

Maden Proses Atıklarının Macun Teknolojisi Kullanılarak Yerüstünde Depolanması
*Storage of Mining Processing Tailings at Surface Using Paste Technology*Ataç Başçetin^{1*}, Orhan Özdemir¹, Serkan Tüylü¹, Deniz Adıgüzel¹, Ufuk Gökhan Akkaya¹¹*Istanbul Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 34320, Avcılar, İstanbul*^{*}*Sorumlu Yazar : basçetin@istanbul.edu.tr,***Özet**

Son yıllarda hızla gelişmekte olan madencilik sektörü, aynı zamanda yanında çevresel sorunları da birlikte getirmektedir. Bu sorunların başında her yıl madenlerden yüksek miktarlarda üretilen maden proses atıkları gelmektedir. Özellikle metal madenciliğinde konsantrite üretimi sonucu arta kalan ekonomik yönden değersiz ve sülfür içeren atıklar, su ve oksijen varlığında asitli sızıntı suyu üretimine neden olarak çevreye önemli derecelerde kalıcı zararlar verebilmektedirler. Bu atıkların yerüstünde geleneksel yöntemler (atık barajı vs.) kullanılarak bertarafı sırasında sebep olduğu çevresel zararların yeni teknolojiler ve yöntemlerle beraber önemli ölçüde azaltılabileceği çeşitli araştırmalarda ortaya konmuştur. Bu yöntemlerden birisi de, atıkların çevresel açıdan güvenilir olarak bertarafına imkân veren macun teknolojisi yöntemidir. Atıkların bir kısmı macun dolgu şeklinde yeraltına dolgu amaçlı olarak kullanılırken diğer bir kısmı da yerüstünde macun depolama şeklinde değerlendirilmektedir. Bu kapsamda, ülkemizde macun teknolojinin geleneksel yerüstü bertaraf yöntemlerine alternatif bir yöntem olarak incelenmesi önem arz etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Maden Proses Atıkları, Çevresel Problemler, Macun Teknolojisi, Yerüstü Atık Bertarafı.**Abstract**

Mining sector developing rapidly in recent years also brings it together environmental issues. Main problem of this situation comes from high amounts of mining process tailings produced in mines every year. Particularly, economically invaluable and sulfur containing tailings from production of concentrates in metal mining cause acidic water leaking in the presence of water and oxygen, hence significantly permanent damage to environment. Several studies demonstrated that it is possible to considerably reduce environmentally damage caused by disposal of these tailings using conventional methods (tailings dam etc.) along with new technologies and methods. One of these methods is paste technology which allows the tailings to be disposed safely. While some of these tailings are used at underground as paste materials, another part of the tailings are evaluated at aboveground as paste disposal materials. In this context, it is important to examine paste technology as an alternative method to conventional aboveground methods in our country.

Keywords: *Mining Process Tailings, Environmental Problems, Paste Technology, Aboveground Tailings Disposal.*

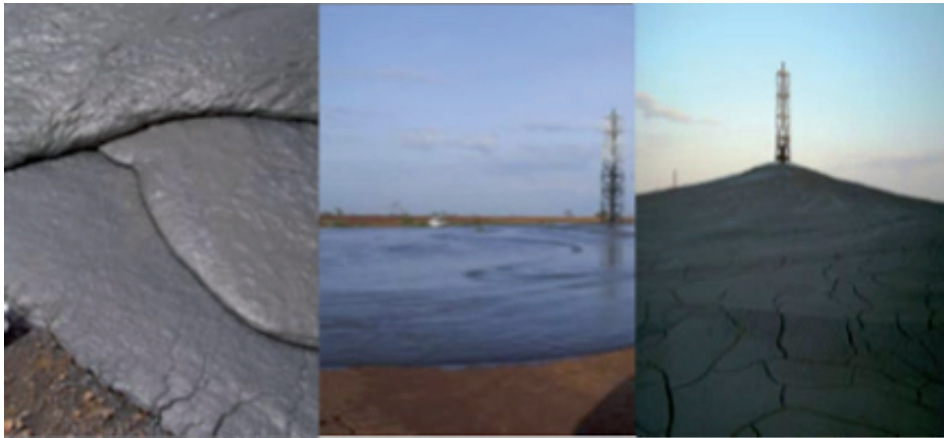
1. Giriş

Cevherlerin üretimi ve zenginleştirilmesi işlemleri sonucunda, özellikle metalik cevherler de önemli miktarda çözünebilir sülfür içeriği yüksek atıklar açığa çıkmaktadır. Zenginleştirme amaçlı kullanılan kimyasal maddeleri de içeren bu atıkların çevreye olan olumsuz etkileri çok yönlü olup, bu atıkların depolanacağı yerin izolasyonu, tesisten nakli, stabilitesi, emniyeti, su ve toprak kalitesi gibi parametrelere bağlı olarak atık sahalarının düzenlenme şekli ve kontrolü de başlıca dikkat edilmesi gereken hususlardandır. Ayrıca konvansiyonel atık barajları ve kuru depolama gibi yöntemlerin maliyetleri açısından bakıldığında da bir dezavantaja sahip olduğu görülmektedir.

Günümüzde genellikle yerüstü atık barajlarına, denizlere, nehirlere, çaylara vb. boşaltılan metal maden atıkları, son yıllarda önemi giderek artan bertaraf yöntemlerinden biri olan Macun Teknolojisi kullanılarak güvenli bir şekilde atıkların depolanabilirliği araştırılmaktadır (Şekil 1). Dünyada Macun Teknolojisi ilk olarak 1980 yılında Almanya'nın Grund madeninde yeraltında tahkimat amacıyla dolgu şeklinde kullanılmaya başlanmıştır (Kesimal vd., 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 atıklarının macun formunda yeraltında depolanması olarak uygulanmaya başlamıştır. Bu tarihten itibaren proses atıklarından oluşan macun malzemesinin yeraltı ve yerüstünde depolanması ya da bertarafı ile ilgili özellikle bilimsel çalışmalar hız kazanmıştır. Bu çalışmalar yerüstü macun depolama işleminin geleneksel atık 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 hidrojeoteknik özelliklerinin gelişmesi ve yerüstü macun malzemesine gerekli olduğu durumlarda hidrolik bağlayıcının ilave edilmesi ile de oluşturulan macunun dayanımı, duraylılığı ve asit nötralizasyon potansiyeli artırılmış olduğu görülmüştür. Bu uygulama beraberinde özellikle atık depolama sahası bulunması zor işletmelerde bir yer kazanımı sağlamaktadır. Diğer önemli bir husus ise yapılan araştırmalarda maliyet yönünden diğer yöntemlere göre çok daha avantajlı bir yöntem olduğu anlaşılmıştır.

Bu kapsamda ülkemizde macun teknolojinin geleneksel yerüstü bertaraf yöntemlerine alternatif bir yöntem olabilmesi için macun atık malzemesinin fiziksel, jeokimyasal ve jeoteknik özellikleri bakımından detaylı olarak incelenmesi önem arz etmektedir.



