

Statik Testlerin Çimentolu Macun Dolguda Asit Maden Drenajı (AMD) Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanımı

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 12.11.2023

Kabul/Accepted: 09.06.2024

Yayımlandı/Published: 20.08.2024

Use of Static Tests for the Determination of Acid Mine Drainage (AMD) Properties of Cemented Paste Backfill

Ercüment KOÇ¹, Ferdi CİHANGİR^{2*}, Bayram ERÇİDKİ²

¹ Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye

² Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Öz

Çimentolu macun dolgu (ÇMD), ince boyutlu maden tesis atığı, çimento ve suyun başarılı bir mühendislik karışımıdır. Özellikle bakır, kurşun, çinko gibi metalik cevherlerin işlenmesi durumunda oluşan atıklar sülfürlü mineraller içerebilmektedir. Sülfür içeriği yüksek atıklar oksijen ve nemin olduğu ortamlarda oksidasyona uğrayarak asit maden drenajı (AMD) oluşumuna sebep olabilmektedir. Genel olarak AMD, su ortamının pH değerini düşürmekte ve ağır metal salınımına neden olmaktadır. Bu nedenle, AMD potansiyeli çevresel açıdan dikkate alınması gereken önemli bir parametredir. Sülfürlü mineral içeren malzemelerin AMD potansiyelini belirlemek için ilk etapta kullanılan testlerden birisi statik testlerdir. Statik testler sonucunda atıkların nötralizasyon kapasitesinin asit oluşturma potansiyelinden yüksek olması durumunda, bu tür atıklar AMD açısından zararsız olarak sınıflandırılmaktadır. Bu çalışmada, sülfürlü atık ve aynı atıktan hazırlanmış ÇMD numunelerinde AMD potansiyeli statik modifiye asit-baz hesabı (ABH) testi ile incelenmiştir. Bulgular, ÇMD numunelerinin atık numunesine kıyasla %15 daha yüksek net nötralizasyon potansiyeline (NNP) sahip olduğunu göstermiştir. Çalışmada ayrıca sülfürlü mineral içeren atık ve/veya ÇMD'de AMD'nin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan statik testlerin önemi hakkında bilgi verilmiştir. Bu çalışma kür almış ÇMD numunesi üzerinde yapılan deneysel bir statik test çalışması olması bakımından önem arz etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Asit maden drenajı, Sülfürlü atık, Çimentolu macun dolgu, Statik test.

Abstract

Cemented paste backfill (CPB) is a successfully prepared engineering material from fine mine processing tailings, cement and water. Tailings may contain sulfidic minerals when metallic ores such as Zn, Cu, Pb etc. are subjected to mineral processing. Tailings with high sulfur content can go through oxidation in the presence of oxygen and moisture and, cause the formation of acid mine drainage (AMD). In general, AMD lowers the pH of environmental waters and, causes heavy metal releases. Therefore, AMD potential is an important parameter to consider from an environmental perspective. One of the tests initially used to determine AMD potential is static testing. As a result of static tests, if the neutralization capacity of waste is higher than its acid-generating potential, this type of tailings is classified as non-hazardous in terms of AMD. In this study, AMD potentials of sulfidic tailings and CPB samples prepared from such tailings were investigated by static modified acid base account (ABA) test. As a result of the study, CPB samples were found to have 15% higher net neutralization potential compared to the tailings sample. In addition, fundamental information about the importance of static tests, which are commonly used in determining the AMD originating from tailings and/or CPB was given. This study is a significant experimental static test study on cured solid CPB specimen.

Keywords: Acid mine drainage, Sulfidic tailings, Cemented paste backfill, Static test.

1. Giriş

Gelişen teknoloji ve küresel ekonomideki talep neticesinde enerji ve hammadde ihtiyacı giderek artmaktadır. Artan talebi karşılayabilmek için madencilik faaliyetlerinin sürdürülebilir bir şekilde yönetilebilmesi kritik önem taşımaktadır. Sürdürülebilir madencilik operasyonlarında atık yönetimi kilit bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Dolayısıyla, artan hammadde ihtiyacı, iyi yönetilmesi gereken büyük bir atık sorununu da beraberinde getirmektedir. Özellikle metalik hammaddelere olan talebin karşılanabilmesi için üretilen

bakır, kurşun, çinko gibi cevherler sülfürlü bileşikler içeren atıklar meydana getirmektedir (Ergüler, 2012). Atık bünyesindeki sülfürlü mineraller ortamda bulunan oksijen ve su ile tepkimeye girerek oksidasyona uğramaktadır. Böylece, ortamın asidik özellik kazanmasına ve bunun bir sonucu olarak ortamda hareketsiz ve hapsolmuş halde bulunan kirlenici/zararlı metallerin çözülerek çevreye, doğal yaşam alanlarına yayılmasına ve olumsuz etkilerin oluşumuna neden olabilmektedir. Bu olay kısaca Asit Maden Drenajı (AMD) şeklinde özetlenebilir (Akcil vd. 2006, Lei vd. 2010, İnt.Kay.-1, Tomiyama vd. 2019, Xu vd.

2020). Bu gibi çevresel olumsuzlukların önlenmesi amacıyla çeşitli atık yönetimi ve AMD rehabilitasyon yöntemleri kullanılmaktadır (Grey 1997, Kuyucak 2002, Çetiner vd. 2006, Moodley vd. 2018, Park vd. 2019, Skousen vd. 2019, Rodríguez-Galán vd. 2019). Günümüzde yaygın olarak kullanılan atık yönetimi yöntemleri arasında, çimentolu macun dolgu teknolojisi, madencilik faaliyetleri bakımından teknik ve ekonomik avantajlarının yanında özellikle çevresel açıdan sağladığı faydalar bakımından ön plana çıkmaktadır (Yılmaz ve Erçikdi 2021, Yılmaz vd. 2021). Metalik madenlerin cevher zenginleştirme tesislerinde işlenmesi sonucu oluşan sülfürlü atıklar genellikle -150 mikron malzemedan oluşmaktadır (Karadeniz 2008). Atık boyutu incelidkçe serbest yüzey ve serbestleşen mineral oranı arttığından sülfürlü mineralin oksijen ve su ile olan tepkime şiddeti (oksidasyon potansiyeli) yükselmektedir. Özellikle pirit minerali (FeS₂) 25 mikron altı boyutlarda olduğunda çok daha hızlı tepkime göstermektedir. Dolayısıyla ince boyutlu atıklar AMD potansiyeli bakımından nispeten daha yüksek risk teşkil etmektedir (Strömberg ve Banwart 1999, Ergüler ve Ergüler 2015). Bu noktada ÇMD teknolojisinin yardımıyla ince boyutlu atıklar çeşitli bağlayıcılar ve su ile karıştırılarak sertleştirilmekte ve yeraltı maden üretim boşluklarında depolanabilmektedir. ÇMD uygulaması ile dolgu bünyesinde hapsedilen sülfürlü mineralin oksijen ve suyla etkileşimi minimuma indirilmektedir. Dolayısıyla AMD potansiyeli büyük ölçüde engellenebilmektedir (Koç vd. 2023).

