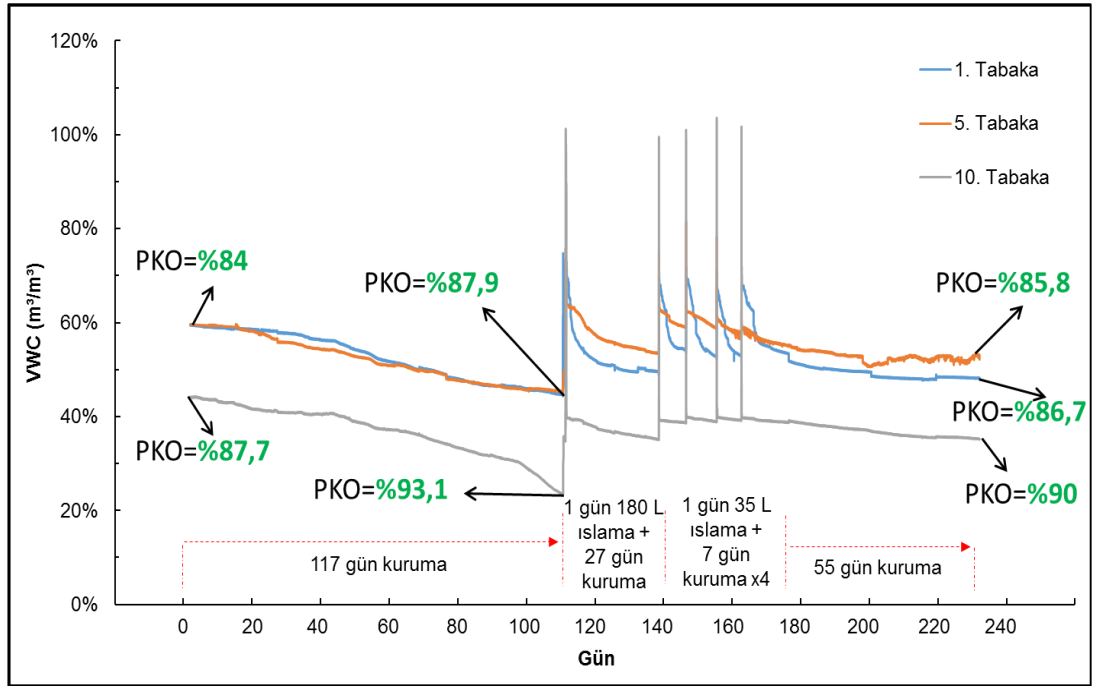
Tasarım 1’deki 1. tabakanın ıslama-kuruma süreci boyunca %100 suya doygunluk sınırı olan %53 hacimsel su içeriğinin üzerinde kaldığı Şekil 4.30’da görülmektedir. Buna karşın bu süreçte PKO değeri en son %84,5 hesaplanmış ve likit limit değerinin üstünde çıkmıştır. 5. ve 10. tabakalarda ise birbirine yakın değer ölçülmüş ve sürecin başından sonuna kadar hacimsel su içerikleri ~%87-%89 aralığında değişmiştir. Bu süreçte özellikle 5. ve 10. tabakaların ıslandıktan 24 içinde eski değerlerine tekrar dönmeye çalışarak birbirlerine yaklaştıkları görülmektedir.



Şekil 4. 31: Tasarım 2 için ıslanma-kuruma sürecindeki hacimsel su içeriği değişimleri.

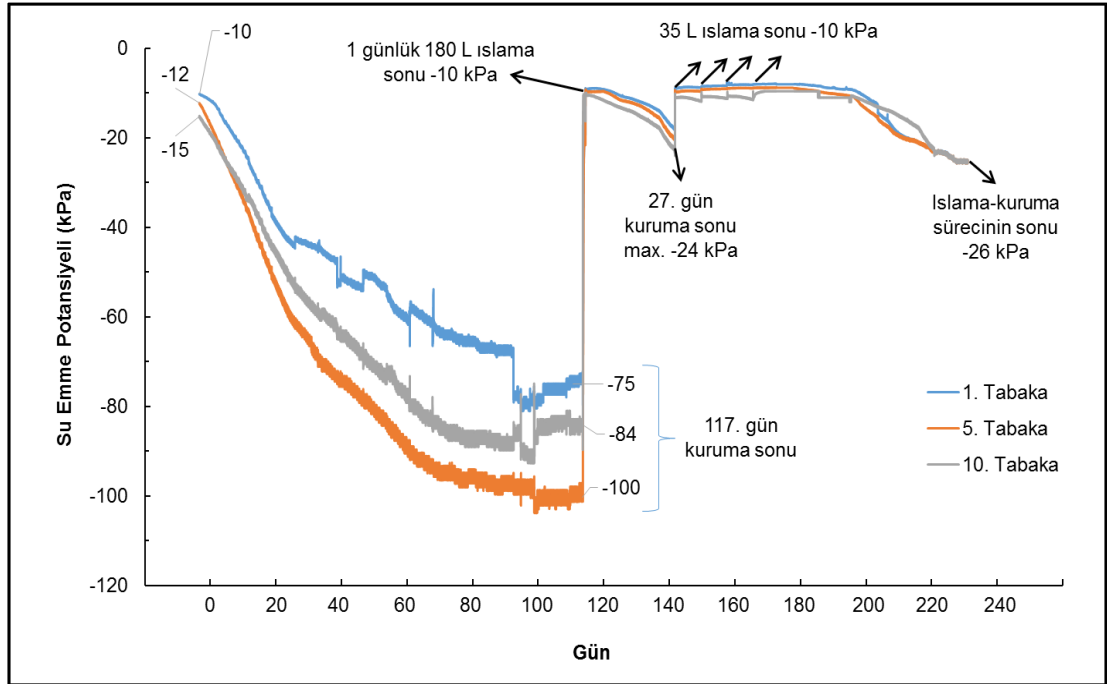
Islanma-kuruma süreci Tasarım 2 için incelendiğinde, 1. tabakanın hacimsel su içeriğinin 117 günlük kuruma sürecinde yaklaşık %50 seviyelerinde sabit kaldığı Şekil 4.31’de görülmektedir. Buna karşın aynı süreçte 5. tabakanın ~%60’dan ~%40’a ve 10. Tabakanın ise ~%45’ten ~%35’lere düştüğü ölçülmüş ve PKO’larının ~%90’na çıktığı hesaplanmıştır. Sürecin sonunda ise başlangıç PKO’larına göre 1. tabakanın ~%1, 5. tabakanın ~%5 ve 10. tabakanın ~%7 arttığı belirlenmiştir.

Şekil 4.32’de görüldüğü üzere, Tasarım 3’deki 5. tabaka ıslanma-kuruma süreci boyunca hacimsel su içeriği %50’nin üzerinde ölçülmüştür. Ayrıca Tasarım 1 ve Tasarım 2’deki 5. tabakalara göre daha doygun kalmıştır. Bu üç tasarım genel olarak incelendiğinde, ıslanma sürecinde tabakalarda kısa bir zaman diliminde (~12 saat) likit limit değerine ulaşmış fakat suyun hızla uzaklaşmasıyla tekrar stabil hale gelmiştir.



Şekil 4. 32: Tasarım 3 için ıslanma-kuruma sürecindeki hacimsel su içeriği değişimleri.

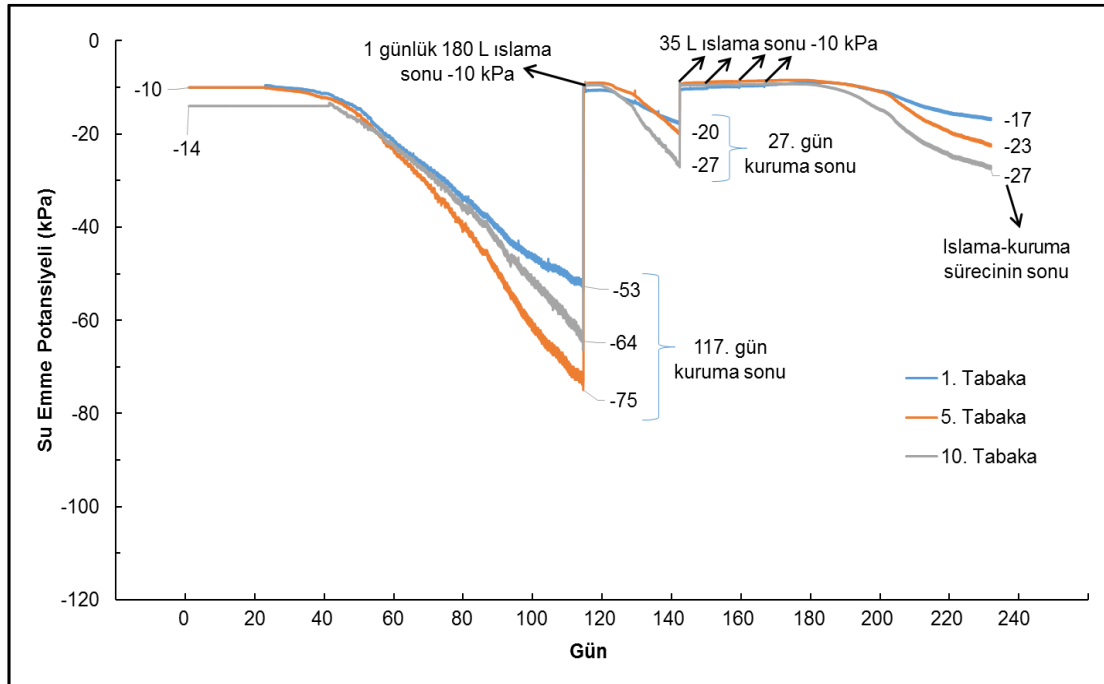
Hacimsel su içeriği ile ilişkili olan kılcal emme basıncı sensör ölçümleri Tasarım 1 için Şekil 4.33, Tasarım 2 için Şekil 4.34 ve Tasarım 3 için Şekil 4.35'te verilmiştir.



Şekil 4. 33: Tasarım 1 için ıslanma-kuruma sürecindeki kılcal emme basıncındaki değişimleri.

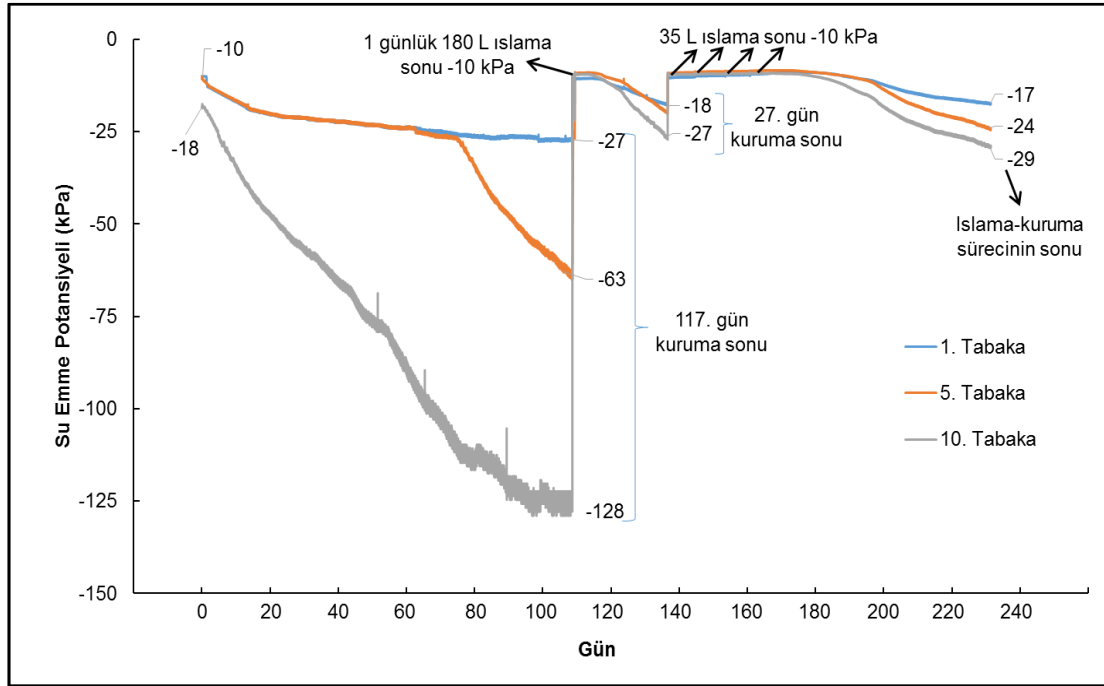
Tasarım 1'deki kılcal emme basıncı değişiklikleri incelendiğinde, 1., 5. ve 10. tabakaların 117 günlük kuruma süresinin 100. gününden sonra daha stabil kaldıkları belirlenmiştir (Şekil 4.33). Bu durumun bir benzeri hacimsel su içeriği grafiğinde de gözlenmiş ve Şekil 4.30'daki gibi 117 günlük kuruma süresindeki su kaybı oranlarına göre kılcal emme basıncı değerlerinin aynı şekilde sıralandığı ölçülmüştür. Bu kuruma süreci sırasında 5. tabaka -30 kPa değerinden sonra 10. tabakayı geçerek en fazla kılcal emme basıncı değerine ulaşmıştır. Bunun sebebi olarak, üst tabakalarda oluşan çözünmüş madde yoğunluğunun fazla olması ile beraber tabakalar arasındaki kılcal çatlaklardan geçen kılcal emme basıncının neden olduğu düşünülmektedir.

180 L ıslanma yapıldıktan sonra her üç tabakanın doymun hale geldiği Şekil 4.33'de görülmektedir. Sonraki 27 günlük kuruma süresinde en alt tabakadan en üst tabakaya doğru giderek artan kılcal emme basıncı değerleri oluşmuş ve 27. gün sonunda 10. tabaka en yüksek -24 kPa değerini almıştır. Daha sonra gerçekleştirilen 35 L ıslanma ve 7 günlük kuruma deneyleri sırasında tabakalar doymun kalmaya devam etmiştir. Ancak 200. günden itibaren artmaya başlayan kılcal emme basıncı değerleri, 32 gün sonra -26 kPa ulaştığı ölçülmüştür.



Şekil 4. 34: Tasarım 2 için ıslanma-kuruma sürecindeki kılcal emme basıncındaki değişimleri.

Tasarım 2’de, 1. ve 5. tabakalar ~30 gün -10 kPa değerinde kalırken, 10. Tabaka ~40 gün -14 kPa’da stabil kaldığı ve bu tabakaların ~50. günden sonra hızla kılcal emme basıncı değerlerinin arttığı Şekil 4.34’te görülmektedir. Belirtilen süreler içinde Şekil 4.31’deki Tasarım 2 hacimsel su grafiği incelendiğinde, benzer bir şekilde 1. ve 5. tabakaların doymunluk sınırının altına düşmediği ve 10. tabakanın ise stabil bir görünüm içinde olduğu belirlenmiştir. 117 günlük kuruma sürecinin sonunda, kılcal emme basıncı değerlerinde Tasarım 1’dekine benzer bir sıralama oluşmuş ve -75 kPa değeri ile 5. tabakanın en yüksek değere ulaştığı ölçülmüştür. Islanma testlerine başlandıktan sonra tabakaların üçü de doymunluğa ulaşmış ve takip eden kuruma sürelerinde -17 kPa ile -27 kPa arasında değişen değerler almışlardır.



Şekil 4. 35: Tasarım 3 için ıslanma-kuruma sürecindeki kılcal emme basıncındaki değişimleri.

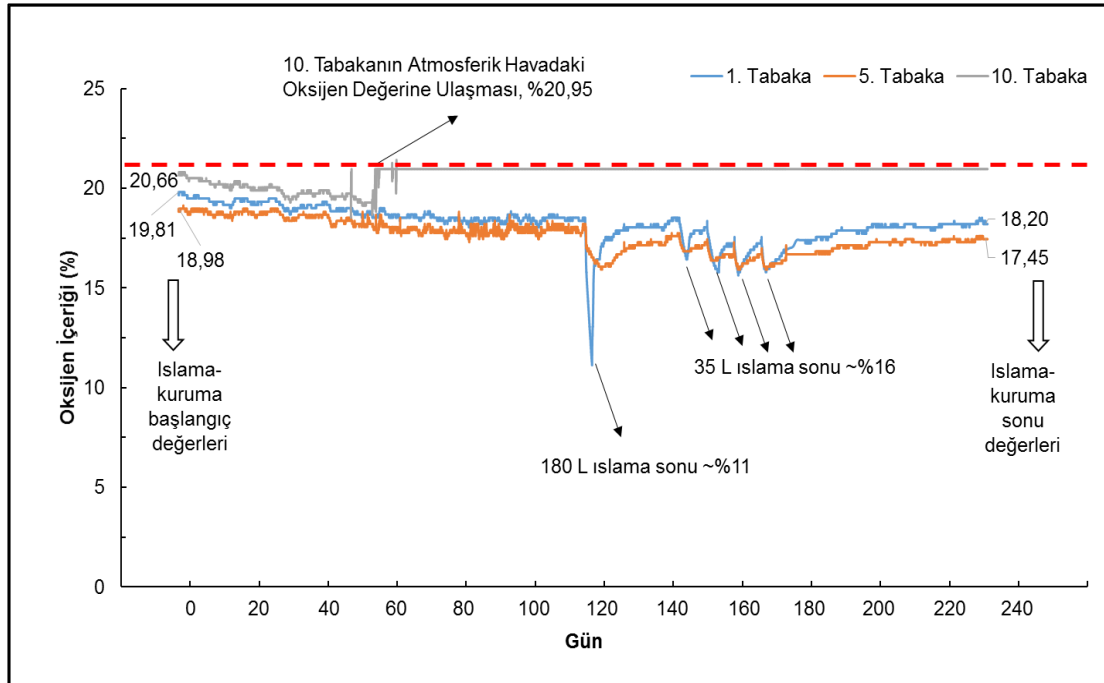
Tasarım 3’te ise, Şekil 4.35’te görüldüğü üzere, Tasarım 2’deki gibi 1. ve 5. tabakalar ~60 gün beraber hareket etmektedir. Ancak kılcal emme basıncı üzerinde etkili olan hacimsel su içeriği incelendiğinde de, bu beraberliğin kuruma sürecinin sonuna kadar devam ettiği Şekil 4.32’de görülmektedir. 5. Tabakanın 80. günden sonra farklı hareket etmesinin üzerinde, sürecin başlangıcından itibaren hızla düşen 10. tabakanın etkili

olduğu düşünülmektedir. Böylece kılcal emme basıncı üzerinde önemli bir rolü olan hacimsel su içeriğinin dışında, birbirine yakın olan tabakaların yüksek kılcal emme basıncı kuvvetlerinden etkilendiği söylenebilmektedir.

Kuruma sürecinin sonunda, Tasarım 1 ve Tasarım 2'ye göre 10. tabakanın -128 kPa ile en yüksek değere ulaştığı ölçülmüştür. Burada, bir üstünde yer alan çimento katkılı macun tabakada oluşan kılcal çatlakların uyguladığı su emiliminin etkisi olduğu düşünülmektedir.

Islanma testlerinden sonra çimento katkılı en üst tabakanın yüzeyinde oluşan deformasyonlar, bu tabakada yer alan kılcal çatlakların biraz daha büyümesine yardımcı olmuştur (Şekil 4.41). Dolayısıyla Tasarım 3'ün ıslanma testlerinden sonra Tasarım 2 gibi davranmaya başlamasını sağlamıştır (Şekil 4.34 ve 4.35).

Islanma-kuruma sürecinde diğer bir önemli parametre macun tabakalardaki oksijen difüzyonunu ölçen oksijen sensörü sonuçları, Tasarım 1 için Şekil 4.36, Tasarım 2 için Şekil 4.37 ve Tasarım 3 için ise Şekil 4.38'de verilmiştir.