Şekil 1. Macun teknolojisi yerüstü uygulaması (Theriault vd., 2003)

2. Maden Atıklarının Depolanması / Bertaraf Yöntemleri

Madencilikte kullanılan atık bertaraf yöntemleri genelde atığın türü, uygulanan yöntemin amacı, yeri, yerleşimi, yapım biçimi ve su deşarjı durumuna göre yerüstü, yeraltı ve su altı (deniz ve göllere) olmak üzere 3 ana başlıkta sınıflandırılmaktadır (MMSD, 2002).

Yerüstü Bertaraf Yöntemleri: Setlendirilmiş baraj ve havuzlar, doğaya geri kazandırılan kuru atık depoları, işlenmiş liç yığınları, açık ocak çukurları, özel olarak kazılan çukurlar başlıca yerüstü atık bertaraf yöntemleridir.

Yeraltı Ocaklarında Atık Bertarafı: Kazı-dolgu ve oda-topuk maden işletme yöntemlerinde gerekli olan dolgu malzemesi atıklardan sağlanabilir. Genellikle suyunu kolay bırakan iri veya kumsu atık kullanılırken son zamanlarda gelişen teknolojiye paralel olarak macun dolgu adı verilen basınçlı filtre ile suyu iyice alınmış çimento katkılı kuru çamurlar da hem tahkimat hem de atık bertarafını aynı anda sağladığı için başarıyla kullanılmaktadır.

Derin Deniz, Nehir ve Göl Deşarjı Atık Bertarafı: Cevher zenginleştirme atıkları için kullanılan bir yöntemdir. Bu bertaraf yönteminde atıklar deniz veya okyanuslarda kıyıdan uzaktaki derin zonlara bırakılır. Denizin yakın ve derin, yağışın çok, buharlaşmanın az, yerüstü atık bertaraf yöntemlerinin riskli olduğu bölgelerde uygulanır. Diğer ifade ile vahşi bertaraf yöntemi olarak isimlendirilen bu metod, günümüzde birçok ülkede çevresel duyarlılığın artmasıyla terkedilen bir bertaraf yöntemidir.



Şekil 2. Maden atıklarının depolama/bertaraf yöntemleri (Tüylü, 2015)

Bu yöntemlerden atık miktarına bağlı olarak en fazla kullanılan yöntem yerüstü olup o da kendi içinde geleneksel atık barajı, açık ocak içerisinde depolama ve kuru depolama olarak ayrılmaktadır.

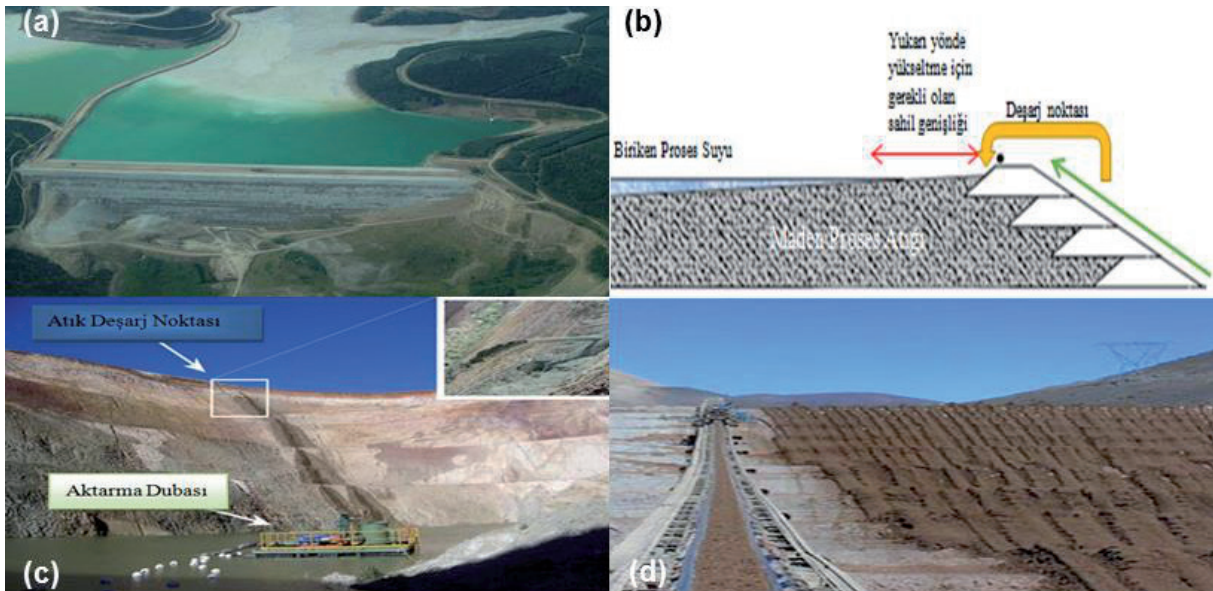
Geleneksel Atık Barajları, bir baraj inşa edilmesiyle hem suyun hem de atıkların birlikte depolanmasında kullanılan geleneksel bir yöntemdir. Klasik baraj ve set tipi olmak üzere iki ana türü bulunmaktadır. Baraj tipi depolamada, hem maden atıkları hem de atıklarının içerdiği

yüksek su ile birlikte depolanmaktadır (Şekil 3a). Bundan dolayı bu yöntem çoğunlukla yüksek hacimlerdeki suyun depolanması planlanan operasyonlarda kullanılmaktadır.

Diğer atık barajı yöntemi olan Set Tipi Barajlar ise klasik baraj tipine benzemekle beraber aralarında bazı temel farklılıkları bulunmaktadır (Şekil 3b). Mesela, Set tipi genellikle düz topografyalarda uygulanmaktadır. Bu yöntemde atıkların depolanacağı bölgenin etrafı birkaç metrelik bir dolgu seti ile çevrilir, Kapasitenin dolması ile de dolgu set üzerine tekrar dolgu yapılarak kademeli kapasite artışı sağlanır. 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 operasyon ömrüne yayılmasına olanak tanınması avantaj olarak kabul edilmektedir.

Açık Ocak İçerisinde 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 3c). Yöntemin en büyük avantajı herhangi bir baraj yapımı gerektirmemesi rağmen yeraltı suyu kirlenme riski gibi bazı ciddi sakıncaları da bulunmaktadır.

Diğer bir yöntem olarak Kuru Depolama yönteminde ise atıkların su içeriği malzemenin doğal nemine kadar düşürülerek (%85 ve üzeri katı içeriği) depolama yapılır (Şekil 3d). Bu malzeme kuru bir yapıya sahip olduğundan dolayı naklinde konveyörler ve kamyonlar gibi makine ve ekipmanlar kullanılır. Malzemenin depolama alanına yerleştirilmesinde ve doymun olmayan sıkıştırılmış bir yığın formu elde edilmesinde makine ve ekipman kullanımı ile birlikte kendi kendini tutabilen ve harici bir destek ünitesine gerek duymayan stabil bir malzeme oluşur (Davies ve Rice 2001).