Sülfürlü atıkların AMD potansiyelinin belirlenebilmesi için statik ve kinetik testler kullanılmaktadır. Bu testler neticesinde atığın ne şekilde yönetileceği (bertaraf/depolanma) kararlaştırılmaktadır. Atığın çevresel açıdan tehlikeli atık sınıfında mı yoksa tehlikesiz atık sınıfında mı yer aldığı hızı ve doğru bir şekilde tespit edilmesi gerekmektedir. Çünkü, atık bertarafı/yönetimi, oluşabilecek çevresel/ekolojik riskler ve yüksek rehabilitasyon maliyetleri sebebiyle madencilik operasyonları bakımından kritik bir öneme sahiptir. Atığın çevresel değerlendirmesinde ilk adım, yapısında bulunan bileşiklerin kimyasal ve mineralojik analizlerle tespit edilmesidir. Burada öncelikle atığın bünyesinde bulunan kükürt (sülfür) içeriği belirlenir. 15.07.2015 tarihli 29417 sayılı Maden Atıkları Yönetmeliği uyarınca (Maden atıkları yönetmeliği EK-4/B-2.Madde ve Maden Atıkları Yönetmeliği'nin uygulanmasına ilişkin açıklamalar, Ç bendi) bünyesinde %0.1'den az kükürt içeren atıklar asit üretmeyen atıklar olarak sınıflandırılmaktadır. %1 ve daha fazla miktarda kükürt içeren atıklar ise tehlikeli atık olarak sınıflandırılmaktadır. %0.1-%1 arasında kükürt içeren atıkların sınıflandırılmasına yönelik statik ve kinetik testler

yapılmaktadır (T.C. Resmî Gazete, 2015; Aka 2018; İnt.Kay-2).

Statik testlerle atığın asit üretme ve asit nötralizasyon potansiyeli hızlı, pratik ve ekonomik bir şekilde belirlenebilmektedir. Bu gibi avantajlarından dolayı kükürt içeren atıkların sınıflandırılmasında yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Günümüzde kullanılan çeşitli statik test yöntemleri bulunmaktadır. Asit baz hesabı (ABH), net asit üretim deneyi, alkali üretim potansiyeli/kükürt oranı deneyi, British Columbia Research testi bu yöntemlerin başlıcalarıdır. Kullanılan yöntemler yıllar içerisinde araştırmacılar tarafından geliştirilmiş ve/veya kullanım alanlarına göre değiştirilmiştir. Statik testler ile malzeme içindeki sülfürlü minerallerin asit üretme potansiyelleri ve yine aynı malzeme bünyesindeki nötralizan minerallerin asit nötrleştirme kapasiteleri arasındaki denge araştırılır. Bu sayede malzemenin asit üretilip üretmeyeceği tahlil edilir. Elde edilen sonuçlar, sülfürlü mineral içeren malzemelere yönelik ileri analizlerin gerekliliğini gösterir. ÇMD bünyesinde de sülfürlü minerallerin yüzeyleri hidrasyon ürünleri ile kaplandığından AMD riskini azaltma potansiyeli veya ÇMD bünyesindeki atığın asit üretilip üretmemesi çevresel açıdan sınıflandırılması bakımından tek başına yeterli değildir. ÇMD malzemelerinin metal ve sülfat salınımlarının da ayrıca kinetik testler ile analiz edilmesi gerekmektedir. Bu sayede atığa uygun çevresel atık yönetimi seçenekleri belirlenmektedir (Koç vd. 2023, Aka 2018).

Açık literatüre bakıldığında statik test çalışmaları genellikle macun dolguda kullanılan sülfürlü atık malzeme ve/veya diğer macun dolgu bileşenleri (kireçtaşı, uçucu kül, mermer vb.) üzerinde gerçekleştirilmiştir (Bouzahzah vd. 2014, Plante vd. 2012, Barnes vd. 2015; Bascetin ve Tuylu, 2018; Bascetin vd. 2018; Bascetin vd. 2022; Yılmaz vd. 2020; Yılmaz ve Erçikdi, 2022; Yılmaz ve Erçikdi, 2022b). Ancak, doğrudan katı çimentolu macun dolgu numuneleri üzerinde yapılan statik test çalışması sayısı oldukça azdır (Chapman 2003; DeVos ve Verburg 2006; Cihangir vd. 2023).

Bu çalışmada sülfürlü mineral bakımından zengin flotasyon tesis atıkları ve bu atıklardan %7 bağlayıcı (Portland Çimento, PÇ-42,5R) ile hazırlanan kür almış ÇMD numuneleri üzerinde statik değiştirilmiş (modifiye) ABH testi yapılmıştır. Böylece, malzemelerin AMD potansiyelleri araştırılmıştır.

2. Statik Testlerin Genel Prensipleri

Statik testler esas olarak, sülfür içeren malzemenin kimyasal içeriğine dayalı bazı hesaplamalara ve bir dizi asit baz tepkimesine maruz bırakılarak gösterdiği davranışın tahliline dayanmaktadır. Kimyasal tepkimelerin daha hızlı

ve etkili sonuç verebilmesi bakımından genellikle statik testlerde kullanılacak sülfürlü/kükürtlü malzeme ince boyuta indirgenir. Ancak bu durum malzemenin özgün yapısını değiştirebileceğinden malzemenin saha koşullarındaki davranışını yeterli ölçüde yansıtmayabilir. Özetle, statik testler malzemenin kimyasal içeriği ile ilgilenirken malzemenin fiziksel yapısını ve ortam koşullarını göz ardı etmektedir (Dold 2017). Bu sebeple çevresel açıdan değerlendirme yapılırken her malzeme ve ortama özgün tahlillerin yapılması gerekmektedir. İlaveten, sülfürlü bileşiklerin gösterdiği çeşitlilik (mineraloji) sebebiyle her kimyasal prosedür her türlü bileşik için aynı oranda doğru netice verememektedir. Bu nedenle malzemenin yapısına uygun test yöntemi belirlenmeli ve kullanılmalıdır (Barnes vd. 2012, Chapman vd. 2003). Ayrıca, bazı statik test prosedürleri (fışkırdama testi, karbonat oranı gibi) gözleme/tecrübeye ve birtakım kabullere (malzemedeki tüm karbonatlı yapıların nötralizasyon sağlayacağı kabul edilmekle birlikte, gerçekte siderit ya da manganez gibi karbonatlı yapılar bunu sağlamamaktır) dayalı yorum gerektirmektedir. Bu gibi eksikliklerinden dolayı, analiz edilecek malzemeye uygun en doğru sonuçları elde edebilmek adına araştırmacılar farklı protokoller geliştirerek statik testler üzerinde çeşitli değişiklikler yapmaktadır.

