

**T.C.**

**İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GÖRGÜ (MALATYA) ÇİNKO-KURŞUN CEVHER ATIKLARININ ASİT  
MADEN DRENAJİ OLUŞTURMA POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Basri BAŞARAN**

**Maden Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hikmet SİS**

**TEMMUZ-2022**

**T.C**

**İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

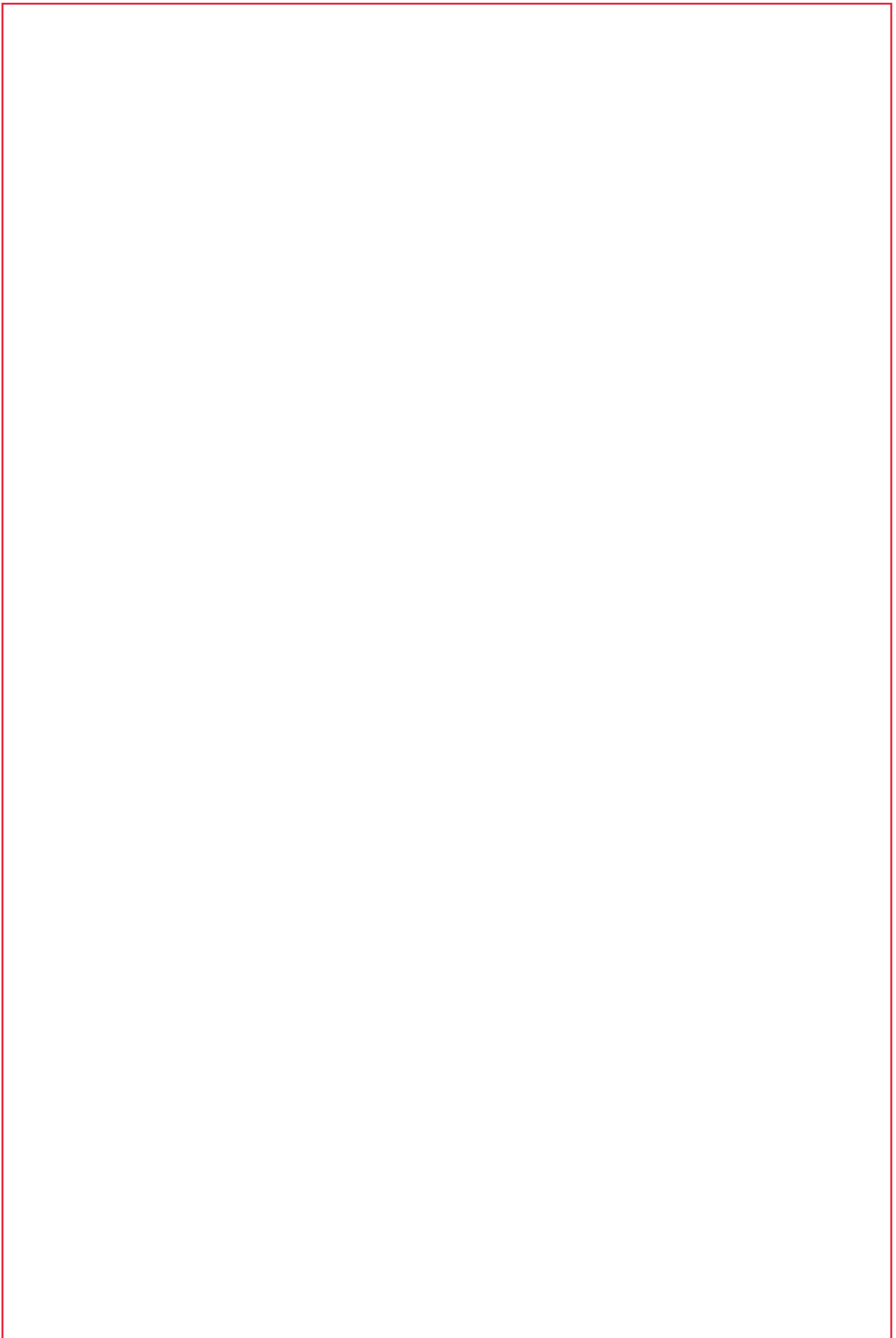
**GÖRGÜ (MALATYA) ÇİNKO-KURŞUN CEVHER ATIKLARININ ASİT  
MADEN DRENAJİ OLUŞTURMA POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Basri BAŞARAN (36183616030)**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hikmet SİS**

**TEMMUZ-2022**





## TEŞEKKÜR ve ÖNSÖZ

Tez çalışmasının ilerlemesinde büyük pay sahibi olan, bilgi ve deneyimlerini daima benimle paylaşan ve mesleki gelişimime katkı sağlayan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Hikmet Sis'e,

“Görgü (Malatya) Çinko-Kurşun Cevher Atıklarının Asit Maden Drenajı Oluşturma Potansiyelinin Belirlenmesi” başlıklı projeyi (Proje No: FYL-2020-661) destekleyerek maddi katkıda bulunan İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine,

Flotasyon atığı örneği sağlayarak tez çalışmalarına katkı da bulunan CVK Holding'e bağlı Çevkur Madencilik Tic. Ltd. Şti' ye,

İNönü Üniversitesi, Kimya bölümünde AAS analizlerini gerçekleştiren Prof. Dr. Sema Erdemoğlu ve ekibine,

Hayatımın her alanında bana önce “iyi karakter iyi insan” düşüncesini aşılayan, beni alın teri ile bugünlere getiren annem Fadime Başaran'a,

Aile bağının gücünü her zaman hissettiren Sevgili Kardeşlerime ve Babama,

Uzun yıllardan beri yanımda olan ve gelişimimi destekleyen güzide dostlarım Ömer Atlı, Necati Karaçay ve Abidin Ağnar' a

Bana mesleki anlamda tavsiyeler veren ve gelişimimi destekleyen meslektaşım Bedri Uzunpınar' a

teşekkür ederim.

## ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “**Görgü (Malatya) Çinko-Kurşun Cevher Atıklarının Asit Maden Drenajı Oluşturma Potansiyelinin Belirlenmesi**” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Basri BAŞARAN



## İÇİNDEKİLER

|  |           |
|--|-----------|
| TEŞEKKÜR ve ÖNSÖZ .....                                | i         |
| ONUR SÖZÜ.....   | ii        |
| İÇİNDEKİLER .....                                      | iii       |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                | v         |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                  | vi        |
| SEMBOLLER VE KISALTMALAR .....                         | vii       |
| ÖZET .....   | viii      |
| ABSTRACT .....   | x         |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                                  | <b>1</b>  |
| 1.1 Tezin amacı .....                                  | 3         |
| 1.2 Tezin Kapsamı.....                                 | 3         |
| <b>2. KURAMSAL TEMELLER VE LİTERATÜR TARAMASI.....</b> | <b>4</b>  |
| 2.1 Asit Maden Drenaj Kavramı .....                    | 4         |
| 2.2 AMD Önemi.....                                     | 5         |
| 2.3 AMD Oluşum Mekanizması .....                       | 6         |
| 2.4 AMD'yi Etkileyen Faktörler .....                   | 8         |
| 2.5 AMD Kestirimi.....                                 | 11        |
| 2.5.1 Statik AMD Testleri .....                        | 12        |
| 2.6 AMD Kontrolü .....                                 | 14        |
| 2.7. Önceki Çalışmalar .....                           | 16        |
| <b>3. MALZEME VE YÖNTEM .....</b>                      | <b>18</b> |
| 3.1 Malzemeler.....                                    | 18        |
| 3.1.1 Atık Numuneleri ve Pirit.....                    | 18        |
| 3.1.2 Kimyasallar .....                                | 18        |
| 3.2 Yöntem .....                                       | 18        |
| 3.2.1 Numune Hazırlama.....                            | 18        |
| 3.2.2 Numunenin Karakterizasyonu ve Analizler .....    | 20        |
| 3.2.3 Sülfür (Kükürt) Analizleri.....                  | 20        |
| 3.3 Statik Laboratuvar Testleri.....                   | 21        |
| 3.3.1 Çamur pH'ı.....                                  | 21        |
| 3.3.2. Standart ABH .....                              | 22        |
| 3.3.3. Değiştirilmiş (modifiye) ABH.....               | 24        |
| 3.3.4 BC Araştırma Başlangıç Testi .....               | 26        |
| 3.3.5. NAG Testi .....                                 | 29        |
| 3.4 Sabit Kaplarda Yapılan Statik Testler.....         | 30        |
| <b>4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>           | <b>34</b> |
| 4.1 Malzemelerin Karakterizasyonu.....                 | 34        |
| 4.2 Statik Testler.....                                | 38        |
| 4.2.1 Çamur pH'ı Testi.....                            | 38        |

|  |           |
|--|-----------|
| 4.2.2 Standart ve Değiştirilmiş ABH Sonuçları .....                    | 39        |
| 4.2.3 BC Araştırma Başlangıç Testi Sonuçları.....                      | 40        |
| 4.2.4 NAG Testi Sonuçları .....  | 41        |
| 4.3 Kaplarda Yapılan Statik Test Sonuçları .....                       | 42        |
| 4.3.1 pH ve Elektriksel İletkenlik Sonuçları .....                     | 42        |
| 4.3.2 Pülp Sıvısında Metal İyonları Derişiminin Zamanla Değişimi ..... | 47        |
| 4.3.3 Katıların Karakterizasyonu.....                                  | 51        |
| <b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>                                       | <b>54</b> |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>  | <b>56</b> |
| <b>ZGEMİş.....</b>   | <b>61</b> |





## ÇİZELGELER DİZİNİ

|   |    |
|---|----|
| <b>Çizelge 2.1:</b> AMD oluşturma potansiyeline sahip sülfür mineralleri .....                            | 9  |
| <b>Çizelge 2.2:</b> Bazı Minerallerin Azami Nötürleştirme Potansiyeli .....                               | 10 |
| <b>Çizelge 2.3:</b> Statik Test Yöntemleri, Maliyetleri, Avantajları ve Dezavantajları.....               | 12 |
| <b>Çizelge 3.1:</b> Fışırdama testi sonrası Standart ABH testi için kullanılacak HCl çözeltisi .....      | 23 |
| <b>Çizelge 3.2:</b> Fışırdama testi sonrası Değiştirilmiş ABH testi için kullanılacak HCl çözeltisi ..... | 25 |
| <b>Çizelge 3.3:</b> Plastik kaplarda hazırlanan statik test örnekleri(İri Pirit).....                     | 30 |
| <b>Çizelge 3.4:</b> Plastik kaplarda hazırlanan statik test örnekleri(İnce Pirit).....                    | 31 |
| <b>Çizelge 4.1:</b> Numunenin ve piritin elementel analizleri .....                                       | 37 |
| <b>Çizelge 4.2:</b> Numunenin XRF analizi.....  | 38 |
| <b>Çizelge 4.3:</b> Numunenin ICP-OES analizi .....   | 38 |
| <b>Çizelge 4.4:</b> Numunenin elementel analizi .....   | 51 |
| <b>Çizelge 4.5:</b> Ortalama kükürt analiz değerleri .....  | 51 |
| <b>Çizelge 4.6:</b> Test sonrası katı numunenin XRF analizi. ....   | 52 |
| <b>Çizelge 4.7:</b> Test sonrası katı numunenin ICP-OES analizi. ....                                     | 52 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|  |    |
|--|----|
| Şekil 1.1: Bakır pasasından çözünen demir sülfürlerin sonucunda oluşan Fe(OH) <sub>3</sub> çökelleri ..... | 2  |
| Şekil 1.2: Çanakkale Çan ilçesindeki linyit sahasında oluşan asit maden drenajı .....                      | 2  |
| Şekil 2.1: Sülfürlü maden yığımında AMD oluşum mekanizması .....   | 4  |
| Şekil 2.2: Pirit oksidasyonunun basitleştirilmiş gösterimi .....   | 8  |
| Şekil 3.1: Konileme-dörtleme .....   | 19 |
| Şekil 3.2: Numunenin oluklu bölücüyle azaltılması .....  | 19 |
| Şekil 3.3: Titreşimli besleyicili rotary (döner) örnek bölücü .....  | 20 |
| Şekil 3.4: BC Araştırma Başlangıç testi düzeneği .....   | 28 |
| Şekil 3.5: Testlere hazırlanmış örnekler .....   | 32 |
| Şekil 3.6: Karışımların pH ve elektriksel iletkenlik ölçümleri .....                                       | 32 |
| Şekil 3.7: Kaplardan sıvı örneklerin alınması ve süzülerek AAS analizlerine hazırlanması .....             | 33 |
| Şekil 4.1: Numune ve piritlerin tane boyu dağılımları .....  | 34 |
| Şekil 4.2: Numunenin XRD analizi .....   | 35 |
| Şekil 4.3: Piritin XRD analizi .....   | 36 |
| Şekil 4.4: Pülp pH'sının zamanla değişimi(İri Pirit).....  | 44 |
| Şekil 4.5: Pülpün elektriksel iletkenliğinin zamanla değişimi(İri Pirit).....                              | 45 |
| Şekil 4.6: Pülp pH'sının zamanla değişimi(İnce Pirit).....   | 46 |
| Şekil 4.7: Pülpün elektriksel iletkenliğinin zamanla değişimi(İnce Pirit).....                             | 47 |
| Şekil 4.8: Kurşun derişiminin zamana bağlı değişimi .....  | 48 |
| Şekil 4.9: Çinko derişiminin zamana bağlı değişimi .....   | 48 |
| Şekil 4.10: Demir derişiminin zamana bağlı değişimi .....  | 49 |
| Şekil 4.11: Mangan derişiminin zamana bağlı değişimi .....   | 49 |
| Şekil 4.12: Magnezyum derişiminin zamana bağlı değişimi .....  | 50 |
| Şekil 4.13: Test sonrası ham numunenin XRD analizi .....   | 53 |

## SEMBOLLER VE KISALTMALAR

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| <b>AMD</b>                         | :Asit maden drenajı  |
| <b>NNP</b>                         | :Net ntrleşme potansiyeli                                  |
| <b>APP</b>                         | :Asit retme potansiyeli                                     |
| <b>NNR</b>                         | :Net ntrleştirme oranı                                     |
| <b>EPA</b>                         | :Environmental protection agency                             |
| <b>NAG</b>                         | :Net Asit retimi  |
| <b>ABH</b>                         | :Asit Baz Hesabı   |
| <b>BC</b>                          | :British Columbia  |
| <b>XRD</b>                         | :X-ışını difraktometrisi                                     |
| <b>ICP-ES</b>                      | :İndüksiyonla birleşmiş plazma atomik emisyon spektroskopisi |
| <b>AAS</b>                         | :Atomik Absorbsiyon Spektroskopisi                           |
| <b>XRF</b>                         | :X- ışını floresansı   |
| <b>TDS</b>                         | :Toplam znen katı  |
| <b><math>\mu\text{m}</math></b>    | :Mikrometre  |
| <b><math>\mu\text{S/cm}</math></b> | :Mikrosiemens/santimetre                                     |

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### GÖRGÜ (MALATYA) ÇİNKO-KURŞUN CEVHER ATIKLARININ ASİT MADEN DRENAJİ OLUŞTURMA POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ

Basri BAŞARAN

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

61+xi sayfa

2022

Danışman: Prof. Dr. Hikmet Sis

Görgü (Malatya) çinko-kurşun yatağı ülkemizin işletilen önemli metalik maden yataklarından biridir. Cevher gravimetrik ve flotasyon yöntemiyle zenginleştirilmekte ve atıklar atık yığınlarında veya atık havuzlarında depolanmaktadır. Taze atık yığınlarından alınan numunelerin kimyasal ve mineralojik analizleri yapılarak statik AMD testleri ile AMD oluşturma potansiyeli belirlenmiştir. AMD açısından en önemli mineral olan pirit belli oranlarda atık içerisine ilave edilerek, piritin, AMD oluşturma potansiyeline etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, cevher atıklarının uzun süre su ve hava ile temas etmesi sonucunda zamanla suyun özelliklerinde değişikliklere neden oldukları bilindiğinden su analizleri de yapılmıştır. Atık havuzlarına benzetilerek plastik kaplar içerisinde hazırlanan numunelerin pH'ı, elektriksel iletkenlikleri ve metal iyon derişimleri zamana bağlı olarak ölçülmüştür. Kalan atıklarının kimyasal ve mineralojik analizleri yapılarak testler sonucunda numunelerdeki jeokimyasal değişimler belirlenmiştir.