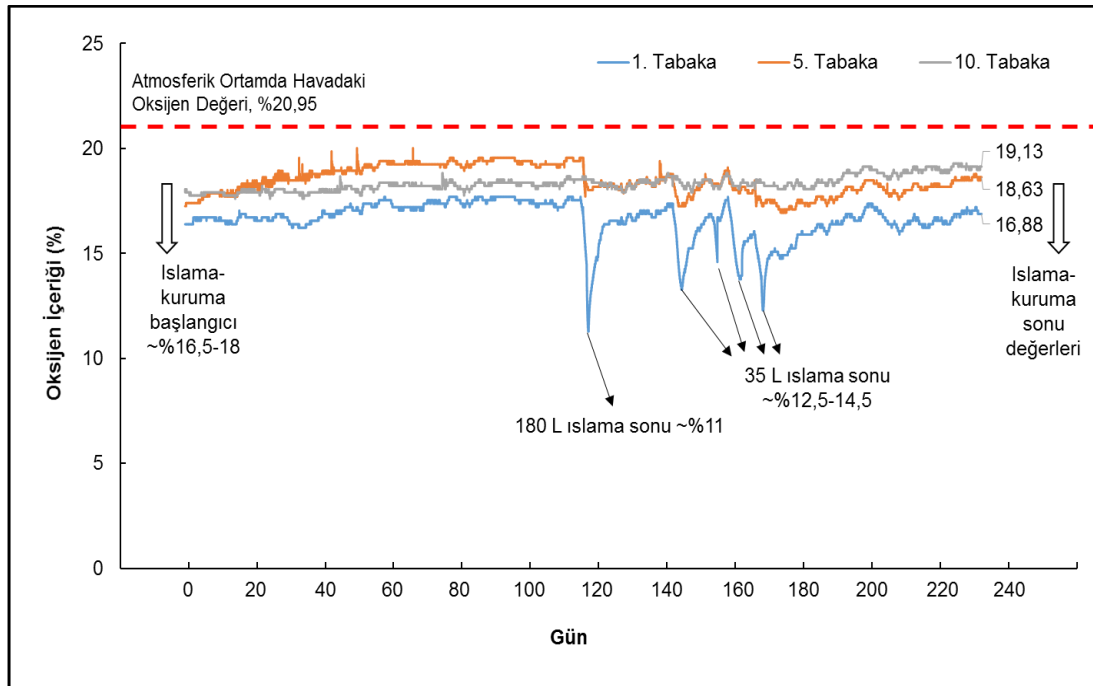


Şekil 4. 36: Tasarım 1 için ıslanma-kuruma sürecindeki oksijen içeriği değişimleri.

Tasarım 1'deki 10. tabakanın 60. günden sonra atmosferik havayla temasa geçtiği Şekil 4.36'da görülmektedir. Dolayısıyla yaklaşık 8 cm derinliğe kadar oksijen difüzyonu

gerçekleştiği belirlenmiştir. Buna karşın 1. ve 5. tabakaların ise ıslanma-kuruma sürecinde genellikle ~%17,5-%19,5 aralığında kaldığı ve atmosferik oksijen içeriği olan %20,95'e hiç ulaşmadıkları görülmektedir.

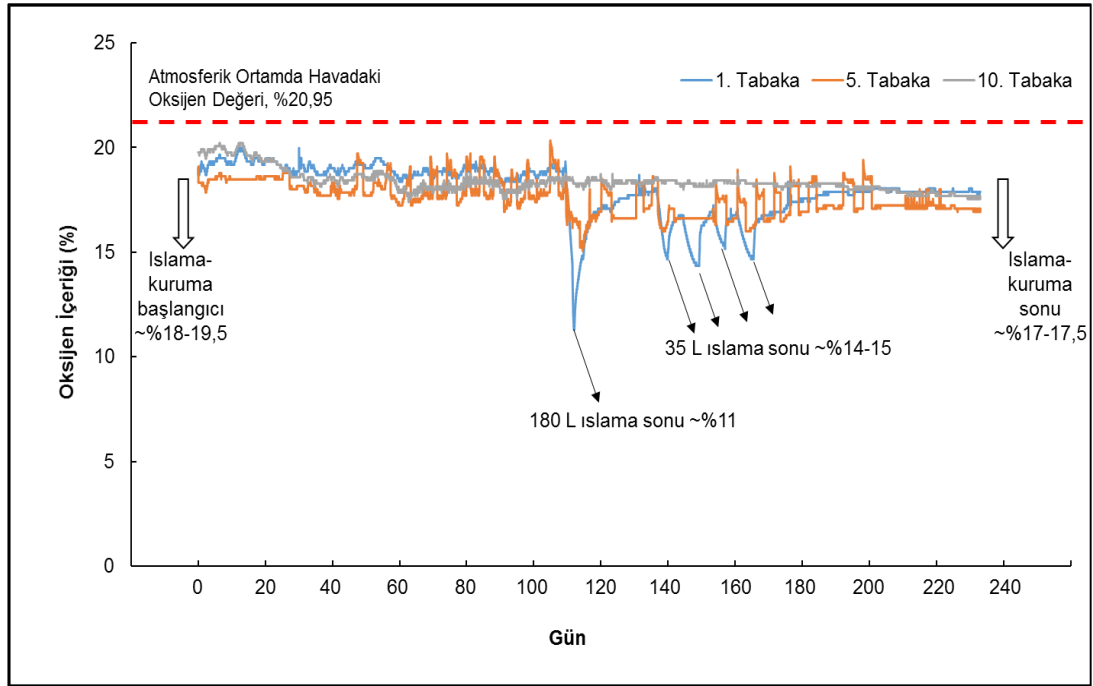
180 L ıslanma yapıldıktan sonra en alt tabakanın ~%11 ve 5. tabakanın ~%16 oksijen değerleri olmuştur. Takip eden 35 L ıslanma periyodunda da bu iki tabakanın oksijen içeriği ~%16 olarak ölçülmüştür (Şekil 4.36). Aynı zamanda bu tabakaların hacimsel su içeriklerinin %100 değerine yaklaştığı Şekil 4.30'da görülmektedir.



Şekil 4. 37: Tasarım 2 için ıslanma-kuruma sürecindeki oksijen içeriği değişimleri.

Tasarım 2'de tüm tabakaların hava ile temasa geçmediği ve ıslanma dönemleri dışında stabil kaldığı Şekil 4.37'den görülmektedir. 180 L'lik ıslanmanın sonunda Tasarım 1'deki gibi ~%11 oksijen değeri ölçülmüştür. Sular drene olduktan sonra başlangıç değerlerine yakın oksijen içeriklerine geri döndükleri belirlenmiştir.

Tasarım 3'te ise başlangıçtaki oksijen içeriği değerlerinin ıslanma-kuruma sürecinin sonuna kadar azalış eğiminde oldukları Şekil 4.38'de görülmektedir.



Şekil 4. 38: Tasarım 3 için ıslanma-kuruma sürecindeki oksijen içeriği değişimleri.

180 L ıslanma yapıldıktan sonra Tasarım 3'teki 1. tabakanın da Tasarım 1 ve Tasarım 2'deki gibi oksijen içeriği değeri ~%11 olarak ölçülmüştür. 35 L ıslanma periyodunda ise Tasarım 2'dekine benzer bir şekilde özellikle 1. tabakanın oksijen içeriğinde önemli düşüşler gerçekleşmiştir. Bunun sebebi olarak sızıntı suyunun 1. tabakadan daha yavaş geçmesi olarak ifade edilebilir. İslanma sürecinin dışında tabakalar arasındaki hava ve sızıntı suyu geçişleri sırasında oksijen içeriklerinde azda olsa artış ve azalışlar gözlemlenmiştir (Şekil 4.38).

Böylece farklı tasarımlarda depolanan macun malzemenin hacimsel su içeriklerinin, su emme potansiyellerinin ve oksijen içeriği değerlerinin yer yer benzerlikler göstermesine rağmen iklim vb. dış etkenler altında farklı davranışlar gösterdikleri ortaya konulmuştur. Özellikle hacimsel su içeriği ve oksijen içeriği değerlerinde çimento katkılı tabakaların diğer tabakalar üzerindeki etkilerinin pozitif olduğu anlaşılmaktadır. Bu açıdan incelendiğinde Tasarım 3'ün daha doygun ve daha az oksijen içerdiği Şekil 4.32 ve Şekil 4.38'den de görülmektedir.

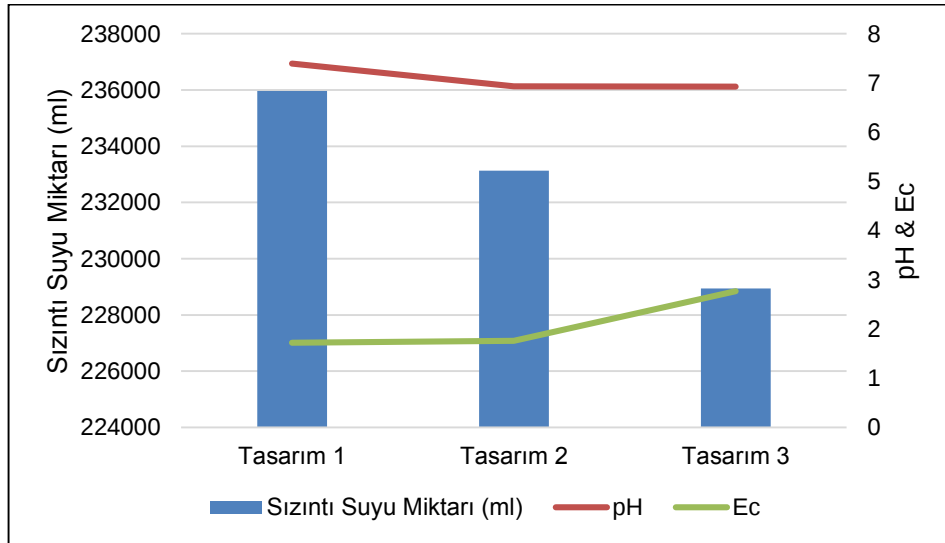
4.3.2.2. Sızıntı Suyu Miktarları ve pH-Ec Değerleri

Islanma-kuruma sürecinde 117. günde yapılan 180 L ve takiben 27 gün sonra da 35 L'lik 8'er gün arayla gerçekleştirilen 4 ıslanma sonunda toplanan sızıntı suyu miktarları ve pH-Ec ölçümleri Tablo 4.7'de verilmiştir. Islanmalarda kullanılan çeşme suyunun pH'ı 6,5 ve Ec'si ise 0,403 mS/cm olarak ölçülmüştür.

Tablo 4. 7: Islanma-kuruma sürecindeki sızıntı suyu miktarları ve pH-Ec değişimleri

	Tasarım 1			Tasarım 2			Tasarım 3		
Beslenen Su Miktarı (ml)	Sızıntı Suyu Miktarı (ml)	pH	Ec (mS/cm)	Sızıntı Suyu Miktarı (ml)	pH	Ec (mS/cm)	Sızıntı Suyu Miktarı (ml)	pH	Ec (mS/cm)
180000	129570	7,34	2,44	126787	7,05	1,71	120456	6,60	2,42
35000	18400	7,23	2,51	17290	6,90	1,83	16140	7,40	2,95
35000	28850	7,40	1,43	27700	7,04	2,06	29800	7,36	3
35000	28700	7,46	1,22	30100	6,88	1,68	30270	6,70	2,81
35000	30450	7,54	1,01	31250	6,79	1,54	32280	6,57	2,65

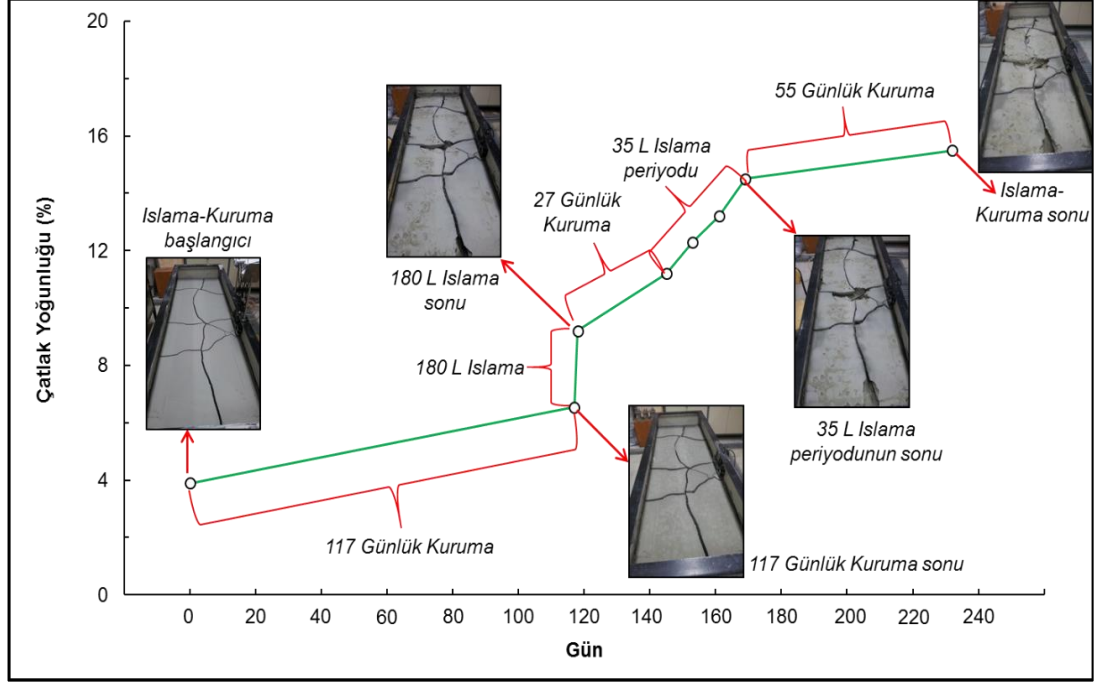
Islanma sürecinde kabinlere beslenen sulardan toplamda en fazla sızıntı suyunu Tasarım 1 verirken en az sızıntı suyunu Tasarım 3 vermiştir. Üç farklı tasarımda da beslenen suya göre pH ve Ec değerlerinin arttığı Tablo 4.7'den görülmektedir. Islanma sürecinde sisteme toplamda 320000 mL su beslenmiş ve Tasarım 1, 2 ve 3'ün ortalama pH-Ec değerleri sırasıyla, 7,39-1,72; 6,93-1,76; 6,93-2,77 olarak ölçülmüştür. Tasarım 3'te çözünen iyon miktarının yüksek oluşuna bağlı olarak Ec değeri ise diğer tasarımlardan fazla çıkmıştır (Şekil 4.39).



Şekil 4. 39: Islanma sürecindeki sızıntı suyu miktarları ve pH-Ec değişimleri.

4.3.2.3. Çatlak Yoğunluğu

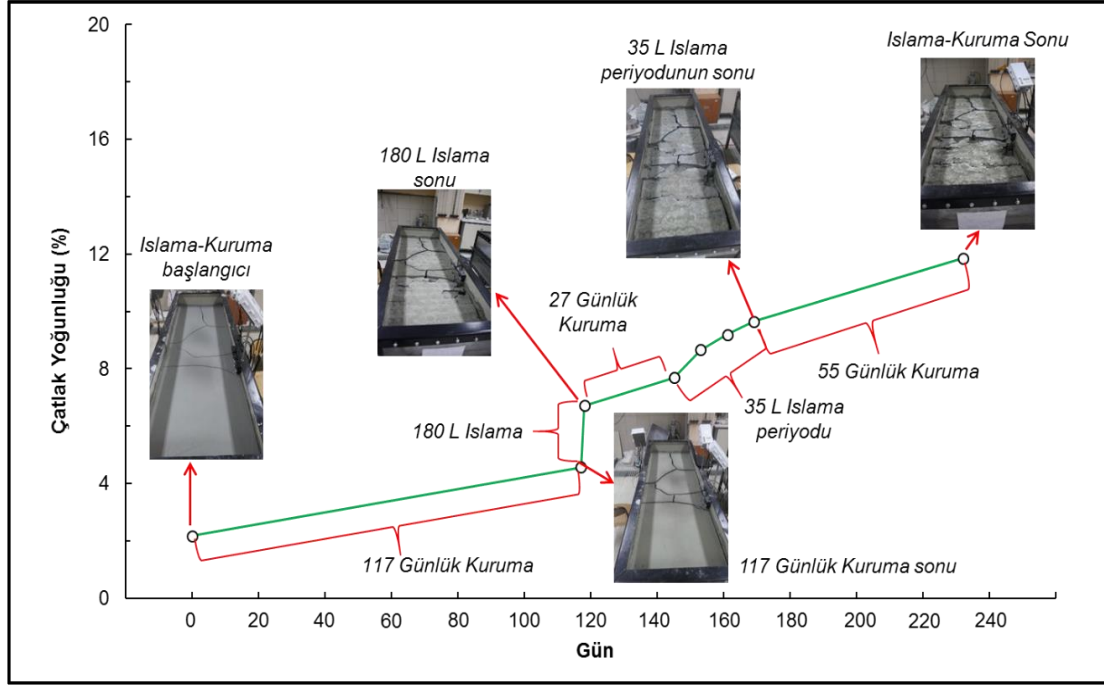
Islanma-kuruma sürecinde çatlak yoğunluklarındaki değişimler fotoğraflanarak imageJ programında analiz edilmiş ve sonuçları Tasarım 1 için Şekil 4.40, Tasarım 2 için Şekil 4.41 ve Tasarım 3 için Şekil 4.42’de verilmiştir.



Şekil 4. 40: Tasarım 1 için ıslanma-kuruma sürecindeki çatlak yoğunluğu değişimleri.

Şekil 4.40’dan da görüldüğü üzere ıslanma-kuruma süreci boyunca 11. tabaka yüzeyinde ki çatlak yoğunluğu miktarı artış göstermiştir. Başlangıçtaki %3,89 luk çatlak yoğunluğu değeri 117 günlük kuruma süreci sonunda %6,54 değerine yükselmiş, ıslanma sürecinin başlaması ile beraber sonraki 115 günde hızlı bir artış göstermiştir. Süreç sonunda da başlangıca göre ~4 kat artarak %15,49 değerine ulaşmıştır. Buradaki artışa neden olarak, risk analizi ile başlayan ıslanmalarda özellikle orta kısımda büyük bir çökme meydana gelmiş olması söylenebilmektedir ve Şekil 4.40’daki resimlerden açıkça anlaşılmaktadır. Tasarım 1’in çatlak analizleri ve Ec değerleri birlikte incelendiğinde ise, malzeme içerisindeki boşluk suyunda çözünen iyon miktarının artışına bağlı olarak artan Ec değerlerinin, çatlak yoğunluğu değerleri ile benzer bir eğilime sahip olduğu görülmektedir. Buna göre malzemedeki iyon salınımı sonucunda oluşan boşlukların, çatlak oluşumlarına doğrudan etkisi olduğu düşünülmektedir (Başçetin ve diğ., 2015d).

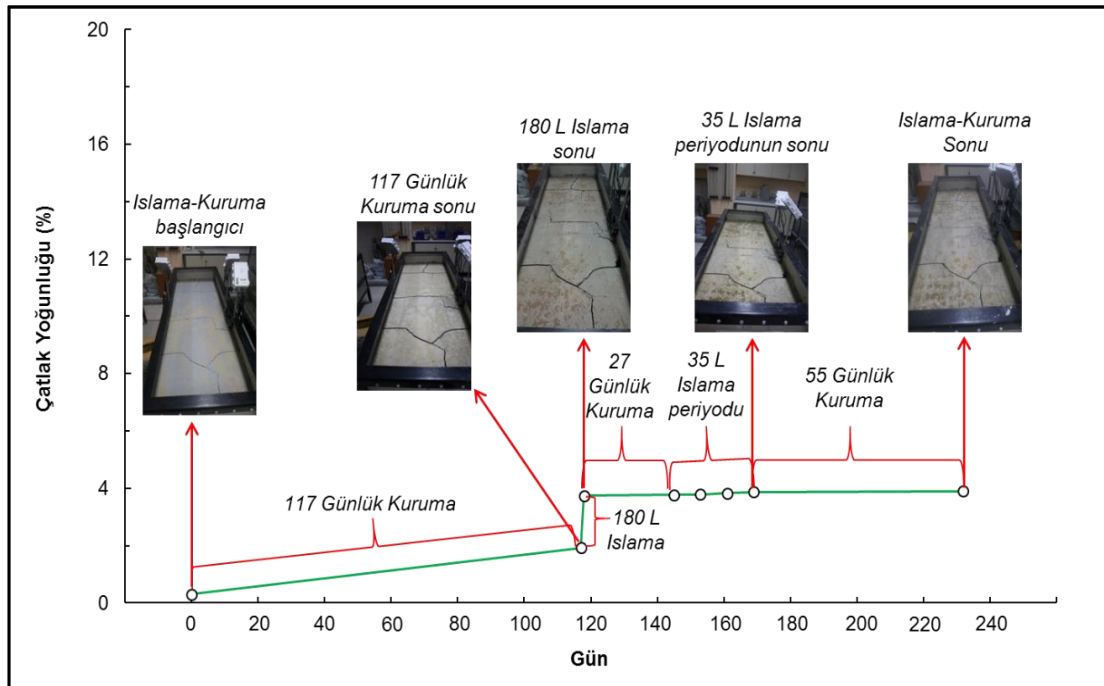
Tasarım 2’de de çatlak yoğunluklarının benzer bir şekilde devam ettiği ve en üst tabakanın ıslanma sonrasında yüzeyinde stabilizasyon problemi olduğu Şekil 4.41’de görülmektedir.



Şekil 4. 41: Tasarım 2 için ıslanma-kuruma sürecindeki çatlak yoğunluğu değişimleri.