Örneğin asit baz hesabı (ABH) (Sobek vd. 1978) jeolojik malzemelerin asit üretme potansiyelinin belirlenmesinde kullanılan en yaygın tekniklerden biridir. Ancak bu teknik,

araştırmacılar tarafından tahlil edilen malzemeye göre zaman içerisinde değiştirilmiştir. Değiştirilmiş (modifiye) asit baz hesabı, özellikle demire bağlı kükürt (Fe_2S vb.) içeren atıklar için günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Değiştirilmiş ABH testi (Lawrence 1990) işlem basamakları şu şekildedir:

1-) Asit üretme potansiyelinin (AP) tespiti: Öncelikle atığın demire bağlı kükürt içeriği (%S₂-) tespit edilir. Elde edilen değer 31.25 katsayısı ile çarpılarak atığın asit üretme potansiyeli (AP) hesaplanır. Bu kısım için dikkat edilmesi gereken önemli noktalar bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, atığın bünyesindeki kükürdün esas kaynağının belirlenmesidir (demire bağlı kükürt, organik kükürt, sülfat kükürdü). Standart ABH (Sobek vd. 1978), alkali üretim potansiyeli/kükürt oranı tayini ve British Columbia Research testlerinde olduğu haliyle, bu dağılım belirlenmeden toplam kükürt içeriğine dayalı yapılan hesaplamalar, olması gerekenden daha yüksek miktarda asit üretme potansiyeli sonucu verebilmektedir. Diğer bir önemli husus ise; oksijence fakir ortamlar için piriti oksitleyen Fe^{3+} iyonları aynı piritten meydana gelmiş ise AP hesaplanırken 31.25 katsayısı yerine 15.625 katsayısının kullanımı daha doğru sonuçlar verebilmektedir (Karadeniz 2008). Bu durum oksitleyici kaynağa göre farklılık gösterebilmekle birlikte, kimi durumlarda katsayı olarak 62.5 (Dold 2017) veya 125 (Morin 2001) de seçilebilmektedir.

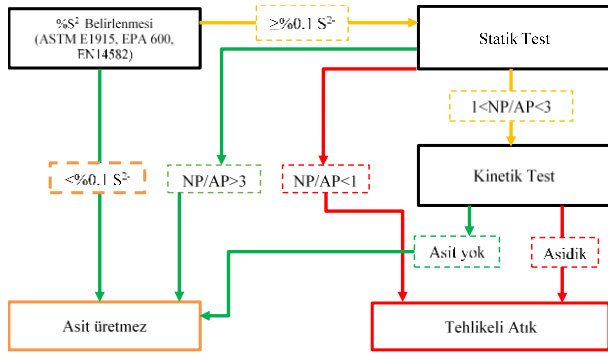
Çizelge 1. Fışkırdama testi ile asit hacmi ve normalitesinin belirlenmesi (Sobek vd. 1978, Koç vd. 2023).

| Fışkırdama oranı | Gözlem | Asit Hacmi (ml) | Asit Derişimi (Normalite) |
|------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------|
| Yok | Tepkime yok | 20 | 0.1 |
| Düşük | Hafif ve yavaş tepkime (küçük baloncuklanma) | 40 | 0.1 |
| Orta | Belirgin tepkime (orta baloncuklanma) | 40 | 0.5 |
| Yüksek | Kuvvetli ve hızlı tepkime (büyük baloncuklanma ve sıçramalar) | 80 | 0.5 |

2-) Nötralizasyon potansiyelinin (NP) tespiti: Fışkırdama testinde, 0.5 veya 1.0 g toz haline getirilmiş numune (-0.25mm) üzerine %25 HCl çözeltisi damlatılır ve karbonat oranı (fışkırdama derecesi) gözlemlenir. Buna göre bir sonraki adımda eklenecek HCl miktarı (ml) ve normalitesi (N) belirlenir (Çizelge 1, Şekil 2). Daha sonra, 2.0 g numune, oda sıcaklığında 24 saat boyunca HCl ile çalkalanır. Bu işlem sonucunda çözeltinin pH değerinin 1.5-2.0 aralığında olması beklenir. Aksi durumda çözelti normalitesi ve/veya miktarı tekrar gözden geçirilmeli ve işlem tekrarlanmalıdır. Bu reaksiyon sırasında tüketilen asit miktarını belirlemek için çözelti NaOH ile pH 8.3'e titre edilir. Böylelikle atık tarafından nötralizasyon potansiyeli bulunur. Burada, kullanılan titrasyon pH değeri ve

numune çözündürme şekli yöntemler arasında farklılık gösterebilmektedir. Standart ABH testinde titrasyon pH değeri 7 olarak belirlenmiştir ve bu testte atık-asit çözeltisi oda sıcaklığında 24 saat çalkalanmak yerine çözeltideki tepkime (baloncuk çıkarma) duruncaya kadar ısıtılmaktadır. Fışkırdama testinin kantitatif bir şekilde yapılabilmesi adına araştırmacılar tarafından çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Morin 2001, Bouzahzah vd. 2015). Ayrıca bazı test yöntemlerinde (British Columbia Research, Alkali üretim potansiyeli/Kükürt oranı) fışkırdama testi yerine karbonat oranı hesabı (BS EN 15875, 2011) veya mineralojik hesaplama yöntemleri kullanılabilir (Karadeniz 2008, Koç vd. 2023, Morin 2001, Lawrence vd. 1989).

3-) AMD potansiyelinin tespiti: Hesaplamalar sonucunda genellikle NP-AP (NNP: net nötralizasyon potansiyeli) değeri $-20 \text{ kgCaCO}_3/\text{ton}$ 'dan düşük ise veya NP/AP (NNO: net nötralizasyon oranı) değeri 1'den küçük ise asit üretir, 1 ile 3 arasında ise belirsiz, 3'ten büyük ise asit üretmez şeklinde sınıflandırılır (Şekil 1). Bunun yanında araştırmacılar tarafından kullanılan farklı sınıflandırma kriterleri de mevcuttur (Morin 2001). Kükürt içeren atığın statik test sonucunda AMD potansiyeli taşımadığının tespiti halinde dinamik süzüntü testleri (BS EN 15863, 2015) ile metal salınım davranışı incelenir. Metal salınım değerleri kabul edilen sınır değerlerin altında olan kükürtlü atıklar çevresel açıdan tehlikesiz atık olarak sınıflandırılır (Karadeniz 2008; Lawrence vd. 1989, U.S. EPA 2009).