Kimyasal ve mineralojik analizler ham atığın karbonatça zengin, piritik (veya sülfidik) kükürt içeriğinin ise düşük olduğunu göstermiştir. Atığın çamur testinde pH 8,01 olarak ölçülmüş ve AMD oluşturmak için oldukça yüksek çıkmıştır. Standart ABH ve değiştirilmiş ABH testleri yapılmış ve Net Nötürleştirme Potansiyeli (NNP) değerleri

sırasıyla 641,25 ve 242,031 kg CaCO<sub>3</sub>/ton hesaplanmıştır. NNP >> 10 olduğundan atığın AMD oluşturma potansiyeli olmadığı sonucuna varılmıştır. B.C. Araştırma Başlangıç test sonuçları atığın asit tüketiminin (372,89 kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/ton cevher), asit üretiminden (4,56 kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/ton cevher) çok daha fazla olduğunu göstermiştir. NAG testi sonucunda pH 8,77 ölçülmüş ve pH > 4 veya pH > 7 olduğundan atığın net asit üretmediği sonucuna varılmıştır. Atık ve su karışımının olduğu sabit kaplarda yapılan statik testlerde ortamın pH'ı ve elektriksel iletkenliği düzenli aralıklarla ölçülerek zamanla değişimleri izlenmiştir. Ortam pH'ının bazik olduğu, pH'ının düzenli bir şekilde değişmediği ancak 17. haftada pH'ın 8,0'a gerilediği görülmüştür. Ortamın elektriksel iletkenliğinin ise zamanla arttığı ve yaklaşık 1500 µS/cm'den yaklaşık 7500 µS/cm'ye yükseldiği görülmüştür. Sonuçlar ortamın asidik olmadığını, ancak ortama çözünme dolayısıyla bazı metal iyonların geçtiğini göstermektedir. Ortamdaki metal iyonları derişimleri incelendiğinde bazı minerallerin çözüldüğü ancak derişimde düzenli bir değişimin olmadığı anlaşılmıştır. Sonuçlar, reaksiyonlar sonucu ortamda çözünme ve çökmenin beraberce gerçekleştiğine işaret etmektedir. Ham atık numunesi ve sabit kaplarda yapılan testlerden kalan numunelerin XRD analizleri karşılaştırıldığında ana piklerde önemli değişimler olmadığı görülmüş ve çalışılan koşullarda minerallerin bozulmalarının ancak düşük seviyede kaldığı sonucuna varılmıştır.

Standart AMD testleri sonuçları, atığın AMD oluşturma potansiyelinin olmadığını ve pirit ilavesinin atığın AMD oluşturma potansiyeline önemli bir katkı yapmadığını göstermiştir. Sabit kaplarda yapılan testler ve statik AMD testleri sonuçları bir birleriyle uyumlu çıkmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Asit Maden Drenajı, Maden Atıkları, Pirit, Elektriksel İletkenlik, Metal İyon Derişimi

## ABSTRACT

Master Thesis

Determination of Acid Mine Drainage Potential of Görgü (Malatya) Zinc-Lead Ore Tailings

Basri BAŞARAN

Inonu University

Graduate School of Nature and Applied Sciences

Department of Mining Engineering

61+xi Page

2022

Supervisor: Prof. Dr. Hikmet SİS

Görgü (Malatya) zinc-lead deposit is one of the important metallic ore deposits exploited in Turkey. The ore is beneficiated by gravimetric and flotation methods and the tailings are stored in waste piles or waste ponds. The chemical and mineralogical analyzes of the samples obtained from the fresh waste piles were performed and AMD potential of the tailings was determined by static AMD tests. Pyrite, the most important mineral in AMD generation, was added to the tailings at certain ratios and its effect the AMD generation was investigated. Since the ore tailings cause changes in the properties of water with time as a result of contact with water and air, water analyzes were also carried out. The pH, electrical conductivity and metal ion concentrations of the medium prepared with tailings and water like tailing ponds, were measured in the course of time. The geochemical changes in the tailings were determined by carrying chemical and mineralogical analyzes on the remained tailings after the tests.

Chemical and mineralogical analyzes showed that the raw tailings contains high amount of carbonates, but very low amount of pyritic (or sulphitic) sulfur. The paste pH test of the tailings was measured as 8.01 and was found to be too high to generate AMD. Standard ABA and modified ABA tests were performed and Net Neutralization Potential (NNP)

values were calculated as 641.25 and 242.031 kg CaCO<sub>3</sub>/ton, respectively. Since NNP >> 10, it was concluded that the tailings do not have AMD generation potential. B.C. Research Initial test results showed that the acid consumption of the tailings (372.89 kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/ton ore) was much higher than the acid production (4.56 kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/ton ore). At the end of NAG test, pH was measured as 8.77 and it was concluded that the tailings could not produce net acid since pH was higher than 4 (or 7). In the static tests performed in plastic containers, the pH and electrical conductivity of the medium were measured at regular intervals, and their changes with time were detected. It was observed that the medium was basic and the pH did not change regularly, but it decreased to 8.0 in the 17th week. It was observed that the electrical conductivity of the medium increased with time and reached 7500 μS/cm from 1500 μS/cm. The results show that the medium was not acidic, but some metal ions reported into the medium due to dissolution. When the concentrations of metal ions in the medium were evaluated, it was found that dissolution of some minerals took place with time, but there was no regular change in the concentration. The results indicated that dissolution and precipitation reactions took place simultaneously in the medium.

When the XRD analyzes of the raw tailings and the remained tailings were compared, it was seen that there was no significant changes in the main peaks and it was concluded that the alteration of the minerals was low under these working conditions. It was found that the results obtained from static AMD tests and container tests were compatible.

**Keywords:** Acid mine drainage, Ore tailings, Pyrite, Electrical conductivity, Dissolved ions concentration





## 1. GİRİŞ

Endüstriyel faaliyetler sonucu hava, toprak ve su kirliliği oluşabilmektedir. Bunlardan su kirliliği, çok geniş alanlara yayılma potansiyeli nedeniyle kullanılabilir veya içilebilir su kaynaklarının sürdürülebilirliğini tehdit eden başlıca kirlilik türüdür. Madencilik faaliyetleriyle de yeraltı ve yüzey sularının çeşitli biçimlerde kirlenmesi söz konusudur. Asit maden drenajı (AMD) genelde sülfürlü cevherlerin işletildiği madenlerde sıklıkla karşılaşılan özellikle yeraltı ve yüzey sularında olumsuz sonuçlar ortaya çıkaran bir çevre ve su kirliliği sorunudur.

Günümüzde çevre koruma bilinci artmıştır ancak bu doğal kaynakların kullanımından vazgeçileceği anlamına gelmemektedir. Çevresel planlama çalışmalarıyla madencilik faaliyetlerinin oluşturabileceği olumsuz etkilerin önceden tespit edilmesi, bu etkilerin en aza indirilmesi veya giderilmesi mümkündür. AMD sadece su kirliliğine neden olan tek yönlü bir kirlenici olarak düşünülmemelidir. AMD, hem doğrudan, hem de dolaylı olarak çevre sorunlarına yol açabileceği gibi ekonomik sonuçları şaşırtıcı derecede büyük olabilir. Bu nedenle maden işletmelerinde başlangıç aşamasından, ocağın kapatılmasından sonraki döneme kadar yapılacak tüm işlemler önceden planlanmalıdır (Şanlıyüksel Yücel ve Baba, 2020). Şekil 1.1 ve Şekil 1.2’de asit maden drenajının neden olduğu kirlilikler görülmektedir.

Çevre konuları içinde su ve toprak kirliliği en az hava kirliliği kadar önemli olup, ağır metaller ve toksik (zehirli) elementlerce kirlenmesi büyük önem kazanmıştır. Önceleri gelişmiş ülkelerde ortaya atılan ve tartışılan “Asit Kaya Drenajı” (veya “Asit Maden Drenajı”) kavramı artık bütün ülkelere benimsenmiştir. Özellikle sülfürlü cevher içeren madenlerin işletilmeleri sırasında, işletmeden sonraki evrelerde, cevher hazırlama sırasında ve daha sonraki süreçlerde asit üretip üretmeyecekleri su ve toprağı kirletip kirletmeyecekleri sorgulanır olmuştur. Atık yığınlarından, atmosfere açık duran galerilerden ve kuyu ve ocak şevlerinden çıkacak atmosferik suların sızıntıyla yer altı suyunu veya yeryüzünde akan su kaynaklarını ve toprağı kirletmesi mümkün olabilmektedir. Sülfür içeren madenler yüzeyde açık bırakılırsa ve ıslah edilmezse AMD oluşturmaya devam ederek metal iyonlarını çevreye salarlar (Skousen ve diğ., 2019). Ayrıca, atık havuzlarının ve kaya/dolgu barajlarının çeşitli nedenlerle (heyelan, deprem ve aşırı yağış gibi doğal riskler) çökmesi durumunda büyük çaplı ağır metal kirlenmelerinin oluşması mümkündür. Bu sebeple daha işin başında atıkların cinsi, miktarı ve bunların uzun vadedeki davranışlarının önceden kestirilmesi ve risk öncesi ve riskin oluşmasını müteakip yapılması gereken tedbirlerin daha işletmeye başlamadan bilinmesi gerekmektedir (Anıl, 2014).

Cevher atıklarının uzun süre su ve hava ile temas etmesi sonucunda zamanla suyun özelliklerinde değişikliklere neden olduklarından değişimlerin yorumlanarak AMD açısından risk durumları belirlenmelidir. Belirlenen risk seviyesine göre atıkların kontrol stratejisi belirlenmeli, atık havuzları risk durumuna göre tasarlanmalı ve atık sularının tekrar kullanılıp kullanılmayacağına karar verilmelidir.



**Şekil 1.1:** Bakır pasasından çözünen demir sülfürlerin sonucunda oluşan  $Fe(OH)_3$  çökeltileri (yellow boy) (Karadeniz, 2010).



**Şekil 1.2:** Çanakkale Çan ilçesindeki linyit sahasında oluşan asit maden drenajı (Şanlıyüksel Yücel ve Baba, 2020).

1950'lere kadar pek çoğu küçük boyutta ve yeryüzüne yakın konumda olan açık işletmeler daha sonra devasa kazı makinalarının keşfi ve yüksek tenörlü madenlerin azalmasıyla daha düşük tenörlerde ancak daha derinlerde yataklanmış madenlerin işletilmeye açılması sonucunda çok büyük maden çukurlarının oluşmasına neden olmuştur. Bunun üzerine çevre bilincinin de yaygınlaşmasıyla madencilerin faaliyetleri mercek altına alınarak siyasi iradelerce pek çok

yaptırım uygulanmaya konulmuştur (Anıl, 2014). Bu yaptırımların en yenilerinden olan asit maden drenajının oluşup oluşmayacağı başta sülfürlü madenler olmak üzere birçok maden işletme ruhsatı için hazırlanacak ÇED raporlarında ayrı başlık altında istenmeye başlanmıştır. (Anıl, 2014).

## **1.1 Tezin amacı**

Maden sahalarında ve cevher hazırlama tesislerinde uygun ve etkin çevresel yönetim planlamalarının yapılabilmesi için, sahanın AMD oluşturma potansiyellerinin önceden tahmin edilmesi ve kirliliğin oluşmadan önlenmesi veya azaltılması AMD ile mücadelenin ilk basamağını oluşturmaktadır. Maden atıklarının özellikleri atık depolama yöntemine etki ettiğinden atıklar nerede (havuzlar, derin deniz vb) tutulursa tutulsun AMD oluşturma potansiyellerinin belirlenmesi gereklidir. Malatya ili, Akçadağ ilçesi, Görgü köyü sınırlarında bulunan çinko-kurşun cevheri ülkemizde işletilmekte olan önemli metalik cevherinden biridir. Açık ve kapalı işletme ile ocaktan çıkarılan cevher, çeşitli cevher hazırlama ve zenginleştirme işleminden geçirilmekte ve sonuçta çinko ve kurşun konsantreleri elde edilmektedir. Cevher konsantreleri satılmakta, ancak cevher atığı havuzlarda biriktirilmekte ve talep olması durumunda satılmaktadır. Çalışmanın amacı zenginleştirme sonrası kalan atıkların AMD oluşturma potansiyeline sahip olup olmadığını belirlenmesidir. Cevherin kimyasal ve mineralojik özelliklerinin yanı sıra AMD açısından çok önemli olan pirit mineralinin AMD'ye etkisini belirlemek hedeflenmiştir.

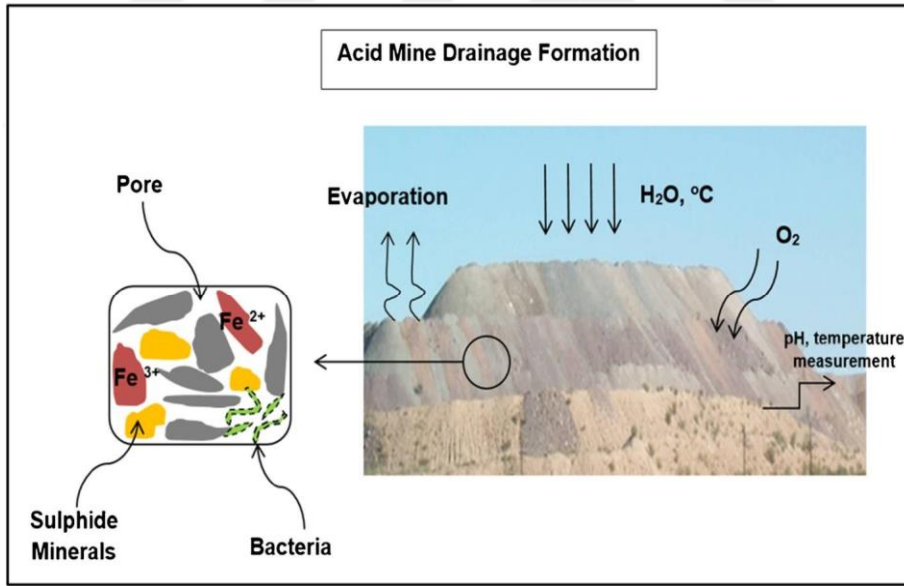
## **1.2 Tezin Kapsamı**

AMD kestirim testleri çok çeşitlidir. Bu çalışmada Görgü (Malatya) çinko-kurşun cevher atıklarının AMD oluşturma potansiyeli kimyasal ve mineralojik özellikleri belirlenerek AMD oluşturma potansiyeli incelenmiştir. Öncelikle numuneler üzerinde yaygın olarak uygulanan statik AMD testleri (çamur pH'ı, asit-baz hesaplamaları, değiştirmiş asit-baz hesaplamaları, BC başlangıç testi ve net asit üretimi) gerçekleştirilmiştir. Bazı testlerde cevher örnekleri içerisine belirli miktarlarda pirit minerali ilave edilerek piritin etkisi de araştırılmıştır. Ayrıca, saf su içerisine bırakılan örneklerin uzun sürelerde suyun kalitesine etkisi (pH, elektriksel iletkenlik, çözülmüş metal iyonları derişimi) incelenmiştir. Standart statik AMD test sonuçları ile kaplarda yapılan test sonuçları karşılaştırmalı olarak yorumlanarak atıkların AMD açısından risk durumları belirlenmiştir.