Şekil 3. Yerüstü depolama yöntemleri (a) Klasik baraj tipi (b) Set tipi baraj (c) Açık ocak içerisinde depolama (d) Şili'de La Coipa Madeni kuru depolama uygulaması (Davies ve Rice 2001)

3. Macun Teknolojisi ve Yerüstünde Depolama Yöntemi

Son yıllarda kullanılan yerüstü bertaraf yöntemlerine alternatif olarak geliştirilen Macun Teknolojisi, cevher hazırlama tesis atıklarının filtrasyon yada koyulaştırma (tikiner) yardımı ile susuzlaştırıldıktan sonra belli bir oranda su ve gerekli görüldüğü yerlerde ilave bağlayıcı

malzemeye iyice karıştırılarak pompalanabilir kıvamdaki ince taneli malzeme olarak tanımlanmaktadır. Sulu çamurun pompa le taşınmasındaki durumun aksine, doğal halinde ve taşınması sırasında ayrışmayan özellikte olup oldukça iri parçaların nakline izin verirken tane boyu ancak pompa boru çapı ile sınırlıdır (Brackebush, 1994; Newman vd., 2001; Verburg, 2001). Belirli kıvama getirilmiş bu atık malzeme hem pompalanabilir özelliğe sahiptir hemde depolama alanında akış durduğu anda kısa sürede kuruma özelliğine sahiptir. Kuruyan bu malzeme su içeriği yönünden belirli bir doygunluğa da sahip olduğu için oksijen ve su difüzyonuna da müsade etmez. Bu nedenle de atık içerisindeki metal çözünmeleri ya gerçekleşmez yada minimum düzeyde kalır. Bu özellikleri ile yerüstü macun depolama yöntemi değişik iklim koşullarında fiziksel, jeokimyasal ve jeoteknik özellikleri açısından duraylı bir malzeme olup, konvansiyonel depolama yöntemlerinde karşılaşılan çevresel rikleri taşımaz.

3.1. Macun Malzemesinin Karakterizasyonu

Macunun geleneksel atık depolama yöntemlerine göre en önemli ayırt edici özelliklerinden birisi karışımın tane boyut dağılımıdır. Macun malzemesi yeterli miktarda su tutabilmesini sağlayacak miktarda ince boyutlu tane içermelidir. Çok sayıdaki ampirik verilere ve işletme tecrübelerine göre, tipik bir macunun en az ağırlıkça %15'inin 20 µm altında olması gerekir.

İnce tanelerin kolloidal su tutabilme özelliği sayesinde ayrışmaya uğramayan ve tipik macun akış özelliği gösteren karışımlar sağlanır. Macun uzun süre hareketsiz bırakıldığında çok az süzüntü suyu bırakabilir. Ayrıca uzun süre duraylılık gösterir ve boru hattı tıkanma riski taşımaz. Fazla su miktarı malzemeye bağlı olduğundan, macun belirli bir katı konsantrasyonunda olarak da tanımlanamaz.

Macun, taze beton ile benzer kıvamda olduğundan beton endüstrisinde kullanılan geleneksel Çökme Konisi Beton Testi uygulanarak slump (kıvam) özelliği belirlenir. Slamp testleri genellikle macun karışımlarının viskozite ölçümleri için kullanılmaktadır. Slamp, bir karışım malzemesinin konik şeklindeki bir kaygan kalıptan serbest bırakıldığında maruz kaldığı boydaki düşmenin bir ölçüsüdür. Slampı belirleyerek bir malzemenin taşınabilirliği ile kıvam karakterize edilir. Yeraltı macun sisteminde optimum slump değeri 150-200 mm arasındadır. Bu durum, taşımada basınç kayıplarını azaltır ve kazanılan dayanımı artırır. Yeraltı macun dolgu sistemlerinde macun taşınmasında pompa nadiren kullanılırken; çimentonun rutin olarak ilave edilmediği yerüstü bertaraf sisteminde, pompalama macun bertaraf sisteminin en önemli parçasını oluşturur. Dolayısıyla, optimum slump değeri yüksek olup 200-250 mm arasındadır. Bu slump değeri sürtünme kayıplarını azaltmakta ve macunun büyük tek bir pompa ile 2-3 km mesafelere taşınmasına imkan sağlamaktadır (Newman vd., 2001).

Belirli bir slump 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. Tanelerin özgül ağırlıkları da karışımın yoğunluğunu etkileyen bir diğer faktördür. Tipik bir porfiri bakır flotasyon tesisi atıklarından oluşan %75 katı içerikli bir macunun, uygulanmasında ise macun karışımlarının ağırlıkça katı yüzdesinin %40-90 arasında değiştiği belirtilmektedir (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 atıklar non-newtonian davranışı

gösterdiğinden belirli bir akma gerilmesine sahiptir. Sulu çamurdan macuna geçiş noktası yaklaşık 200 Pa akma gerilmesi olarak kabul edilmektedir. 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. Brackebush'a (1994) göre birçok macun pseudoplastiktir (kuvvet karşısında direnç kaybeden malzeme yapısı) ve viskozite, yüksek pompalama hızlarında azalır. Bu durum malzemenin pompa ile taşınmasında yararlı bir özellik olup ulu çamur ve macun formundaki atıkların taşınmasında santrifüj ve pozitif yer değiştirme pompalarının kullanılmasına imkan verir. Ayrıca, , çok yüksek yoğunluklu macun taşınmasında ise sadece pozitif deplasmanlı (PD) pompalar kullanılabilir (Meggyes ve Debreczeni, 2006). Dolayısıyla herhangi bir macun veya susuzlandırılmış atık bertaraf sistemi tasarımı ve işletme şartlarının tespiti için hem kesme hem de basma ile ilgili malzemenin reolojik özelliklerinin iyi anlaşılmasını gerektirir.

3.2.2. Macun Malzeme Karakterizasyon Testleri

Atıkların macun formunda depolanması diğer yöntemlere göre daha karmaşık testler ve ön çalışmalar gerektirmektedir. 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 atıkların malzeme özelliklerinin iyileştirilmesini sağlamaktır. Böylelikle atıkların doğasında yatan tehditleri ortadan kalkmasıyla, uzun vadede ekonomik, güvenli ve çevre dostu bir şekilde depolanmaları mümkün olmaktadır.

Macun nakliyatı ve depolanmasıyla ilgili çeşitli testlerin uygulanması gerekmektedir. Bunlar ; Laboratuvar testleri ve Pilot Tesis testleri olmak üzere 2'ye ayrılmaktadır (Brackebusch, 1994; Zou, 1997; Oulette vd., 1998; Jewell vd., 2002).

Laboratuvar Testleri

- Lazer tane boyut dağılımı analizi,
- Mineralojik analiz,
- Yoğunluk tayini,
- Tane şekli,
- Kompaksiyon eğrileri ve optimum yoğunluk,
- Kıvam limitlerinin belirlenmesi,
- Porozite,
- Permeabilite,
- Slump ve su içeriği,
- Kıvamlandırma testi,
- Filtrasyon testi,
- Siklon testi,
- Macun karışımında görsel gözlemler,
- Akış testleri (Reometre, kanal, kolon),
- Akma gerilmesi tayini,
- Kayma gerilmesi tayini,
- Proses suyu kalite analizleri,
- Viskozite,
- Sıvılaşma,
- Konsolidasyon,

- Su tutma eğrileri,
- Sızıntı suyu değerlerinin ölçümlerini içerirken,

Pilot Tesis Testleri

- Pilot tesiste çöktürmeyle kıvamlandırma,
- Pilot tesiste filtrasyon,
- Slump testleri,
- Tam ölçekli pompa çevrimi testleri şeklinde sıralanmaktadır.