Şekil 4.41’de görüldüğü üzere Tasarım 1’dekine benzer bir şekilde ıslanma-kuruma süreci boyunca 11. tabaka yüzeyinde ki çatlak yoğunluğu miktarı artış göstermiş ve bazı bölgelerinde çökmeler meydana gelmiştir. Başlangıçtaki %2,17’lik çatlak yoğunluğu değeri 117 günlük kuruma süreci sonunda %4,57 değerine yükselmiş, ıslanma sürecinin başlaması ile beraber sonraki 115 günde hızlı bir artış göstermiştir. Süreç sonunda da başlangıca göre ~2,5 kat artarak %11,85 değerine ulaşmıştır.

Tasarım 3’te ise diğer tasarımların aksine çimento katkılı olan en üst tabakanın daha stabil durduğu ve yüzeyinde fazla bir bozunmanın yaşanmadığı Şekil 4.42’de görülmektedir.



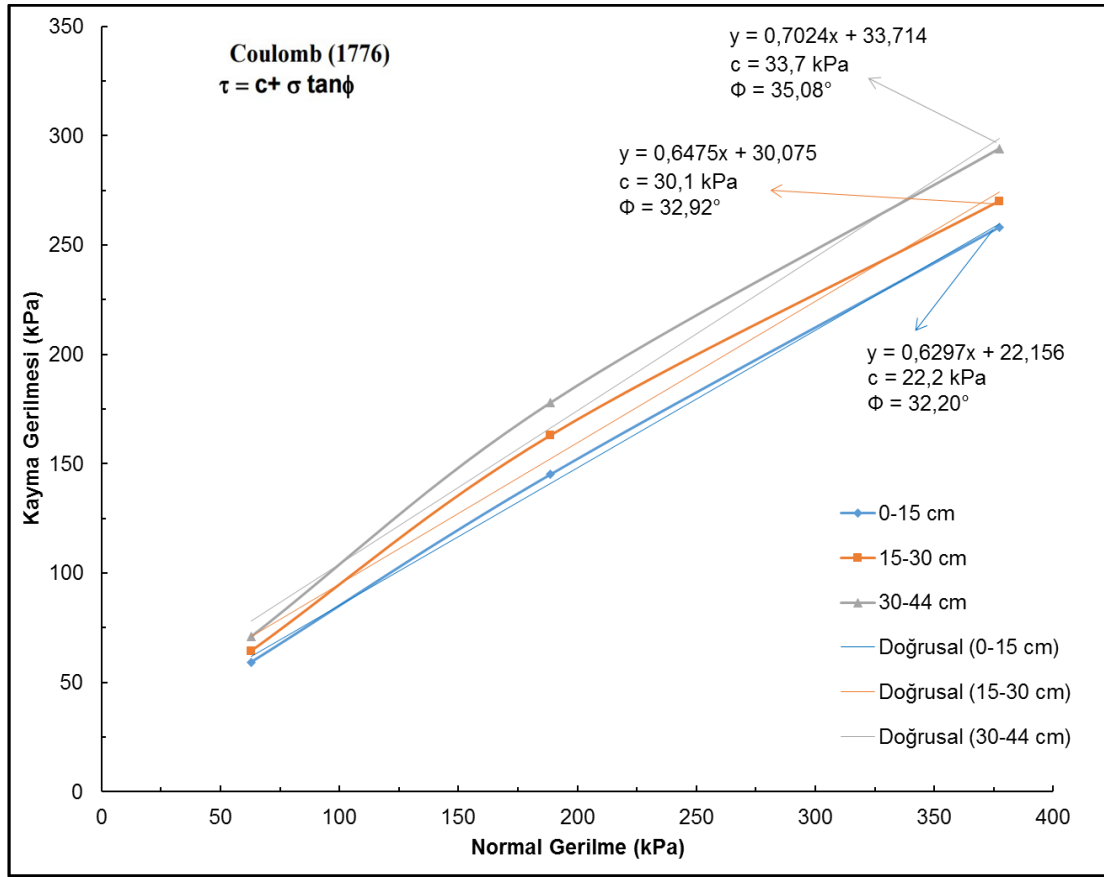
Şekil 4.42’de görüldüğü üzere Tasarım 3’ün 11. tabaka yüzeyinde ki çatlak yoğunluğu miktarı Tasarım 1 ve Tasarım 2’nin aksine 180 L’lik ıslanmadan sonra az bir artış göstermiş ve devamında ise sürecinin sonuna kadar stabil kaldığı belirlenmiştir. Başlangıçtaki %0,3’lük çatlak yoğunluğu değeri 117 günlük kuruma süreci sonunda %1,93 değerine yükselmiş, ıslanma sürecinin başlaması ile beraber sonraki 115 günde az da olsa artış göstermiştir. Süreç sonunda da başlangıca göre ~2 kat artarak %3,9 değerine ulaşmıştır. Ayrıca üç farklı tasarım içerisinde ıslanma-kuruma sürecinden en az etkilenenin Tasarım 3 olduğu ve çimento katkısının özellikle üst tabakada kullanıldığında stabilizasyon problemine çözüm getirdiği ortaya konulmuştur.

4.3.3. Jeomekanik Testler

Macun malzemenin iklimsel yağış koşulları altında ve kendi ağırlığında konsolide olarak depolanmasından sonra malzemenin kayma dayanımlarının ve zamana bağlı oturma oranlarının belirlenebilmesi için doğrudan kesme kutusu ve tek yönlü ödometre deneyleri yapılmıştır. Böylece depolanan malzemenin stabilizasyonun doğrudan değerlendirilebilmesi sağlanmıştır.

4.3.3.1. Kayma Dayanımının Belirlenmesi

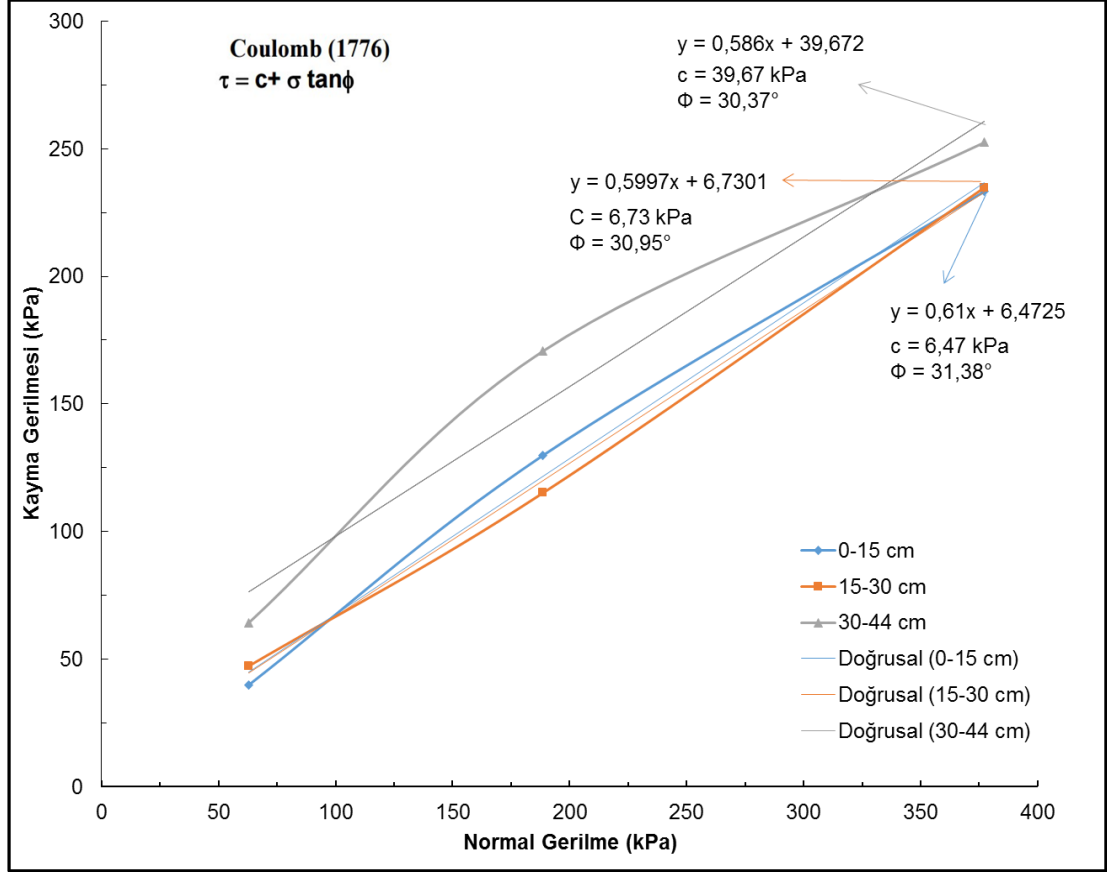
İslanma-kuruma süreci tamamlandıktan sonra kabinin farklı yüksekliklerinden numuneler alınmış ve macun malzemenin kayma dayanımı TSE CEN ISO TS 17892-10 direkt kesme kutusu deneyi yapılarak belirlenmiştir. Buna göre farklı yüksekliklere (0-15 cm, 15-30 cm, 30-44 cm) göre belirlenen kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri Tasarım 1 için Şekil 4.43'de, Tasarım 2 için Şekil 4.44'te ve Tasarım 3 için ise Şekil 4.45'te verilmektedir.



Şekil 4. 43: Tasarım 1 için farklı yüksekliklere göre belirlenen kayma gerilmeleri.

Şekil 4.43'den de görüldüğü gibi kendi ağırlığında konsolide olan alt tabakaların taneleri arasındaki boşlukların giderek azalması bu tabakalardaki kohezyon değerlerinin artırarak jeomekanik açıdan daha stabil bir yapı oluşmasını sağlamıştır. Buna göre ilk 3 tabakanın (30 cm - 44 cm arası) ortalama kohezyon değeri ~34 kPa, içsel sürtünme açısı 35.08°, 4. ve 7. tabakaların arası (15 cm - 30 cm) ortalama kohezyon değeri ~30 kPa, içsel sürtünme

açısı 32.92° ve kabinin üst kısımlarında yer alan 8. ile 11. tabakalar arası (0 cm - 15 cm) ise ortalama kohezyon değeri ~ 22 kPa, içsel sürtünme açısı 32.2° olarak bulunmuştur.

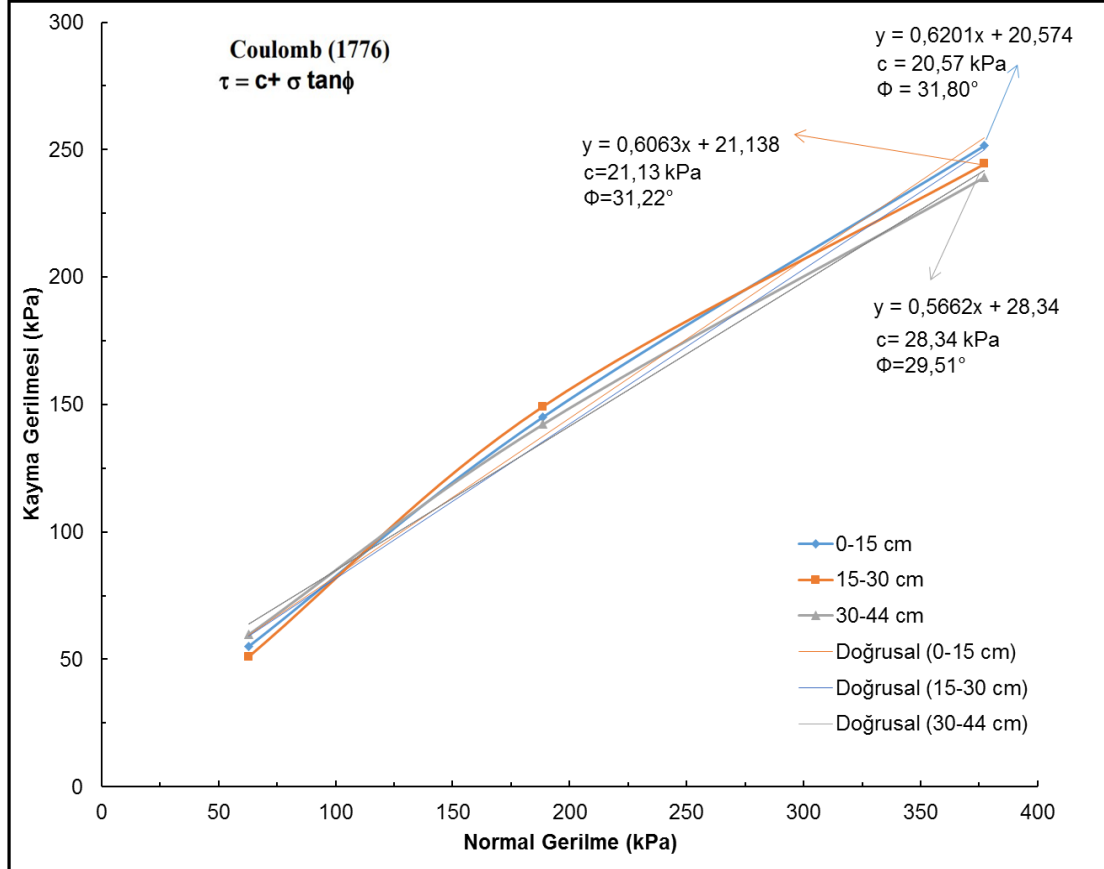


Şekil 4. 44: Tasarım 2 için farklı yüksekliklere göre belirlenen kayma gerilmeleri.

Tasarım 2’de üst ve orta tabakaların kohezyonlarının çok düşük olduğu Şekil 4.44’te görülmektedir. Buna karşın alt tabakaların yanal kuvvetler karşısında yüksek direnç sağladığı ve ~ 40 kPa kohezyon değerini yakaladığı ölçülmüştür. Ancak orta ve üst tabakalara ait kohezyon değerleri alt tabakalara göre çok düşük olan $\sim 6,5$ kPa olarak ölçülmüştür. Bu durum, Tasarım 2’deki en alt tabakanın çimento katkılı olması dolayısıyla üst tabakaların daha doygun kalmasını sağladığı ve bununla beraber bu tabakalarda gevşek bir yapı oluştuğu anlaşılmaktadır. Tasarım 2’de içsel sürtünme açısının $\sim 31^\circ$ olduğu ve bu değerin her üç derinlik içinde değişmediği belirlenmiştir.

Tasarım 2’deki orta ve üst tabakalardaki düşük dayanımın, Tasarım 3’teki en üst tabakanın çimentolu olması ile iyileştirildiği ve bu tabakalardaki kohezyon değerlerinin artırıldığı Şekil 4.45’te görülmektedir. Tasarım 3’teki çimento katkılı en üst tabakanın

kılcal çatlaklı yapıda olması nedeniyle kapiler su akışının oluştuğu ve efektif gerilmeyi arttırdığı düşünülmektedir. Bu durum Tasarım 3'e ait Şekil 4.35'teki grafiğe göre, 117 günlük kuruma süresince en fazla artışın görüldüğü 10. tabaka kılcal emme basıncı değerlerinden anlaşılmaktadır.

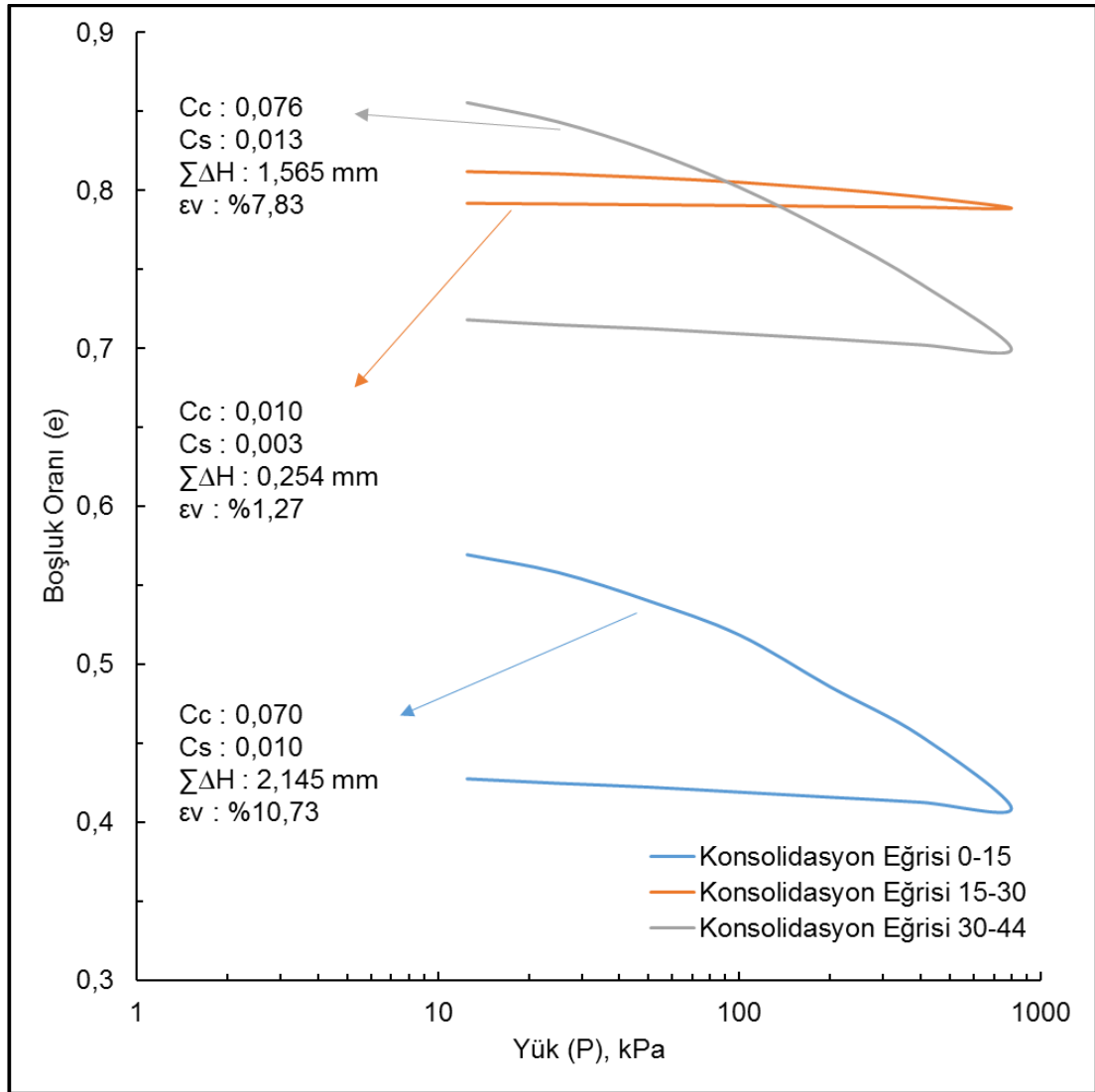


Şekil 4. 45: Tasarım 3 için farklı yüksekliklere göre belirlenen kayma gerilmeleri.

Tasarım 3'ün orta ve üst tabakalarının kohezyon değerleri ~21 kPa olarak ölçülmüş ve en alt tabakalara doğru diğer tasarımlarda olduğu gibi kohezyon değerinin arttığı belirlenmiştir (Şekil 4.45). Genel olarak üç tasarımın 30 cm derinlikten sonra kohezyon değerinin 28 kPa'nın üzerine çıktığı görülmektedir. Ayrıca Tasarım 2 ve Tasarım 3'ün Tasarım 1'e göre tabakalarının daha doygun kalması sonucu tabaka içerisindeki su taneler arasında hareketi kolaylaştırmış ve kohezyon değerlerini düşürmüştür. Bu üç tasarım arasında, sızıntı suyu deşarjı daha verimli olan Tasarım 1'in buna bağlı olarak efektif gerilmelere daha fazla maruz kaldığı ve kohezyon değerlerinin dolayısıyla artış gösterdiği düşünülmektedir.