## 2. KURAMSAL TEMELLER VE LİTERATÜR TARAMASI

### 2.1 Asit Maden Drenaj Kavramı

Başta pirit olmak üzere sülfürlü metalik mineral içeren kömür, sülfür formundaki bazı metaller, uranyum ve değerli metal içeren madenlerde görülen asit maden drenajı sülfürlü minerallerin nemli ortamda bazen de mikrobiyolojik organizmaların katkısıyla oksitlenmesi sırasında drenaj sularının asidik özellik kazanmalarına ve geçtikleri formasyonlar içerisindeki bazı ağır ve toksik elementleri çözerek drenaj suyuna karıştırmalarına asit maden drenajı denilmektedir (Anıl, 2014; Karadeniz, 2010). Ayrıca, madencilik faaliyetleriyle ilgisi olmayan havaalanı ve baraj yapımı gibi derin kazı gerektiren çalışmaların sülfürlü minerallerin bulunduğu formasyonlarda yapılması neticesinde de asit maden (kaya) drenajı görülebilmektedir. Eğer, asit drenajı madencilik veya insan faaliyetleri olmadan metal sülfürlerin yoğun olduğu yüzeye yakın alanlarda kendiliğinden (doğal ortamında) oluşursa buna asit kaya drenajı denir (Karadeniz, 2008). Şekil 2.1, bir sülfürlü maden yığında AMD oluşum mekanizmasını ve bakteri etkisini göstermektedir.



Şekil 2.1: Sülfürlü maden yığında AMD oluşum mekanizması (Karagüzel ve diğ., 2020).

## 2.2 AMD Önemi

AMD değişik madenlerde ortaya çıkabilmesi (yaygınlığı), uzun mesafelere kolayca taşınabilmesi (hareketliliği) ve etkinliğini yıllar boyunca sürdürebilmesi (devamlılığı) dolayısıyla çevreyi en fazla tehdit eden madencilik faaliyetlerinden biri olmuştur.

Oluşan sular, aşağıdaki kimyasal özelliklerden bir veya bir kaçını taşır (URL1).

- Düşük pH (< 4)
- Yüksek metal derişimi (demir, alüminyum, manganez, bakır, kurşun, çinko, kadmiyum, arsenik gibi)
- Toplam yüksek asitlik (100-1500 mg/L CaCO<sub>3</sub> eşdeğeri)
- Yüksek sülfat içeriği (500-10000 mg/L)
- Yüksek tuzluluk (1000 – 20000 µs/cm)
- Düşük çözülmüş oksijen derişimi (genellikle 6 mg/L'den düşük)
- Yüksek bulanıklık veya asılı taneler

Bu sular insan, hayvan ve bitki yaşamlarını tehdit ettiğinden, doğrudan doğaya (su veya toprak) bırakılmaları veya tekrar kullanımları olanaksızdır. Asit maden drenajı sülfürlü minerallerin su ve hava ile temas ettiği her yerde (faal veya terkedilmiş, açık veya kapalı maden ocakları, stoklar, atık yığınları, liç yığınları vb) oluşabilir.

Amerika Birleşik Devletlerinde (ABD) yaklaşık 500.000 terk edilmiş maden ocağı bulunduğu ve bu ocakların 20.000-50.000 tanesinin AMD oluşturdukları USDA Orman Hizmetleri (USDA, 1993) tarafından tahmin edilmiştir (US-EPA, 1994). Warhurst ve Noronha, (1999), Colorado eyaletinde 23.000 adet kapanmış maden ocağının bulunduğunu ve bunların 2.000-3.000 tanesinin acid maden drenajına neden oldukları tahmin etmişlerdir. ABD Çevre Koruma Ajansı (USEPA), Ülkenin batı kesiminde, akıntıların yaklaşık % 40'ının kirletildiğini ve kirlenmelerin çoğunlukla terkedilmiş maden ocaklarından kaynaklandığını belirtmiştir. 19.300 km uzunluğunda akıntıların ve 72.000 hektar göl ve rezervuar alanlarının asitik maden suları tarafından kirletildiği belirtilmiştir. Terkedilmiş Summitville (Colorado) Maden ocağından çıkan atık suların arındırılması için günlük 30.000\$ harcandığı ve bu maden ocağı için toplamda 170.000.000\$ harcanacağı belirtilmiştir. Terk edilmiş bütün maden ocaklarının ıslahı için toplamda 35.000.000.000\$ harcanması gerektiği hesaplanmıştır. Dold (2014), maden atıklarının yeryüzündeki en büyük atıklardan biri olduğunu, sadece bir maden ocağı (Talabra, Chuquicamata, Şili) atığının 52 km<sup>2</sup> alan kapladığını ve yüksekliğinin yüz metre geçtiğini belirtmiştir.

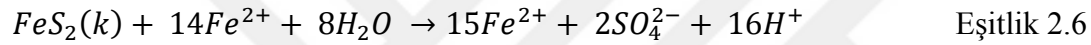
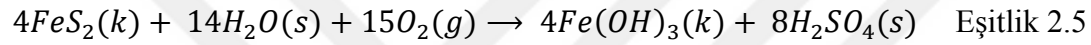
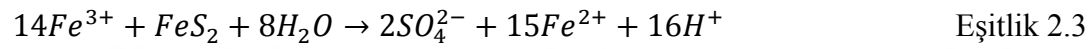
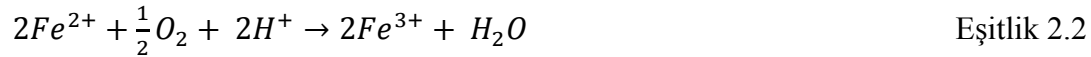
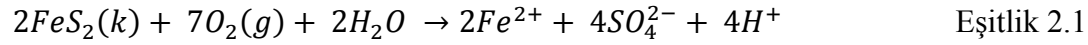
Üretim faaliyetleri devam eden bu ocakların atıklarında oksidasyon zonlarının görülmeye başlandığı belirtilmektedir. Dold (2014), maden atıklarını incelediği çalışmada, faaliyet gösteren bazı büyük maden ocaklarının atıklarının AMD oluşturduklarını belirlemiştir. Bunlardan en önemlileri, Ocroyoc (Cerro de Pasco, Peru) polimetalik (çoğunlukla çinko-kurşun) maden atıkları ve Ojancos (Hochschild, Şili) bakır madeni atıklarıdır.

Ülkemizde asit maden drenajına neden olan terkedilmiş veya aktif maden ocağı sayısı bilinmemekte, ancak, bazı maden ocaklarının ve atıkların çevreyi tehdit ettikleri bilinmektedir (Özçelik, 2007). Murgul (Artvin) bakır madeni, Balya (Balıkesir) bakır/kurşun/çinko madeni (Özçelik, 2007) ve Ergani (Elazığ-Diyarbakır) bakır madenleri bunlar arasındadır. Gümüşköy (Ulukışla-Niğde) sülfürlü cevher atıkları üzerinde yapılan çalışmalar, pirit, galen, simitsonit ve sfalerit içeren atıkların, asit maden drenajı oluşturdukları ve çevredeki sulara ve toprakta kirlenmelere neden olduklarını göstermiştir (Kelebek, 2007). Maden rezervleri açısından zengin olan Ülkemizde ocaklar işletilmeye açıldıkça daha fazla asit maden drenajı sorunuyla karşılaşacağımız kesindir.

### **2.3 AMD Oluşum Mekanizması**

AMD oluşumunda nem (su), hava ve sülfürlü mineraller birincil etmenler olarak adlandırılmıştır. Buna karşılık ortaya çıkan asidi nötrleştiren ve reaksiyon ürünleriyle tepkimeye giren kalsit ve dolomit gibi mineraller içeren karbonatlar ile daha az etkili bazı silikat mineralleri ikincil etmen olarak tanımlanmıştır. Madencilik faaliyetleri ile ilintili çevre sorunları; madenlerin çeşitlilik göstermesi, farklı biçimlerde ve yapılarda yataklanması, üretim ve zenginleştirilmelerinde zorunlu olarak birbirinden ayrı yöntemler uygulanması gibi nedenlerle, yerel şartlara da bağlı olarak geniş bir yelpazede değişkenlik göstermektedir (Karadeniz, 2010). Asit maden drenajının kimyasal mekanizması literatürde detaylı olarak anlatılmaktadır (Akçıl ve Koldaş, 2006; Karadeniz, 2011; Kelebek, 2007; ). Asit maden drenajında en önemli mineral olan pirit su ve oksijen ile temas ettiğinde oksitlenmeye başlar (Eşitlik 2.1). Reaksiyonda görüldüğü gibi -1 değerlikli sülfür +6 değere yükseltgenmiş (oksidasyon) ve ortama  $H^+$  iyonları geçmiştir (ortamda asitlik artmıştır). Ortamda yeterli oksijen bulunması ve asidin tüketilmemesi durumunda  $Fe^{2+}$  demiri,  $Fe^{3+}$  demire yükseltgenir (Eşitlik 2.2). Oksijenden daha güçlü bir oksitleyici olan  $Fe^{3+}$ , piritin doğrudan oksitlenmesine ve ortamın daha da asidik olmasına neden olurken  $Fe^{3+}$ ,  $Fe^{2+}$  demire indirgenir (Eşitlik 2.3) ve böylece sürekli asit üreten bir döngü gelişmiş olur (Schoonen ve diğ., 2010; Karadeniz, 2011).

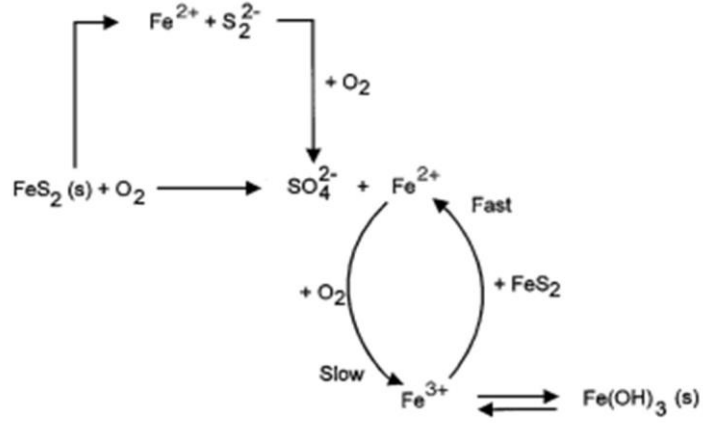
Eğer,  $Fe^{3+}$  iyonunun bulunduğu ortamın pH'ı artarsa,  $Fe^{3+}$  kararlı bir katı olan  $Fe(OH)_3$ 'e kolaylıkla dönüşür (Eşitlik 2.4). Bu reaksiyon,  $Fe^{3+}$  içeren asit sularının yüzey sularıyla karışması neticesinde bile rahatlıkla gerçekleşir (pH 3'ün üzeri) ve gözlenebilen bu kararlı çökeltiye renginden dolayı yellow-boy denir. Eşitlik 2.5 de özetlendiği gibi, pirit mineralinin hava ve su ile teması sonucunda yellow-boy ve asit ortaya çıkabilir (Kelebek, 2007; Karadeniz, 2011). Suların asidik olmasını sağlayan iki süreç i) sülfürün oksitlenmesi ile doğrudan asit üretmesi (Eşitlik 1) ve ii) metallerin metal oksit olarak çökerken asit üretmesidir (Eşitlik 4).



Ortamda ferrik demir bulunması, pirit oksitlenmesini hızlandırır ve daha fazla sülfat ve asit oluşumuna neden olur. Bir mol piritin moleküler oksijen ile oksitlenmesi neticesinde 2 mol asit meydana çıkarken (Eşitlik 2.1), ferrik demir ile oksitlenmesi neticesinde ise 16 mol asit ortaya çıktığı görülür (Eşitlik 2.6). Asit maden drenajındaki reaksiyonlar bunlarla sınırlı olmayıp demirden başka metallerin ve piritten başka minerallerin, oksijenden başka oksitleyicilerin ortamda bulunmasıyla tepkimeler çeşitlenir.

Sülfür minerallerinin en yaygını olmasından ve AMD oluşumunda en önemli rolü oynamasından dolayı pirit mineralinin oksidasyon mekanizması Şekil 2.2'de görüldüğü gibi incelenmiştir (Banks,1997; Dokuzlar, 2019). Demir, iki değerli ve üç değerlikli hallerinde, piritin dolaylı oksidasyonunda merkezi bir rol oynamaktadır. Bu farklı pirit oksidasyon mekanizmaları şöyle özetlenebilir (Lottermoser, 2010);

1. Oksijen ile oksidasyon (abiyotik doğrudan oksidasyon)
2. Mikroorganizmaların varlığında oksijen ile oksidasyon (biyotik doğrudan oksidasyon)
3. Oksijen ve demir yoluyla oksidasyon (abiyotik dolaylı oksidasyon)
4. Mikroorganizmaların varlığında oksijen ve demir ile oksidasyon (biyotik dolaylı oksidasyon)



Şekil 2.2: Pirit oksidasyonunun basitleştirilmiş gösterimi (Banks ve diğ., 1997).

## 2.4 AMD'yi Etkileyen Faktörler

Madenlerin asit üretim kapasitesine (potansiyeline) ve hızına (hızlandırıcı ve yavaşlatan) etki eden faktörler vardır (USA-EPA, 1994).

i. Cevher içerisinde asit üretme toplam kapasitesine etki eden bileşenler;

- Asit üretme potansiyeline sahip minerallerin miktarı (genellikle sülfür mineralleri dikkate alınır).
- Asit nötrleştirme potansiyeli olan minerallerin miktarı
- Kirlenme potansiyeli olan minerallerin miktarı

ii. Asit üretme hızına etki eden bileşenler;

- Sülfür minerallerin cinsi (kristal yapıları dâhil)
- Karbonat minerallerinin cinsi (ve nötrleştirme yapabilen diğer mineraller)
- Reaksiyona giren minerallerin yüzey alanları
- Su ve oksijen bulunması
- Bakteri bulunması

Ortamda su ve oksijenin bulunmaması (örnek, yeraltı su seviyesinin altında ve oksijensiz ortamlarda) durumunda bu reaksiyonlar neredeyse tamamen durur. Madencilik faaliyetleri sırasında kayaçların ana kayadan ayrılması, kırılması ya da öğütülmesi gibi işlemler ile yüzey alanlarının artması, asit oluşturma potansiyellerini de arttırmaktadır (Kahramanoğlu ve diğ., 2015). Bazı bakteriler (Örnek, acidithiobacillus ferrooxidans, leptospirillum ferrooxidans) AMD oluşumunda önemli rol oynarlar. Bu bakteriler enerji ihtiyaçlarını piritin oksitlenmesi (Eşitlik 2.1) ve  $\text{Fe}^{2+}$  demirin,  $\text{Fe}^{3+}$  demire yükseltgenmesinden (Eşitlik 2.2) karşılarlar ve demirin oksidasyon hızını on binlerce kat arttırarak asit maden drenajını hızlandırmış olurlar. Ortamda bakterinin gelişmesi ve etkili olabilmesi için çevresel koşullarında uygun olması gerekir.



Örneğin asit sever demir oksitleyen bakteriler (*acidithiobacillus ferrooxidans*) ancak pH 3,5'den az olan sularda aktif olabilmektedir. Koşullar uygun değilse bakterinin asit üretme etkisi sınırlı olur.

Asit maden drenajına neden olan tek mineral pirit olmayıp, diğer metal sülfürler (markazit, sfalerit, kalkopirit, galen, arsenopirit vs) de sonraki aşamalarda oksitlenir ve asit maden drenajına katkı yaparlar (Karadeniz, 2011). AMD oluşturma potansiyeline sahip sülfür mineralleri Çizelge 2.1'de görülmektedir (Topçu, 2012). Cevher mineralleri içinde demir sülfürlerin de bulunması ve oksitlenmesi diğer sülfür cevherlerinin (Cu, Pb, Zn, Ni vb.) oksidasyonlarını artırarak asit maden drenajını yükseltirler. Şayet primer cevherde demir sülfürler yoksa oksidasyon çok yavaş ilerler, dolayısı ile de ortama verilen asit sınırlı kalır (Anıl, 2014).