Şekil 1. Kükürtlü atıkların AMD potansiyeli bakımından sınıflandırılması (Aka 2018, Koç vd. 2023)

3. Deneysel Çalışmalar

Bu çalışmada sülfürlü atık ve aynı atıktan üretilen ÇMD malzemesi kullanılmıştır. Yer altında uygulanacak olan ÇMD tasarımlarının 28 gün kür sonunda en az 1 MPa dayanımı sağlaması hedeflenmektedir (Hassani ve Archibald 1998; Li vd. 2002; Fall vd. 2005; Ercikdi vd. 2013; Shespari 2015). Yazarların önceki çalışmalarından elde ettikleri deneysel tecrübelerle ilgili olarak ön deneysel çalışmalardan da elde edilen 1MPa dayanımı sağlayacak bir karışım olması adına ÇMD tasarımında bu çalışma için %7 oranında bağlayıcı kullanılmıştır. Tasarımın su/çimento oranı ~ 4.3 olacak şekilde 7.5 inç slump akışkanlıkta hazırlanmıştır. ÇMD numuneleri üzerinde yapılan tek eksenli sıkışma dayanımı testleri genellikle boy/çap oranı 2 olan silindirik numuneler üzerinde gerçekleştirilmektedir (Ercikdi vd. 2014). Hazırlanan macun dolgu karışımı boy/çap oranı ~ 2 olan plastik silindirik kaplara dökülerek kür odasında 85 ± 1 nem ve $24 \pm 20^\circ\text{C}$ sıcaklıkta 28 gün kürlenmiştir. Çalışmada 3 adedi dayanım, 1 adedi statik test (Değiştirilmiş ABH), 2 adedi de kimyasal, mineralojik ve fiziksel analizlerde kullanılmak üzere toplamda 6 adet silindirik ÇMD

numunesi hazırlanmıştır. Kür sonunda kalıplardan çıkartılan ÇMD numuneleri üzerinde 50 kN yük altında ve ASTM C 39 standardında tarif edildiği şekilde tek eksenli sıkışma dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir. Numuneler ortalama 1 MPa tek eksenli basınç dayanımı değeri üretmiştir. Dayanım testi sonrasında özdeş ÇMD numuneleri rendelenerek 55 santigrat derece sıcaklıkta 24saat boyunca kurutulmuş akabinde öğütülerek statik testler ve analizler için taneli yapıya (-0.25mm) indirgenmiştir. Deneysel çalışmalar KTÜ Maden Mühendisliği Bölümü Macun Dolgu Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Mineralojik analizler hizmet alımı yoluyla Türkiye Çimento Mühendisleri Birliği'nde (TÇMB) yaptırılmıştır.

3.1. Malzeme karakterizasyonu

Çalışmada atık malzeme olarak, bir bakır üretim tesisine ait flotasyon atıkları kullanılmıştır. Atık malzemenin d80 tane boyutu ~ 70.8 mikron olarak Malvern Mastersizer cihazı ile belirlenmiştir. Piritik kükürt oranları LECO cihazı ile belirlenmiştir. Atık ve ÇMD malzemelerinin piritik kükürt değerleri sırasıyla %28.77 ve %24.61'dir. ÇMD numunelerinin hazırlanmasında CEM-I 42.5R çimento tipi bağlayıcı ve musluk suyu kullanılmıştır. Atık ve ÇMD malzemelerine ait başlıca/baskın mineraller sırasıyla Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Mineralojik analiz sonuçları

| Atık | ÇMD |
|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Pirit (FeS_2) | Pirit (FeS_2) |
| Kuvars (SiO_2) | Kuvars (SiO_2) |
| Kaolinit [$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$] | Kaolinit [$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$] |
| Barit [BaSO_4] | Barit [BaSO_4] |
| Dolomit [$\text{MgCa}(\text{CO}_3)$] | Markasit (FeS_2) |
| Markasit (FeS_2) | Dolomit [$\text{MgCa}(\text{CO}_3)$] |
| Kalkopirit [CuFeS_2] | Kalsit [$\text{Ca}(\text{CO}_3)$] |
| Kalsit [$\text{Ca}(\text{CO}_3)$] | Alit [$\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$] |
| | Larnit(Belit) [$\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$] |

3.2. Statik test (değiştirilmiş ABH)

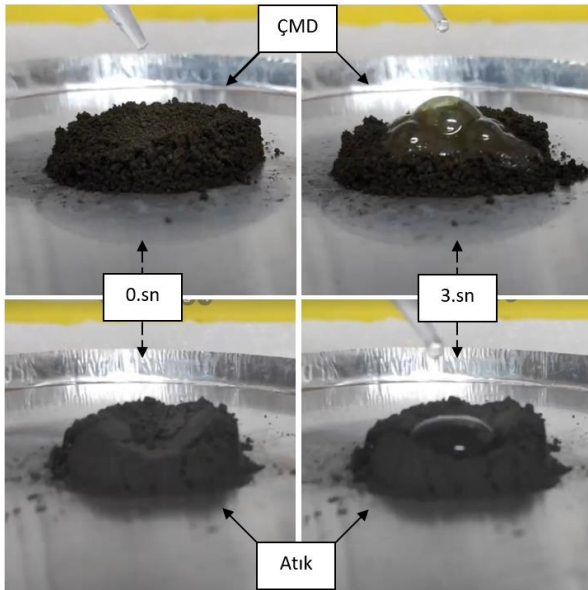
Bu çalışmada, statik test yöntemi olarak değiştirilmiş (modifiye) ABH testi kullanılmıştır. Testler, %28.77 sülfür içeriğine sahip atık ve atık+%7 çimento oranında ÇMD numunesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yöntemin detayları önceki bölümde "statik testlerin genel prensipleri" başlığı altında verilmiş olup; i) asit üretme potansiyelinin (AP) hesaplanması, ii) nötralizasyon potansiyelinin (NP) hesaplanması, iii) AMD potansiyelinin hesaplanması aşamalarından oluşmaktadır.