4.3.3.2. Konsolidasyonun Belirlenmesi

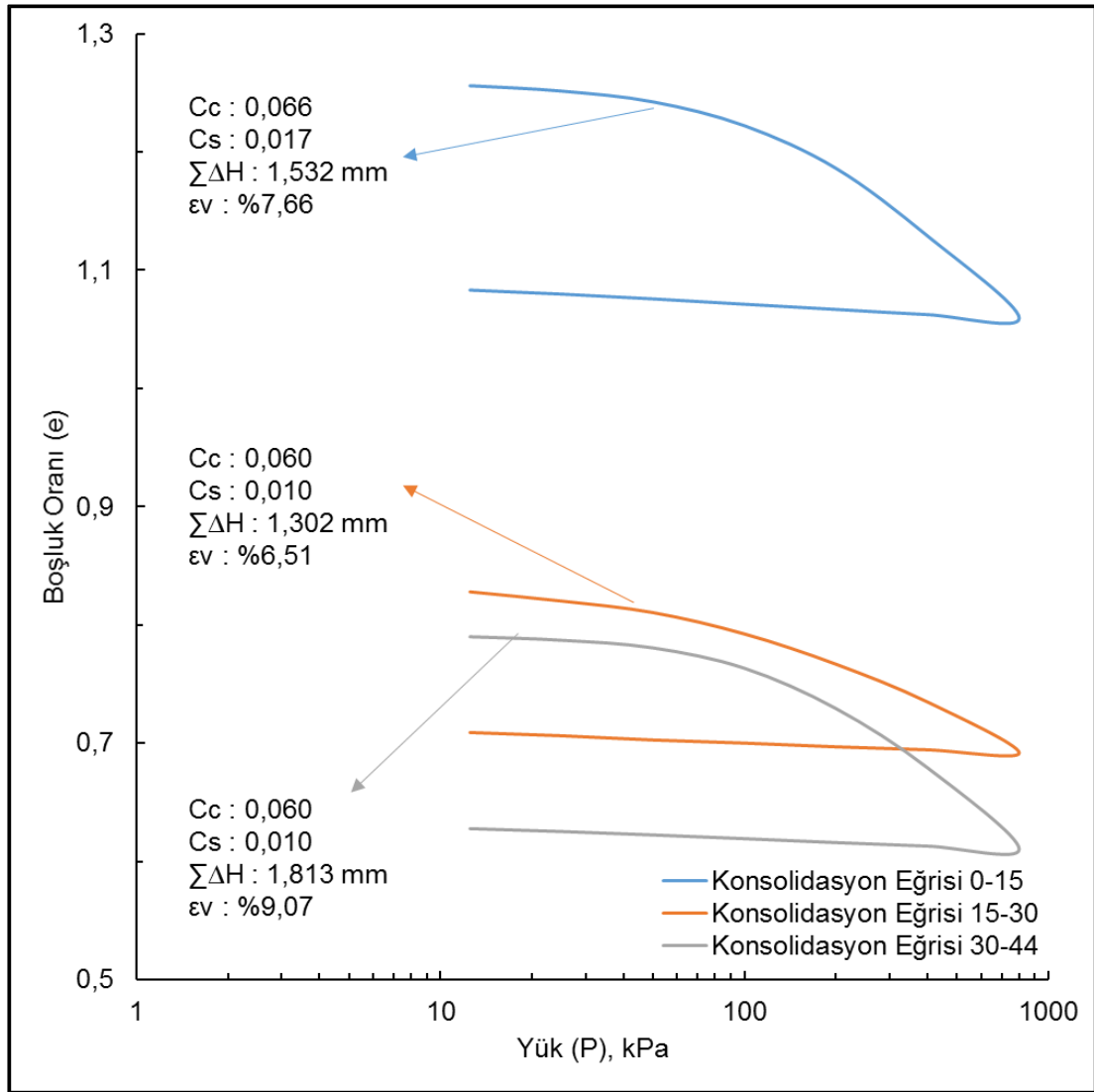
İnce taneli malzemelerde zamana ve gerilmelere bağlı olarak oluşan oturmaların oranı, herhangi bir üst yapı veya malzeme üstünde yapılabilecek olan çalışmalarda oluşabilecek deplasmanlar açısından oldukça önemlidir. Bu kapsamda Eşitlik 3.1'den yararlanılarak başlangıç boşluk oranları belirlenen macun malzemenin konsolidasyon eğrileri Tasarım 1 için Şekil 4.46'da, Tasarım 2 için Şekil 4.47'de ve Tasarım 3 için ise Şekil 4.48'de verilmektedir.



Şekil 4. 46: Tasarım 1 konsolidasyon eğrisi.

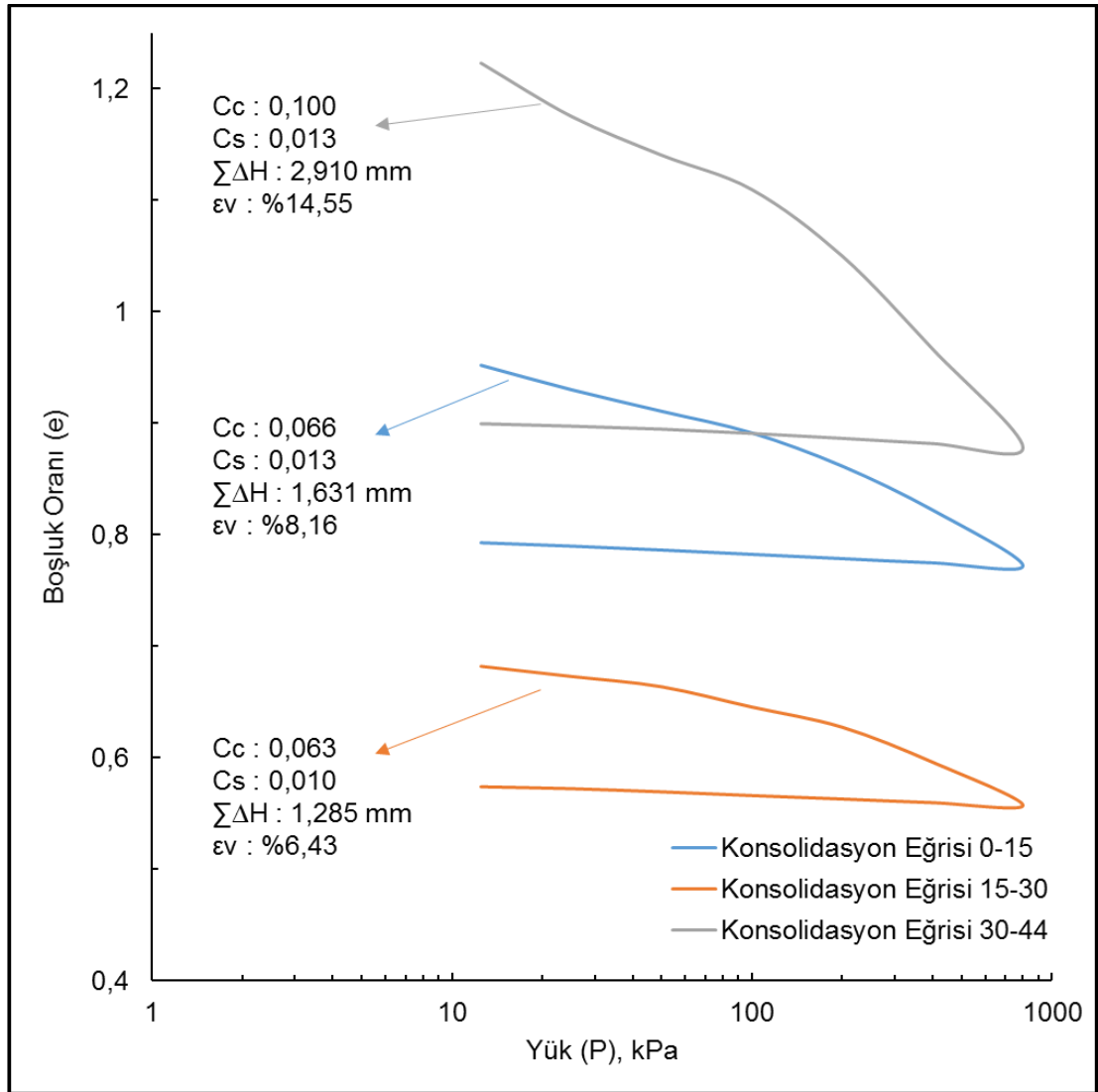
Tasarım 1'in farklı derinlik gruplarına göre konsolidasyon eğrileri incelendiğinde en fazla oturmanın ($\Sigma\Delta H$) beklendiği üzere 0-15 cm tabaka derinliğinde 2,145 mm olarak gerçekleştiği Şekil 4.46'dan görülmektedir. Oturmaya bağlı olarak düşey birim

deformasyonun (ϵ_v) %10,73 gerçekleştiği belirlenmiştir. Orta kısım olan 15-30 cm aralığındaki oturma ise 0,254 mm ve düşey birim deformasyonu %1,27 olarak gerçekleşmiştir. Ayrıca bu derinlikteki tabakaların sıkışma indisi (C_c) 0,010 ve kabarma indisi (C_s) 0,003 en düşük değerler olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla Tasarım 1'deki macun malzemenin orta kısmında yer alan tabakaların kendi ağırlıkları altında döküm ve ıslanma-kuruma süreci boyunca diğer kısımlara göre daha iyi konsolide oldukları ve hidrostatik dengeye geldikleri ifade edilebilir. Böylece orta kısımda yer alan boşluk sularının oluşturduğu basıncın, konsolidasyon deneyi sırasında uygulanan normal gerilmeleri karşıladığı ve bu gerilemlere yenilmeyerek drene olmadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 4. 47: Tasarım 2 konsolidasyon eğrisi.

Şekil 4.47'den de görüldüğü üzere alt ve orta tabakaların sıkışma indisi (C_c) 0,060 ve kabarma indisi (C_s) 0,010 olarak hesaplanmıştır. Tasarım 2'deki macun malzemelerin normal gerilmeler altında düşey birim deformasyonları %6,5-9 aralığında seyrederek birbirine yakın oturmalar göstermişlerdir. Ayrıca Tasarım 1'deki gibi Tasarım 2'de de orta kısımda yer alan tabakalar en az oturmayı gerçekleştirmişlerdir. Ancak Tasarım 2'de en fazla oturma Tasarım 1'in aksine alt tabakaların yer aldığı 30-44 cm derinliğinde 1,813 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 4. 48: Tasarım 3 konsolidasyon eğrisi.

Tasarım 2'deki gibi Tasarım 3'te de en fazla oturma 2,910 mm olarak 30-44 cm derinliğindeki tabakalarda gerçekleşmektedir (Şekil 4.48). Malzeme yapısına bağlı olarak diğer tasarımlardaki gibi kabarma ve sıkışma indisleri birbirine yakın ve düşük çıkmıştır.

Üç farklı tasarımdaki macun malzemelerin kabarma indis (Cs) değerlerine bakıldığında 0,003-0,017 gibi çok küçük değerler aldıkları ölçülmüştür. Bu durum, artık malzemenin yaklaşık %8'ini oluşturan kil boyutundaki malzemenin etkisini açıklamaktadır. Gerçekleşen düşey deplasmanlar açısından oturmalar incelendiğinde, Tasarım 2 ve Tasarım 3'teki çimento katkılı tabakanın da yer aldığı 30-44 cm derinliğindeki tabakaların diğer tabakalara göre daha fazla oturma gösterdikleri belirlenmiştir. Çimentonun hidratasyon sırasında taneler arasında oluşturduğu silis jellerinin katılaşıp tanelerin boyutunu büyüttüğü ve konsolidasyon sırasında maruz kaldığı normal gerilmeler karşısında parçalanarak küçüldüğü düşünülebilir. Üç farklı tasarımdaki depolama sırasında en alt tabakaların üzerine uygulanan en büyük gerilmelerin ~8,4-8,9 kPa arasında olması ve bu yükün ~100 katı büyüklüğünde yük uygulanarak konsolidasyon testlerinin gerçekleştirilmesi bu düşüncüyü desteklemektedir. Bunun yanı sıra özellikle Tasarım 3'teki düşey birim deplasmanın en yüksek değeri almasında, aynı tasarımın en üstünde yer alan çimento katkılı tabakanın oluşturduğu kapiler kuvvetin etkisi de unutulmamalıdır. Çünkü kapiler kuvvet artıkça efektif gerilme düşmektedir. Dolayısıyla tanelerin birbirine uyguladığı kuvvet azalarak daha boşluklu bir yapı oluşmasına neden olmaktadır.

4.4. MACUN DEPOLAMA METODUNUN EKONOMİK AÇIDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışma kapsamında macun malzeme depolama tesisi maliyet yönünden incelenmiştir. Yapılan maliyet analizi hesaplarında Tablo 4.8'de yer alan 2014 yılı Eczacıbaşı Esan Balya Pb-Zn Yeraltı İşletmesi flotasyon tesisine beslenen tüvenan cevher miktarları, Pb-Zn konsantre ve tenörlerine göre depolama tesisinde kullanılması düşünülen ekipmanların piyasa araştırma verileri esas alınmıştır. Aynı zamanda Ülkemizde geçerli olan yasalara göre depolanması düşünülen sahanın yaklaşık arazi bedelleri hesaplanmıştır.

Tablo 4. 8: 2014 yılı flotasyon tesisine beslenen tüvenan cevher miktarları, Pb-Zn konsantre ve tenörleri (Eczacıbaşı Esan Balya Pb-Zn Yeraltı İşletmesi)

Tesis Beslenen (t)	% Metal		Pb Konsantre (%65,56 Pb)	Zn Konsantre (%51,29 Zn)	Toplam Konsantre (t)	Artık (t)
	%Pb	%Zn				
1.404.081	2,37	3,30	48.550	86.249	134.799	1.269.282,00

İşletme verilerine göre cevher hazırlama tesisine yaklaşık 3900 t/gün besleme yapılmaktadır. Bunun 374 t'lik kısmı konsantre yaklaşık 3526 t'sini artık malzeme oluşturmaktadır. Bu miktarlara göre işletmenin yıllık artık miktarı yaklaşık 1.270.000 t olarak kabul edilmiş olup tesisten çıkan proses artığının macun tesisi kurularak yer üstünde depolanması planlanmaktadır. Kurulacak olan macun malzeme depolama sahası kapasitesinin ömrü, işletme tarafından topografya ve ekonomik şartlara göre planlanan 5 yıllık atık barajına göre belirlenmiştir.

İşletmeden alınan mevcut atık depolama sahasının inşaat faaliyetlerine Aralık 2012'de başlanmış, Eylül 2014'de son bulmuştur. Atık depolama sahasının zemin geçirimsizlik sistemi, sırasıyla doğal zemin, doğal kil, geomembran ve geosentetik drenaj tabakası şeklinde, yan yüzeyler geosentetik kil tabakası, geomembran ve geosentetik drenaj tabakası şeklinde oluşturulmuştur. Mevcut klasik atık barajının depolama hacmi yapılan hesaba göre 1250 kotuna kadar, 44.178 m² alana, 346.352 m³ (~700.000 t) kapasiteye sahiptir ve mevcut sahaya 659.583 t atık 7 aylık sürede depolanmıştır. 1250 kotundan 1290 kotuna kadar 4.988.608,96 m³ (9.977.217,92 t) atığın yaklaşık 5 senede depolanması öngörülmüştür. Bu kapsamda bu güne kadar yapılan yatırım maliyeti ~ 16.248.400 TL'dir. Ayrıca işletme verilerine göre cevher hazırlama tesisi ile artık depolama sahası arasındaki mesafe 420 m'dir.

Bu çalışmada, maliyet hesapları TL üzerinden yapılmış olup TCMB Efektif Satış Kuru üzerinden 11 Mayıs 2015 verilerine göre 1\$ = 2,70 TL, 1£ = 3,01 TL olarak alınmıştır. Maliyet hesaplamalarında kullanılan yıllık işletme çalışma süresi 360 gün olarak alınmıştır. Kalan 5 günlük süre tesisin bakım ve onarımı için düşünülmüştür.

Yatırım ve işletme maliyetlerinde hesaplanacak kalemler aşağıdaki gibidir;

- i. Yatırım maliyetleri:
 - a. Tikiner
 - b. Nakil Hattı ve Boru Çapı Hesabı
 - c. Pompa Seçimi
 - d. Karıştırma Tankı
 - e. Silo
 - f. Macun Depolama Sahasının Yapımı

g. Arazi Bedeli (Ağaçlandırma, Orköy, Erozyon, Depolama,  n İzin, Teminat)

ii. İşletme maliyetleri:

- a. Enerji Tüketimi
- b. İşçi maliyetleri
- c. Bakım-Onarım
- d. Bağlayıcı maliyeti (Gerekliyse)
- e. Flokülant
- f. Arazi İzin Bedeli

i. Yatırım Maliyetleri:

a. Tikiner:

İşletme verilerine göre günlük 3526 t cevher hazırlama tesis artığına göre belirlenen tikiner günlük kapasitesi ile toplam olarak 2 adet tikiner kullanılacağı düşünülmektedir (Tablo 4.9).

Tablo 4. 9: Tikinerin Teknik Kapasitesi (Xinhaikuangye, 2015).

Model	�ap (mm)	Derinlik (mm)	��kelme Alanı (m ²)	Kapasite (m ³ /saat)	Maksimum Güç (kW)	Maliyet \$
GSNG-9	9000	13500	190	340-470	4	500.000

Tikiner olarak GSNG-9 Model (Deep Cone Tikiner) 9 m çap ve 13,5 m derinliğinde tikinerler kullanılması planlanmaktadır. GSNG-9 Model tikiner seçimi yapılırken cevher hazırlama tesisinden çıkan %20 PKO'ya sahip artık malzeme dikkate alınarak 634,72 m³/saat'lik kapasiteye sahip olması gerektiği hesaplanmıştır. Tikinerin teknik kapasitesi dikkate alınarak 2 adet tikinerin yeterli olduğu anlaşılmıştır. Tikinerin yaklaşık fiyatı 2.700.000 TL olarak ilgili kaynaklardan bulunmuştur (Xinhaikuangye, 2015).

b. Nakil Hattı ve Boru  apı Hesabı:

Tesisten çıkan macun malzeme boru hatları yardımıyla uzun mesafeler boyunca taşınabilmektedir. Mevcut artık barajı tesisinde kullanılan boru çapları 12,5 in  (31,75 cm) değerlendirildiğinde, %70 PKO'ya sahip macun sisteminde 2'si sabit, 1'i bakım-onarım için yedek olmak üzere toplam 3 adet 150 mm çapında boru hattı kullanılması

düşünülmektedir. Boru çapı seçiminde borudaki malzemenin akış hızının (1,72 m/sn) teorik minimum çökme hızından (1.66 m/sn) düşük olmaması gerekliliği esas alınmıştır. Böylece ortaya çıkan pülpün istenilen hızda boru içerisinde çökmeden ve tıkanmaya neden olmadan deşarjı gerçekleştirilebilecektir. Seçilecek boru yüksek basınca dayanıklı, aşınmaya karşı dirençli olmalıdır. Borunun fiyatı **230 TL/m** (85 \$/m) olduğu tespit edilmiştir (alibaba, 2015).

Toplam Boru Maliyeti = Boru uzunluğu x Boru fiyatı (TL/m)

$$= 420 \text{ m} \times 230 \text{ TL/m} = 96.600 \text{ TL} >>> \text{ üç hat olacağından}$$

$$96.600 \times 3 = \mathbf{289.800 \text{ TL}}$$

Boru hattında bulunan dirsek, vana vb. bağlantı elemanları fiyata dahildir.

c. Pompa Seçimi:

Pompa seçiminde artık malzemenin özelliği, yoğunluğu, kullanılan bağlayıcının tipi, miktarı gibi değişkenlere bağlı olarak seçim yapılmaktadır. Pompa seçiminde özellikle bu iş için katı içeriği, tane boyutu ve viskozite değerlerine uygun kapasitede ve yetenekte pompa seçilmeye özen gösterilmiştir. Bu amaçla Weird GEHO firmasına ait kapasite aralığı 10 m³/saat ile 300 m³/saat olan DHC ve DHT modelleri göz önünde bulundurulmuştur (Tablo 4.10). Bu tür pompalar, tikinerden çıkan %70 PKO'daki macun malzemeye göre istenen 110 m³/saat tesis çıkışını karşılayabilecek özelliklerdedir. Ayrıca yüksek katı içeriğindeki malzemeyi uzun mesafelere deşarj edebilme kapasiteleri olduğundan bu tür pomplar seçilmektedir.

Tablo 4. 10: Macun tesisinde kullanılacak olan pompanın teknik özellikleri.

Pompa Tipi	Viskozite (mPa.s)	Katı Oranı (%)	Parçacık Boyutu (mm)
Valfli Hidrolik Pistonlu Pompa	<50.000	<80	<15
Valfsiz Hidrolik Pistonlu Pompa	<10.000	<90	<80

Tikinerlerden karıştırma tankına pompalanacak malzeme için bir adet, karıştırma tankından çıkan macun malzemenin pompalanabilmesi için de bir adet olmak üzere toplam iki adet pompa kullanılması yeterli olacaktır. Pompa maliyeti **1.500.000 TL/adet** olmak üzere toplam **3.000.000 TL** bulunmuştur. Her tesise uygun koşullar sağlayacak pompa tasarımı sebebiyle tam fiyatı belirlenememiş, diğer muadil ürünler oranlanarak değeri kabul edilmiştir.

d. Karıştırma Tankı:

Macunun bileşenleri olan proses artık malzemesi, su ve eğer gerek görülürse bağlayıcı; (çimento, puzolan vb.) pompalama için uygun görülen 25 cm slump değerinde homojen bir karışım elde edilecek şekilde harmanlanmalıdır. Karıştırma tankı seçiminde tankın kapasitesi önem kazanmaktadır. Tanka beslenecek olan %70 PKO'daki macun malzemenin saatlik hacmi, cevher hazırlama tesisinden çıkan artık miktarına göre 110 m³/saat olarak hesaplanmıştır. Karıştırma tankı teknik özellikleri ve maliyeti Tablo 4.11'de verilmektedir. Karıştırma tankı olarak, hacimce kapasitesi dikkate alınmış ve RJ – 4000/RJW - 4000 model 45 m³'lük tank seçilmiştir.

$$\text{Karıştırma tankı adedi} = \frac{\text{Tesisin kapasitesi (m}^3\text{)}}{\text{Karıştırma tankının kapasitesi (m}^3\text{)}} = 110 / 45 = 2,45 \approx 3 \text{ adet}$$

Tablo 4. 11: Karıştırma tankının teknik özellikleri ve maliyeti (alibaba.com, 2015).