3.3. Macun Teknolojisinin Sahâ Uygulaması

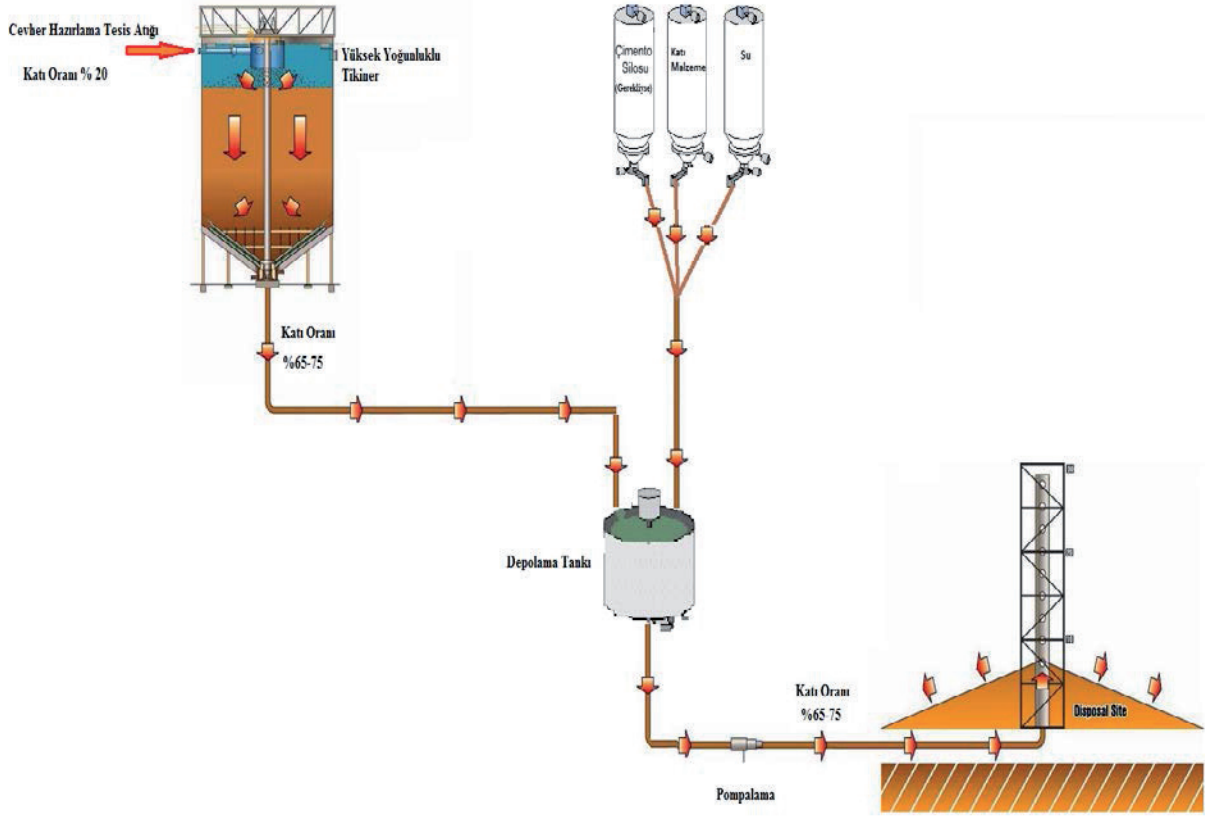
Susuzlandırma teknolojisindeki gelişmeler (Ultra yüksek hızlı ve ultra yüksek yoğunluklu tikinerler), bazı atıklar için yüksek slamlı macunların eldesini kolaylaştırmıştır. Bu da daha ucuz macun üretimi imkanı sağlamıştır. Sonuç olarak daha çevreci macun bertaraf yöntemini bir adım daha yaklaştırmıştır.

Macun teknolojisinin öncülerinden biri olan Robinsky'e (1999) göre, gerçekte bütün cevher hazırlama yöntemleri macun üretimine uygun atıklar oluşturur. Ancak, atıkları macun formunda bertaraf etmeden önce jeoteknik ve jeokimyasal karakterizasyonunun yapılması gerekmektedir. Macunun uzun dönem çevresel duraylılığı bu anlamda özellikle önemlidir. Potansiyel çevresel etki faktörü derecesi, uygun macun ve bertaraf senaryolarının seçimini etkiler.

Atıkların daha yoğun kıvamlara susuzlandırılmaları ile kendi kendini destekleyen atıklar oluşturmak mümkündür. Dolayısıyla cevher zenginleştirme atıklarının macun formunda yeryüzünde depolanması çökme göleti/atık barajları gereksinimini de ortadan kaldırır. Bunun için tesis çıkışı atıklar, proses suyunun çoğu uzaklaştırılarak duraylı hale getirilir. Tikinerlerde çökelen katı, tikinerin altından alınırken üstten alınan su tesise geri beslenir. Tikinerlerdeki kıvamlaştırma, atıkları ayrışmaya uğratmayan ancak hala pompalanabilir kıvama dönüştürecek yeterlilikte olmalıdır. Bazı durumlarda tikiner alt akımının bir kısmının filtre edilmesi ve daha sonra arta kalan tikiner alt akımı ile istenilen kıvamı yakalamak için birleştirilmesi gerekebilir.

Macun formundaki atıklar serbest bırakıldığı zaman, yoğun kıvamları ve dolayısıyla yüksek viskozite nedeniyle, ayrışmaya uğramadan uzun mesafe kat eder, nihayetinde az bir eğimde akış durur. Bu eğimin derecesi susuzlandırma derecesi ile belirlenir. Amaç, ılıman iklimlerde %2-6'lık bir eğime ulaşmaktır. Bu eğim derecesi erozyonu önleyecek yeterlidir ve bitki örtüsü için yeterli drenajı da sağlar. Kurak iklimlerde, daha dik eğimler tasarlanabilir. Susuzlandırılmış atıkların ayrışmama özelliği, katıyı oluşturan tanelerin birbirlerine bağlanmasını sağlayarak hem erozyon hem de tozlaşma potansiyelini azaltır (Robinsky, 1999; Meggyes ve Debreczeni, 2006).

Macun teknolojisindeki atık bertaraf alanları tesis yakınlarında bir vadi ya da düz bir alan olabilir. Bir vadide eğimli bir atık alanı oluşturmak için susuzlandırılmış atık, vadinin tavanından ya da tepenin bir yamacı boyunca boşaltılır. Atık, vadi boyunca bir eğimle karşılaşınca kadar akacaktır veya alternatif olarak küçük bir baraj sayesinde durdurulur. Düz alanlarda, susuzlandırılmış atık yapay rampa veya tepe şeklinde boşaltılarak serilir veya atık konisi oluşturulur (Şekil 4).



Şekil 4. Macun tesisi akım şeması

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 direkt yığın oluşturacaktır. Diğer taraftan, katı içeriği çok düşük olursa, çok uzaklara kadar akış gösterecek ve istenilen yığını oluşturmayacaktır. Su içeriği arttıkça kuruma da uzun zaman alacaktır.