4. Bulgular ve Tartışma

4.1. Değiştirilmiş (modifiye) ABH test sonuçlarının değerlendirilmesi

Değiştirilmiş (modifiye) ABH testi ile AMD potansiyelinin belirlenmesi için yapılan çalışmalardan elde edilen bulgular aşağıdaki işlem basamaklarında detaylı olarak ele alınmıştır:

1-) Asit üretme potansiyelinin (AP) hesaplanması: Malzemelerin her birinin piritik kükürt içerikleri 31.25 katsayısıyla çarpılarak malzemelerin AP değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler atık ve ÇMD için sırasıyla 899.06 ve 769.06 kgCaCO₃/ton'dur. Ancak, malzemeler yer altında (oksijence fakir ortamda) depolanacak ise bir yaklaşım olarak bu çalışmada olduğu gibi katsayı 15.625 alınabilir. Bu durumda APof değerleri atık ve ÇMD için sırasıyla 449.53 ve 384.53 kgCaCO₃/ton olmaktadır. Her iki durumda da (yerüstü veya yeraltı depolama) atık numune ÇMD numunesine göre ~%17 daha yüksek asit üretme potansiyeline sahiptir.



Şekil 2. ÇMD ve atık numunelerinin fişirdama tepkileri (ÇMD: düşük tepkime, Atık: tepkime yok)

2-) Nötralizasyon potansiyelinin (NP) hesaplanması: Atık ve ÇMD malzemeleri üzerinde yapılan fişirdama testi sonucunda atık numunesinde fişirdama tepkisi gözlenmezken, ÇMD numunesinde düşük fişirdama tepkimesi gözlenmiştir (Şekil 2). Tepkime şiddetine göre malzemeler için gereken asit çözeltileri Çizelge 1'e göre belirlenmiş ve malzemeler uygun asit çözeltileri ile muamele edilmiştir. Malzeme-asit süspansiyonu pH 8.3'e titre edilerek NP değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler Atık ve ÇMD için sırasıyla 21.31 ve 22.99 kgCaCO₃/ton olarak belirlenmiştir. ÇMD numunesinin atığa göre daha yüksek nötralizasyon potansiyeline sahip olduğu görülmektedir.

3-) AMD potansiyelinin hesaplanması: Malzemelerin asit üretme ve nötralizasyon potansiyelleri arasındaki ilişkiye bakarak net nötralizasyon potansiyeli (NNP) ve net nötralizasyon oranı (NNO) belirlenmiştir (Çizelge 3).

Statik test sonuçları incelendiğinde, atık ve ÇMD numunelerinin nispi yüksek kükürt (yüksek AP) ve düşük nötralizasyon (düşük NP) içerikleri nedeniyle asit maden drenajı (AMD) oluşturma potansiyeline sahip oldukları görülmüştür (Çizelge 3).

Statik testler esasen taneli ya da asıtlı (katı-sıvı süspansiyon) yapıdaki maden atıklarının (-6mm) çevresel açıdan sınıflandırılması için geliştirilen testlerdir. Dolayısıyla, statik testlerin ÇMD numuneleri üzerine kullanımının ne ölçüde doğru sonuçlar verebileceği tartışmaya açık bir konudur. Bu sebeple araştırmacılar genellikle ÇMD yerine, ÇMD numunesini oluşturan atık malzeme üzerinde statik testler gerçekleştirmekte ve yorumlamaktadır. Ancak ÇMD malzemesi gerek fiziksel gerekse kimyasal özellik bakımından kendisini oluşturan atık malzemesinden oldukça farklı karakteristik özellikler göstermektedir. Dolayısıyla, çevresel açıdan değerlendirilmesine yönelik kendine özgü tahlillere ve yöntemlere gereksinim duymaktadır. Bu noktada araştırmacılar alternatif testlere yönelebilmektedir (kinetik testler, dinamik süzütü testleri vb.). Yine de statik testler, sağladıkları kolaylıklar bakımından (kısa sürede tamamlanmaları, pratik olmaları, düşük maliyetli olmaları gibi) ÇMD malzemelerinin AMD potansiyellerinin belirlenmesi noktasında göz ardı edilmemelidir. Uygun statik test yöntemleri kullanıldığında, ÇMD hakkında gerçekçi sonuçlar elde edilebilmektedir. Chapman vd. (2003), %40 piritik kükürt içeriğine sahip pirit konsantresi ile bu malzemedan %5 bağlayıcı (Portland çimento) oranında hazırladıkları ÇMD numuneleri üzerinde değiştirilmiş (modifiye) asit baz hesabı testi gerçekleştirmiştir. Sonuçta, ÇMD numunelerinin pirit konsantresine kıyasla ~%14.7 daha yüksek net nötralizasyon potansiyeli (NNP) değeri verdiğini tespit etmişlerdir. Araştırmacılar ayrıca statik test ile buldukları NP sonucunun, yapmış oldukları kinetik test sonuçlarından elde ettikleri NP sonuçları ile uyumlu olduğunu belirtmişlerdir (Chapman vd. 2003). Cihangir vd. (2023), %28.8 piritik kükürt içeriğine sahip cevher zenginleştirme tesis atıkları ile bu malzemedan %7 sülfata dayanıklı bağlayıcı (CEM-I 42.5R-SR5) oranında hazırladıkları ÇMD numuneleri üzerinde değiştirilmiş (modifiye) asit baz hesabı testi gerçekleştirmiştir. Araştırmacılar, ÇMD numunelerinin tesis atığına kıyasla ~%8.5 daha yüksek net nötralizasyon potansiyeli (NNP) değeri verdiğini tespit etmişlerdir (Cihangir vd. 2023).

Çizelge 3. Statik test sonuçları

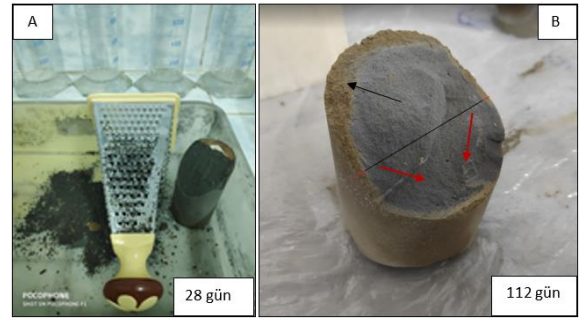
| | AP* | AP _{of} * | NP* | NNP* | NNP _{of} * | NNO | NNO _{of} | Sonuç |
|-------------------------|--------|--------------------|-------------|------------|---------------------|--------------|-------------------|--------------|
| Atık | 899.06 | 449.53 | 21.31 | -877.75 | -428.22 | ~0.02 | ~0.04 | AMD + |
| ÇMD | 769.06 | 384.53 | 22.99 | -746.07 | -361.54 | ~0.03 | ~0.06 | AMD + |
| Limit Değerler** | | | Asit üretir | Belirsiz | | Asit Üretmez | | |
| NNP* | | | <-20 | -20<NNP<20 | | >+20 | | |
| NNO | | | <1 | 1<NNO<3 | | >3 | | |

*: kgCaCO₃/ton (NP değerleri gözlemciye/laboranta bağlı olarak değişkenlik gösterebilir). **: Limit değerler (Koç vd. 2023, Benzazoua vd. 2004)'den alınmıştır.