Model	Etkin Hacim (m ³)	Maksimum Güç (kW)	Ağırlık (kg)	Maliyet (TL) (3 adet)
RJ-4000 RJW-4000	45	1.1	8.918	810.000

e. Silo:

Eğer macun malzemesine çimento, puzolan gibi katı malzemeler eklenecekse silonun maliyeti de önem kazanmıştır. Literatüre göre bağlayıcı miktarı katının ağırlıkça ≤ %2'si kadar katılmaktadır ve bu maliyet hesabında %2 çimento konulacağı hesaplanmıştır. Çimento miktarı, karışımdaki katı miktarının %2'si olduğundan dolayı tesisten çıkan günlük kuru artık miktarının bilinmesi gerekmektedir. Bu veriler ışığında ihtiyaç duyulan çimento miktarı hesaplanarak, uygun kapasitedeki silo ve adedi seçilmiştir.

Tesisten çıkan kuru artık malzeme: 1120 m³/gün

Çimento miktarı yaklaşık m³/ gün = 1120 x 0,02 = 22,4 m³/gün

1 m³ çimento yaklaşık 3,15 t'dir. Buradan;

Çimento miktarı (t)= 22,4 x 3,15 = 70,56 t hesaplanır.

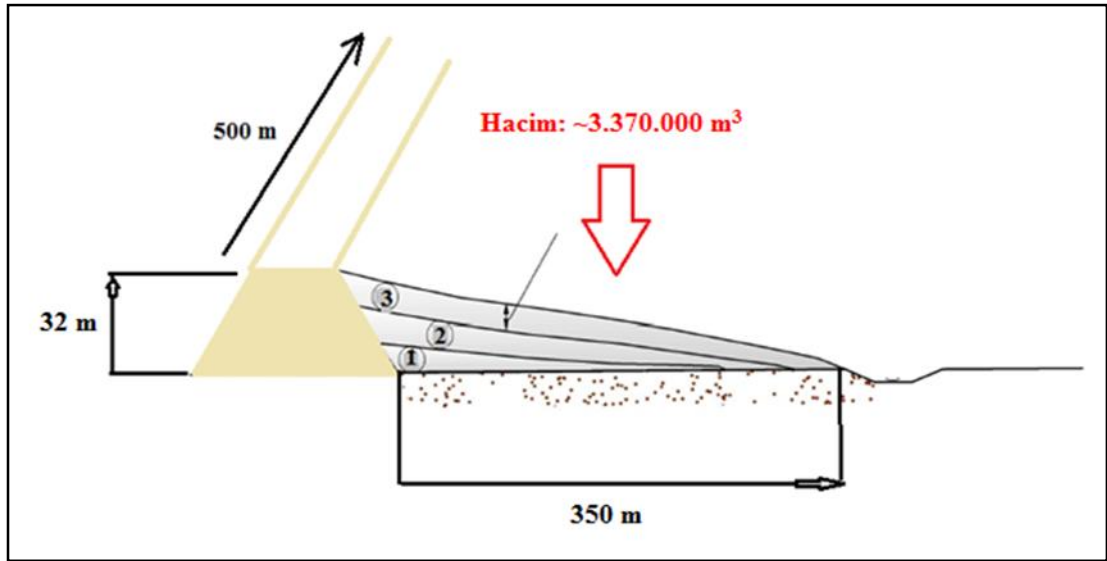
Çimento siloları 200 t'lik olarak düşünülmüştür.

Silo Maliyeti: 2 x 95.000 TL = **190.000 TL** olarak hesaplanmıştır.

f. Macun Depolama Sahasının Tasarımı:

Macun depolama sahası yapım maliyeti, son Avrupa artık yönetimine ve Ülkemizdeki tehlikeli atık depolama yönetmeliğine uygun olarak hesaplanmıştır. Macun depolama sahasının yapımı; temel hazırlık, astar (500 mm kil, 2 mm jeomembran), saptırma hendekleri ve genel baraj dolgusundan oluşmaktadır.

Başlangıçta %70 PKO olan macun malzeme kuruma sürecinden sonra %85 PKO değerine ulaşmaktadır. Depolama maliyetlerinde %85 PKO değeri baz alınmıştır. %85 PKO'ya sahip macun malzemenin yoğunluğu $2,382 \text{ t/m}^3$ olup yıllık artık pülp miktarı yaklaşık $1.530.000 \text{ t}$, hacmi ise 642.070 m^3 olarak belirlenmiştir. 5 senelik hesaplanan %85 PKO ya sahip toplam artık hacmi yaklaşık $3.210.352 \text{ m}^3$ olarak bulunmuştur. Bulunan bu hacme göre tasarlanan macun malzeme depolama sahası Şekil 4.49'da verilmektedir. Macun depolama saha yapımında kullanılan geçirimsiz tabaka oluşturulması ve jeomembran maliyetleri açısından toplam **2,7 TL/m³ (1\$)** olarak alınmıştır. 5 yıllık artık barajı kapasitesine ($3.370.000 \text{ m}^3$) göre toplam maliyet **9.099.000 TL** olarak bulunmuştur.



Şekil 4. 49: Yerüstü macun depolama sahası tasarımı.

g. Arazi Bedeli:

Ağaçlandırma Bedeli: İzin verilen alan üzerinden bir defaya mahsus alınan bedelidir. Genel müdürlükçe, Asgari Ücret Tespit Komisyonu tarafından yılın ikinci yarısı için tespit edilen 16 yaşını doldurmuş işçilerin bir günlük normal çalışma karşılığı asgari

ücretlerinin 294 gün/hektar katsayısıyla çarpımı sonucu belirlenen ağaçlandırma birim hektar bedelinin, izin alanı ile çarpımı sonucu elde edilir.

$$\text{Macun Artık Barajı Alanı} = 350 \times 500 = 175.000 \text{ m}^2 = \mathbf{17,5 \text{ hektar}}$$

$$\mathbf{\text{Ağaçlandırma Bedeli} = 12.481 \text{ TL} \times 17,5 = 218.418 \text{ TL}}$$

Orköy Bedeli: 13/6/2012 tarihli ve 28322 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan Orman Köylülerinin Kalkındırılmalarının Desteklenmesi Faaliyetlerine İlişkin Yönetmeliğin 5. maddesinin birinci fıkrasının (b) bendine göre alınacak orman köylüleri kalkınma gelirleri tahsis payını ifade eder. Orköy bedeli toplam proje bedelinin yüzde üçü (%3) alınarak elde edilir.

$$\mathbf{\text{Orköy Bedeli} = 14.738.800 \text{ TL} \times 0,03 = 442.164 \text{ TL}}$$

Erozyon Bedeli: 3/9/2005 tarihli ve 25925 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan Çevre ve Orman Bakanlığı Ağaçlandırma ve Erozyon Kontrolü Hizmetlerine İlişkin Usul ve Esasların 4. maddesinin 1. fıkrasının (c) bendine göre alınacak ağaçlandırma ve erozyon kontrolü gelirini ifade eder. Toplam proje bedelinin yüzde ikisi (%2) alınarak elde edilir

$$\mathbf{\text{Erozyon Bedeli} = 14.738.800 \text{ TL} \times 0,02 = 294.776 \text{ TL}}$$

Depolama Bedeli: İzin verilen sahada yapılacak depolama hacmi üzerinden alınacak bedelidir. Cari yıl bir metrekare ağaçlandırma bedelinin, büyükşehir belediyesi bulunan illerde dört katı, diğer illerde ise üç katının toplam depolama hacmi ile çarpımı sonucu elde edilir.

$$\mathbf{\text{Depolama Bedeli} = 1,2481 \text{ TL /m}^2 \times 4 \times 175000 \text{ m}^2 = 873.670 \text{ TL}}$$

Ön İzin: Kesin izinde istenen belgelerin hazırlanması için verilen ve sahada çalışma hakkı vermeyen izni ifade eder. İzin alanının metrekaresi ile cari yıl ağaçlandırma birim metrekare bedelinin 30 hektara kadar olan ön izinlerde 1/10’u, 30 hektar dâhil daha büyük olan ön izinlerde ise 1/5’i ile çarpımı sonucu bulunacak bedel olup bir defaya mahsus alınır. Süre uzatımlarında ayrıca bedel alınmaz.

$$\mathbf{\text{Ön İzin Bedeli} = 12.481 \text{ TL /hektar} \times 17,5 \text{ hektar} \times 0,1 = 21.842 \text{ TL}}$$

Teminat: Tedavüldeki Türk parasını, bankalar veya katılım bankaları tarafından verilen süresiz teminat mektuplarını, Hazine Müsteşarlığınca ihraç edilen Devlet iç borçlanma senetleri ve bu senetler yerine düzenlenen belgeleri ifade eder. Teminat; bir hektar için cari yıl ağaçlandırma bedelinden az olmamak kaydıyla cari yıl ağaçlandırma bedelinin onda biri ile izin alanının çarpımı sonucu bulunur. Ancak ocak ve iletişim panosu izinlerinde teminat bedeli bir hektar için cari yıl ağaçlandırma bedelinin onda biridir. İzin başlangıcında bir defa alınır. Süre uzatımlarında ve izin devirlerinde güncellenir. Genel bütçe kapsamındaki kamu idareleri ile kamu kurum ve kuruluşlarından ve ön izinlerden teminat alınmaz.

Teminat Bedeli = 12.481 TL /hektar x 17,5 hektar= **218.420 TL**

Toplam Arazi Bedeli = Ağaçlandırma Bedeli + Orköy Bedeli + Erozyon Bedeli + Depolama Bedeli + Ön İzin Bedeli + Teminat

Toplam Arazi Bedeli = **2.019.290 TL**

Yerüstü macun depolama yönteminin tesis yatırım maliyeti detaylı olarak ve topluca Tablo 4.12’de verilmiştir.

Tablo 4. 12: Macun malzeme yönteminin toplam yatırım maliyeti.

	Özellikler	Fiyat (TL)	Maliyet(TL)
Tikiner	GSNG-9 Model (Deep Cone Tikiner	2 Adet x 1.350.000	2.700.000
Pompa	Weird GEHO - DHT	2 Adet x 1.500.000	3.000.000
Boru	Çap: 150 mm Boy: 420 m	3*420m x 230TL/m	289.000
Karıştırma Tankı	RJ – 4000 / RJW - 4000	3 Adet x 270.000	810.000
Silo	Çimento (200 t) Katkı M. (200 t)	2 Adet x 95.000	190.000
Macun Depolama Sahasının Yapımı	3.370.000 m ³ depolama sahasının hacmi	2,7 TL/m ³	9.099.000
Arazi Bedeli	Ağaçlandırma, Orköy, Erozyon, Depolama, Ön İzin, Teminat	218.418 442.164 294.776 873.670 21.842 218.420	2.069.290
Toplam Yatırım Maliyeti			18.157.290

ii. İşletme Maliyetleri:

İşletme maliyetlerinin büyük kısmını pompaların güç tüketimi ve bakım maliyetleri oluşturmaktadır. Sırasıyla işletme maliyetini oluşturan kalemler aşağıda detaylarıyla verilmiştir:

a. Enerji Tüketimi;

Macun malzeme yönteminde işletme maliyetinin en büyük kalemini enerji tüketimi oluşturmaktadır. İşletmede 2 adet pompa (1000 kW/s) , 2 adet tikiner (4,4 kW/s) , 3 adet karıştırma tankı (1,1 kW/s) kullanılması planlanmıştır. Bu kapsamda, mevcut artık barajı sahasında kullanılan pompaların yıllık enerji tüketimi maliyetlerine göre 1 kW/yıl'ın birim fiyatı yaklaşık 1110 TL hesaplanmış ve macun tesisinde kullanılacak ekipmanların enerji tüketimleri Tablo 4.13'de verilmiştir.

Tablo 4. 13: Macun malzeme yönteminin enerji tüketimleri.

	Enerji Gideri (TL)
Pompa	2.220.000
Tikiner	4.840
Karıştırma Tankı	3.330
Toplam	2.228.170

Macun üretimi için artıkların susuzlandırılmasında; derin konik macun tikinerler yerine işletmedeki mevcut tikiner ve filtrasyon sistemi kullanılmak istenirse, işletme verilerine göre enerji tüketimi Tablo 4.13'te belirtilen miktarın ~2 katına çıkmaktadır.

b. İşçi Maliyeti:

İşletmede vardiya sistemi uygulanacak olup 3 vardiya çalışılacaktır. İşletmede her bir vardiyada pompa ve nakil hattından sorumlu 2 işçi, tikiner, artık sahası, silo ve karıştırma tankından sorumlu 3 işçi bulundurulacaktır (Tablo 4.14).

Tablo 4. 14: Macun malzeme yöntemi için işçi maliyeti.

Çalışılan Alan	İşçi Sayısı (Vardiya)	Toplam İşçi Sayısı	Brüt Ücret (TL/Ay)	Toplam Brüt Ücret (TL/Ay)
Pompa ve Nakil Hattı	2	6	2.500	15.000
Tikiner, Silo, Karıştırma Tankı, Artık Sahası	3	9	2.500	22.500
Toplam				37.500

c. Bakım- Onarım;

İşletmeden alınan veriler doğrultusunda gerekli görülen bakım- onarım bedeli yaklaşık **200.000 TL/yıl** ayrılmıştır.

d. Bağlayıcı maliyeti (Gerekliyse);

Eğer macun malzemesine çimento, puzolan gibi katı malzemeler eklenecekse çimentonun maliyeti önem arz eder. Bağlayıcı olarak ağırlıkça katı oranı %2 olarak düşünülmüş ve buna göre hesaplanmıştır.

Günlük Çimento Miktarı : 70,56 t
Yıllık Çimento Tüketimi : 25.401,6 t
Yıllık Çimento Maliyeti : 25.401,6 t x 135 TL/t = **3.429.216 TL**

e. Flokülant Maliyeti;

Cevher hazırlama tesisinden çıkan artık malzeme içerisine tikinerde flokülant malzeme eklenerek topaklanması sağlanmaktadır. Flokülant miktarı işletme verilerine göre katının ağırlıkça 100 gr/t'si olarak düşünülmüştür.

Yıllık Katı Miktarı : 1.270.000 t
Yıllık Flokülant Miktarı : 1.270.000 x 0,0001 = 127 t
Yıllık Flokülant Maliyeti : 127 t x 8100 TL/t = **1.028.700 TL**

f. Arazi İzin Bedeli;

Verilen izinlerden orman idaresince alınacak kullanım bedelini ifade eder. İzin alanının metrekaresi, cari yıl ağaçlandırma birim metrekaresi bedeli, Orman Kanununun 17/3 ve 18'inci Maddelerinin Uygulama Yönetmeliğinin ekinde yer alan izin türü katsayısı, ekolojik denge katsayısı ve il katsayısının çarpımlarının sonucu elde edilir (EK-I; EK-II ve EK-III).

Arazi İzin Bedeli = 12.481TL /hektar x 17,5 hektar x 3 x 1 (Ağaçsız alanlar) x 2,4
= **1.572.606 TL/Yıl = 593. 436 \$/Yıl**
5 yıl için: 7.863.030 TL

Elde edilen veriler ışığında yaklaşık olarak yerüstü macun depolama yönteminin tesis işletme maliyeti Tablo 4.15'de verilmiştir.

Tablo 4. 15: Macun malzeme yönteminin toplam işletme maliyeti.

	Yıllık Maliyet (TL)	5 Yıllık Maliyet (TL)
Enerji Tüketimi	2.228.170	11.140.850
İşçi Maliyeti	450.000	2.250.000
Bakım-Onarım	200.000	1.000.000
Flokülan	1.028.700	5.143.500
Arazi İzin Bedeli	1.572.606	7.863.030
Toplam	5.479.476	27.397.380
Çimento (Gerekliyse)	3.429.216	17.146.080
Toplam (çimento kullanımında)	8.908.692	44.543.460

Tablo 4.15'ten görüldüğü üzere yerüstü macun malzeme yönteminde eğer bütün artık malzemesinin %2'si kadar çimento katılırsa, çimentosuz işletme maliyetine ~%62,5 kadar artı bir maliyet getirmektedir. Dolayısıyla bu tez çalışmasında uygulanan optimum macun depolama tasarımlarının aynı zamanda çimento maliyetini düşürmede yardımcı olacağı anlaşılmaktadır. Diğer taraftan eğer çimentosuz macun malzeme yöntemi uygulanırsa, işletme maliyetinin ~%40'ını enerji tüketim maliyetlerinin oluşturduğu görülmektedir (Tablo 4.15). Ayrıca 5 yıllık depolama süresine göre yerüstü macun malzeme yöntemi, geleneksel artık barajı maliyeti ile toplam maliyetler açısından Tablo 4.16'da karşılaştırılmış vetbaşına düşen birim maliyetler Tablo 4.17'de verilmiştir.

Tablo 4. 16: Geleneksel atık barajı ile yerüstü macun depolama yöntemlerinin 5 yıllık toplam maliyetleri.

	Yatırım Maliyeti (TL)	İşletme Maliyeti (TL)		Toplam Maliyet (TL)	
Artık Barajı	23.047.946	20.275.776 TL		43.323.722	
Macun Malzeme Yöntemi	18.157.290	Çimentolu	Çimentosuz	Çimentolu	Çimentosuz
		44.543.460	27.397.380	62.700.750	45.554.670

Tablo 4.16'daki toplam yatırım maliyetlerine bakıldığında, artık barajı için gereken depolama sahasının daha büyük hacimli olması nedeniyle yerüstü macun depolama yönteminin artık barajına göre ~%20 daha az maliyetli olduğu, ancak işletme maliyetlerine bakıldığında ise çimentolu macunun özellikle çimentodan kaynaklı ~%50 ve çimentosuz macunun enerji tüketiminden kaynaklı ~%25 daha fazla maliyetli olduğu görülmektedir.

Tablo 4. 17: Yerüstü depolama yöntemlerinin maliyet karşılaştırılması.

	Toplam Maliyet (TL)		5 Yıllık Artık Miktarı (t)	Toplam Maliyet (TL/t)	
Artık Barajı	43.323.722		6.346.260	6,82	
Macun Malzeme Yöntemi	Çimentolu	Çimentosuz		Çimentolu	Çimentosuz
	62.700.750	45.554.670		9,87	7,17

Tablo 4.17 incelendiğinde, geleneksel artık barajı ve macun malzeme yöntemlerinin toplam maliyetleri iletbaşına düşen maliyetlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Yerüstü macun depolama yönteminin jeokimyasal ve jeoteknik duraylılığı açısından avantajları göz önüne alındığında, sahada mevcut olarak uygulanan geleneksel artık barajına alternatif bir yöntem olarak düşünülebileceği anlaşılmaktadır.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Maden tesis atıklarının çevreye duyarlı bir şekilde güvenilir olarak depolanabilmesi ya da bertaraf edilebilmesi madencilik endüstrisinin günümüzde ve ilerki dönemlerde karşılaşacağı en büyük problemlerden biridir. Zenginleştirme tesisinde fiziksel ve fizikokimyasal işlemlerin sonucu olarak ortaya çıkan bu artıkların doğru bir şekilde yönetilmesine ihtiyaç vardır. Aksi takdirde büyük çevresel felaketlerin doğmasına yol açılabilmektedir.

Dolayısıyla bu tez çalışmasında temel olarak maden tesis atıklarının, alternatif bir yöntem olabilecek macun formunda ve yerüstünde depolanabilmesi ve buna uygun bir depolama tasarımının geliştirilmesi araştırılmıştır. Bu kapsamda laboratuvar ölçekli macun depolama kabinleri ile tabakalar içersinde ölçüm yapabilecek sensörlerden ve iklimsel yağış koşullarını simüle edebilecek yağmurlama sisteminden oluşan bir deney düzeneği tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Literatürde yapılan incelemelerde artıkların asit oluşturma riskini belirlemeye yönelik kolon ve nem hücresi testlerinin uygulandığı anlaşılmıştır. Ancak artıkların bazı fiziksel-mekanik testlerini yapabilmek, bölgenin iklim şartlarını simüle edebilmek ve oldukça fazla miktarda artığı laboratuvar şartlarında depolayabilmek için bir kabin geliştirme ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu amaçla bu çalışma yapılmış ve test kabini geliştirilmiştir. Alınan başarılı sonuçlardan sonra ise patent başvurusu gerçekleştirilmiştir. Ayrıca uygun depolama tasarımının belirlenebilmesi için 88 günlük döküm süreci ve sonrasındaki 232 günlük ıslanma-kuruma süresi boyunca 1., 5. ve 10. tabakalardaki hacimsel su içeriği, kılcal emme basıncı ve oksijen içeriği sensörleriyle ölçümler alınmıştır. Aynı süreç içerisinde tabakaların yüzeyinde meydana gelen çatlakların yoğunluğu fotoğraf analiz yöntemi ile belirlenmiş ve macun malzemelerin oluşan sızıntı suları kabin altından toplanarak pH-Ec değerleri ölçülmüştür. En son, jeomekanik testler uygulayarak kayma dayanımı ve oturma oranı belirlenmiştir.