3.4. Macun Malzemesinin Tasarım Özellikleri

Bir macun tesisi için ilk olarak 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.

Macun malzemenin yerüstünde uygulanabilmesi için bazı temel parametrelerin sağlanması gerekmektedir (Benzaazoua vd., 2004; Yılmaz vd., 2014). Bunlar;

- Atık malzemesinin tane boyut dağılımına göre 20 µm altı içeriğinin %15 veya daha yüksek olması,
- Macun malzeme karışımında katı içeriğinin ağırlıkça %65-75 olması,
- Su içeriğinin ağırlıkça %25-35 arasında olması,
- Eğer macun malzeme karışımında kullanılacaksa, bağlayıcı miktarının ağırlıkça katı oranının \leq %2 olması,
- Slamp değerinin 25 cm (10") olması gerekir.

3.5. Macun Teknolojisinin Geleneksel Yöntemlere Göre Avantajları

Macun bertaraf yöntemi ile aşağıda ifade edilen temel problemler ortadan kaldırılacaktır:

- Yer sarsıntısı; ağır makinelerin yol açacağı titreşim ve hareketin neden olacağı atık barajı kazaları,
- Yükseltile çökeltme göletlerinden olan sızıntıların yol açacağı erozyon ve barajın zarar görmesi,
- Gömülü boşaltma borularının çökme tehlikesi,
- Sıvı göletteki istenmeyen atık sıvının toprağa ve yer altı suyuna sızması.

Yerüstü macun bertarafının avantajları çevresel fayda, güvenlik ve ekonomik fayda olarak sınıflandırılabilir. Bunlar;

- Yatırım maliyetlerinin azalması (büyük barajların inşası gerekmekte),
- Güvenliğin artması,
- Halkın negatif algısının azalması,
- Su kaynaklarının korunması (su tasarrufu),
- Atık bertaraf alanının küçülmesi,
- Toprak ve yeraltı suyu kirlenmesinin azalması,
- Madencinin yükümlülüklerinin azaltılması,
- Harç ödemelerinde ve sigorta primlerinde azalma (atık barajı kazaları ile ilgili sorumluluklar azaldığından),
- 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 sağlanması,
- Çok az sızıntı suyu oluşumu sayesinde su tutma yapılarının boyutunu küçültmesi,
- Reklamasyon şartlarında iyileşme sağlanması,
- Tanelerin ayrışmasının önlenmesi,
- Eğimli atık yüzeyi sayesinde yağmur suyunun kolay ve hızlı drenajının sağlanması.

Ayrıca, hidrolik bağlayıcıların ilave edilmesi, yerüstü macun dolgunun dayanıklılık, duraylılık ve asit nötralizasyon potansiyelini artıracak, çimento katkısı macun malzeme içindeki kirleticileri duraylı kılacaktır.

3.6. Macun Teknolojisinin Laboratuvar Çapında Uygulanması

İstanbul Üniversitesi Maden Mühendisliği Maden İşletme Laboratuvarlarında, Balıkesir bölgesinde yer alan bir flotasyon tesisinden alınan Pb-Zn proses atıklarının macun teknolojisi kullanılarak yerüstünde optimum bir şekilde depolanabilirliği 2012 yılından beri Prof. Dr. Ataç Başçetin yönetiminde bu konuda uzman bir araştırma ekibi tarafından detaylı olarak çalışılmaktadır. Bu çalışmalarda ilk olarak 200×70×50 cm boyutlarında iki cephesi pleksiglas şeffaf plakalardan oluşan dikdörtgenler prizması şeklinde macun haline getirilmiş atığın depolanabileceği kabinler tasarlanmıştır (Şekil 5). Bu kabinin alt tarafına, sızıntı sularının drene olabileceği malzeme kaçağına izin vermeyecek boyutlarda jeotekstil yerleştirilmiştir (Bascetin vd., 2013; Bascetin vd., 2014).



Şekil 5. Atık depolama deney kabini

Macun olarak kullanılacak tesis atıklarının yerüstünde optimum şekilde depolanabilirliğinin incelenmesi için, öncelikle atığın fiziksel-kimyasal özellikleri (yoğunluk, tane boyu dağılımı, spesifik yüzey alanı, maksimum kuru birim hacim ağırlığı, optimum su içeriği, permeabilitesi, mineralojik kompozisyonu, elementel içeriği vb.) ve macun malzemenin karışım oranları (25 cm slump değerine göre katı-su oranı) belirlenmiştir. Daha sonra optimum yerüstü macun depolama tasarımı için 4 farklı set-up'tan oluşan kabin konfigürasyonlarında testler yapılmıştır (Şekil 6).

Set-up 1, tamamen bağlayıcısız macun atık malzemesinden oluşacak şekilde tabaka tabaka doldurulmuş olan deney kabini. Tabakaların kalınlığı 4 cm olarak belirlenmiş ve her tabaka döküldükten sonra iklim şartlarına bağlı olarak 8 gün kuruma sürecine bırakılmıştır. Bu deney kabini farklı konfigürasyonların denendiği diğer deney kabinleri için bir kontrol örneğidir (Şekil 6a).

Set-up 2'nin sadece 1. tabakası çimentolu macun atık malzemesinden, üstünde yer alan diğer tabakalar ise çimentosuz macun atık malzemedenden oluşturulmuştur. Buradaki 1. tabakada atığın toplam kütlece katı içeriğinin %2'si kadar Portland Çimento tipi bağlayıcı kullanılmıştır (Şekil 6b). Her bir set-up'taki macun malzeme karışımı için katı su oranı, slump değeri 10" (250 mm) olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu deney konfigürasyonu ile 1. tabakanın alkali seviyesi yükseltilecek sızan sulardaki ağır metal mobilizasyonunun önüne geçilmesi planlanmıştır. Aynı zamanda bağlayıcı olarak kullanılan çimentonun taneler arasındaki bağı güçlendirerek macunun stabilitesi artırılmıştır.

Set-up 3'ün 1. ve 11. tabakaları %2 Portland çimentolu macun malzeme ve arada kalan diğer tabakalar ise çimentosuz macun malzeme olarak dökülmesi planlanmıştır (Şekil 6c). Böylece depolanan sahanın en üst tabakasının stabilitesi daha fazla artırılarak, maden kapandıktan sonra yapılacak olan rekreasyon ve reklamasyon çalışmalarına yardımcı olabileceği düşünülmüştür. Ayrıca serbest yüzey sularının temas edeceği en üst tabakadaki yüksek alkali seviyesi Asit Maden Drenajı (AMD) riskinin azaltılmasına katkı sağlayacaktır.

Set-up 4 ise, Set-up 2'ye benzer bir konfigürasyon oluşturulacaktır. Ancak bu set-up'ta çimento oranını minimize etmek için, sadece 1. tabaka %1'lik Portland çimentolu bağlayıcı içeriğinde olacak şekilde dökülecektir (Şekil 6d). Çünkü çimentolu macun atık malzeme oluşturulurken maliyeti arttıran en önemli parametre çimento bağlayıcı oranıdır. Böylece bağlayıcı içerisindeki çimento oranı azaltılmasının depolamaya nasıl bir etkisi olduğu incelenebilecektir.