Bu çalışmada ise önceki çalışmalar ile uyumlu olarak, statik test sonuçlarına göre %28.77 piritik kükürt içeriğine sahip atık kullanılarak %7 bağlayıcı (Portland çimento) oranında hazırlanan kür almış ÇMD malzemesinin sülfürlü atık malzemesine kıyasla yaklaşık %15 daha yüksek net nötralizasyon potansiyeline (%15 NNP, %15.5 NNP_{of}) sahip olduğu görülmüştür. Bu durumun temel sebepleri; i) atığın yanında bağlayıcı ve su kullanımı ile atıkta bulunan kükürt miktarının seyreltilmesi, ii) bağlayıcı tipine bağlı olarak gelişen hidrasyon tepkimeleri sonucu oluşan ürünlerin (C-S-H jelleri, Ca(OH)₂ vb.) ve özellikle çimento tipi bağlayıcılarda bulunan Ca içerikli yapıların nötralizasyona katkı sağlaması şeklinde yorumlanabilir. Bu iki parametre, malzemelerin kimyasal açıdan gösterdikleri farklılık ile ilişkilidir. Bunun yanında malzemelerin fiziksel (yapısal) özelliklerinden kaynaklanan ve nötralizasyon sürecine etki eden birtakım parametreler de mevcuttur (boşluk oranı, geçirimsizlik, tepkime hızı, oksidasyon direnci vb.). Ancak statik testler yapılırken ÇMD numunesinin yapısal bütünlüğü bozulduğundan (rendeleme, öğütme), bu fiziksel parametreler statik testlerle tayin edilememektedir (Şekil 3a). Bu sebeple olması gerektiğinden daha düşük nötralizasyon değerleri elde edilebilmektedir.

ÇMD malzemeleri üzerinde yapılan statik testlerde dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta da kullanılan deneysel yöntem veya metodolojinin numunenin doğal koşullardaki muhtemel davranışını iyi bir şekilde yansıtmamasının kontrolünün/testinin sağlanmasıdır. Kullanılan statik test yönteminde, özdeş numunelerin doğal koşullar altındaki davranışları incelenerek teyit edilmeli, gerek duyulması durumunda test yöntemi veya metodolojisi değiştirilmelidir. Hidrasyon tepkimelerinin devam etmesi sonucunda, ÇMD numunelerinde zamanla birtakım fiziksel ve kimyasal değişiklikler meydana gelmektedir. Bu sebeple, ÇMD numuneleri üzerinde yapılan analizler numune kür süresine bağlı olarak farklı sonuçlar verebilmektedir. Statik testler de bu değişkenlikten etkilenebilmektedir. Dolayısıyla ÇMD numuneleri üzerinde yapılan statik testlerin hangi kür süresine ait numuneler üzerinde yapıldığı belirtilmeli ve gerekmesi halinde farklı kür süresine sahip özdeş numuneler ile tekrarlanmalıdır. Bu süreçte analiz için

(statik test, kimyasal analiz, fiziksel analiz vb.) ÇMD numunesinden alınan temsili örneklerin mümkün oldukça bütünü yansıtmaması gerekmektedir. Özellikle ilerleyen kür sürelerinde dıştan içe oksidasyonun da etkisiyle (Şekil 3b) ÇMD numuneleri homojen yapısından uzaklaşmakta ve bu da analiz için temsili örnek alma işlemini daha önemli hale getirmektedir. ÇMD numuneleri üzerinde yapılan statik testlerin güvenilirliğini arttırmak adına örneğin temsili olması sağlanmalıdır. Aynı zamanda, özdeş numuneler üzerinde yapılan kinetik testler ile sonuçların uyumu incelenmeli ve nihai sonuçlar değerlendirilmelidir.



Şekil 3. a) ÇMD numunesinden analiz numunesi hazırlama, b) ÇMD numunesi görünüşü

4.2. Çevresel açıdan değerlendirme

Madencilik faaliyetleri sonucu oluşan sülfürlü atıkların AMD potansiyelinin belirlenmesi ve uygun atık yönetimi teknikleri ile bertaraf edilmesi, çevre dostu ve sürdürülebilir madencilik açısından kritik öneme sahiptir. AMD potansiyeli taşıyan ince boyutlu kükürlü atıkların ÇMD teknolojisiyle AMD potansiyeli düşürülebilir ve uygun statik testler ile bu değişim ölçülerek atıkların çevresel açıdan daha güvenli bir şekilde depolanması sağlanabilir. Sağladığı kolaylıklar bakımından statik testlerin ÇMD üzerinde doğru ve etkin kullanımına yönelik detaylı çalışmalar, özellikle kükürlü çevresel açıdan riskli ince boyutlu atıkların başarılı bir şekilde yönetilmesine ve çevresel problemlerinin çözümüne olumlu katkılar sağlayacaktır.

5. Sonuçlar ve Öneriler

ÇMD numuneleri üzerinde yapılan statik test çalışmaları, malzemenin yapısal bütünlüğü, değişken içeriği ve farklı fiziko-mekanik davranışları gibi nedenlerden ötürü atık

numunelerde uygulanan prosedürlere nazaran farklılık gösterebilmektedir. Bu çalışmada kür almış ÇMD malzemesinin sülfürlü atığa kıyasla yaklaşık %15 daha yüksek net nötralizasyon potansiyeli (NNP) değeri verdiği görülmüştür. Bu durumun temel sebepleri; i) atık bünyesindeki kükürt miktarının bağlayıcı ile seyreltilmesi, ii) bağlayıcıya bağlı oluşan hidratasyon ürünlerinin (C-S-H jelleri, Ca(OH)₂ vb.) ve özellikle çimento bünyesinde bulunan Ca içerikli yapıların nötralizasyona katkı sağlaması şeklinde yorumlanabilir.

ÇMD numunelerinde kür süresince kimyasal reaksiyonlar süreklilik arz ettiğinden, malzemenin mineralojik içeriği ve dizayn parametreleri dikkate alınarak ve statik test yöntemleri denenerek en uygun statik test yöntemi tayin edilmelidir. Kantitatif analizler içeren statik test prosedürlerinde gözlem becerisi ve tecrübesi test sonuçlarını doğrudan etkileyebilmektedir. Bu gibi olumsuzluklardan kaçınmak adına alternatif yöntemler (kimyasal ve mineralojik analizler ile karbon oranı, karbonat oranı hesabı vb.) tercih edilebilir. Ancak esas netice her iki yöntemin de kıyaslanması ile belirlenmelidir.