Laboratuvar deneyleri, yaz ve kış mevsimlerine göre değişen 22 ± 3 °C ortam sıcaklığında ve %55-%70 nem aralığında yapılmıştır. Diğer bir ifade ile laboratuvar şartlarında sıcaklığın çok değişmemesi nedeni ile sıcaklığın değişim etkisi deneyler üzerinde net olarak tespit edilememiştir. Bu süreçte 4 cm kalınlığındaki bir macun tabakanın dökümü sonrasında laboratuvarda gerçekleşen buharlaşma oranı ~%30-%35, sızıntı suyu miktarı

~%10-%15 aralığında gerçekleşmiştir. Ancak bölgenin atmosferik şartları altında buharlaşma oranları ve yağış sıklıkları değişeceği için macunun su içeriği bu koşullarla doğrudan ilişkili olarak farklılık gösterecektir. Bu da depolanan malzeme içindeki oksijen difüzyonunu etkileyecektir. Dolayısıyla yazın buharlaşma yüksek oranda olduğu için çok tabakalı depolamada derin ve geniş kuruma çatlakları oluşabilmekte, kışın ise yağışlar yüksek olduğu için tabakaların doygunluk dereceleri bir o kadar yüksek ve uzun süreli olmaktadır. Ancak teorik olarak düşünülen bu değişim ileride sahada yapılacak bir pilot çalışma ile daha net olarak belirlenebilecektir.

Yerüstü depolama metodunda ağırlıkça katı oranı %65-75 arasında değişen macun malzemenin uzak mesafelere pompalanabilmesi için, slamp değerinin 25 cm ve tane boyut dağılımının 20 µm altı içeriği %15 veya daha yüksek olması istenmektedir. Bu slamp değeri ve ince malzeme miktarı sürtünme kayıplarını azaltmakta ve macunun tek güçlü bir pompa ile 2-3 km mesafelere taşınmasına imkan sağlamaktadır (Newman ve diğ., 2001). Ayrıca belirli bir slamp değerindeki macunun su içeriği ve yoğunluğu ince tane miktarına göre değişmektedir. Bu nedenle tane boyutu inceldikçe ıslanan yüzey alanı artacağından macun malzemenin nem içeriği yüksek ve yoğunluğu düşük kalacaktır (Meggyes ve Debreczeni, 2006). Bu katı oranı günümüzde genellikle yüksek yoğunluklu tikinerler kullanılarak elde edilmektedir (Brzezinski, 2001; Grabinsky ve diğ., 2002; Verburg, 2002; Theriault ve diğ., 2003; Benzaazoua ve diğ., 2004; Dechamps ve diğ., 2008 ve 2011; Yılmaz ve diğ., 2013 ve 2014; Başçetin ve diğ., 2013; 2014 ve 2015). Bu çalışma kapsamında oluşturulan macun malzeme tabakalarının ağırlıkça katı oranı, slamp değeri ve tane boyut dağılımı literatüre göre istenilen değerleri yakalamıştır. Ayrıca Bussiere (2007) tarafından yapılan çalışmada, metal madenlerindeki sert kaya artıklarının permeabilite katsayılarının 10^{-4} - 10^{-6} cm/sn arasında değiştiği ifadesi bu tez çalışmasındaki artık malzemenin permeabilite katsayısı $4,27963 \times 10^{-6}$ cm/sn hesaplanarak ortaya konulmuştur.

Yılmaz ve diğ., 2014 yılı çalışmasında en yüksek %55 hacimsel su içeriği değeri verilmiş ve 7 günde bir dökülen tabakalardan sonra ise özellikle çimentosuz olan 1. ve 5. tabakalarda zaman zaman ~%10'luk hacimsel su içeriği artışları görülmüştür. Üst tabakalara doğru gidildikçe doygunluk seviyesinin altına düşülmüş ve tabakaların yaklaşık olarak %45 hacimsel su içeriği seviyelerinde kaldığı ifade edilmiştir. Bu tez

çalışmasında ise, üç farklı tasarımda 1. tabakaların doygunluk sınırı olan %53 hacimsel su içeriğinin üzerinde kaldıkları ölçülmüştür. 5. tabakalar incelendiğinde, hacimsel su içeriği değerinin Tasarım 1’de %50’nin altına düştüğü, Tasarım 2 ve 3’te ise doygunluk sınırının çok üzerinde bulunulduğu belirlenmiştir. Ayrıca tabaka sayısı arttıkça macun malzemenin tabakalar arasındaki kılcal emme basıncının da etkisi görülmüş ve üç farklı tasarımdaki 10. tabakaların döküm süresinin sonuna kadar hacimsel su içeriği değerlerinin %40-50 arasında stabil kaldığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla Yılmaz ve diğerlerinin (2014) çalışmalarında belirtildiği üzere çimentolu tabakanın daha az ve yavaş geçirimsizliği sayesinde bariyer görevi üstlendiği ve üst tabakaları doygun tuttuğu bu tez çalışması ile açıkça ifade edilebilmektedir. Doygunluk derecesi yüksek olan tabakalara oksijen difüzyonu minimum ölçekte gerçekleştiği için bu tabakaların AMD riski düşmektedir (Şekil 4.24 ve Şekil 4.25). Ancak bu durum stabilizasyon problemlerine yol açabilmekte ve Tasarım 2’nin orta ve üst derinliklerinde bulunan tabakaların kohezyon değerlerinde görülmektedir (Şekil 4.44). Theriault ve diğ. (2003) yaptığı çalışmada, depolanan macun malzeme tabakasının yüzeyinin yakınında ölçülen kılcal emme basıncı değerlerinin birkaç gün içinde yaklaşık 4-20 kPa arasında değiştiği ve bir kaç hafta sonra ise 80 kPa değerine kadar çıktığını belirtmişlerdir. Bu durum, bağlayıcısız olarak depolanan Tasarım 1’deki yüzeye yakın 10. tabakanın tabaka döküm ve sonrasında 117 günlük kuruma sürecindeki kılcal emme basıncı değerleriyle örtüşmektedir. Macun dökümünden hemen sonra hacimsel su içeriği değerinin hızla azaldığı, sonra bir süre sabit kalıp tekrar yavaş bir şekilde azalmaya başladığı görülmektedir. Bu değişimin temeli, zamana bağlı oluşan buharlaşma ve kendi ağırlığında konsolide olan macun malzemenin taneleri arasındaki boşluk suyunun ortamdaki uzaklaşması olarak ifade edilebilmektedir.

Bu tez çalışmasında araştırılan bir diğer konu AMD riskidir. Bu kapsamda öncelikle artığın elementel içeriğindeki sülfür miktarından yararlanılarak ABA yöntemi ile artığın asit üretebilme potansiyeli ortaya konulmuş ve özellikle AMD açısından macun malzemelerin sızıntı sularındaki pH-Ec değerleri takip edilmiştir. İlk olarak referans kabini yani Tasarım 1’deki tabakaların sızıntı suyu pH değerleri ölçülmüş ve tabaka döküm süresince 5-7,5 arasında değişimler olduğu belirlenmiştir. 7.,8. ve 9. tabaka sızıntı sularında pH değeri 5’e kadar düşerek Ec değerlerinin yükselmesine yani çözünmüş iyon varlığının artmasına neden olmuştur. Bu da ortamdaki ağır metal mobilizasyonu ve AMD riskinin yer yer arttığını işaret etmektedir. Ancak son iki tabaka dökümünden sonra alınan

sızıntı suyu pH değerlerinin 7 ve üzerinde olduğu ölçülmüştür. Tasarım 1'in aksine çimentolu tabakası olan Tasarım 2 ve Tasarım 3'teki pH değerleri 10'un üzerinde değerler almış ve alkali bir su deşarjı gerçekleştirmişlerdir. Aynı zamanda tabaka döküm sürecinin sonuna doğru Ec değerleri 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 'nin altına düşmüştür. Ayrıca ıslanma-kuruma testlerinde oluşan sızıntı suyu Ec değerleri 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 'yi geçmemiş ve pH değerleri ~ 7 seviyelerinde ölçülmüştür. Sızıntı suyunun yüksek pH değeri, içersinde pek çok ağır metal ve eser elementin çözünmesine ve buna bağlı olarak bir ağır metal kirliliğinin oluşmasına engelleyici bir değer olarak ifade edilebilmektedir. Şimşek ve arkadaşlarının 2012 senesinde yapmış oldukları bölgedeki çalışmada ölçülen asidik maden suyunun elektriksel iletkenlik (Ec) değerleri 10200-14530 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ve pH değerleri 1,91-2,27 arasında ölçülmüştür. Aynı çalışmada Ec değerleri yüzey ve yer altı sularında 437-2603 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arası değerler olarak belirtilmiştir. Bu çalışmada ise ölçülen en yüksek Ec değeri 4810 $\mu\text{S}/\text{cm}$ olup AMD riskinin çok altında olduğu görülmektedir. Dolayısıyla McGregor ve Blowes (2002) tarafından çimento kullanımının, sülfid taşıyan maden artıklarının depolanmasında çevresel açıdan oluşabilecek jeokimyasal zararları azaltıcı bir etkiye sahip olduğu ifadesi bu çalışmada da görülmüştür. Bu çalışmada özellikle Tasarım 3'ün hem en alt ve hem en üst tabakalarının çimentolu olması, bu tasarımın AMD ve ağır metal mobilizasyonunu engelleyici olabilmesi açısından daha ön plana çıkmasını sağlamıştır. Ayrıca kalker, alüminyum silikatlar ve marn hammaddelerinden oluşan çimentonun, Tablo 2.3'e bakıldığında ortamı nötürleştiren özellikle kalsit ve kaolenit açısından burada belirtilen birimlerle uyum göstermektedir.

Diğer bir önemli parametre olan çatlak oluşumları incelendiğinde, üstten alta doğru deşarj olan suyun geride bıraktığı boşluklar ile taneler arası bağın zayıflaması ve kılcal emme basıncının oluşturduğu tane yüzeylerindeki gerilmeler sonucu çatlak yoğunluklarının artış gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca çatlakları etkileyecek olan tabakalardaki buharlaşma oranı, bu çalışmada laboratuvar ortamındaki sıcaklık ve nem değerlerinin çok değişmeyerek etkili olmadığı unutulmamalıdır. Dolayısıyla tasarımlar arası değerlendirme yapılırken bahsi geçen diğer parametreler üzerinde durulmuştur. Benzaazoua ve diğ. (2004) çalışmalarında çatlak yoğunluğu için belirttikleri $<4\%$ değeri bu çalışmada tabaka dökümü süresince sağlanmıştır. Ancak ıslanma-kuruma testlerinden sonra Tasarım 1 ve Tasarım 2'de oluşan göçükler nedeniyle bu oranın çok üzerine

çıkılmıştır. Bu iki tasarımın aksine Tasarım 3'te ise en üst tabakanın çimentolu olması nedeniyle belirtilen oranın altında kaldığı görülmüştür.

Depolanan macun malzemenin stabilizasyonunun doğrudan değerlendirilebilmesi için kayma dayanımını ve oturma miktarını belirlemek üzere iki farklı jeoteknik test yapılmıştır. Genel olarak üç tasarımın 30 cm derinlikten sonra kohezyon değerinin 28 kPa'nın üzerine çıktığı görülmektedir. Ayrıca Tasarım 2 ve Tasarım 3'ün Tasarım 1'e göre üst tabakalarının daha doygun kalması sonucu boşluk suyu taneler arasında hareketi kolaylaştırmış ve kohezyon değerlerini düşürmüştür. Theriault ve diğ. (2003) yaptığı çalışmada ise yüzeyden derine doğru 30 cm'lik macun malzemenin ilk beş gün içinde 5-20 kPa dayanım kazandığı ve birkaç aylık kuruma süresinden sonra kayma dayanımının 60 kPa'a çıktığı belirtilmiştir. Ayrıca aynı çalışmada macun malzemenin üzerinde yürüyebilmek için yaklaşık 5 gün gerektiği ifade edilmiştir. Bu tez çalışmasında da tabakalar döküldükten sonra 232 gün boyunca iklimsel koşullara maruz kalmış aynı derinlikteki Tasarım 1 ve Tasarım 3'teki macun malzemenin kohezyon değerlerinin 20-30 kPa arasında değiştiği, özellikle bütün tabakalara bakıldığında ise Tasarım 1'in normal gerilmeler altında daha iyi drene olarak daha yüksek kohezyon değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Böylece kayma dayanımı sonuçlarına göre, depolama sahasında müdahale gerektiren herhangi bir olay karşısında macun malzemelerin üstünde faaliyet gösterme imkanı sağlanmıştır. Bunula birlikte üç farklı tasarımda da depolanan macun malzemenin içsel sürtünme açısı $\sim 31,71^\circ$ olarak hesaplanmıştır. Erol ve Çekinmez'in (2014) çalışmalarında daha önce belirtmiş oldukları, ML grubunda yer alan sıkıştırılmış kohezyonlu zeminlerin efektif kayma direnci açılarının 32° olduğu ifadesi ile uyumluluk gösterdiği belirlenmiştir.

Konsolidasyon testlerinde ise, Tasarım 3'ün düşey birim deformasyonu $\sim 9,7\%$ değeri ile diğer tasarımlara göre en yüksek oturma oranı olarak belirlenmiştir. Üç farklı tasarımdaki macun malzemelerin en yüksek kabarma indisi (Cs) Tasarım 2'de 0,017 ve en yüksek sıkışma indisi ise Tasarım 3'te 0,100 olarak ölçülmüştür. Ancak Crowder 2004 yılında yapmış olduğu doktora çalışmasında, ince taneli altın artıklarının sıkışma indisinin 0,35'ten daha büyük değerler aldığını hesaplamıştır. Crowder'in çalışmasında kullandığı malzemenin tane boyut dağılımı incelendiğinde ~ 20 kil boyutunda ve D_{50} 'sinin $\sim 10 \mu m$ tane boyutunda olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bu tez çalışması sonuçları macun

malzemenin konsolidasyon oranları üzerindeki tane boyut dağılımının etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Aynı zamanda daha az hassas olan siltli zeminlerde doku aşamalı olarak değiştiği ve de uygulanan gerilmelere uyum sağladığı için, konsolidasyon eğrisinde hiçbir zaman kırılma söz konusu olmamaktadır (Kabayalı, 2002). Bu durum düşük plastisiteli silt sınıfında yer alan macun malzemenin konsolidasyon eğrilerinde açıkça görülmektedir.

Macun atık depolama sisteminde, bir süre sonra macun malzemenin kendini sabit bir su seviyesinde tuttuğu anlaşılmıştır. Bununla beraber, çimentolu sistemin daha az geçirimsizliğe sahip olması, üst tabakaların doygun kalmasına neden olmuştur. Böylece oksijen difüzyonu minimum ölçüde tutularak AMD riski ve ağır metal mobilizasyonu riskinin önüne geçilmiştir. Ayrıca farklı tasarımlarda depolanan macun malzemenin hacimsel su içeriklerinin, kılcal emme basınçlarının ve oksijen içeriği değerlerinin yer yer benzerlikler göstermesine rağmen iklim vb. dış etkenler altında farklı davranışlar gösterdikleri ortaya konulmuştur. Özellikle hacimsel su içeriği ve oksijen içeriği değerlerinde çimento katkılı tabakaların diğer tabakalar üzerindeki etkilerinin pozitif olduğu anlaşılmaktadır. Bu açıdan incelendiğinde, Tasarım 2 ve Tasarım 3 ön plana çıkmış, özellikle Tasarım 3'ün daha doygun ve daha az oksijen içerdiği görülmüştür. Macun malzemenin stabilizasyon değerlerinin belirlenmesi için yapılan kayma dayanımı ve konsolidasyon testlerinin sonuçlarına göre Tasarım 1'in diğer tasarımlardan daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Ancak iklimsel koşullar simüle edildiğinde özellikle Tasarım 1 ve Tasarım 2'de oluşan göçükler nedeniyle stabilizasyon problemlerinin olduğu görülmektedir. Bu üst tabakada gerçekleşen göçük probleminin Tasarım 3'te giderilmesi ve kayma dayanımlarının da iyi olması nedeniyle stabilizasyon açısından da Tasarım 3'ün daha ön plana çıktığı söylenebilmektedir. Ayrıca bu tez çalışması 4 farklı tasarımdan hareketle başlamış ama zaman yetersizliğinden 4. tasarım (en alt, orta ve en üst tabaka çimentolu) tamamlanamamıştır. Dolayısıyla bu konudaki çalışmalar farklı konfigürasyonlarda ve farklı katkı maddeleri denenerek geliştirilmesinin artık yönetiminde faydalı olacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmada çevresel açıdan tehlikeli artık sınıfında olan Pb-Zn madeni artıklarının yerüstünde macun malzeme olarak depolanabilirliği ortaya konmuştur. Buna göre macun malzeme tabakalarının PKO değerleri gerek depolama sürecinde gerekse ıslanma-kuruma

çevrimleri sonucunda malzemenin sıvılaşma riski olan likit limit değerin altında oluşmuştur. Kendi ağırlığında konsolide olan alt tabakaların kohezyon değerlerinin artarak malzemenin sahada depolanması sırasında alt tabakalarda, üst tabakalara göre daha fazla oluşan arazi gerilmelerini karşılayacağı ve jeomekanik açıdan macun malzemenin üzerine gelen yükler karşısında stabilitesini koruyabileceği ortaya konulmuştur.

Sonuç olarak bu tez çalışmasında, Pb-Zn maden artıkları macun teknolojisi kullanılarak yerüstünde depolanabilirliği sürdürebilir madencilik ve maliyet açısından değerlendirilmiş, endüstriyel artık depolamadaki kullanılabilirliği araştırılmış ve alternatif bir depolama yöntemi olabileceği vurgulanmıştır.

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçların endüstriyel alanda daha belirgin olarak değerlendirilebilmesi için bundan sonraki çalışmalarda pilot ölçekli saha çalışmasının yapılmasında fayda olduğu düşünülmektedir. Ayrıca çimento yerine farklı malzemelerin (puzzolan vb.) katılarak macun üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi, farklı cevher hazırlama tesis artıklarının macun teknolojisi kullanılarak incelenmesi ve farklı tane boyutlarına ve yoğunluklarına sahip macun malzemelerin reolojik özelliklerinin belirlenmesi ileriki çalışmalar için araştırma konuları olarak önerilebilir.

KAYNAKLAR

- AASHTO T 11-05, 2009, “Materials Finer Than No. 200 (75 μ m) Sieve In Mineral Aggregates By Washing”, *Standard by American Association of State and Highway Transportation Officials*.
- AASHTO T 27-14, 2014, “Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates”, *Standard by American Association of State and Highway Transportation Officials*.
- Akyol, Z., 1977, “Balya Madeni Civarının Jeolojisi”, *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, Ekim 1977, syf. 19-27.
- Akyol, Z., 1978, “Balya Madeni ve Atıkları Sorunu”, *Yeryuvarı ve İnsan*, Mayıs 1978, syf. 68-69.
- Akyol, Z., 1982, “Balıkesir-Balya Cevherli Sahalarının Jeolojisi, Mineralojisi ve Maden Potansiyelinin Değerlendirilmesi”, *İstanbul Yerbilimleri Derg.*, 3, 163-189.
- Alibaba, 2015, <http://www.alibaba.com>, [Ziyaret tarihi: 4 Nisan 2015].
- Andrews, D.C.A. ve Martin, G.R., 2000, “Criteria for liquefaction of silty soils”, *12th World Conference on Earthquake Engineering, Proceedings*, Auckland, New Zealand.
- Ansal, A. ve Ögünç, G., 1981, “Dinamik Üç Eksenli Sıvılaşma Deneyleri ve Tekrar Sıvılaşma”, *Deprem Araştırma Bülteni*, Yıl 8, Sayı 35, Sayfa 61-82.
- Apogee Instruments Inc., 2013, “Oxygen Sensor, SO-100 & 200 Series Manual”, <http://www.apogeeinstruments.co.uk/oxygensensor/>, [Ziyaret tarihi: 19 Nisan 2015].
- Arol, A.İ., 2002, “Madencilik Atıklarının Bertaraf Edilme Yöntemleri”, *Madencilikte Çevre Yönetimi Seminer Notları*, TMMOB Maden Mühendisleri Odası.
- ASTM D421-85, 2007, “Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants”, *ASTM Standards Source (Online)*.
- ASTM D422-63, 2007, “Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils”, *ASTM Standards Source (Online)*.
- ASTM D 5084-10, “Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter”, *ASTM Standards Source (Online)*.
- Aswathanarayana, U., 2003, “Mineral Resources Management and the Environment; CHAPTER 8 Control technologies for minimizing the mining environmental impact”, Taylor & Francis, 2003, ISBN: 9058095452, 316 pages (pp.195).