(a) Bütün tabakaları bağlayıcısız



(b) Yalnızca 1. tabakası 2% Portland Çimento



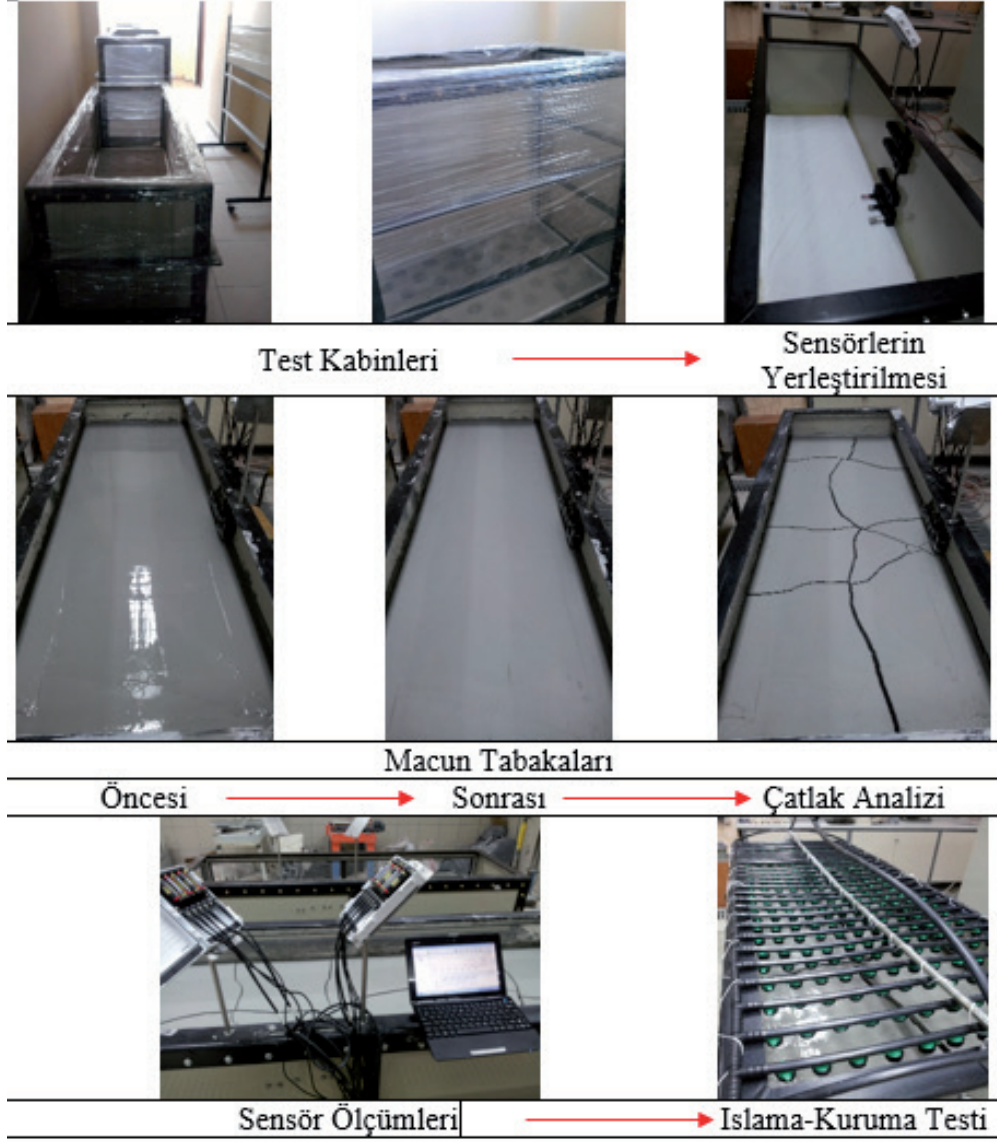
(c) Yalnızca 1. ve 11. tabakalarda 2% Portland Çimento



(d) Yalnızca 1. tabakası 1% Portland Çimento

Şekil 6. Farklı konfigürasyonların yer aldığı test kabinleri

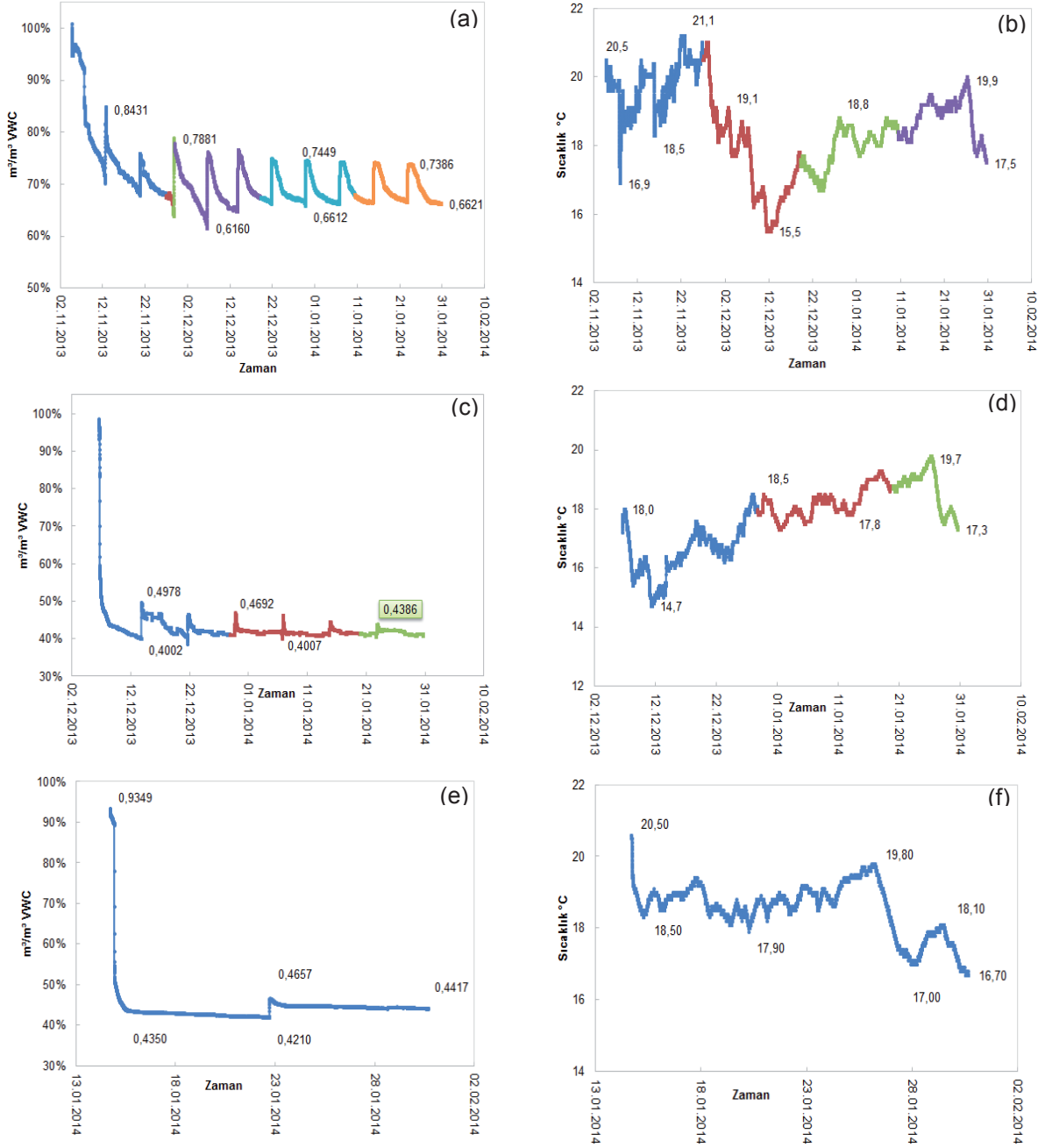
Bu çalışma kapsamında farklı konfigürasyonlarda 4 ayrı kabin çalışması yürütülmüştür. Set-up çalışmaları sırasıyla sızıntı suyu ölçümleri, sensör ölçümleri, ıslama-kuruma testi, çatlak yoğunluğu analizi ve kesme kutusu testine tabi tutulmuştur. Laboratuvar ölçekli kabin deneyleri günlük alınan veriler doğrultusunda ortalama 23^{+3} °C sıcaklığında ve %6010 nem de yapılmıştır. İlk üç set-up'ın dökümü tamamlanmıştır. Örnek olarak bir set-up'ın aşama aşama oluşturulması ve üzerinde yapılan ölçümler sırasıyla Şekil 7'de görülmektedir.