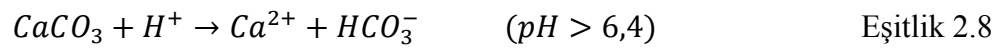
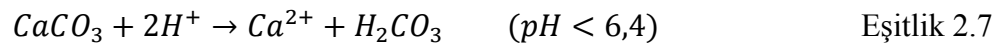
**Çizelge 2.1:** AMD oluşturma potansiyeline sahip sülfür mineralleri (Topçu, 2012)

| Mineral adı | Formülü                             | Mineral adı | Formülü   |
|-------------|-------------------------------------|-------------|---|
| Arsenopirit | FeAsS                               | Orpiment    | As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                        |
| Bornit      | Cu <sub>3</sub> FeS <sub>4</sub>    | Pentlandit  | (Ni,Fe) <sub>9</sub> S <sub>8</sub>                   |
| Enarjit     | Cu <sub>3</sub> AsS <sub>4</sub>    | Pirit       | FeS <sub>2</sub>                                      |
| Galena      | PbS                                 | Pirotit     | FeS   |
| Kalkopirit  | CuFeS <sub>2</sub>                  | Realgar     | AsS   |
| Kalkozin    | Cu <sub>2</sub> S                   | Sfalerit    | ZnS   |
| Kobaltit    | CoAsS                               | Stibnit     | Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                        |
| Kovellit    | CuS                                 | Subanit     | CuFe <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                      |
| Makinavit   | (Fe,Ni) <sub>9</sub> S <sub>8</sub> | Tennantit   | (Cu,Fe) <sub>12</sub> As <sub>4</sub> S <sub>13</sub> |
| Markasit    | FeS <sub>2</sub>                    | Tetrahedrit | (Cu,Fe) <sub>12</sub> Sb <sub>4</sub> S <sub>13</sub> |
| Melnikovit  | Fe <sub>3</sub> S <sub>4</sub>      | Violarit    | FeNi <sub>2</sub> S <sub>4</sub>                      |
| Millerit    | NiS                                 | Zinober     | HgS   |

Asit maden drenajında metal iyonlarının asitliğe katkısı da dikkate alınmalıdır. Eşitlik 2.4 ve Eşitlik 2.5 reaksiyonlarıyla oluşan asit maden drenajı karbonatlı minerallerle (kalsit, dolomit, ankerit ve magnezit gibi) nütürleştirilebilmektedir. Nütürleştirme neticesinde bazı metaller çöktürülürken bazı metaller çöktürülmez. Suda bulunan sülfat iyonları karbonatların eklenmesinden bazen etkilenmezler.

Ancak ortamda magnezyum yerine fazla miktarda kalsiyum bulunması durumunda sülfat iyonları jipsit olarak çöktürülürler. Çizelge 2.2’de verilen nötürleştirme potansiyeli olan mineraller arasında kalsiyum karbonat çok önemli bir yere sahiptir.

Eşitlik 2.1, 1 mol piritin 2 mol H<sup>+</sup> ürettiğini gösterirken Eşitlik 2.7, 1 mol kalsitin 2 mol H<sup>+</sup> nötürleştirdiğini ve Eşitlik 2.8 ise 1 mol kalsitin 1 mol H<sup>+</sup> nötürleştirdiğini gösterir. Reaksiyonlardan görüldüğü gibi kalsit mineralinin pH 6,4’ün altında ve üstünde iki farklı nötürleştirme reaksiyonu vardır (Lapakko, 2002).



**Çizelge 2.2:** Bazı minerallerin azami nötürleştirme potansiyeli (Anıl, 2014).

| Mineral                         | Kimyasal Formül   | 1 mol H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ’i nötürleştirmek için gereken mol sayısı |
|---------------------------------|---|--|
| Kalsit                          | CaCO  | 1  |
| Dolomit                         | CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>   | 1  |
| Ankerit                         | CaFeMgCO <sub>3</sub>   | 1,25   |
| Klorit                          | Mg <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub> | 0,125  |
| Muskovit                        | KA <sub>12</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>            | 0,2  |
| Kaolinit                        | Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>                  | 0,67   |
| Olivin                          | (Mg, Fe) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>  | 0,5  |
| K-Feldspat                      | KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>   | 0,5  |
| Plajioklas (An <sub>0</sub> )   | NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>  | 0,5  |
| Plajioklas (An <sub>100</sub> ) | CaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>  | 0,25   |
| Götit                           | Fe(OH) <sub>3</sub>   | 0,67   |
| Brusit                          | Mg(OH) <sub>2</sub>   | 1  |
| Gibs                            | Al(OH) <sub>3</sub>   | 0,67   |

## 2.5 AMD Kestirimi

Madenin, asit maden drenajına neden olup olamayacağını veya potansiyelini belirlemek (kestirim) için madenin pek çok özellikleri ve çevre (atmosfer) koşulları belirlenir. Elde edilen verilere göre yapılan hesaplamalar neticesinde asit maden drenajının büyüklüğü, süresi ve etkileri kestirilir. Asit maden drenaj kestirim yöntemleri 4 grupta toplanabilir (US-EPA, 1994; Karadeniz, 2008).

- 1) Statik testler (Asit-Baz hesaplaması, BC Araştırma Başlangıç Testi, Alkali Oluşturma Potansiyeli: Sülfür Oranı, Net Nötürleştirme testi, Net Asit Üretme testi vb.)
- 2) Kinetik testler (Nem Hücresi Testi, Sokhelet Ekstraksiyon Testi, Kolon testi, Kesikli reaktör testi vb.)
- 3) Statik ve kinetik test verilerine dayalı tahminler ve
- 4) Üç boyutlu matematiksel modelleme (Amirik ve Deterministik modeller).

Statik testler, asit maden drenajı potansiyelin anlaşılmasında ilk aşama niteliğinde olup, araştırmaların devam edip etmeyeceği kararının verilmesine katkı yapan eleme ve ön değerlendirme niteliğindeki testlerdir. Bu testler başlıca sahadan alınan maden örneklerinin detaylı bir şekilde tanımlanmasını kapsar. Testler malzemelerinin asit üretme ve nütürleştirme kapasitelerinin ve drenajın niteliğini belirlenmesi amacıyla yapılmaktadır. Ancak statik testler, asiti üreten ve nütürleştiren minerallerin birbirlerine göre çözünme hızları arasındaki farkları dikkate almazlar (Lapakko and Antonson, 2002; Yörükoğlu ve Karadeniz, 2003).

Kinetik testler, statik testlerden farklıdır ve madenlerin sahadaki doğal oksidasyon durumlarını taklit eden laboratuvar çalışmalarıdır. Testler için daha çok örnek alınır ve daha uzun süreli çalışmalara yapılır. Sülfürlerin oksitlenme ve dolayısıyla asit üretme hızı ve çıkan drenaj suyunun kalitesi hakkında bilgi edinilir. Yerinde (in-situ) kinetik testler de yapılabilmektedir. Statik ve kinetik testlerden elde edilen oksidasyon hızı, su kalitesi gibi veriler uzun süreler için hesaplanınca asit maden drenajının boyutu uzun süreli etkileri extrapolasyonla tahmin edilir. Belli süre (1, 5, 10 yıl gibi) aralıklarında ne gibi önlemlerin alınması gerektiği belirlenir ve buna göre maden planlaması yapılır.

Kısa sürede gerçekleştirilen testlerdeki belirsizlikleri ortadan kaldırmak ve uzun süreli testlerin maliyetinden kaçınmak için matematiksel modelleme yoluna gidilebilmektedir. Bu modellemelerde malzemelerin fiziksel, jeolojik, homojenlik vb özellikleri göz önüne alınarak belirsizlikler azaltılır.

Amprik modeller regresyon ve korelasyon analizleriyle tanımlanırken deterministik modellemede sahanın drenaj simülasyonu yapılır. Böylece, sahada on yıllarca devam edebilen drenajın gelecek yıllardaki oksidasyon hızları ve buna bağlı olarak drenaj suyunun kalitesi tahmin edilir.

### 2.5.1 Statik AMD Testleri

Statik testler kısa sürede sonuç vermesi, basit ve düşük maliyetli olmalarından dolayı birçok laboratuvarında yapılabilen testlerdir (Yörükoğlu ve Karadeniz, 2003; Karadeniz, 2008). Jeokimyasal statik testler için farklı yöntemler geliştirilmiş olsa da, temelde sülfürlü artıkların asit üretme potansiyelleri (sülfür minerallerinin oksidasyonu) ile oluşan asidin ortadan kalkmasını sağlayan minerallerin (karbonatlar ve silikat minerallerinin çözünürlükleri) asit nötrleştirme kapasiteleri arasındaki denge dikkate alınır (US-EPA, 1994; Doğrul Demiray, 2017). Statik test yöntemleri maliyet, avantaj ve dezavantajları açısından Çizelge 2.3'de karşılaştırılmıştır.

**Çizelge 2.3:** Statik test yöntemleri, maliyetleri, avantajları ve dezavantajları (USA-EPA, 1994; Doğrul Demiray 2017)

| Özellikler                   | ABH   | Değiştirilmiş ABH   | BC Araştırma Başlangıç Testi  | Net Asit Üretimi  |
|------------------------------|---|---|---|---|
| Asit üretme potansiyeli      | Toplam kükürt*31,25   | Sülfür*31,25  | Toplam sülfür*31,25   | Örnekteki sülfürün H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ile oksitlenmesi sağlanır.   |
| Nötrleştirme potansiyeli     | Köpürme deneyi sonucu belirlenen hacimde HCl eklenerek kaynatılır. Soğuduktan sonra pH=7'ye titre edilir.                                     | Köpürme deneyi sonucu belirlenen hacimde HCl eklenerek 24 saat oda sıcaklığında çalkalayıcıda tutulur. pH=8,3'e titre edilir.               | Saf su ile 15 dk çalkalanan örnek, 1 N H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ile pH=3,4'e titre edilir   | %30-50'lik H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ' ile 1 saat çalkalanan örnek pH =7'ye titre edilir.   |
| Olumlu yönleri (Avantajları) | Uygulaması basittir. Çok sayıda örnek kısa sürede test edilebilir. Az ekipman gerektirir, maliyeti düşüktür. Verilerin yorumlanması kolaydır. | Uygulama basittir. Çok sayıda örnek kısa sürede test edilebilir. Az ekipman gerektirir, maliyeti düşüktür. Verilerin yorumlanması kolaydır. | Uygulama basittir. Çok sayıda örnek kısa sürede test edilebilir. Az ekipman gerektirir, maliyeti düşüktür. Verilerin yorumlanması kolaydır. | Uygulama basittir. Çok sayıda örnek kısa sürede test edilebilir. Az ekipman gerektirir, maliyeti düşüktür. Verilerin yorumlanması kolaydır. |

| Olumsuz yönleri | Kinetik veri elde edilmez.  | Kinetik veri elde edilmez.   | Kinetik veri elde edilmez.  | Kinetik veri elde edilmez.   |
|-----------------|---|--|---|--|
|                 | Farklı tane boylarını yansıtmaz.<br>AP ve NP değerleri birbirine yakınsa sonuçları yorumlamak zor olabilir.<br>Test sürecindeki kaynatma işleminden dolayı, NP olduğundan yüksek çıkabilir.<br>AP, toplam sülfür ile hesaplandığından, barit ve jips gibi asit üretmeyen mineraller varsa, AP olduğundan yüksek hesaplanır.<br>Siderit gibi Fe-karbonat mineralleri asit nötürleştirme kapasitesinin olduğundan yüksek hesaplanmasına neden olabilir. | Farklı tane boylarını yansıtmaz.<br>AP ve NP değerleri birbirine yakınsa sonuçları yorumlamak zor olabilir.<br><br>Melanterit, jarosit gibi asi üreten sülfat mineralleri mevcutsa, asit üretme potansiyeli olduğundan düşük hesaplanır. | AP ve NP değerleri birbirine yakınsa sonuçları yorumlamak zor olabilir. | Örneğe verilen H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , örnekteki tüm reaktif sülfürler oksitlenmeden bozuşabilir. Bu yüzden asit üretme potansiyeli olduğundan düşük hesaplanabilir. |

Asit-baz hesaplamaları, özetle, numunelerin Asit Üretme Potansiyeli (APP) ile Nötürleştirme Potansiyeli (NP) karşılaştırılarak yapılır. Numunedeki sülfür yüzdesi ile 31,25 katsayısı çarpılarak APP hesaplanırken, NP numunelerdeki karbonat potansiyeli olup, numunelerin önce asit sonra baz kullanarak geri titrasyonu ile elde edilir. Net Nötürleştirme potansiyeli (NNP) ise APP ile NP farkından. Farkın düşük veya eksi (negatif) olması cevherin asit oluşturma potansiyeli bulunduğunu, farkın yüksek olması ise asit üretme potansiyelinin düşük olduğunu gösterir. NNP yerine APP/NP oranından da yararlanılabilmektedir. Oranın küçük olması asit üretme potansiyelinin düşük, büyük olması ise yüksek olduğunu gösterir. NAG, sülfür analizi gerektirmeyen ve laboratuvar koşullarında kolaylıkla yapılan ve çabuk sonuç veren sayısal bir testtir. Yöntem, çok güçlü bir oksitleyici olan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> kullanılarak cevher içerisinde bulunan pirit gibi sülfürlü mineralleri oksitleyerek sülfürik asit üretilmesi esasına dayanır. Üretilen asit ise cevherde bulunan karbonat gibi asit tüketiciler tarafından nötürleştirilir. Reaksiyonun sonunda, ölçülen pH cevherin net asit üretme potansiyelini belirlemektedir. NaOH çözeltisi ile pülp titrasyonu yapılarak per oksitin cevherde ne kadar asit ürettiği hesaplanabilir (Lawrence ve Day, 1997).

## 2.6 AMD Kontrolü

Asit maden drenajı kontrolü öncelik sırasına göre üç şekilde yapılır:

- i) asidik suların oluşumun engellenmesi,
- ii) asidik suların etkilerinin azaltılması (nötürleştirme vb.) ve
- iii) asidik suların toplanıp arıtılması.

Oluşumun engellenmesi çevrenin kirlenme olasılığını ortadan kaldıracığı için teknik ve ekonomik açıdan istenen bir durumdur. Çünkü, oluşum başladıktan sonra durdurulması zor ve pahalıdır. Sahoo ve diğ. (2013) kapsamlı bir çalışmada asit maden drenajında en iyi çözümün sülfürlerin oksidasyonunun önlenmesi olduğunu belirtmişlerdir. Oksidasyonun engellenmesi için;

- i) fiziksel bariyerler (izolasyon),
- ii) bakteri kullanımı,
- iii) kimyasal pasifleştirme (encapsulation, kaplama),
- iv) elektrokimyasal yöntemler ve
- v) sülfürün uzaklaştırılması yöntemleri uygulanmışlardır.

Yöntemlerin avantaj ve dezavantajlarının ele alındığı çalışmalarda izolasyonun pahalı yöntem olduğu ve izolasyonun ancak kısa süreler için etkili olduğunu belirlemişlerdir. Bakterilerin de sadece taze atıklar üzerinde ve kısa süreler için etkili oldukları belirlenmiştir. Organik ve inorganik maddelerin kullanıldığı kimyasal pasifleştirme (encapsulation) yönteminin basit ve etkili bir yöntem olduğu sonucuna varmışlardır. Fosfatlar, uçucu kül, silikat ve permanganat gibi inorganik pasifleştiriciler içerisinde en iyi sonucun silikalarla alındığı belirlenmiştir. Organik pasifleştirici (kaplayıcılar) içerisinde hümik asitin önlemede etkili, ayrıca ucuz ve çevre dostu olduğu belirlenmiştir. Organik pasifleştiriciler ile inorganik pasifleştiriciler karşılaştırıldığında, inorganik pasifleştiricilerin daha etkili ve ucuz oldukları ve sahada daha iyi sonuç verdikleri belirlenmiştir. Elektrokimyasal yöntemin asit maden drenajını önlemede etkili olduğu fakat ilk yatırım masrafının yüksek ve elektrot giderlerinin sürekli olacağı belirtilmiştir. Ayrıca, atıkta bulunan sülfürlü fraksiyonların uzaklaştırılması, (desülfürüzyon) yönteminin büyük ölçekli atıklar için uygun ve ekonomik olduğu belirlenmiştir.