- Avcı, S. B., 2010, “*Teknik Ofis Maden Mühendisi Eğitim Raporu*”, Eczacıbaşı Esan Balya Yeraltı Kurşun-Çinko İşletmesi, Eczacıbaşı Esan Endüstriyel Hammaddeler San.Tic. A.Ş.
- Balcı, M.C., 2011, “İnce Taneli Zeminlerde Tane Boyu Değişiminin Zemin Sınıflaması Üzerine Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
- Bascetin A., Tuylu S., Sertabipoglu Z., Adiguzel D. and Binen I. S., 2012, “The Study of Geotechnical Parameters For Paste Technologies: A General Review”, *SME Annual Meeting*, Preprint 12-055, Feb. 19 - 22, 2012, Seattle, WA-USA.
- Bascetin A., Tuylu S., Adiguzel D., Akkaya U., Binen I.S., 2013, “Investigation Of Suitability Of Pb-Zn Mine Tailings For Surface Paste Disposal”, *23rd World Mining Congress*, Montreal, CANADA, 11-15 August 2013, pp.Paper301.
- Bascetin A., Tuylu S., Adiguzel D., Akkaya, U.G., 2014, “The Study Of Surface Paste Disposal Technology For Pb-Zn Mine Tailings”, *SME Annual Meeting*, Preprint 14-020, Feb. 23 - 26, 2014, Salt Lake City, UT-USA.
- Başçetin A., Özdemir O., Tüylü S., Adıgüzel D., Akkaya U.G., 2015a, "Maden Proses Atıklarının Macun Teknolojisi Kullanılarak Yerüstünde Depolanması", *MT Bilimsel Yer Altı Kaynakları Dergisi*, ss.33-49.
- Başçetin A., Tüylü S., Adıgüzel D., Akkaya U.G., 2015b, "The Study Of Optimum Tailing Storing Conditions For Surface Paste Disposal Method", *SME Annual Meeting & Exhibit*, Denver, ABD, 15-18 Şubat 2015, vol.15-019, pp.1-5.
- Başçetin A., Özdemir O., Tüylü S., Adıgüzel D., 2015c, "Metal Madenlerinden Üretilen İnce Taneli ve Sülfürlü Atıkların Yerüstünde Güvenilir Olarak Depolanabilirliğinin İncelenmesi", *Türkiye 24. Uluslararası Madencilik Kongresi*, Antalya, Türkiye, 14-17 Nisan 2015, vol.1, no.1, pp.1028-1034.
- Bascetin A., Ozdemir O., Tuylu S., and Adiguzel D., 2015d, “An investigation of crack formation in surface paste disposal”, *23rd International Symposium on Mine Planning & Equipment Selection (MPES 2015)*, 9–11 November 2015, Johannesburg, South Africa. pp.35-40.
- Başçetin, A., Özdemir, O., Adıgüzel, D., Tüylü, S., Savaş, E. G., Çınar, U., 2015e, “Artık Barajı, Macun ve Jeotekstil Malzeme Yöntemlerinin Maliyet Açısından Karşılaştırılması”, *V. Madencilik ve Çevre Sempozyumu*, 26-27 Kasım 2015, Antalya. ss.116-128.
- Belem, T. ve Benzaazoua, M., 2008, “Design and Application of Underground Mine Paste Backfill Technology”, *Geotech Geol Eng.* (2008) 26, pp:147-174.
- Benckert, A. ve Eurenus, J., 2001, “*Tailings dam constructions - Seminar on safe tailings dam constructions*”, Gallivare, Swedish Mining Association, Natur Vards Verket, European Commission pp. 30-36.

- Benzaazoua, M., Bussiere, B., Kongolo, M., McLaughlin, J., Marion, P., 2000, "Environmental desulphurization of four Canadian mine tailings using froth flotation", *Int. J. Miner. Process.* 60 (2000), 57–74.
- Benzaazoua, M., Perez, P., Belem, T., Fall, M., 2004, "A laboratory study of the behaviour of surface paste disposal", *Proceedings of the 8th International Symposium on Mining with Backfill*, Beijing, China, September 19–21, pp. 180–192.
- Boger, D., Scales, P., Sofra, F., 2006, "*Chapter 3: Rheological Concepts*", *Paste and Thickened Tailings – A Guide (Second Edition)*, Editors: Richard Jewell and Andy Fourie, Australian Centre for Geomechanics, pp:25-37.
- Bowles, J. E., 1996, "*Foundation analysis and design*", 5th edition, McGraw-Hill, New York, N.Y., U.S.A., 1175 pp.
- Brackebusch, F.W., 1994, "Basics of Paste Backfill Systems", *Mining Engineering*, Vol. 46, No. 10, October 1994, pp. 1175-1178.
- BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), 2001, "*Management Of Mining, Quarrying and Ore-Processing Waste In The European Union*", Co-ordination by P. Charbonnier December 2001 BRGM/RP-50319-FR, 79 p.
- Brodie, M. J., Broughton, L. M., Robertson, A., 1991, "A Conceptual Rock Classification System for Waste Managment and a Laboratory Method for ARD Prediction from Rock Piles", *In Proc. Second International Conference on the Abatement of Acidic Drainage*, Vol. 3, Montreal, Quebec, September 16-18, MEND Program (Ed.), Quebec Mining Association, Ottawa, pp. 119-135.
- Brzezinski, L.S., 2001, "Surface disposal of thickened tailings", *Mining Environmental Management*, A Mining Journal, London, U.K. Publication, Vol.9 No.5, September, 2001 pages 7-12.
- Budhu, M., 2007, "*Soil Mechanics and Foundations*", 2nd Edition (With CD)", Hoboken, N.J. : John Wiley & Sons, c2007, [ie 2006], ISBN: 9780471431176, 634 pp.
- Bussiere, B., 2007, "Colloquium 2004: Hydro-geotechnical properties of hard rock tailings from metal mines and emerging geo-environmental disposal approaches" *Canadian Geotechnical Journal*, 44, 1019–1052.
- Casagrande, A., 1936, "The Determination of the Pre-Consolidation Load and Its Practical Significance", Discussion D-34, *Proceedings of the First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Cambridge, Vol.III, pp. 60-64.
- Casagrande, A., 1938, "*Notes on Soil Mechanics-First Semester*", Harvard University (unpublished), pp. 129.

- Coastech Research Inc., 1989, “*Investigation of prediction techniques for acid mine drainage*”, MEND Project 1.16.1 a, Canada Centre for Mineral and Energy Technology, Energy, Mines and resources Canada, 61 p.
- Coil, D., Lester, E., Higman, B., 2012, “*Mine Tailings*” Last Modified: 28th August 2012 <http://www.groundtruthtrekking.org/Issues/MetalsMining/MineTailings.html>, [Ziyaret tarihi: 17 Mart 2015].
- Commission of the European Communities, 2003, “*Proposal for a Directive of the European Parliament and of The Council on the Management of Waste from the Extractive Industries*”, COM (2003) 319 final.
- Cooke, R., 2008, “Pipeline design for paste and thickened tailings systems”, *Tailings and Mine Waste 2008*, ISBN 978-0-415-48634-7, pp. 95-100.
- CPS, 2012, “*Atık Yönetimi Hakkında AB Müktesebat Rehberi*”, Temmuz 2012 İstanbul & Brüksel, s.53-58.
- Crowder, J. J., 2004, “*Deposition, consolidation, and strength of a non-plastic tailings paste for surface disposal*”, Doctor of Philosophy, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Canada.
- Çetiner, E.G., Ünver, B. ve Hindistan, M.A., 2006, “Maden Atıkları İle İlgili Mevzuat: Avrupa Birliği ve Türkiye”, *Madencilik*, Cilt 45, Sayı 1, s. 23-34.
- ÇŞB (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı), 2015a, <http://www.csb.gov.tr/gm/cygm/index.php?Sayfa=duyurudetay&Id=21531>, [Ziyaret tarihi: 21 Agustos 2015].
- ÇŞB (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı), 2015b, <http://www.csb.gov.tr/turkce/index.php?Sayfa=yonetmelikliste>, [Ziyaret tarihi: 21 Agustos 2015].
- Dagenais A., Aubertin M., Bussière, B., Martin V., 2005, “Large Scale Applications Of Covers With Capillary Barrier Effects To Control The Production Of Acid Mine Drainage”, *Post-Mining 2005*, November 16-17, Nancy, France.
- Davies, M.P. ve Martin, T., 2000, “*Mine Tailings Dams: When Things Go Wrong*”, Tailings Dams 2000, Association of State Dam Safety Officials, U.S. Committee on Large Dams, LasVegas, Nevada: pp. 261-273.
- Davies, M.P. ve Rice, S., 2001, “An alternative to conventional tailing management – dry stack filtered tailings”, *In proceedings of Tailings and Mine Waste '01*, Balkema.
- Davies, M.P. & Lupo, J. & Martin, T. & McRoberts, E. & Musse, M. & Ritchie, D., 2010, “Dewatered Tailings Practice – Trends and Observations”, *In proceedings of Tailings and Mine Waste '10*, Balkema.

- David, L.F., 2003, "Acid-Base Accounting", *USGS Billings Symposium / ASMR Annual Meeting Assessing the Toxicity Potential of Mine-Waste Piles Workshop*, U.S. Department of the Interior.
- Decagon Devices, 2015, <http://www.decagon.com/products/soils/volumetric-water-content-sensors/5tm-vwc-temp/> ; <http://www.decagon.com/products/soils/volumetric-water-content-sensors/5tm-vwc-temp/>, [Ziyaret tarihi: 11 Mayıs 2015].
- Deschamps, T., Benzaazoua, M., Bussière, B., Belem, T. & Aubertin, M., 2007, "The effect of disposal configuration on the environmental behavior of paste tailings" *MINEFILL2007 in Montreal*, Quebec, April 29 – May 3, 2007, 2491.
- Deschamps, T., Benzaazoua, M., Bussière, B., Aubertin, M. & Belem, T., 2008, "Microstructural and geochemical evolution of paste tailings in surface disposal conditions" *Minerals Engineering*, 21, pp.341–353.
- Deschamps, T., Benzaazoua, M., Bussière B., and Aubertin M., 2011, "Laboratory study of surface paste disposal for sulfidic tailings: Physical model testing" *Minerals Engineering*, 24 (2011), 794–806.
- Dinçer, S., 2014, "Çanakçı Deresi Su Kalitesi ve Kirlilik Düzeyinin Belirlenmesi" Yüksek Lisans Tezi, Giresun Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyoloji Anabilim Dalı.
- DME- Department of Minerals and Energy, 1999, "Guidelines on the Safe Design and Operating Standards for Tailings Storage", Western Australia, ISBN: 073097808757.
- DPI- Department of Primary Industries, 2003, "Management of Tailings Storage Facilities - Environmental Guidelines", Victoria - Minerals & Petroleum Division:63.
- EC- European Commission, 2004, "Draft Reference Document on Best Available Techniques for Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities", Edificio EXPO, Seville, Spain.
- Environment Australia, 1997, "Managing sulphidic mine wastes and acid drainage", Best Practice Environmental Management in Mining Booklet Series.
- EPA (Environmental Protection Agency), 1983, "Design Manual: Neutralization of Acid Mine Drainage", Environmental Protection Agency Office of Research and Development Industrial Environmental Research Laboratory, U.S., EPA-600/2-83-001, January 1983.
- EPA (Environmental Protection Agency), 1994, "Technical document – acid mine drainage prediction", Environmental Protection Agency Office of Research and Development Industrial Environmental Research Laboratory, U.S.
- Erol, A.O. ve Çekinmez, Z., 2014, "Geoteknik Mühendisliğinde Saha Deneyleri", Yüksel Proje Yayınları No: 14 -01. Ankara.

- Fisseha, B., 2008, “*Flow behavior in multilayer deposits of unsaturated paste tailings*” Master of Applied Science, Department of Civil and Environmental Engineering, Carleton University, Ottawa, Ontario, Canada.
- FLSmidth Brochure, 2010, “*EIMCO® Deep Cone® Paste Thickeners*”, www.flsmidth.com, Revision 10/05/2010, Minerals Processing Technology Center FLSmidth Salt Lake City, Inc. 7158 S. FLSmidth Drive Midvale, UT 84047-5559 USA. [Ziyaret tarihi: 20 Agustos 2010].
- Fourie, A. B., 2003, “*In Search of the Sustainable Tailings Dam: Do High-Density Thickened Tailings Provide the Solution*”, School of Civil and Environmental Engineering, University of the Witwaterstrand, South Africa: 12.
- Fredlund D.G. and Rahardjo H., 1993, “*Soil mechanics for unsaturated soils*”, New York, Wiley, 517s.
- Güzel, H., 2005, “*Evaporitik Mineraller İçeren Killi Zeminlerin Jeoteknik Özellikleri*”, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana.
- Henriquez J. A., 2008, “*Dynamic imaging and modelling of gold paste tailings flows*”, Master of Applied Science, Department of Civil and Environmental Engineering, Carleton University, Ottawa, Ontario, Canada.
- Henriquez, J. and Simms, P., 2009, “Dynamic imaging and modelling of multilayer deposition of gold paste tailings”, *Minerals Engineering* 22 (2009) pp.128–139.
- Kayabalı, K., 2002, “*Geoteknik Mühendisliğine Giriş (Çeviri)*”, Gazi Kitabevi, s.723. Orjinal; Robert D. Holtz., William D. Kovacs., 1981. An Introduction to Geotechnical Engineering Prentice – Hall, Englewood Cliffs, p. 733.
- Hustrulid W.A. and Bullock R.L., 2001, “*Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*”, SME, 2001 - [Technology & Engineering](#) - 718 (pp. 603) pages. ISBN: 0873351932.
- ICOLD and UNEP, 2001, “*Bulletin 121: Tailings Dams - Risk of Dangerous Occurrences*”, Lessons learnt from practical experiences. Paris,144.
- Jewell R.J., Fourie A.B. and Lord E.R. 2002, “*Section 7: Above Ground Disposal Paste and Thickened Tailings – A Guide Editors*”, Australian Centre for Geomechanics, pp. 95-101.
- JOURNEAUX ASSOC., 2012, “*Engineering Challenges For Tailings Management Facilities And Associated Infrastructure With Regard To Climate Change In Nunavut*” Report no. L-11-1472, March 21, 2012, pp.110.
- Kahvecioğlu, Ö., Kartal, G., Güven, A., Timur, S., 2001, “*Metallerin Çevresel Etkileri-I*” İTÜ, Metalürji ve Malzeme Müh. Bölümü, *Metalurji Dergisi*.136, İstanbul (2001) 47-53.

- Kanpolat, İ. ve Cengiz, E., 1985, “*Balya (Balıkesir) Kursun-Çinko Cevher Yatağı Ön Fizibilite Çalışması*”, Bölüm III Madencilik, MTA Rap.
- Karadeniz, M., 2008, “*Sülfürlü madenlerin sorunu asit maden drenajı ve çözümü*”, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Fersa Matbaacılık, Ankara, syf: 231, ISBN: 978-9944-89-600-9.
- Karadeniz M., 2011, “*Balıkesir-Balya- Kurşun-Çinko Madeni Flotasyon Artıklarının Asit Maden Drenajı Oluşum Potansiyelinin Derinlikle Değişiminin Araştırılması*”, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği ABD, Ankara.
- Kayadelen, C., 2005, “*Doygun Olmayan İnce Daneli Zeminlerin Koşullarındaki Yanal Basınçlarının İncelenmesi*”, Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Koç, T., 2001, “*Balya Çevresinin (Balıkesir) Jeomorfolojisi*”, syf. 1-16.
- Kwak, M., James, D. F., Klein K. A., 2005, “Flow behaviour of tailings paste for surface disposal”, *Int. J. Miner. Process.* 77, pp. 139– 153.
- Kesimal A., Yılmaz E., Erçikdi B., Alp İ., Yumlu M. ve Özdemir B., 2002, “Laboratory Testing of Cemented Paste Backfill”, *Madencilik*, Vol.41, No.4, pp. 11-20.
- Kovenko, V., 1940, “*Balya Lead Mines (Turkey)*”, *Bull Miner Res Expl Inst.*, 4/21:587–594, Turkey.
- Landriault, D., Welch, D. and Morrison, D., 1996, “Mine Tailings Disposal as a Paste Backfill for Underground Mine Backfill and Surface Waste Deposition”, *Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Short Course Notes*, USA, 81-92.
- Landriault, D., Johnson, J.M., Palkovits, F., 2005, “Thickened Tailings and Paste Technology: The Future of Industrial Waste Disposal”, *SME Annual Meeting*, Preprint 05-111, Feb. 28-Mar., Salt Lake City, UT.
- Lawrence, R.W., 1990, “Prediction of the behavior of mining and processing wastes in the environment”, *In Pro. Western Regional Symposium on Mining and Mineral Processing Wastes*, Doyle, F., (ed.), Soc. for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., Littleton, CO, pp. 115-121.
- McGregor, R.G. and Blowes, D.W., 2002, “The physical, chemical and mineralogical properties of three cemented layers within sulfide-bearing mine tailings”, *Journal of Geochemical Exploration*, 76, pp.195–207.
- Meggyes, T. and Debreczeni, A., 2006, “Paste technology for tailings management”, *Land Contamination& Reclamation*, 14 (4), 2006 EPP Publications Ltd.
- MMSD (Mining, Minerals and Sustainable Development), 2002, “*Mining for the Future Appendix A: Large Volume Waste Working Paper*”, April 2002, No.31, pp. A1-A55.

- Morin, K. and Hutt, N., 1994, "Observed Preferential DEpletion of Neutralization Potential over Sulfide Minerals in Kinetic Tests: Site Spesific Criteria for Safe NP/AP Ratios", *In: International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage*, U. S. Bureau of Mines Special Publication SP 06A-94, pp. 148-156.
- Newman, P., Cadden, A., White, R., 2001, "Paste - The Future of Tailings Disposal? Securing the Future", *International Conference on Mining and the Environment*. June 25 - July 1, Skelleftea, Sweden, pp.594 – 603.
- Ouellet, J., Benzaazoua, M., and Servant, S., 1998, "Mechanical, Mineralogical and Chemical Characterization of a Paste Backfill", *Tailings and Mine Waste'98*, Colorado, pp. 139-146.
- Önalp, A., 2002, "Geoteknik Bilgisi-I. Çözümlü Problemlerle Zeminler ve Mekaniği". Birsen Yayınevi, İstanbul, 408s.
- Önalp, A., 2004, "Zeminlerin Sınıflandırılması ve TS1500/2000'in Tanıtımı", *TMH - Türkiye Mühendislik Haberleri*, Sayı 430 - 2004/2. syf: 27-28.
- Paktunc, A.D., 1998, "Characterization of mine wastes for prediction of acid mine drainage", *Environmental Impacts of Mining Activities*, Azcue, J.M.,(ed.), pp.19-40.
- Palkovits, F., Sutcliffe, R., Wislesky, I., and Wilson, W., 2007, "Toward Sustainability - Mine Waste and Paste Surface Co-Disposal", *Mining and the Environment IV Conference, Sudbury*, Ontario, Canada, October 19 - 27.
- Pastethickassoc, 2015, "What is Paste?" <http://www.pastethickassoc.com/templates/documents/whatIsPaste.pdf>, [Ziyaret tarihi: 8.11.2015].
- Proctor, R.R., 1933, "Fundamental Principles of Soil Compaction", *Enginerring New-Record*, Vol. 111, No. 9,10,11,12,13.
- Proses TİM, 2015, <http://www.kartusfiltre.com.tr/kartus-filtre-teknik-bilgiler.html>, [Ziyaret tarihi: 11.05.2015].
- Robinsky, E.I., 1999, "Thickened Tailings Disposal in the Mining Industry", E.I. Robinsky Associates Ltd.,Toronto, Canada, pp.210.
- Saleh-Mbemba, F., Aubertin, M., Mbonimpa, M. 2010, "Desiccation and Shrinkage of Low Plasticity Tailings: Testing and Preliminary Modeling", *Proceedings of 63rd Canadian Geotechnical Conference & 1st Joint CGS/CNC-IPA Permafrost Specialty Conference*, 12-16 September, Calgary, ALBERTA, Canada.
- Salfate E. R., 2011, "Predicting Void Ratio For Surface Paste Tailings Deposited In Thin Layers", Master of Applied Science, The Faculty of Graduate Studies (Mining), The University Of British Columbia, Vancouver, Canada.