Şekil 7. Yerüstü macun depolama laboratuvar uygulaması

3.7. Örnek Sensör Ölçüm Değerleri

Bu kısımda sadece Set-up 1'in 1., 5. ve 10. tabakalarına yerleştirilen hacimsel su içeriği (VWC)-sıcaklık değerleri Şekil 8'de ve su emme kuvveti sensörlerinden alınan ölçüm değerleri de grafiksel olarak Şekil 9'da verilmektedir (Tüylü, 2015).



Şekil 8. 1., 5. ve 10. tabakaların VWC-Sıcaklık değerleri

(a) 1.tabakanın VWC değeri, (b) 1.tabakanın sıcaklık değeri, (c) 5.tabakanın VWC değeri, (d) 5.tabakanın sıcaklık değeri, (e) 10.tabakanın VWC değeri, (f) 10.tabakanın sıcaklık değeri,

Şekil 8a'da görüldüğü üzere 1. tabaka dökümünde VWC değeri %100 iken 8 gün sonra %70 VWC değerine düşmektedir. 2. tabaka dökümünde ise VWC değeri %85'e çıktıktan sonra 5. tabaka dökümüne kadar kademeli olarak %61 seviyelerine düşmektedir. Daha sonra 5. tabakayı takip eden her bir dökümden sonraki 8 günlük kuruma süresinin bitimlerinde yaklaşık %66 VWC değerine kadar inebildiği görülmektedir. Aynı şekilde 6. tabakadan sonraki her bir tabakanın dökümünde 1. tabakanın VWC değerinin %73-75 aralığında seyrettiği belirlenmiştir. Bu değerlere göre 1. tabakanın tüm tabakaların dökümü sırasında hacimsel olarak %50 den fazlası su olarak gözükmemektedir. Aynı sensör VWC değerinin yanında tabakadaki sıcaklık değişimini de ölçmektedir. 11. tabaka dökümü ve sonrasında 8

günü kapsayacak tarihlerde, 1. tabakanın ortalama sıcaklığı 18.48 °C olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar 11 tabaka dökümü sırasında en alt tabakanın (1. tabaka) suya doymun olarak kaldığı ortaya çıkarmaktadır.

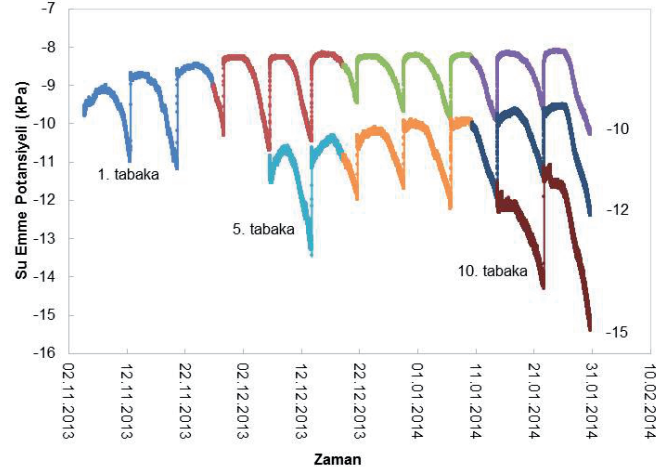
5. tabakada yer alan VWC sensöründen tabaka dökümü ile veri değerleri alınmaya başlanmıştır. 8 gün sonra WVC değerinin %40'a kadar düştüğü ve takip eden dökümlerde de aynı kuruma süresinde %40'ın altına düşmediği Şekil 8c'de görülmektedir. 1. tabakanın 5. tabaka dökümünden sonraki kuruma sürelerinde %65-66 seviyelerinde hacimsel olarak su tuttuğu Şekil 8a'daki grafikten okunmaktadır. 6. tabaka dökümünde ise yaklaşık %50'ye çıkan 5. tabaka VWC değeri 11. tabaka dökümünde %44'e kadar çıkabilmektedir. 1. ve 5. tabakaların sıcaklık değerlerinin birbirine çok yakın seyrettiği Şekil 8b ve 8d'deki grafikteki değerlerden açıkça görülmektedir.

Macun malzemenin 10. tabakadaki ilk VWC değerinin %93,5 olarak diğer tabakalardaki okunan ilk VWC değerlerinden düşük olduğu görülmüştür (Şekil 8e). Bu farkın nedeni olarak alt tabakalara hızlı bir su geçişinin veya emiliminin gerçekleştiği şeklinde ifade edilebilir. Dökümden sonraki 24 saat içerisinde VWC değerinin %43,5'a düşerek 10. tabakanın bir günde %50 hacimsel olarak su kaybetmesi tabakalar arasındaki su geçişini daha iyi açıklamaktadır. Ayrıca 10. ve 11. tabakaların dökümü sonrası hacimsel su içeriği %42-46,5 arasında değiştiği ve 5. tabakanın VWC değerleriyle birbirine yakın olduğu belirlenmiştir. 10. tabakanın sıcaklık değişimi Şekil 8f'deki grafikte gösterilmiştir. 10. tabakanın ilk sıcaklık değeri 20,50 °C'den yaklaşık 24 saat içerisinde 18,50 °C'ye düşmesi ve sonrasında diğer tabakalarda yer alan sensörlerin sıcaklık eğrileri ile benzer bir durumda olması, VWC değerindeki hızlı düşüş gibi malzemenin su geçirgenliğinin yanı sıra sıcaklık iletkenliğinin de yüksek olduğunu göstermektedir.