Pirotit içeren bakır cevheri atıklarının asit maden drenajını pasifleştirmeye kontrol etmek (oluşum hızını çevreye zararsız düzeye indirmek) için (Hmidi,1997), atıklara değişik organik ve inorganik kimyasallar ve çimentolama özelliği olan (portland çimento, kireç, yüksek fırın curufu, uçucu kül vb.) katkı maddeleri ekleyerek peletleme yapmıştır.

Nem hücresi test çalışmaları, en iyi pasifleştirmeyi bir ticari reaktifin (Enviroseal surfactant) ve sodyum silikatın yaptığını göstermiştir. Atıkların aglomerasyonuna ve nütürleşmesine neden olan çimentolama özelliğine sahip katkı maddelerinin kullanımı, peletlemeye gerek görülmeden, yaygın olarak çalışılmıştır (Misra ve diğ., 1996; Jang ve Kim, 2000; Yeheyis ve diğ., 2009). Çimentolama özelliği olan malzemelerin asit maden sularının arıtılmasında da etkili oldukları belirlenmiştir (Gitari, ve diğ., 2008; Sharkey ve Baker, 2009; Sharkey ve Baker, 2010; Mporu ve diğ., 2014). Sharkey ve Baker (2009 ve 2010), patent aldıkları çalışmalarında asidik maden sularını nütürleştirmek ve çözünen iyonları gidermek için çok değişik katkı malzemelerinin (kireç, demir cürufu, atık kâğıt, talaş, hidrojen peroksit, dağıtıcı reaktif vb.) karışımlarını kullanmışlardır. Bu malzemelerin belli oranlardaki karışımlarının suların arıtılmasında olumlu sonuçlar verdikleri belirlenmiştir.

Araştırmalar, özellikle sülfürlü cevherin bulunduğu madenlerde, oluşumun engellenmesinin pratikte çok zor olduğunu göstermiştir (Jonhson ve Hallberg, 2005). Asit maden drenajının başlamış olduğu yerlerde oluşumu yavaşlatmak ve drenajın çevreye zararlarını ihmal edilebilir düzeye indirmek ise mümkündür. Öncelikle, oluşan asidik maden sularının yeraltı, yerüstü ve yağmur sularıyla taşınması önlenmelidir (migration control). Kontrol edilen asidik sular aktif veya pasif yöntemlerle biyolojik (biyotik) veya kimyasal (abiyotik) yollarla kontrol edilir. En çok uygulanan (geleneksel) kontrol yöntemi nütürleştirmedir. Aktif yöntemlerde nütürleştirme ve çöktürme işlemleri reaktörler içerisinde sürekli uygulanırken, pasif yöntemlerde çoğunlukla doğal veya yapay bataklıklar kullanılır. Nütürleştirici (alkali) olarak sodyum hidroksit, sodyum karbonat ve amonyak kullanılabilir de en yaygın kullanılan nütürleştirici kireçtir (Taylor ve diğ., 2005). Ortamın pH'ı sülfürlü minerallerin oksidasyonunu arttıran asidofilik bakterilerin etkili olamayacakları değere kadar arttırılır. Bu uygulamanın şu yararları görülebilmektedir: Drenajın asitliği giderilmiş (nütürleştirilmiş) olur,  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  demire yükseltgenir, ağır matelerin (hidroksit, oksitler veya karbonatlar olarak) çökelmeleri sağlanır ve yeterli pH'a ulaşılmışsa ortamdaki sülfat da çöktürülür (Akçıl ve Koldaş, 2006). Çöktürmeden sonra temizlenen atık sular kontrollü olarak çevreye salınırken geride önemli miktarda çamur kalır. Bu yöntem başarılı olmakla beraber asit maden drenajı sorununu tamamen çözemez. Çökelen metal hidroksitlerin bir kısmı,  $(Fe(OH)_2)$  gibi, kararsız olabilmekte ve yüksek bozundurma giderlerine neden olabilmektedir ve bazı metal iyonlarının (Mo, As gibi) uzaklaştırma verimi düşük kalmaktadır. Yöntemin verimliliğini arttırmak için alkali ilavesi ile beraber havalandırma/oksitleme (mekanik havalandırma, kimyasal oksitleme, biyolojik oksitleme gibi) yapılmaktadır.

Asit maden drenajı ile mücadelenin son seçeneği, AMD devam ederken suların toplanması ve arıtılmasıdır. Etkinliği daha az ve riskli işlemlerdir. Çöktürme, adsorpsiyon, iyon değişimi, membran teknolojisi gibi yöntemlerle, sular zararlı içeriklerinden ayrıştırıldıktan sonra, temiz su kaynaklara beslenebilir. Bu yöntemlerin bir birlerine göre bazı avantaj ve dezavantajları vardır. Örnek olarak, en yaygın uygulama alanı bulan çöktürme yönteminde, kalan atıkların (sludge) kontrolü ayrı bir problem oluşturmaktadır. Bazen, çöktürme sonrası kalan atıkların hacmi, maden atıklarının hacmine ulaşabilmektedir.

## 2.7. Önceki Çalışmalar

Literatürde aktif ve terkedilmiş maden sahalarının, kömür yataklarının, cevher atıklarının ve jeolojik formasyonların AMD oluşturma potansiyellerinin araştırıldığı görülmektedir. Açıkta oldukları için AMD açısından önemli olan cevher atıkları üzerinde çok sayıda araştırma yapılmıştır. Ayrıca, oluşmuş AMD'nin boyutlarını belirlemek için çevredeki toprak ve sular (dere, göl gibi) incelenmiştir.

Balya Pb-Zn maden atık sahasında AMD oluşumu jeokimyasal, moleküler-mikrobiyolojik teknikler bir arada kullanılarak araştırmıştır. Atıkların bulunduğu göletlerden ve atıkların ulaştığı Maden Deresinden su ve sediman örnekleri alınmış ve su örneklerinin bazı fizikokimyasal özellikleri yerinde tayin edilmiş ve bazı iyon ve metal içerikleri ise ICP-MS cihazı ile laboratuvarında tespit edilmiştir. Doğrul Demiray (2017) tez çalışması kapsamında Murgul ve Kuvarshan sınırlarında dasitik kayaçların ve maden atıklarının mineralojik ve jeokimyasal karakterizasyonunu yapmış ve AMD oluşturma potansiyellerini statik ve kinetik testlerle incelemiştir. Araştırma sonuçları statik ve kinetik testlerin çoğunlukla uyumlu olduğunu ve bazı kayaç ve atıkların AMD oluşturma potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir.

AMD oluşumunda en etkili özelliklerden biri olan numunelerin tane boyu dağılımı oldukça kapsamlı bir şekilde çalışılmıştır (Ergüler, 2012; Ergüler ve diğ. 2014; Ergüler ve Ergüler 2015). Ergüler ve Ergüler (2015) Murgul (Artvin) bakır cevherlerinin kinetik kolon testi ile AMD oluşturma potansiyelini ve tane boyu dağılımının AMD oluşumuna etkisini incelemiştir. Ergüler ve diğ. (2014) Murgul (Artvin) bakır cevherlerinin kinetik kolon testi ile AMD oluşturma potansiyelini incelemiş ve değişik boyutlardaki kolonlarda farklı tane boylarında cevher numuneleri kullanmışlardır. Çalışmalar sonucunda kolon boyutlarının drenaj suyu kalitesine dağılımının AMD oluşumuna etkisini incelemiştir.

Şanlıyüksel Yücel ve İleri (2020) Etili (Çanakkale) kömür pasasının AMD oluşturma potansiyelini araştırmış ve termik santral uçucu külün AMD nötralizasyonuna ve pasanın



çevresel etkilerinin azaltılmasına etkisini incelemişlerdir. Araştırma sonucunda uçucu külün, pasanın neden olduğu çevresel etkileri minimize ettiği saptanmıştır.

Leiva ve diğ. (2021) Florida altın-gümüş madeni (Santiago, Şili) atık sahasından aldıkları sulu örneklerin AMD özelliklerini incelemişlerdir. 180 gün süren nem hücresi testlerinde atığın önemli miktarda sülfat, ağır metal iyonları ve asidik su üretmedikleri görülmüştür.

Goto ve diğ. (2016) pirit mineralinin çimento ve beton üzerine etkilerini belirlemek amacıyla agrega/mineral/su karışımlarını incelemişlerdir. Çimento agregası olarak diyabaz kullanıldığı çalışmada ortamın pH, elektriksel iletkenlik, elektriksel potansiyel ve toplam çözünen katı değişimlerini zamana bağlı olarak incelemişlerdir.

Moricz ve diğ (2012) sülfürlü bakır cevheri atıklarının AMD oluşturma potansiyelini ve atık içerisindeki pirit minerallerinin oksidasyon özelliklerini incelemişlerdir. Yaptıkları kolon testlerinde piritin yüzeylerde oksitlendiğini ancak karbonatlı minerallerden dolayı ortamda asitliğin oluşmadığı sonucuna varmışlardır.

## 3. MALZEME VE YÖNTEM

### 3.1 Malzemeler

#### 3.1.1 Atık Numuneleri ve Pirit

Araştırma konusu olan Görgü kurşun-çinko cevherleri Malatya ilinin 20 km batısında yer almaktadır. Maden ocağı ve cevher zenginleştirme tesisleri CVK Holding'e bağlı ÇEVKUR Madencilik Tic. Ltd. Şti. tarafından işletilmektedir. Ocaklardan çıkarılan cevher önce gravimetrik sonra flotasyon yöntemiyle zenginleştirilmektedir. Deneysel çalışmalarda taze flotasyon atıklarından alınan numuneler kullanılmıştır. Atık yığınının farklı bölgelerinden yaklaşık 200 kg temsili numune alınmıştır. Yaklaşık 3 kg pirit minerali Ergani Eti-Bakır (Elazığ) tesislerinden temin edilmiştir.

#### 3.1.2 Kimyasallar

Deneysel Isolab Laborgerate GmbH marka (Almanya)  $H_2SO_4$ , HCl, NaOH ve Merck KGaA marka (Almanya) hidrojen peroksit ( $H_2O_2$ ) kullanılmıştır. Testlerde kullanılan saf su, GFL 2102 (Almanya) cihazından elde edilmiştir.

### 3.2 Yöntem

#### 3.2.1 Numune Hazırlama

Sahadan alınan atık numuneleri Şekil 3.1'de görüldüğü gibi statik AMD testlerine ve kimyasal ve mineralojik analizlere hazırlanmıştır. Numuneler nemli oldukları için 60 °C sıcaklıktaki etüvde 3 gün boyunca kurutulmuşlardır. Kurutma neticesinde oluşan topaklar eldiven takılarak el ile dağıtılmıştır ve içerisinde olabilecek yabancı iri malzemelerin uzaklaştırılması için 300mm elek ile eleme yapılmıştır. Homojenliğin sağlanması için bütün numuneler harmanlanmış ve numune azaltma yöntemleri ile örnekler alınmıştır. Öncelikle iki defa yapılan konileme-dörtleme yöntemi ile (Şekil 3.2) numunenin yaklaşık 150 kg numune şahit numune olarak ağzı kapalı kaplarda saklanmıştır. Geri kalan malzeme oluklu bölücü ile eşit fraksiyonlara bölünmüştür (Şekil 3.3). Sonra bu fraksiyonlar titreşimli besleyici ile çalışan döner (rotary) örnekleyici ile 500 g örneklere bölünmüştür (Şekil 3.4). Bu temsili örnekler kullanılabilecek kadar ağzı kapalı plastik torbalarda saklanmıştır.

Ergani Eti-Bakır (Elazığ) tesislerinden el ile seçilerek alınan yaklaşık 3 kg pirit parçaları boyut küçültme işleminin ardından yeterli saflığı elde etmek için sallantılı masada

zenginleştirilmiştir. İki farklı tane boylarında pirit mineralleri hazırlanmış ve statik AMD testlerinde farklı miktarlarda kullanılmıştır.



**Şekil 3.1:** Konileme-dörtleme



**Şekil 3.2:** Numunenin oluklu bölücüyle azaltılması



**Şekil 3.3:** Titreşimli besleyicili rotary (döner) örnek bölücü

### 3.2.2 Numunenin Karakterizasyonu ve Analizler

Numunelerin karakterizasyonu için tane boyu dağılımı, Elementel, X-Işınları kırınımı (XRD), X-Işınları Floresanı (XRF), İndüktif eşleşmiş Plazma (ICP-ES) ve Atomik Absorpsiyon Spektrometresi (AAS) analizleri yapılmıştır. Atık numunelerin ve bazı testlerde kullanılan pirit mineralinin tane boyu dağılımı için X-Işınları kırınımı yöntemiyle çalışan Malvern Mastersizer 2000 (Malvern Instruments Ltd., UK) cihazı kullanılmıştır. Elementel analiz ile C, H, N ve S elementlerinin tayini için İnönü Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarında bulunan Leco CHNS-932 (LECO Corporation, MI, USA) cihazı kullanılmıştır. AMD hesaplamalarında kullanılan numune içerisindeki toplam sülfür bu yöntemle belirlenmiştir. XRF ve ICP-ES analizleri Bureau Veritas Minerals (Kanada) tarafından yapılarak örnekler içerisindeki belli başlı oksit ve elementler belirlenmiştir. Mineralojik analizler ise Rigaku Geigerflex D-Max/B (Japonya) XRD cihazı kullanılarak İnönü Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarında yapılmıştır. XRD ölçümleri 20-80° 2θ aralığında ve 5°/dakika hızında yapılmıştır. Sulardaki metal iyonlarının derişimlerini belirlemek için İnönü Üniversitesi, Merkez Araştırma Laboratuvarında ve Kimya bölümünde bulunan Alevli AAS cihazları kullanılmıştır.

### 3.2.3 Sülfür (Kükürt) Analizleri

Sülfür madenler içerisinde sülfat, sülfid (veya piritik) ve organik gibi farklı farklı formlarda bulunabilmektedir. Pirit, pirotit, markazit, kalkopirit, galen ve sfalerit piritik sülfürün önemli kaynakları iken, barit, jips, anhidrit, jarozi gibi mineraller sülfat sülfürün önemli kaynaklarını oluştururlar. Organik sülfür ise formülünde sülfür bulunan organik maddelerde bulunmaktadır. Cevherin sülfür içeriği AMD potansiyeline etki eden en önemli parametrelerden biri olmakla beraber, AMD oluşumuna esas katkıyı piritik sülfür yaptığından bazı hesaplamalarda sadece piritik sülfür miktarı dikkate alınır. Çalışılan numune içerisinde organik sülfür bulunmadığından toplam sülfürün sülfat ve sülfid sülfürden oluştuğu kabul edilmiştir. Toplam sülfür Leco CHNS-

932 cihazıyla, sülfat sülfür ise Türk Standartları Enstitüsü'nün TS 329 ISO R 157-1966 standardına göre belirlenmiştir. Cevherdeki sülfür sülfür yüzdesi ise aşağıdaki eşitlikten (Eşitlik 3.1) hesaplanmıştır. ABH hesaplamalarında kullanılan Asit üretim potansiyeli (APP) hesaplamasında test yöntemleriyle uyumlu olarak hem toplam hem de piritik sülfür içeriği kullanılmıştır (Eşitlik 3.2). Eşitlik, numunedeki her % 1 sülfürün nötürleştirilmesi için 31,25 kgCaCO<sub>3</sub>/ton nötürleştirici malzeme gerektiğini ifade eder (Sobek ve diğ., 1978).