- SANS, 1998, “*Code of Practice for Mine Residue Deposits*”, South African Bureau of Standards, ISBN: 0626117003:129.
- Simms, P., Grabinsky, M.W., Zhan, G., 2007, “Modelling evaporation of paste tailings from the Bulyanhulu mine”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 44, Iss. 12, pp. 1417-1432.
- Simms, P., Fisseha, B., Henriquez, J. & Bryan, R., 2008, “Desiccation and Rheology in cyclic surface deposition of gold paste tailings” *Tailings and Mine Waste 2008*, ISBN 978-0-415-48634-7, pp. 269-278.
- Simşek, C., Gündüz, O. ve Elçi, A., 2012, “Terkedilmiş Balya (Balıkesir) Pb-Zn Maden Atıklarının Ağır Metal ve Doğal Radyoaktivite İçeriği ve Çevre Kalitesi Açısından Değerlendirilmesi”, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, Cilt:2, Sayı:1, s:43-55.
- Slottee S., McDonald C., Schreiber H., 2003, “Application and Design of Deep Cone Paste Thickener Systems for Tailings Disposal”, Preprint 03-122, *SME Annual Meeting 2003* Feb. 24-26, Cincinnati, Ohio, USA.
- Smith, R.M., Grube, W.E., Arkle, T.A., Sobek, A.A., 1974, “*Mine spoil potentials for soil and water quality*”, U.S. EPA 670/2-74-070, Washington, DC.
- Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, 2004, Resmi Gazete Tarihi: 31.12.2004 Resmi Gazete Sayısı: 25687.
- Spiers, J., 2010, “Rheological and Geotechnical Characteristics” *Seminar 16-17 November 2010: Treatment methods for mine tailings*, Luleå, Sweden.
- TBMM – Türkiye Büyük Millet Meclisi, 2010, “*Araştırma Komisyonu Raporu*”, Mayıs 2010, Sayfa 183.
- T.Ç.Ş.İ.M. (Tekirdağ Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü), 2011, “*Madencilik Sektöründe Atık Yönetimi Uygulamaları*”, 23 Aralık 2011 tarihli yayını.
- Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği, 2005, Resmi Gazete Tarihi: 14.03.2005 Resmi Gazete Sayısı: 25755.
- Tekinsoy, M.A., 2002, “*Doymamış Zeminlerin İndeks ve Hidrolik Özellikleri*”. S.D.Ü. Basımevi, Isparta, 797s.
- Theriault, J., Frostiak, J., Welch, D., 2003, “Surface disposal of paste tailings at the Bulyanhulu gold mine”, *Proceedings of the 2nd Mining Environment Conference*, Sudbury, Ontario, pp. 1-8.
- Topçu, A., 2013, “*Su Kalite Özellikleri*”, www.agri.ankara.edu.tr/su/1326__SU_BB_3.ppt, [Ziyaret tarihi: 05.06.2015].

- TAILSAFE, 2004, “*Tailings Management Facilities – Intervention Actions for Risk Reduction*” Edited by: Engels, J. A European Research and Technological Development Project Contract Number: EVG1-CT-2002-00066.
- TS 1500, 2000, “*İnşaat mühendisliğinde zeminlerin- Sınıflandırılması*”, Türk Standartları Enstitüsü.
- TS 1900-1, 2006, “*İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini*”, Türk Standartları Enstitüsü.
- TS 1900-2, 2006, “*İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri - Bölüm 2: Mekanik Özelliklerin Tayini*”, Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN ISO 14688-2, 2004, “*Jeoteknik Araştırmalar ve Deneyler - Zeminlerin Tanımlanması ve Sınıflandırılması - Bölüm 2: Sınıflandırma İlkeleri*”, Türk Standartları Enstitüsü.
- TSE CEN ISO TS-17892-5, 2007, “*Geoteknik etüt ve deneyler- Zemin laboratuvar deneyleri- Kademeli yükleme yoluyla odometre deneyi*”, Türk Standartları Enstitüsü.
- TSE CEN ISO TS 17892-10, 2007, “*Geoteknik etüt ve deneyler- Zemin laboratuvar deneyleri- Bölüm 10: Doğrudan kesme deneyi*”, Türk Standartları Enstitüsü.
- TSE CEN ISO TS 17892-11, 2007, “*Geoteknik etüt ve deneyler- Zemin laboratuvar deneyleri- Bölüm 11: Sabit ve düşen seviyeli deney yöntemi ile geçirgenlik tayini*”, Türk Standartları Enstitüsü.
- TSE CEN ISO TS 17892-12, 2007, “*Geoteknik etüt ve deneyler- Zemin laboratuvar deneyleri- Bölüm 12: Atterberg limitlerinin tayini*”, Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 12350-2, 2010, “*Beton- Taze beton deneyleri- Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi*”, Türk Standartları Enstitüsü.
- Ulusoy, U., Yekeler, M., Hiçyılmaz, C., 2004, “Kalsit Mineralinin Şekil, Pürüzlülük ve Islanabilirliğinin Karakterizasyonu”, *Madencilik*, Sayı: 43/2 Cilt: Haziran/2004, syf: 11-24.
- UNEP (United Nations Environment Programme, Industry and Environment), 1996, “*Environmental and Safety Incidents concerning Tailings Dams at Mines*”, Results of a Survey for the years 1980-1996 by Mining Journal Research Services, Paris, 1996, 129 pages.
- USCOLD (U.S. Committee on Large Dams), 1994, “*Tailings Dam Incidents*”, Denver, Colorado, ISBN 1-884575-03-X, 1994, 82 pages.
- Uzuner, B.A., 1998, “*Çözümlü Problemlerle Temel Zemin Mekaniği*”, Teknik Yayınevi, Ankara, 376s.

- Verburg, R. B., 2001, "Use of Paste Technology For Tailings Disposal: Potential Environmental Benefits and Requirements For Geochemical Characterization", *IMWA Symposium*, Proceedings of a meeting held 24-28 April 2001, Belo Horizonte, Brazil.
- Verburg, R. B., 2002, "Paste technology for disposal of acid-generating tailings", *Mining Environmental Management*, July 2002. 84.
- Yıldırım, M. ve Gökaşan, E., 2013, "*Mühendisler İçin Jeoloji Bilgileri*", YILDIZ Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Genişletilmiş İkinci Baskı, İstanbul.
- Yıldız, N., 2014, "*Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme-1. ve 2. Cilt*", Ertem Basım Ltd. Şti., Ankara, ISBN: 978-975-96779-5-4.
- Yılmaz, E., Kesimal, A., Deveci, H. ve Erçikdi, B., 2003, "Macun Dolgu Performansına Etki Eden Fiziksel, Kimyasal ve Mineralojik Faktörler", *Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar 1. Kongresi, MBGAK'03*, İstanbul, 683-690.
- Yılmaz, E., 2010, "*A field investigation of the behaviour of fine-grained, sulphide-rich paste tailings under a surface disposal condition*", Post-Doc Project Final Report, University of Quebec at Abitibi-Témiscamingue (UQAT). Rouyn-Noranda, Quebec, Canada, pp.1-126.
- Yılmaz, E., Benzaazoua, M., Bussière, B., Pouliot, S., Bernard, M., 2013, "Hydrogeotechnical and geochemical characterization of surface paste tailings disposal", *Proceedings of the 23rd International Mining Congress and Exhibition of Turkey*, Kemer, Antalya, Turkey, April 16-19, pp. 1815-1828.
- Yılmaz, E., Benzaazoua, M., Bussière, B., Pouliot, S., 2014, "Influence of disposal configurations on hydrogeological behaviour of sulphidic paste tailings: A field experimental study", *International Journal of Mineral Processing* 131, pp.12-25.
- Watson, A.H., 2010, "Alternative tailing disposal - fact and fiction", *Paste tailings management*, APRIL 2010 International Mining SUPPLEMENT, pp. 3-6.
- Welch, D., 2003, "*Advantages of Tailings Thickening and Paste Technology*", Responding to Change - Issues and Trends in Tailings Management - Golder Associates Report:5.
- Wels C. and Zapata R., 2010, "Assessment of Tailings Seepage from an In-Pit Tailings Storage Facility", *II International Congress on Water Management in the Mining Industry*, 9-11 June 2010, Santiago, Chile.
- Wetzel, R. G., 1983, "*Limnology*", (2nd Edition; Complete Revision) Saunders College Publishing, Philadelphia. 858 pp.
- WISE Uranium Project, 2015, <http://www.wise-uranium.org/mdaf.html>, [Ziyaret tarihi 4.02.2015].

Xinhaikuangye, 2015. <http://xinhaikuangye.en.made-in-china.com>, [Ziyaret tarihi 4.05.2015].

EKLER

EK-I: İzin ve Katsayı Tablosu

İzin Türü	Katsayısı
Yol, demiryolu, teleferik hattı, tünel, enerji nakil hattı, telefon iletim hattı, savunma, güvenlik tesisleri, su isale hattı-kaptaj, su deposu, kanalizasyon, baraj, gölet, rezervuar alanı (hidroelektrik santrali rezervuar alanları da dâhil). Yükseköğretim kurumlarının eğitim, araştırma ve öğrenci yurdu, mezarlık	0,1
Hidroelektrik santrali, rüzgâr enerji santrali, ölçüm ve gözlem istasyonu, su arama, su kuyusu, jeotermal kaynak ve doğal mineralli su arama, atık su tesisi, petrol ve doğalgaz boru hattı, petrol ve doğalgaz arama ve işletme izni, odun kömürü ocağı	0,5
Havaalanı, trafo binası, ölçüm istasyonu, R/L tesisi, fiber optik kablo, yer altında yapılacak patlayıcı madde deposu, patlayıcı madde deposu emniyet alanı, depo olarak kullanılacak tünel, sokak hayvanları bakımevi, balık üretim tesisi	0,7
Katı atık aktarma istasyonu, katı atık bertaraf ve düzenli depolama tesisleri, liman geri hizmet alanı	3
Radio-televizyon verici istasyonu ve antenleri, su dolum tesisi	5
Termik santral, nükleer enerji santrali	8
Define arama	10
Elektronik haberleşme sistemlerine ait baz istasyonu, iletişim panosu	30

EK-II: Orman Amenajman Planlarına Göre Orman Ekolojik Denge Katsayısı

Orman Amenajman Planlarına Göre Orman Durumu	Ekolojik Denge Katsayısı
Ağaçsız alanlar	1
% 10'dan daha az kapalı ormanlar	1,1
%11-40 kapalı ormanlar	1,4
%41-70 kapalı ormanlar	1,7
%71 ve üstü kapalı ormanlar ve ağaçlandırma sahaları	2

EK-III: İllere Göre Katsayı

İl Adı	Katsayısı
İstanbul	3
İzmir, Kocaeli	2,8
Adana, Ankara, Antalya, Aydın, Balıkesir, Bursa, Çanakkale, Mersin, Muğla, Osmaniye, Sakarya, Samsun, Yalova	2,4
Bartın, Bilecik, Bolu, Düzce, Edirne, Gaziantep, Giresun, Karabük, Kayseri, Kırıkkale, Kırklareli, Konya, Kütahya, Ordu, Rize, Zonguldak, Denizli, Eskişehir, Hatay, Manisa, Tekirdağ, Trabzon	2
Adıyaman, Artvin, Afyonkarahisar, Amasya, Burdur, Çankırı, Çorum, Diyarbakır, Elazığ, Erzincan, Erzurum, Isparta, Kahramanmaraş, Kastamonu, Kırşehir, Kilis, Malatya, Nevşehir, Niğde, Sinop, Sivas, Şanlıurfa, Tokat, Uşak, Yozgat	1,6
Aksaray, Bayburt, Gümüşhane, Karaman, Ağrı, Ardahan, Batman, Bingöl, Bitlis, Hakkâri, Iğdır, Kars, Mardin, Muş, Siirt, Şırnak, Tunceli, Van	1,2

EK-IV: Bağlayıcının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri (Akçansa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş. Büyükçekmece fabrikası)

KİMYASAL ANALİZ		Standartlar	Analiz Sonuçları	FİZİKSEL DENEMELER		Standartlar	Analiz Sonuçları
TEST METODU: TS EN 196-2				TEST METODU: TS EN 196-3 ve TS EN 196-6			
Si O ₂ Çözünen (%)			20,02	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)			3,14
Çözünmez Kalıntı(%)		≤ 5,0	0,54	Priz Süresi (Vicat)	Başlama (dak.)	≥ 60	91
Al ₂ O ₃ (%)			5,32		Bitiş (dak.)		138
Fe ₂ O ₃ (%)			3,32	Hacim Genleşmesi (mm) (Le Chatelier)		≤ 10	1
Ca O (%)			62,65	İncelik	Özgül Yüzey – Blaine		3620
Mg O (%)			1,25		45 µm elek kalıntısı (%)		4,6
S O ₃ (%)		≤ 4,0	3,39		90 µm elek kalıntısı (%)		0,5
Kızdırma Kaybı (%)		≤ 5,0	2,56	DAYANIM DENEMELERİ			
Cl ⁻ (%)		≤ 0,10	0,0421	TEST METODU : TS EN 196-1			
Na ₂ O / K ₂ O (%)			0,25 / 0,56	40x40x160 mm kalıplar Karışım: 1 kısım çimento, 3 kısım CEN ref. kumu, 0.50 su/çimento			
Tayin Edilemeyen(%)			0,54				
S.CaO-Free Lime (%)			2,25	Basınç Dayanımı (Mpa)			
Mineralojik bileşim	C3 S		43,58				
	C2 S		24,52	Mekanik Özellik/Gün	Standartlar	Deney Sonuçları	
	C3 A		8,48	Erken Dayanım 2 gün	≥ 20,0 Mpa	26,4	
	C4 AF		10,10	Erken Dayanım 7 gün	-----	42,9	
LSF			0,93	Standard Dayanım 28 gün	≥ 42,5 Mpa ≤ 62,5 Mpa		

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler



Adı Soyadı	Serkan TÜYLÜ
Uyruğu	T.C.
Doğum tarihi, Yeri	19.04.1983, Fatih/İstanbul
Telefon	05428088283
E-mail	stuylu@istanbul.edu.tr
Web adres	http://aves.istanbul.edu.tr/stuylu/

Eğitim

Derece	Kurum/Anabilim Dalı/Programı	Yılı
Doktora	İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü/ Maden Müh. / Maden Müh.	2015
Yüksek Lisans	İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü/ Maden Müh. / Maden Müh.	2009
Lisans	İ.Ü. Maden Mühendisliği	2006
Lise	Çapa Anadolu Öğretmen Lisesi	2001

Makaleler / Bildiriler

SCI,SSCI,AHCI İndekslerine Giren Dergilerde Yayımlanan Makaleler

Bascetin A., **Tuytu S.**, Nieto A., "Influence Of The Ore Block Model Estimation On The Determination Of The Mining Cutoff Grade Policy For Sustainable Mine Production", Environmental Earth Environmental Earth Sciences, vol.64, pp.1409 - 1418, 2011.

Diğer Dergilerde Yayımlanan Makaleler

Başçetin A., Özdemir O., **Tüylü S.**, Adigüzel D., Akkaya U.G., "Maden Proses Atıklarının Macun Teknolojisi Kullanılarak Yerüstünde Depolanması", MT Bilimsel Yer Altı Kaynakları Dergisi, ss.33-49, 2015.

Bascetin A., Adiguzel D., **Tuylu S.**, Karadogan A., Caglayan M., "The Control Of Energy Consumption And The Investigation Of CO₂ Emissions In The Production Of Aggregate", Gazi University Journal of Science, vol.24, no.3, pp.647- 656, 2011.

Hakemli Kongre/Sempozyum Bildiri Kitaplarında Yer Alan Yayınlar

A. Başçetin, O. Özdemir, D. Adigüzel, **S. Tüylü**, E. G. Savaş, U. Çınar, 2015, “Artık Barajı, Macun ve Jeotekstil Malzeme Yöntemlerinin Maliyet Açısından Karşılaştırılması”, V. Madencilik ve Çevre Sempozyumu, 26-27 Kasım 2015, Antalya. ss.116-128.

Bascetin A., Ozdemir O., **Tuylu S.**, and Adiguzel D., 2015, “An investigation of crack formation in surface paste disposal”, 23rd International Symposium on Mine Planning & Equipment Selection (MPES 2015), 9–11 November 2015, Johannesburg, South Africa. pp.35-40.

Ozdemir O., Bascetin A., Adiguzel D. and **Tuylu S.**, 2015, “Flow behaviour of tailing paste in surface paste disposal technology”, 23rd International Symposium on Mine Planning & Equipment Selection (MPES 2015), 9–11 November 2015, Johannesburg, South Africa. pp.1027-1032.

Bascetin A., Ozdemir O., Adiguzel D., **Tuylu S.**, Baktarhan Y., Harmsel M.T., "Use Of Geotextile Filtration System (Geotube® Technology) For Dewatering And Disposal Of Mineral Processing Plant Tailings", XVI Balkan Mineral Processing Congress, Belgrad, SIRBISTAN, 17-19 Haziran 2015, pp.969-972.

Başçetin A., Özdemir O., **Tüylü S.**, Adigüzel D., "Metal Madenlerinden Üretilen İnce Taneli Ve Sülfürlü Atıkların Yerüstünde Güvenilir Olarak Depolanabilirliğinin İncelenmesi", Türkiye 24. Uluslararası Madencilik Kongresi, Antalya, Türkiye, 14-17 Nisan 2015, vol.1, no.1, pp.1028-1034.

Bascetin A., **Tuylu S.**, Adiguzel D., Akkaya U.G., "The Study Of Optimum Tailing Storing Conditions For Surface Paste Disposal Method", SME Annual Meeting & Exhibit, Denver, ABD, 15-18 Şubat 2015, vol.15-019, pp.1-5.

Bascetin A., **Tuylu S.**, Adiguzel D., Akkaya U.G., "The Study Of Surface Paste Disposal Technology For Pb-Zn Mine Tailings", 2014 SME Annual Meeting , Utah, ABD, 23-26 Şubat 2014, vol.14, no.20, pp.1-5.

- Adiguzel D., Bascetin A., Baray S.A., **Tuylu S.**, "The Study Of Blending Optimization For Concrete Aggregates ", V. Global Stone Congress, ANTALYA, TÜRKİYE, 22 Ekim - 25 Ekim 2014.
- Adiguzel D., Bascetin A., Baray S.A., **Tuylu S.**, "Determination Of Optimal Aggregate Blending With Linear Programming In Concrete Production", 23rd World Mining Congress, KANADA, 11-15 August 2013, pp.Paper813.
- Bascetin A., **Tuylu S.**, Adiguzel D., Akkaya U., Binen I.S., "Investigation Of Suitability Of Pb-Zn Mine Tailings For Surface Paste Disposal", 23rd World Mining Congress, KANADA, 11-15 August 2013, pp.Paper301.
- Bascetin A., **Tuylu S.**, Sertabipoglu Z., Adiguzel D., Binen I.S., "The Study Of Geotechnical Parameters For Paste Technologies: A General Review", SME Annual Meeting & Exhibit , ABD, 19-22 Şubat 2012, pp.12 – 055.
- Adiguzel D., Bascetin A., Yilmaz M., Tugrul A., **Tuylu S.**, "Determination Of Optimal Aggregate Blending Policy With Linear Programming In A Quarry", Twentieth International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection (MPES 2011), KAZAKISTAN, 12-14 Ekim 2011, pp.73 – 83.
- Bascetin A., Adiguzel D., **Tuylu S.**, "The Study Of Energy Consumptions And Co2 Emissions In The Production Of Aggregate For Different Rock Units", SME Annual Meeting & Exhibit, ABD, 27 Şubat-02 Mart 2011, pp.11-026.
- Bascetin A., Adiguzel D., **Tuylu S.**, "Investigation Of CO₂ Emissions Based On Energy Consumption In The Production Of Aggregate", 22nd WORLD MINING CONGRESS & EXPO , , 11-16 Eylül 2011, vol.2, pp.559-566.
- Bascetin A., Adiguzel D., **Tuylu S.**, Karadogan A., Caglayan M., "The Control Of Energy Consumption And The Investigation Of CO₂ Emissions In The Production Of Aggregate", International Sustainable Building Symposium, , 26-28 Mayıs 2010, pp.796-801.
- Bascetin A., Nieto A., **Tuylu S.**, "The Study Of Relationships Between Economical And Environmental Parameters For Sustainable Resources Management", Eighteenth International Symposium on Mine Planning & Equipment Selection (MPES 2009), KANADA, 16-19 Kasım 2009, pp.107-119.
- Bascetin A., Nieto A., **Tuylu S.**, "Determination Of Optimal Cutoff Grade Policy For An Copper Mine In Turkey", Seventeenth International Symposium on Mine Planning & Equipment Selection (MPES 2008), ÇİN HALK CUM., 20-22 Ekim 2008, pp.307 – 315.