Uygun statik test yönteminin belirlenmesi, ÇMD tasarımlarının çevresel etkilerinin tahminine yönelik büyük önem arz etmektedir. Ayrıca atık ve ÇMD numunelerinin uzun dönemde jeokimyasal davranışlarının belirlenmesini gerektiren durumlarda (metal , pH, sülfat salınımları gibi) ilave kinetik testlerin (kinetik nem hücresi, kinetik kolon, çalkantılı şişe testi gibi) yapılması önerilmektedir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar-1: Kaynaklar, Araştırma, Deney, Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak

Yazar-2: Biçimsel analiz, Doğrulama, Metodoloji, Yazma – inceleme ve düzenleme,

Yazar-3: Proje Yönetimi, Finansman Sağlama, Denetleme, Yazma – inceleme ve düzenleme,

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Yazarlar, bu çalışmanın bulgularını destekleyen ana verilerin makale içerisinde mevcut olduğunu beyan ederler.

Teşekkür

Bu araştırma TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir (Proje No: 118M505)

5. Kaynaklar

- ASTM C 39. 2002. Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. Annual Book of ASTM Standards, American Society of Testing Material.
- Aka M., 2008. Maden Atıklarının Yönetimi & Maden Atıkları Yönetmeliği. Çevre Mühendisleri Odası. Ankara, 37.
- Akçil A., And Koldas S., 2006. Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. *Journal of Cleaner Production*, **14**,1139–1145.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.09.006>
- Barnes A., Howell R., Warrender R., Sapsford D., Sexsmith K., Charles J., Declercq J., Santonastaso M. and Dey B. 2015. Comparison between Long-Term Humidity Cell Testing and Static Net Acid Generation (NAG) Tests : Potential for NAG Use in Preliminary Mine Site Water Quality Predictions. 10th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD). Santiago, 1–10.
- Bascetin, A., Tuylu, S. 2018. Application of Pb-Zn tailings for surface paste disposal: geotechnical and geochemical observations. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, **32(5)**, 312–326.
<https://doi.org/10.1080/17480930.2017.1282411>
- Bascetin, A., Tuylu, S., Ozdemir, O., Adiguzel, D., & Benzaazoua, M. 2018. An investigation of crack formation in surface paste disposal method for pyritic Pb–Zn tailings. *International Journal of Environmental Science and Technology*, **15(2)**, 281-288
<https://doi.org/10.1007/s13762-017-1380-5>
- Bascetin, A., Adiguzel, D., Eker, H., & Tuylu, S. 2022. The investigation of geochemical and geomechanical properties in surface paste disposal by pilot-scale tests. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, **36(8)**, 537–551.
<https://doi.org/10.1080/17480930.2022.2076501>
- Benzaazoua, M., Bussière B., Dagenais A.M. Archambault M. 2004. Kinetic tests comparison and interpretation for prediction of the Joutel tailings acid generation potential. *Environmental Geology*, 1086–1101.
- Bouzahzah, H., Benzaazoua M., Bussiere B. Plante B. 2014. Prediction of Acid Mine Drainage: Importance of Mineralogy and the Test Protocols for Static and Kinetic Tests. *Mine Water and the Environment*, **33**, 54–65.
<https://doi.org/10.1007/s10230-013-0249-1>
- Bouzahzah, H., Benzaazoua M., Plante B. and Bussiere B. 2015. A quantitative approach for the estimation of the “fizz rating” parameter in the acid-base accounting tests: A new adaptations of the Sobek test. *Journal of Geochemical Exploration*, **153**, 53-65.
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.03.003>

- BS EN 15863. 2015. Characterization of waste. Leaching behaviour test for basic characterization. Dynamic monolithic leaching test with periodic leachant renewal, under fixed conditions. European Standard. ISBN: 978 0 580 83658 9. 66pp.
- BS EN 15875. 2011.Characterisation of waste. Static test for determination of acid potential and neutralisation potential of sulfidic waste. European Standard. ISBN: 978 0 580 80587 5. 30pp.
- Chapman J., Hockley D., Sexsmith K., Arthur B. and Donohue S. 2003. Testing Acid Generation in Cemented Paste Backfill. 6th International Conference on Acid Rock Drainage. 863–867.
- Cihangir F., Koc E., Orak M., Devci T.Y., and Ercikdi B., 2023. Importance of Static Tests for the Prediction of AMD Potential of Cemented Paste Backfill, 23rd International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2023. Sofia, **23(1)**, 349-356. <https://doi.org/10.5593/sgem2023/1.1/s03.42>
- Çetiner, E.G., Ünver B. Hindistan M.A. 2006. Regulations related with mining wastes: European community and Turkey. *Scientific Mining Journal*, **45**, 23–34.
- DeVos, K., & Verburg, R. (2006). Cemented paste backfill leachate characteristics - Snap Lake Diamond Mine. *Journal American Society of Mining and Reclamation*, **2006(2)**, 476–493. <https://doi.org/10.21000/JASMR06020476>
- Dold, B. 2017. Acid rock drainage prediction: A critical review. *Journal of Geochemical Exploration*, **172**, 120–132. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.09.014>
- Ercikdi, B., Baki, H., and İzki, M. 2013. Effect of desliming of sulphide-rich mill tailings on the long-term strength of cemented paste backfill. *Journal of environmental management*, **115**, 5-13. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.11.014>
- Ercikdi, B., Yılmaz, T., Külekci, G. 2014. Strength and ultrasonic properties of cemented paste backfill. *Ultrasonics*, **54(1)**, 195–204. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2013.04.013>
- Ergüler, G.K., 2012. Sülfürlü bir maden sahasında asit maden drenaj oluşum potansiyelinin belirlenmesi ve modellenmesi. Doktora Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 267.
- Ergüler, Z.A., Ergüler G. K., 2015. The effect of particle size on acid mine drainage generation: Kinetic column tests. *Minerals Engineering*, **76**, 154–167. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.10.002>
- Fall, M., Benzaazoua M., Ouellet S. 2005. Experimental characterization of the effect of tailings fineness and density on the quality of cemented paste backfill. *Minerals Engineering*, **18(1)**:41–44 <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.05.012>
- Gray N.F. 1997. Environmental impact and remediation of acid mine drainage: A management problem. *Environmental Geology*, **30**, 62–71.
- Hassani, F., Archibald J. 1998. Mine backfill. In: Canadian Institute of Mine, Metallurgy and Petroleum, *Published on CD-ROM Proceedings*, Canada, 263p.
- Karadeniz, M. 2008. Sülfürlü Madenlerin Sorunu Asit Maden Drenajı ve Çözümü. Fersa Matbaacılık. Ankara: TMMOB Maden Mühendisleri Odası, 231.
- Koc, E., Cihangir F. and Ercikdi B. 2023. Chapter 3 - Geochemical evaluation of sulfidic tailings and cemented paste backfill with respect to environmental impacts. *Managing Mining and Minerals Processing Wastes*. Qi C. and Benson C.H. (editors), Elsevier, 47–70. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91283-9.00003-1>
- Kuyucak, N. 2002. Acid mine drainage prevention and control options. *CIM Bulletin*, **95**,96–102.
- Lawrence, R.W. 1990. Prediction of the behaviour of mining and processing wastes in the environment,. F. Doyle (ed.), *Proceedings Western Regional Symposium on Mining and Mineral Processing Wastes*, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Littleton, CO, 115-121.
- Lawrence, R.W., Poling G.W., Ritcey G.M., Merchant P.B. 1989. Assessment of Predictive Methods for the Determination of AMD Potential in Mine Tailings and Waste Rock. *Tailings and Effluent Management*, 317–331.
- Lei, L.Q., Song C.A., Xie X.L., Li, Y.H, and Wang, F. 2010. Acid mine drainage and heavy metal contamination in groundwater of metal sulfide mine at arid territory (BS mine, Western Australia). *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, **20**, 1488–1493. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(09\)60326-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(09)60326-5)
- Li, T., Singh U., Coxon J., Grice T.G., Sainsbury D. 2002. Development and application of paste fill using dry tailings. First International Seminar on Deep and High Stress Mining, Perth, 10 pp
- Moodley, I., Sheridan C.M., Kappelmeyer U. and Akcil A. 2018. Environmentally sustainable acid mine drainage remediation: Research developments with a focus on waste/by-products. *Minerals Engineering*, **126**, 207–220. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.08.008>
- Morin, K. and Hutt N.M. 2001. Environmental geochemistry of minesite drainage: practical theory and case studies. *Environmental Geochemistry of Minesite Drainage*. Vancouver, 19. ISBN 0-9682039-1-4
- Park, I., Tabelin C.B., Jeon S., Li X., Seno K., Ito M. and Hiroyoshi N. 2019. A review of recent strategies for