Sülfür (veya piritik) sülfür (%) = Toplam sülfür (%) – Sülfat sülfür (%) Eşitlik 3.1

APP = Toplam veya sülfür sülfür (%) x 31,25 Eşitlik 3.2

### 3.3 Statik Laboratuvar Testleri

Cevherin AMD oluşturma potansiyelini belirlemek amacı ile aşağıdaki statik laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Literatürde aynı testler için bazı küçük farklılıklar bulunduğundan testler “Testin Yapılışı” bölümünde açıklandığı gibi yapılmıştır. (<http://mendem.org/wpcontent/uploads/2013/01/1.16.1b.pdf>)

1. Çamur (Pasta) pH'ı
2. Standard Asit-Baz Hesaplaması (ABH)
3. Değiştirilmiş Asit Baz Hesaplamaları
4. BC Araştırma Başlangıç Testi
5. Net Asit Üretme (NAG) Testi

#### 3.3.1 Çamur pH'ı

**Hedef:** Öğütülmüş cevheri su ile karıştırarak cevherde analiz öncesinde asit oluşumunun gerçekleşip gerçekleşmediğine bakmak.

#### Kullanılan malzeme ve donanımlar

- pH metre
- 50 ml'lik beher
- Karıştırma çubuğu
- Saf su

#### Testin yapılışı

10 g cevher numunesi tartılıp beher içerisine aktarılır ve üzerine 5 ml saf su ilave edilir. Numunenin iyice ıslanması için beklenilir. Pülp karıştırılırken yavaş bir şekilde su ilavesi yapılır. pH ölçümü yapılabilir kıvama gelince su eklemesi durdurulur ve pH ölçümü yapılır.

**Sonuçların yorumlanması** pH'ın 7'den yüksek çıkması cevher içerisinde reaktif karbonat olduğunu, 5'den küçük çıkması cevher içerisinde asitliğin oluştuğunu gösterir.

### **Yöntemin Avantaj ve dezavantajları**

Kolay ve çabuk sonuç alınan bir yöntemdir. Asit oluşmaya başlamış örneklerin değiştirilmesi gerektiği düşünülebilir. Asitliğin ve alkaliliğin ne hızda gelişebileceği konusunda bir fikir vermez.

### **3.3.2.Standart ABH**

**Hedef:** Cevherdeki asit üreten ve asit tüketen bileşenler arasındaki dengenin belirlenmesi.

**Temeli:** Cevherin Asit Üretim Potansiyeli (AP) ve Nötürleştirme Potansiyeli (NP) belirlenir. Bu iki değer arasındaki fark Net Nötürleştirme Potansiyeli (NNP) değerini verir. NNP değeri cevherin potansiyel asit üreten veya tüketen sınıfında olduğunu söyler. Başlangıç olarak, pozitif NNP değeri cevherin net asit tüketen olduğuna işaret eder. AP, NP ve NNP birimleri kg CaCO<sub>3</sub> eşdeğer/ton cevherdir.

Nötürleştirme potansiyeli örneğe fazla miktarda HCl ekleyerek ve reaksiyonu tamamlamak için ısıtılarak belirlenir. Örnek içerisindeki bütün asit tüketen minerallerin reaksiyona girmesini sağlamak için yeterli miktarda asit kullanmak amacıyla NP testi öncesinde örneğe fişirdama (fizy) testi yapılır. Tükünmeyen asit, standart baz kullanılarak pH 7'ye çıkarılır ve burada tüketilen asitin kalsiyum karbonat eşdeğeri hesaplanır.

Asit üretim potansiyeli toplam sülfür analizi yapılarak şu iki varsayıma göre hesaplanır; 1) sülfürler sülfata dönüşür ve 2) bir mol oksitlenmiş pirit 4 mol H<sup>+</sup> oluşturur.

### **Malzeme ve Donanım**

- Alüminyum folyo
- 250 ml Erlen
- Isıtıcı (hot plate)
- Mikropipet
- pH metre
- Saf su
- Konsantre (% 25) HCl (fişirdama testi için)
- 0,1 N standart HCl çözeltisi
- 0,5 N standart HCl çözeltisi
- 0,1 N standart NaOH çözeltisi
- 0,5 N standart NaOH çözeltisi

## Testin yapılışı

- Numunenin toplam S içeriği belirlenir
- Numunenin çamur pH'ı belirlenir
- Fışırdama testi için 0,5 g örneğini tartıp bir petri kap içerisine aktarılır. % 25 HCl'den numune üzerine ik-üç damla damlatılır. Numuneden çıkan "fışırdama" sesi Çizelge 3.1'e göre değerlendirilir ve bu sese göre HCl miktarı ve derişimi seçilir.

**Çizelge 3.1:** Fışırdama testi sonrası Standart ABH testi için kullanılacak HCl çözeltisi

| Fışırdama sesi | HCl (ml) | HCl (Normalite) |
|----------------|----------|-----------------|
| Yok            | 20       | 0,1             |
| Hafif          | 40       | 0,1             |
| Orta           | 40       | 0,5             |
| Güçlü          | 80       | 0,5             |

- 2 gr örnek tartılıp 250 ml Erlen içerisine aktarılır ve üzerine Çizelge 3.1'de görülen miktar kadar HCl çözeltisi ilave edilir.
- Erlen kaynama noktasına kadar ısıtılır ve reaksiyon tamamlanana kadar arada bir karıştırılarak bu sıcaklıkta tutulur. Gaz kabarcıkları çıkışı bitince ve taneler erlen tabanına homojen olarak çökelince reaksiyon tamamlanmış olur.
- Saf su kullanarak hacmi 125 ml'ye tamamlanır ve erlen bir dakika daha kaynatılır. Erlen soğumaya bırakılır ve sıcaklık düşünce kapağı kapatılıp oda sıcaklığına soğutulur.
- Nötürleştirmede kullanılan HCl ile aynı normaliteye sahip (0,1 veya 0,5 N) NaOH çözeltisi ile pH 7 oluncaya kadar titrasyon yapılır. pH'ın 7'de en az 30 saniye sabit kalması gerekir.
- Eğer pH 7'ye ulaşmak için kullanılan NaOH miktarı 3 ml'den az ise kullanılan HCl miktarının asit tüketen mineralleri nötürleştirme için yeterli olmadığı düşünülür. Çizelgedeki bir üst seviyedeki miktarda HCl kullanmak üzere deney yeniden yapılır.

## Hesaplama

1. Numunenin nötürleştirme potansiyeli Eşitlik 3.3'den hesaplanır ve birimi kg CaCO<sub>3</sub> eşdeğeri/ton cevher

$$NP = \frac{50x[(Ma*Va)-(Mb*Vb)]}{w}$$

Eşitlik 3.3

NP: nötürleştirme potansiyeli

Ma: HCl normalitesi, N

Mb: NaOH normalitesi, N

w: numune miktarı, g

Va: eklenen HCl miktarı, ml

Vb: eklenen NaOH miktarı, ml

2. Numunenin ntrleştirme potansiyeli toplam sülfür yüzdesi kullanılarak Eşitlik 3.2'den hesaplanır.
3. Net ntrleştirme potansiyeli (NNP) Eşitlik 3.4'den, Net Ntrleştirme oranı (NNR) ise Eşitlik 3.5'den hesaplanır. NNP birimi kg CaCO<sub>3</sub> eşdeğeri/ton cevher NNR ise birimsizdir.

$$NNP = NP - AP$$

Eşitlik 3.4

$$NNR = NP / AP$$

Eşitlik 3.5

### Sonuçların yorumlanması

NNP <-10 çıkması durumunda cevherin potansiyel olarak asit üretebildiği, +10 < NNP < 10 aralığında belirsiz olduğu ve NNP > +10 olması durumunda asit üretme potansiyelinin olmadığı kabul edilir. Ancak, NP ve AP farkı ile elde edilen NNP değeri yerine NP ve AP oranı ile elde edilen NNP oranının (NNP oranı = NP/AP) daha güvenli sonuçlar verebilmektedir. NP/AP > 2 veya NP/AP > 3 ise cevherin asit üretmeyeceği söylenmektedir (Jennings ve Jacobs, 2014).

### Yöntemin Avantaj ve dezavantajları

- Hızlı ve yapımı kolaydır.
- Maliyeti düşük olduğu için çok sayıda örnek test edilebilir.
- Sülfür türlerinin analiz edilerek hesaplamalarda sülfit slfrnn kullanılması daha gerçekçi sonuç verir.
- NP değeri standart yöntemden daha gerçekçi bir sonuç verir.
- Asit retme ve ntrleştirme hızları belirlenememektedir.
- AP hesaplamaları bir reaksiyon stokiyometrisine göre yapılmıştır ancak pratikte gerçek stokiyometri farklı olabilir.
- Yöntem, rneğin asidik sularla uzun süreli temaslarında hangi pH'a kadar ntrleşme yapabileceğini göstermez.

### 3.3.3. Değiştirilmiş (modifiye) ABH

**Temeli:** Standart asit-baz hesaplama yönteminden biraz farklılıklar gösteririr. Farklılıklardan bazıları i) Eşitlik 3,2'de toplam sülfür yerine sülfit (piritik) sülfür miktarı kullanılır, ii) numuneyi



HCl çözeltisi ile kaynatmak yerine, çevre sıcaklığında aynı çözelti ile 24 saat reaksiyona sokar ve iii) son titrasyon pH'ı 7 yerine 8,3 alınır. Piritik sülfürden APP hesaplanırken şu varsayımlar yapılmıştır; 1) sülfidin tamamı sülfata dönüşmüştür ve 2) oksitlenmiş her bir mol pirit 4 mol H<sup>+</sup> üretmiştir. Bazı durumlarda, barit mineralinde olduğu gibi asit üretimine katkı yapmayan diğer sülfür türleri belirlenir ve sülfid sülfürü hesaplamalarında düzeltme yapılır.

### Malzeme ve Ekipman

Standart ABH yöntemi ile aynı malzeme ve ekipman kullanılıp, ısıtıcı kullanılmamakta ve 1 N HCl çözeltisi kullanılmaktadır.

### Testin yapılışı

Değiştirilmiş ABH testinde kullanılan HCl çözeltisinin miktarı fişirdama testi sonucuna bağlı olarak Çizelge 3.2'ye göre seçilir.

- Numuneye fişirdama testi yapılarak kullanılacak HCl miktarı belirlenir.
- 2.0 gr maden örneği tart ve 250 ml'lik Erlen içerisine koyulur.
- Üzerine 90 ml saf su koy ve Çizelge 3.2'de belirtildiği kadar 1 N HCl standardı eklenir.
- 2 saat süreyle iyice çalkaladıktan sonra Çizelge 3.2'de belirtildiği kadar 1 N HCl standardı eklenir.
- 22 saat sonra pülp pH'ı ölçülür. Eğer pH 2,5'ten daha büyük ise 1 N HCl standardı kullanarak pH'ı 2,0-2,5 aralığına düşürülür ve eklenen miktarı not edilir. Eğer pH 2,0'ın altında ise asit miktarı fazla gelmiştir. Bu örneği atılır ve başlangıç asit miktarları azaltılarak (1 N HCl standardından 2 + 2 ml) yeniden başlanır. Bu aşamada çözelti pH'ının 2,0-2,5 aralığında olması gerekmektedir.
- 24 saat sonra erlen içerisine saf su ilave ederek hacmi 125 ml'ye tamamlanır.
- 0,5 N NaOH standardı kullanarak pH'ı 8,3'e yükseltilir ve eklenen miktarı not edilir.

**Çizelge 3.2:** Fişirdama testi sonrası Değiştirilmiş ABH testi için kullanılacak HCl çözeltisi

| Fişirdama sesi veya gaz çıkışı | Eklenecek 1 N HCl miktarı (ml) |              |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------|
|                                | Başlangıç                      | 2 saat sonra |
| YOK                            | 1,0                            | 1,0          |
| AZ                             | 2,0                            | 1,0          |
| ORTA                           | 2,0                            | 2,0          |
| GÜÇLÜ                          | 3,0                            | 2,0          |

## Hesaplamalar

1. Numunenin asit üretme potansiyeli Eşitlik 3.2'den hesaplanır, ancak numunenin sülfür sülfür yüzdesi alınır.
2. Numunenin nötürleştirme potansiyeli Eşitlik 3.3'den hesaplanır.
3. Net nötürleştirme potansiyeli Eşitlik 3.4'den hesaplanır.

## Sonuçların yorumlanması

Standart ABH testine benzer şekilde yorumlanmaktadır.

## Yöntemin Avantaj ve dezavantajları

- Hızlı ve yapımı kolaydır.
- Maliyeti düşük olduğu için çok sayıda örnek test edilebilir.
- Sülfür türlerinin analiz edilerek hesaplamalarda sülfür sülfürün kullanılması daha gerçekçi sonuç verir.
- NP değeri standart yöntemden daha gerçekçi bir sonuç verir.
- Asit üretme ve nötürleştirme hızları belirlenmemektedir.
- AP hesaplamaları bir reaksiyon stokiyometrisine göre yapılmıştır ancak pratikte gerçek stokiyometri farklı olabilir.
- Yöntem, örneğin asidik sularla uzun süreli temaslarında hangi pH'a kadar nötürleşme yapabileceğini göstermez.

## 3.3.4 BC Araştırma Başlangıç Testi

**Hedef:** Cevherdeki asit üreten ve asit tüketen bileşenler arasındaki dengenin belirlenmesi.

**Temeli:** İki farklı testten oluşur.

1) Örneğin nötürleştirme kapasitesinin belirlenmesi

2) Örneğin asit üretme potansiyelinin belirlenmesi

İki değer karşılaştırılması örneğin asit üreten veya tüketen olarak sınıflandırılmasına imkân verir. Eğer örneğin asit üretimi asit tüketimini geçiyorsa potansiyel asit üreten olarak sınıflandırılır ve onaylama testi yapılması önerilir.

Nötürleştirme kapasitesi numunenin pH'ını standart sülfürik asit ile pH 3,5'e indirerek belirlenir. Asit üretim potansiyeli toplam sülfür analizi yapılarak şu iki varsayıma üzerine kurulmuştur; 1) sülfürler sülfata dönüşür ve 2) bir mol oksitlenmiş pirit 4 mol H<sup>+</sup> oluşturur.

Son nokta olarak pH 3,5 tercih edilmesinin nedeni acidithiobasillus ferrooxidans gibi demir ve sülfür oksitleyen bakterilerin bu değer üstünde aktif olmamalarıdır. Bu nedenle, eğer teorik asit

üretim potansiyeli pH'ı 3,5'in altına indirmeye yeterli değilse, malzemenin biyolojik oksitlemesi olmayacağından AMD oluşma olasılığı mümkün görünmez.

### **Malzeme ve Ekipmanlar**

1. 250 ml beher
2. Manyetik karıştırıcı
3. Mikropipet
4. pH metre
5. Saf su
6. 1,0 N sülfürik asit (Certified grade)

### **Testin yapılışı**

1. Örneğin toplam sülfür analizi yapılır.
2. 10 gr cevher örneği tartılıp 250 ml'lik behere koyulur ve üzerine 100 ml saf su eklenir. Yaklaşık 15 dakika karıştırılır ve pH'ı kaydedilir.
3. Karıştırma yapılırken, pH 3,5 oluncaya kadar 1,0 N sülfürik asit eklenir. pH sabit kalıncaya kadar eklemeye devam edilir ve eklenen toplam asit miktarı kaydedilir.

### **Hesaplamalar**

1. Ton cevher başına tüketilen kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> miktarı Eşitlik 3.4'e göre hesaplanmıştır.

$$\frac{1N \text{ sülfürik asit miktarı (ml)} \times 0,049 \times 1000}{\text{Örnek miktarı (gr)}}$$

Eşitlik 3.4

2. Ton cevher başına kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> üretimi potansiyeli ise Eşitlik 3.5'e göre hesaplanmıştır.

$$\text{Asit üretim potansiyeli} = \%sülfür \times 30,625$$

Eşitlik 3.5



**Şekil 3.4:** BC Araştırma Başlangıç testi düzeneği

### **Sonuçların yorumu**

Asit tüketim ve asit üretim potansiyeli değerleri karşılaştırılır. Eğer asit üretim potansiyeli asit tüketimini geçerse, cevher asit maden drenajı üretme potansiyeline sahip olarak sınıflandırılır. Onaylama testleri olan BC Araştırma Onaylama Testi veya başka kinetik test yapılması önerilir. Eğer asit tüketim değeri asit üretim potansiyelinden yüksek olursa cevher asit üretmeyen olarak sınıflandırılır ve başka teste gerek kalmaz.