Tabakalardaki Su Emme Potansiyeli

Su emme kuvveti tabakalar arasındaki su geçişi ve tabakaların su tutabilmesi hakkında bilgi vermektedir. 11. tabakanın dökümü sırasındaki 1. tabakanın ortalama su emme kuvveti -10 kPa olarak ölçülmüştür. Decagon MPS-1 dielectric water potential (suction) sensörüne göre alt sınır olarak kabul edilen bu değer ile 1. tabakanın suya doymun kaldığı anlaşılmaktadır. 5. tabakanın -12 kPa ve 10. tabakanın -15 kPa olması ile üst tabakalara doğru su emme kuvvetinin arttığını göstermektedir (Şekil 9).

Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen kabin deneylerinden alınan VWC ve su emme potansiyeli sensör sonuçları, macun tabakalarının suya doymun kaldığını göstermektedir. Bunun nedeni olarak atık malzemesinin ince taneli yapısı ve geniş tane yüzey alanlarının suyu tutması olarak ifade edilebilir. Ayrıca atığın tane boyu dağılımına bakıldığında yaklaşık %10'unun kil boyutunda olması ve mineralojik kompozisyonunda da kil minerallerinin bulunması, macun malzemenin suyu bünyesine hapsederek az miktarda sızıntı suyu vermesini sağladığı düşünülebilir.



Şekil 9. 1., 5. ve 10. tabakaların su emme kuvveti

4. Tartışma ve Sonuçlar

Macun teknolojisi fikri ilk ortaya atıldığında, yüksek riskli ve yüksek maliyetli bir uygulama olarak düşünüldüğünden endüstriyel anlamda kullanılması uzun yıllar almıştır. Ancak sistemin başarılı uygulamaları, bu teknolojinin güvenilir dolgu yöntemi olarak kabulünü ve günümüzde binlerce ton macunun her gün sorunsuz olarak depolanmasını sağlamıştır. Günümüzde gelişen teknoloji ve gittikçe artan çevresel duyarlılığa bağlı olarak, gerek maliyet gerekse çevresel avantajları nedeniyle Macun teknolojisi kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Macun teknolojisinin bir diğer önemli avantajı ise tesiste kullanılan suyun verimli olarak geri kazanımıdır. Dolayısıyla sürdürülebilir madencilik faaliyetleri açısından macun teknolojisinin geleneksel atık bertaraf yöntemlerine göre tercih edilmesi gerektiği düşünülmektedir.

Ülkemizde son yıllarda hızla gelişmekte olan madencilik endüstrisinde yaygın olarak uygulanan geleneksel atık barajı sisteminde atıkların, içi su dolu bir gölete boşaltılması malzemenin gevşek yapıda olmasına yol açmaktadır. Atığı oluşturan taneler suyun içinde çökelmekte, ağırlıkları suyu kaldırma kuvveti nedeniyle nerdeyse yarı yarıya azalmakta ve göl taban çamuru şeklinde gevşek yapı oluşturmaktadır. Dolayısıyla atık barajlarının çevre açısından riskli olmasının nedeni, barajın kendisi olmayıp, barajın oldukça gevşek, sağlam olmayan kütleli tutması ve önemli miktarda proses suyu içermesidir. Baraj kazalarında, barajdaki malzeme yıkılan baraj duvarından akarken tamamen sıvılaşmakta ve atıklar meyilin olduğu yöne doğru kilometrelerce akmaktadır.

Çevresel açıdan yüksek risk barındıran geleneksel atık barajlarının yerine, aynı depolama sahasında daha fazla katı içeriğinin, çevresel etkileri minimize edilmiş olarak macun formunda depolanması, alternatif bir atık bertaraf yöntemi olarak Ülkemiz Madencilik sektöründe değerlendirilmelidir.

Teşekkür

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje No: BAP-19062/27102011, IRP-21527/27022012, T-27845/14112012, BAP-40376/22092014). Yazarlar, İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Sekreterliğine teşekkürlerini sunar.

Kaynaklar

Bascetin A., Tuylu S., Adiguzel D., Akkaya U., Binen I.S., 2013. Investigation of Suitability Of Pb-Zn Mine Tailings For Surface Paste Disposal. In: 23rd World Mining Congress, Montreal, Canada, Paper301.

Bascetin A., Tuylu S., Adiguzel D., Akkaya, U.G., 2014. The Study Of Surface Paste Disposal Technology For Pb-Zn Mine Tailings. In. SME Annual Meeting, Salt Lake City, UT-USA, Preprint 14–020.

Benzaazoua, M., Perez, P., Belem, T., Fall, M., 2004. A laboratory study of the behaviour of surface paste disposal. In: Proceedings of the 8th International Symposium on Mining with Backfill, Beijing, China, pp. 180–192.

Brackebusch, F.W., 1994. Basics of Paste Backfill Systems. Mining Engineering, 46(10), 1175–1178.

Davies, M. P., Rice S., 2001. An alternative to conventional tailing management – dry stack filtered tailings. In: AMEC Earth & Environmental, Vancouver, Canada, 10.

Jewell, R.J., Fourie, A.B., Lord, E.R., 2002. Paste and Thickened Tailings-a Guide. The Australian Centre for Geomechanics. The University of Western Australia, Nedlands, Western Australia, 35–47.

Kesimal A., Yılmaz E., Erçikdi B., Alp İ., Yumlu M., Özdemir B., 2002. Çimentolu Macun Dolgunun Laboratuvar Testi. MADENCİLİK. 41(4), 11–20.

Meggyes, T. and Debreczeni, A., 2006. Paste technology for tailings management. Land Contamination& Reclamation, 14 (4).

MMSD (Mining, Minerals and Sustainable Development), 2002. Mining for the Future Appendix A: Large Volume Waste Working Paper. 31, 18–19.

Newman, P., Cadden, A., White, R., 2001. Paste - The Future of Tailings Disposal?" Securing the Future. In: International Conference on Mining and the Environment. Skelleftea, Sweden, 594 – 603.

Ouellet, J., Benzaazoua, M., Servant, S., 1998. Mechanical, Mineralogical and Chemical Characterization of a Paste Backfill. In: Tailings and Mine Waste'98, Colorado, USA, 139–146.

Robinsky, E.I., 1999. Thickened Tailings Disposal in the Mining Industry. E.I. Robinsky Associates Ltd., Toronto, Canada. 210 p.

Theriault, J., Frostiak, J., Welch, D., 2003. Surface disposal of paste tailings at the Bulyanhulu gold mine. In: Proceedings of the 2nd Mining Environment Conference, Sudbury, Ontario, 1–8

Tüylü, S., (devam eden araştırma), “Maden Tesis Atıklarının Yerüstünde Depolanmasında En Uygun Tasarım Koşullarının Belirlenmesi”, Doktora Tezi, I. Danışman Prof. Dr. Ataç Başçetin ve II. Danışman Prof. Dr. Mostafa Benzaazoua, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Verburg, R. B., 2001. Use of Paste Technology For Tailings Disposal: Potential Environmental Benefits And Requirements For Geochemical Characterization. In: IMWA Symposium.

Yilmaz E., Benzaazoua, M., Bussiere 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, 12–25.

Zou, D.H.S., 1997. An innovative technology for tailings treatment. Tailings and Mine Waste Balkema, Rotterdam, 633–642.