- acid mine drainage prevention and mine tailings recycling, *Chemosphere*, **219**, 588–606.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.053>
- Plante, B., Bussière B. and Benzaazoua M. 2012. Static tests response on 5 Canadian hard rock mine tailings with low net acid-generating potentials. *Journal of Geochemical Exploration*, **114**, 57–69.
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.12.003>
- Rodríguez-Galán, M., Baena-Moreno F.M., Vázquez S., Vázquez S., Arroyo-Torralvo F., Vilches L.F. and Zhang Z. 2019. Remediation of acid mine drainage. *Environmental Chemistry Letters*, **17**, 1529–1538.
<https://doi.org/10.1007/s10311-019-00894-w>
- Sheshpari, M. 2015. A Review on Influential Parameters on the Strength of Cemented Paste Backfill (CPB)-Part II. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, **20(22)**, 12467- 12491
- Skousen, J.G., Ziemkiewicz P.F. and McDonald L.M. 2019. Acid mine drainage formation, control and treatment: Approaches and strategies. *Extractive Industries and Society*, **6**, 241–249.
<https://doi.org/10.1016/j.exis.2018.09.008>
- Sobek, A.A., Schuller W.A., Freeman J.R. and Smith R.M. 1978. Field and Laboratory Methods Applicable to Overburdens and Minesoils. U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati, 218.
- Strömberg, B. and Banwart S.A. 1999. Experimental study of acidity-consuming processes in mining waste rock: Some influences of mineralogy and particle size. *Applied Geochemistry*, **14**, 1–16.
- T.C. Resmî Gazete. 2015. Maden Atıkları Yönetmeliği. 15 Temmuz 2015 Tarihli ve 29417 Sayılı Resmî Gazete. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2015/07/20150715-3.html>
- Tomiyama, S., Igarashi T., Tabelin C.B., Tangviroon P. and li, H. 2019. Acid mine drainage sources and hydrogeochemistry at the Yatani mine, Yamagata, Japan: A geochemical and isotopic study. *Journal of Contaminant Hydrology*, 225.
<https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2019.103502>
- U.S. EPA. 2009. National Primary Drinking Water Guidelines. Epa 816-F-09-004. U.S. Environmental Protection Agency. 1, 7.
- Xu, R., Li B., Xiao E., Young L.Y., Sun X., Kong T., Dong Y., Wang Q., Yang Z., Chen L. And Sun W. 2020. Uncovering microbial responses to sharp geochemical gradients in a terrace contaminated by acid mine drainage. *Environmental Pollution*, **261**. 114226
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114226>
- Yılmaz, T. and Ercikdi B. 2021. Effect of construction and demolition waste on the long-term geo-environmental behaviour of cemented paste backfill. *International Journal of Environmental Science and Technology*, **19**, 3701-3714.
<https://doi.org/10.1007/s13762-021-03359-2>
- Yılmaz, T., and Ercikdi, B. 2022. Effect of construction and demolition waste on the long-term geo-environmental behaviour of cemented paste backfill. *International Journal of Environmental Science and Technology*, **19(5)**, 3701–3714.
<https://doi.org/10.1007/s13762-021-03359-2>
- Yılmaz, T., Ercikdi, B. 2022b. Kalsitik ve dolomitik kireçtaşlarının çimentolu macun dolgunun çevresel davranışına etkisi. *Bilimsel Madencilik Dergisi*. **61(1)**, 31-40.
<https://doi.org/10.30797/madencilik.967090>
- Yılmaz, T., Ercikdi, B., and Cihangir, F. 2020. Evaluation of the neutralization performances of the industrial waste products (IWPs) in sulphide-rich environment of cemented paste backfill. *Journal of Environmental Management*, **258**, 110037.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.110037>
- Yılmaz, T., Ercikdi B. and Deveci H. 2021. Evaluation of geochemical behaviour of flooded cemented paste backfill of sulphide-rich tailings by dynamic-tank leaching test. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, **35**, 336–355.
<https://doi.org/10.1080/17480930.2020.1829778>

İnternet Kaynakları

1. INAP: The International Network for Acid Prevention. <http://www.gardguide.com>, (11.11.2023)
2. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. Maden atıkları yönetmeliğinin uygulanmasına ilişkin açıklamalar. 01 Haziran 2018. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/duyurular/ma-y-ac-klama201805-20180601164229.pdf>, (11.03.2024)