### **Yöntemin Avantaj ve dezavantajları**

- Yapımı hızlı ve göreceli olarak kolaydır.
- Daha seçimli ve detaylı değerlendirme için daha fazla sayıda örneğin test edilmesinde kullanılabilir.
- Örneğin pH 3,5'e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> titrasyonu asit-baz hesaplamalarındaki fazla HCl eklenen diğer nötürleştirme kapasitesi testlerinden daha gerçekçi bir tahmin verebilir.
- Asit üretme ve nötürleştirme reaksiyonlarının hızları ve derecesi belirlenemez.
- Yöntem örneğin uzun süreli asidik sularla teması durumunda nötürleştirebileceği pH değerini göstermez.
- Diğer asit-baz hesaplamalarından daha fazla zaman alır ve masraflıdır.

### 3.3.5. NAG Testi

Tek eklemeli Net Asit Üretimi testi yapılmıştır ([http://mendem.org/wpcontent/uploads/1.20.1\\_PredictionManual.pdf](http://mendem.org/wpcontent/uploads/1.20.1_PredictionManual.pdf)).

#### Malzeme ve Ekipmanlar

- Sodyum hidroksit (NaOH): 0,1 veya 0,5 N
- Hidrojen peroksit (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>): % 30 analitik saflıkta H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> çözeltisi 1:1 oranında saf su ile seyreltilerek % 15 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> çözeltisi hazırlanır. Çözelti pH'ı 4,5 – 6,0 aralığında olmalıdır, eğer değil ise pH 4.5 oluncaya kadar seyreltik NaOH çözeltisi eklenmelidir.

#### Yöntem

- 2,5 g örnek tartılır ve 500 ml hacimli bir beher içerisine aktarılır. Üzerine 250 ml % 15 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> çözeltisi eklenir.
- Beherin üzeri bir saat camı ile kapatılır ve çeker ocak içerisine bırakılır.
- Beher içerisinde kabarcıklanma gözlenir ve kabarcıklanmanın bitmesi için örnek bir gece (yaklaşık 12 saat) bekletilir.
- Reaksiyon tamamlandıktan sonra beher ısıtıcı üzerine bırakılır. Karıştırılarak kaynama noktasına yaklaşıncaya kadar ısıtılır ve kabarcıklanma bitinceye kadar ısıtma devam ettirilir (yaklaşık 2 saat). Sonra saf su eklenerek toplam hacim 250 ml'ye tamamlanır.
- Beher ısıtıcı üzerinden alınarak oda sıcaklığına düşene kadar soğutulur.
- Hacimde azalma olmuşsa beherin kenarlarına yapışan katı taneleri ortama aktaracak şekilde deiyonize su eklenir ve hacim 250 ml'de sabit tutulur.
- Çözeltinin pH ve EC değerleri ölçülüp kayıt edilir. Bu değer NAG değeri olarak kayıt edilir.
- Örnek filtre edilir ve filtre suyu titrasyon için alınır (bazı kaynaklarda filtrasyon yapılmaz sonraki işlemler süspansiyonla yapılır).
- Filtre suyu 0,1 N NaOH kullanılarak ve karıştırma yapılarak önce pH 4,5'e sonra 7,0'ye titre edilir. pH 4,5'e kadar yapılan titrasyon Fe, Al ve daha çok hidrojen iyonlarından (sülfürik asit) dolaydır. pH 4,5 ile 7,0 arası titrasyon ise bozunmamış hidroksit ve hidroksit olarak çökelebilen Cu ve Zn metalik iyonlardan dolaydır.

#### Sonuçların Yorumlanması

- Karışımın pH'ı 4,5'den büyük ise örnek asit üretme potansiyeline sahip değildir.
- Karışımın pH'ı 4,5'den küçük ise örnek asit üretme potansiyeline sahiptir.
- Stewart ve diğ. (2003), pirit, pirotit, arsenopirit ve kalkopirit'in NAG testlerinin pH < 4,5 çıktığını göstermiştir. Sfalerit, galen, bornit, kalkozit ve kovelin'in ise bakır, kurşun ve

çinkonun pH < 4,5 koşullarında hidroliz olmadıklarından NAG testlerinin pH > 4,5 çıktığını göstermiştir.

### 3.4 Sabit Kaplarda Yapılan Statik Testler

Yaygın uygulanan statik AMD testleri cevher içerisindeki asiti üreten ve nötürleştiren minerallerin reaksiyon hızları arasındaki farkları dikkate almadan sonuçların elde edildiği testlerdir (Anıl, 2014). Sulu cevher atıklarının uzun süre su ve hava ile temas etmesi sonucunda suyun özellikleri zamanla değişmektedir. AMD'nin sulara etkisini belirlemek için akarsulardan, sızıntılardan veya havuzlardan sıvı örnekler alınarak farklı analizler yapılmaktadır (Skousen ve Jacobs, 2014). Ortamın pH'ı, elektriksel iletkenliği, çözünen oksijen miktarı, indirgemeyükseltgeme (redox) potansiyeli, tuzluluk, toplam çözünen katı (TDS) ve bulanıklık en önemli analizlerdir (Skousen ve Jacobs, 2014). Büyük miktarlarda kaya dolgusu ve beton gerektiren baraj gövdesi gibi büyük yapılarda sülfürlü kayalar bulunabildiğinden sülfürlü minerallerin agrega/su karışımlarına etkisi incelenmiştir (Goto ve diğ., 2016).

Bu tür çalışmalar atık havuzlarındaki sülfürlü atıkların davranışını gözlemlemek açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada, atık havuzlarına benzetmek amacıyla 500 g katı numune 1000 ml saf su ile karıştırılarak 2 L hacimli plastik kaplara konulmuştur. Atıkların ve suyun laboratuvar koşullarında hızlıca buharlaşmasını engellemek, ancak hava ile temaslarını kesmemek için kapların kapaklarına sistematik olarak küçük (~3 mm çapında) delikler açılmıştır (Şekil 3.5). Kapların yerleri deney süresince laboratuvar tezgâhı üzerinde hep sabit tutulmuş ve hiç karıştırma yapılmamıştır. Ayrıca, pirit mineralinin numune üzerinde etkisini incelemek için atıklar içerisinde belli ağırlık oranlarında (yüzde) pirit eklenmiştir. Deneylerin tekrarlanabilirliklerini görmek için her örnekten iki adet hazırlanmış ve testler paralel yürütülmüştür. Hazırlanan örnekler ve örnek kodları Çizelge 3.3'de sunulmuştur.

**Çizelge 3.3:** Plastik kaplarda hazırlanan statik test örnekleri (1000 ml saf su içerisinde, iri pirit).

| Örnek kodu     | Katı                      | Açıklama   |
|----------------|---------------------------|------------|
| 500-1 ve 500-2 | 500 g atık                | % 0 pirit  |
| 475-1 ve 475-2 | 475 g atık + 25 g pirit   | % 5 pirit  |
| 450-1 ve 450-2 | 450 g atık + 50 g pirit   | % 10 pirit |
| 400-1 ve 400-2 | 400 g atık ve 100 g pirit | % 20 pirit |

Bu aşamada yapılan analiz ve testleri üç gruba ayırmak mümkündür.

- 1. pH ve elektriksel İletkenlik ölçümleri:** Hazırlandıktan 24 saatten sonra haftada bir günden az olmamak üzere düzenli aralıklarla pülpün pH'ı ve elektriksel iletkenliği ölçülmüştür (Şekil 3.6). Ölçümler hep pülpün merkezi yerinde yapılmış ve pülpde ölçüm için yeterli miktarda sıvı kalmayınca kadar devam etmiştir.
- 2. Metal iyon derişimi:** Su içerisindeki bazı metal iyonlarının derişimlerinin zamanla değişiminin belirlenmesi için pülpden 10 ml sıvı örnek alınmıştır. İlk 10 ml sıvı örneği pülp hazırlandıktan 24 saat sonra alınmış ve örnek alımı 2 haftada bir yapılmıştır. Plastik şırıngalarla alınan su örnekleri AAS analizlerinden önce 45 µm gözenekli şırıngaya uyumlu disk filtrelerle 20 ml hacimli cam tüpler içerisine süzölmüştür (Şekil 3.7). AAS analizi yapılanaya kadar tüplerin ağızları kapalı tutulmuştur. Örnek alma işlemleri pülpde yeterli miktarda sıvı kalmayınca kadar devam etmiştir.
- 3. Katıların karakterizasyonu:** Kaplardaki ölçümler tamamlandıktan sonra kalan örnekler kurutulmuş ve kuru numune üzerinde bazı analizler yapılmıştır. Ham numune ile kullanılmış numunelerin özellikleri karşılaştırılarak katı özelliklerindeki değişimler belirlenmiştir. Statik deneylerden alınan sonuçlar incelenmiş ve Çizelge 3.4'de verilen örneklerin deneylere ilave edilmesi kararlaştırılmıştır. Öğütölmüş piritin yüzey alanının artırılarak reaksiyona girebileceği düşünölmüştür. Çizelge 3.4'te görölen her örnekten iki adet hazırlanmış ve testler paralel yürütölmüştür.

**Çizelge 3.4:**Plastik kaplarda hazırlanan statik test örnekleri (1000 ml saf su içerisinde, ince pirit)

| Numune kodu    | Katı                      | Açıklama   |
|----------------|---------------------------|------------|
| 500-1 ve 500-2 | 500 g atık                | % 0 pirit  |
| 400-1 ve 400-2 | 400 g atık ve 100 g pirit | % 20 pirit |



**Şekil 3.5:** Testlere hazırlanmış örnekler.



**Şekil 3.6:** Karışımların pH ve elektriksel iletkenlik ölçümleri.





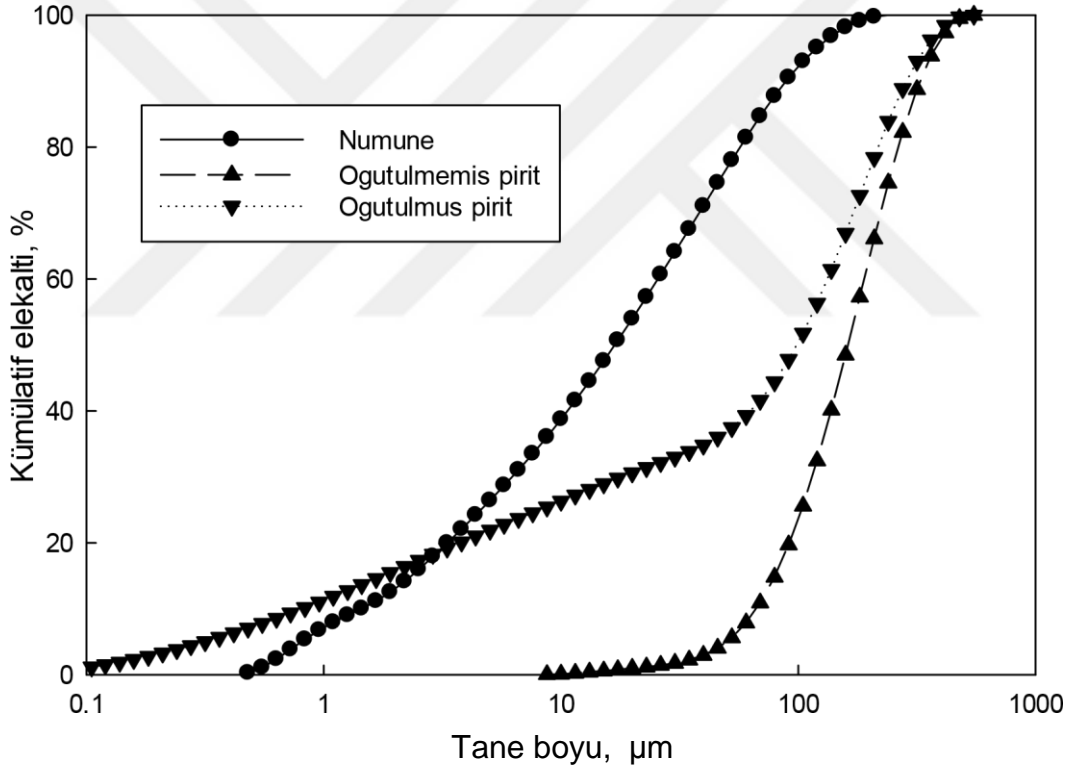
Şekil 3.7: Kaplardan sıvı örneklerin alınması ve süzülerek AAS analizlerine hazırlanması.



## 4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1 Malzemelerin Karakterizasyonu

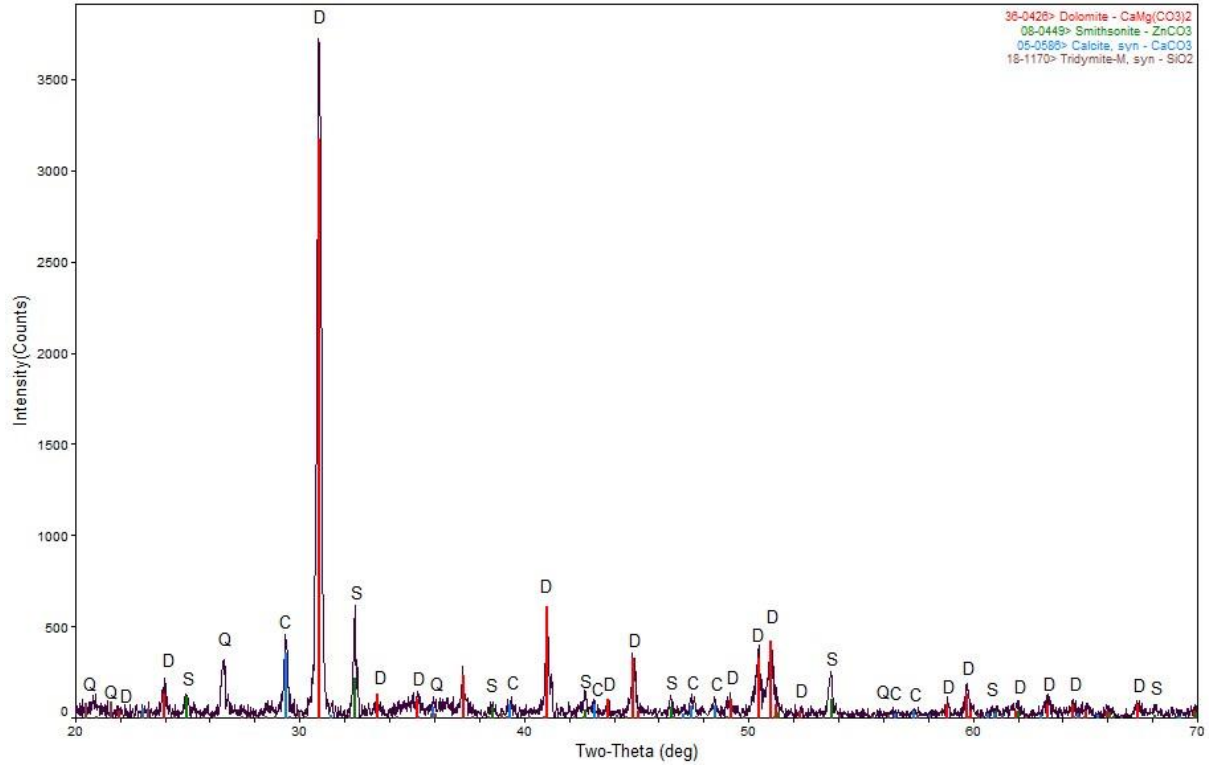
Tane boyu dağılımı cevherlerin AMD potansiyeline etki eden önemli parametrelerden biridir. Tane boyu küçüldükçe özgül yüzey alanı artacağından numunelerin su ve hava ile reaksiyonları artarken AMD oluşturma hızları da artacaktır (Ergüler ve Ergüler, 2015). Atık numunenin ve piritlerin tane boyları dağılımları ölçülmüş ve sonuçlar Şekil 4.1’de sunulmuştur. Numunenin, öğütülmemiş ve öğütülmüş piritin ortalama tane boylarının yaklaşık 20, 162 ve 105  $\mu\text{m}$  olduğu bulunmuştur. Numunenin oldukça ince tane boyuna sahip olduğu ve sadece tane boyu açısından bakıldığında numunenin hızlı AMD oluşturma potansiyeline sahip olacağı düşünülmektedir.



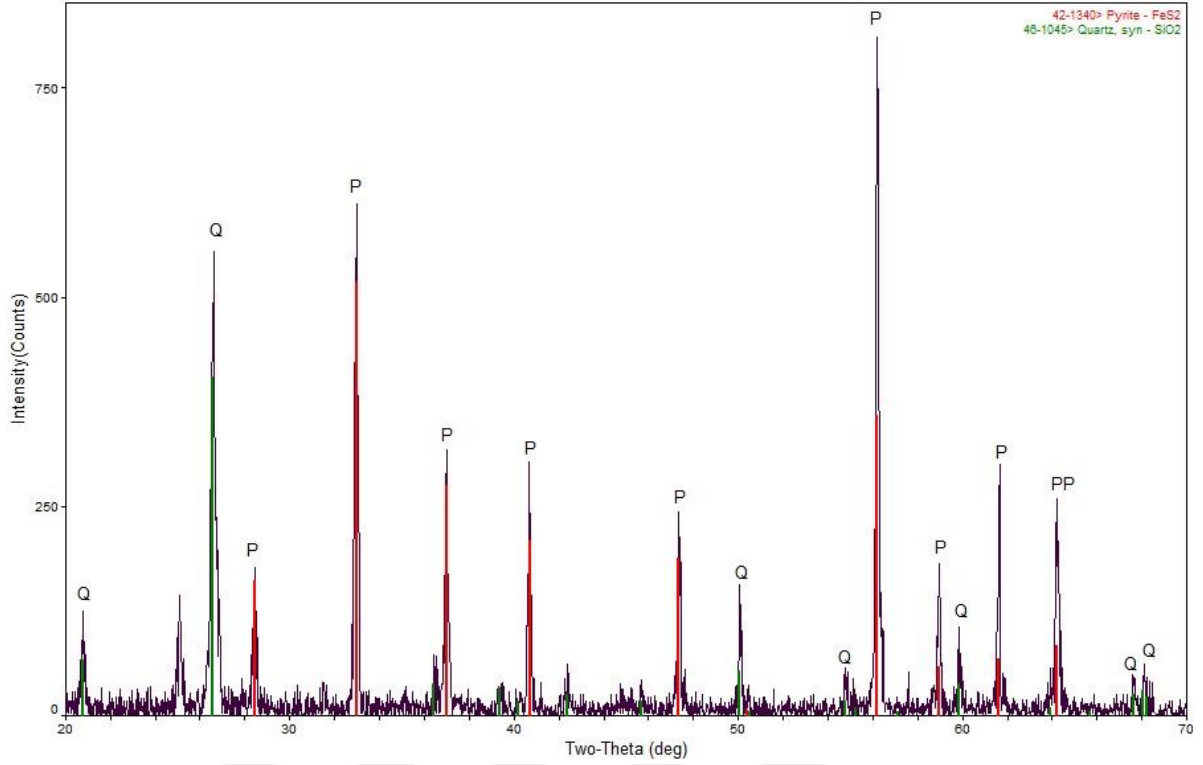
Şekil 4.1: Numune ve piritlerin tane boyu dağılımları.(Numune: Ham atık)

Numunenin mineral içeriğini belirlemek için XRD analizleri yapılmış ve sonuçlar Şekil 4.2’de sunulmuştur. Numune içerisinde genellikle dolomit, kalsit, kuvars ve simitsonit gibi minerallerinin bulunduğu ve numune içeriğinin ağırlıklı olarak karbonat minerallerinden oluştuğu anlaşılmaktadır. Ana pikler gözönüne alındığında en yüksek AMD oluşturma potansiyeline sahip olan pirit mineraline numune içerisinde rastlanılmamıştır.

Saflaştırılmış piritin XRD analizinde ise pirit ile beraber kuvars pikleri görülmektedir (Şekil 4.3). Ana pikler incelendiğinde pirit örneğinin tamamen saf olmadığı ve içerisinde kuvars bulunduğu görülmektedir.



**Şekil 4.2:** Numunenin XRD analizi(S: Smitsonit, D: Dolomit, Q: Kuvars)



**Şekil 4.3:** Piritin XRD analizi(P: Pirit, Q: Kuvars)

Numune ve pirit örneklerinin elementel analizleri yapılmış ve sonuçlar Çizelge 4.1’de sunulmuştur. Numune içerisinde sadece % 0,149 sülfür bulunurken saflaştırılmış pirit içerisinde % 47,49 sülfür bulunmaktadır. Diğer taraftan numune % 8,668 karbon içerirken, saflaştırılmış piritin karbon içermediği görülmektedir. Sonuçlar, XRD sonuçları ile uyumlu olarak, numunenin karbonat mineralleri açısından zengin olduğunu göstermiştir. Saflaştırılmış piritteki sülfürün sadece piritten geldiği düşünülürse saflaştırılmış pirit örneğinin % 88,75 pirit içerdiği görülmektedir. Ayrıca, Çevkur Ltd. firmasının titrasyon yöntemiyle yaptığı bakır analizlerinde numunenin ve piritin bakır içermediği (veya tayin sınırlarının altında kaldığı) anlaşılmıştır. Sonuçlara göre saflaştırılmış pirit numunesinde safsızlık olarak kuvars ile beraber bir miktar (% 11 civarında) diğer minerallerin bulunabileceği değerlendirilmiştir.

Ayrıca, numune içerisindeki sülfür formlarını belirlemek için sülfat sülfür analizi yapılmış ve numunenin % 0,134 sülfat sülfür içerdiği görülmüştür. Toplam sülfür içeriğinin % 0,149 olduğu düşünüldüğünde sülfat kükürtün piritik kükürttten daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Bu analizlerin XRD ve elementel analiz sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmektedir.

**Çizelge 4.1:** Numunenin ve piritin elementel analizleri

| Malzeme | % C   | % H   | % N | % S   |
|---------|-------|-------|-----|-------|
| Numune  | 8,668 | 0,119 | -   | 0,149 |
| Pirit   | -     | -     | -   | 47,49 |

AMD oluşması durumunda numune içerisindeki elementlerin ve özellikle ağır metallerin asidik sulara geçtiği ve suyun kalitesini düşürdüğü bilindiğinden numune içeriğinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla yaptırılan XRF ve ICP-ES analizleri sırasıyla Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3’de verilmiştir. XRF sonuçları numunenin CaO (% 20,85), MgO (% 9,63) ve SiO<sub>2</sub> (% 12,84) içeriklerinin yüksek olduğunu göstermiştir. Numunenin kızdırma kaybı (LOI) % 31,9 olup oldukça yüksektir. Kızdırma kaybının esasen yüksek sıcaklıkta karbonatların bozulmasından kaynaklandığı gözönüne alınırsa numunenin karbonatlarca (dolomit, kalsit, vb.) zengin olduğu anlaşılmaktadır. Bu açıdan XRF analizi sonuçlarının XRD analizi ile uyumlu olduğu görülmektedir. Numunede % 4,63 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bulunması demirin genellikle oksit (veya karbonat) formlarında olduğunu göstermektedir. Ayrıca, % 4,91 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bulunması numune içerisinde önemli miktarda kil minerali olduğunu göstermektedir. Numunede Pb (% 0,84) içeriğinin düşük ancak Zn içeriğinin (% 7,70) ise yüksek olduğu görülmektedir. Flotasyon tesisinden gelen bu numuneler üzerinde Pb flotasyonu yapıldığı için Pb içerikleri düşük, ancak Zn flotasyonu yapılmadığından Zn içerikleri yüksektir. Titrasyon yöntemiyle uyumlu olarak numunede Cu tespit edilememiştir (veya cihazın tayin sınırının altında kalmıştır).

ICP-ES sonuçlarının XRF sonuçlarıyla çok uyumlu olduğu ve numunenin karmaşık yapıda olduğu görülmektedir. Kızdırma kaybının % 31,90 olması numunelerde önemli miktarda karbonat olduğuna işaret etmektedir. Ayrıca, numune içerisinde önemli miktarda Zn, Pb, Al, Fe, Cr, Co, Cd, Ni, gibi ağır metallerin bulunduğu tespit edilmiştir. AMD oluşması durumunda bu metallerin suyun kalitesine olumsuz etki etmeleri beklenir. XRF analizlerinde cihazın tayin (detection) sınırının altında kalan Cu (% 0,01) elementine ve ICP-EOS cihazının tayin sınırının altında kalan As (% 0,02), Sb (%0,01), Mo (% 0,001), W (% 0,01) ve Bi (% 0,01) elementlerine çizelgelerde yer verilmemiştir.

**Çizelge 4.2:** Numunenin XRF analizi

| Pb, %               | Zn, %  | SiO <sub>2</sub> , % | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , % | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , % | CaO, % | MgO, % |
|---------------------|--------|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------|--------|
| 0,84                | 7,70   | 12,84                | 4,91                               | 4,63                               | 20,85  | 9,63   |
| K <sub>2</sub> O, % | MnO, % | TiO <sub>2</sub> , % | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %  | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , % | Ba, %  | LOI, % |
| 1,52                | 0,31   | 0,59                 | 0,19                               | 0,01                               | 0,60   | 31,90  |

**Çizelge 4.3:** Numunenin ICP-OES analizi

| Pb, % | Zn, % | Fe, % | Ca, % | Mg, % | Al, % | Mn, % | Ni, % |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,84  | 7,80  | 3,23  | 14,85 | 5,61  | 2,63  | 0,24  | 0,003 |
| Na, % | Cu, % | Cr, % | Co, % | P, %  | Cd, % | K, %  | S, %  |
| 0,16  | 0,003 | 0,008 | 0,001 | 0,08  | 0,024 | 1,34  | 0,46  |

Numunenin karakterizasyonu için yapılan analizler (Elementel, XRD, XRF ve ICP-ES) numunenin pirit ve sülfür içeriğinin düşük ancak karbonatça zengin olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar cevherlerin AMD oluşturma potansiyelinin düşük olduğunu göstermektedir. Statik AMD test ve deneylerinde katkı olarak kullanılacak pirit numunesinin karakterizasyonu yapılmış ve piritin önemli oranda saflaştırıldığı görülmüştür. AMD oluşturma potansiyeli en yüksek mineral olan pirit mineralinin atık numunenin AMD oluşturma potansiyeline etki etmesi beklenebilir.

## 4.2 Statik Testler

Statik testler kapsamında, numunenin çamur pH'ı, Standart ABH, Değiştirilmiş ABH, NAG ve BC Araştırma başlangıç testleri yapılmıştır.

### 4.2.1 Çamur pH'ı Testi

Numunenin çamur pH'ını belirlemek amacıyla 10 g numune tartılmış ve yöntemler bölümünde belirtildiği gibi ölçüm yapılmıştır. Cevher çamurunun ölçülebilir durumda pH 8,01 olarak okunmuş ve saf su ilave edildikçe çamur pH'ı yavaşça artış göstermiştir. Çamur pH'ı

literatürde farklı şekillerde yorumlanmaktadır. Gül (2014) ve Miller ve Murray (1988) çamur pH'nın 4'ün altında olması durumunda kayaçların asit üretebileceklerini belirtmiştir.

Morin ve Hutt (1997) ise çamur pH'nın 6'dan daha düşük olması halinde kayaçların asit üretebileceklerini belirtmişlerdir.

Saflaştırılmış pirit numunesinin çamur pH'ı testi aynı yöntemle yapılmış, pH 3,37 olarak okunmuş ve saf su ilave edildikçe çamur pH'ı hafif artış görülmüştür. Beklenildiği gibi pirit çamurunun pH'ı oldukça düşük çıkmıştır. Pirit numunesinin AMD oluşturma potansiyelinin oldukça yüksek olduğu ve bakteri aktivitesine açık olduğu görülmektedir. Ağırlıkça eşit miktarda hazırlanan pirit ve atık numunesi karışımının da çamur pH'ı aynı yöntemle ölçülmüş ve pH 6,25 okunmuştur. Beklenildiği gibi karışımın çamur pH'ı pirit ve atık numune arasında çıkmıştır. Bu test sonucuna göre karışımın AMD oluşturma potansiyeline sahip olmadığı ve atığın asidik özellik gösteren piriti önemli ölçüde nötürleştirebildiği söylenebilir.

#### 4.2.2 Standart ve Değiştirilmiş ABH Sonuçları

ABH hesaplamaları kapsamında numunenin APP ve NP testleri yapılmış ve sonra NNP hesaplanmıştır. Eşitlik 3.1 kullanılarak numunenin toplam kükürt içeriğinden Eşitlik 3.2 kullanılarak APP hesaplanmış ve 4,66 kg CaCO<sub>3</sub>/ton bulunmuştur. Bu sonuç, cevherin asit üretiminin düşük olduğunu ve cevherin bir tonunu nötürleştirmek için sadece 4,66 kg CaCO<sub>3</sub>'ün yeterli olduğunu göstermektedir.

NNP hesaplamaları için öncelikle yöntemler kısmında belirtildiği gibi fişirdama testi yapılmıştır (Şanlıyüksel Yücel ve İleri, 2020). 0,5 g numune üzerine 2 damla % 25 HCl damlatılması sonucunda güçlü fişirdama sesi duyulmuştur. Çizelge 3.1 ile uyumlu olarak 2 g örnek için 80 ml 0,5 M HCl çözeltisi kullanılarak test devam ettirilmiştir. pH 7 ye ulaşmak için 28,7 ml 0,5 M NaOH kullanılmış ve hesaplamalar Eşitlik 3.3'e göre yapılmıştır. NNP sonucu numunenin nötürleştirme potansiyelinin 641,25 kg CaCO<sub>3</sub>/ton olduğunu ve oldukça yüksek olduğunu göstermiştir. NNP >> 10 olması nedeniyle cevherin net asit üretme potansiyelinin olmadığı sonucuna varılmıştır. Bazı araştırmacılar (US-EPA, 1994; ) NNP yerine NP/APP hesaplamasının daha güvenilir sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. NP/APP oranının 137,61 (ve dolayısıyla NP/APP >> 3) olması nedeniyle cevherin net asit üretmediği sonucu vurgulanmıştır.

$$APP = \text{Toplam sülfür (\%)} \times 31,25 = 0,149 \times 31,25 = 4,66 \text{ kg CaCO}_3/\text{ton}$$

$$NP = \frac{50[aV_{HCl} - bV_{NaOH}]}{w} = \frac{50[0,5 \times 80 - 0,5 \times 28,7]}{2} = 641,25$$

$$NNP = NP - APP = 648,75 - 4,66 = 636,59 \text{ kg CaCO}_3/\text{ton}$$

$$NP/APP = 641,25/4,66 = 137,61$$

Değiştirilmiş ABH testi yöntemler bölümünde açıklandığı gibi yapılmıştır. Numunenin fıçırdama sesi yüksek olduğundan 2 g numune için başlangıçta 3 ml HCl çözeltisi kullanılmış ve 2 saat sonra 2 ml daha HCl çözeltisi ilave edilmiştir. Karışımı pH 2-2,5 aralığına düşürmek için toplam 15,3 ml 1 N HCl çözeltisi ve sonra pH 8,3'e çıkarmak için 11,2 ml, 0,5 N NaOH çözeltisi kullanılmıştır. Numunenin değiştirilmiş NP potansiyeli Eşitlik 3.3'e göre yapılmış ve 242,5 kg CaCO<sub>3</sub>/ton bulunmuştur. Numunenin APP değeri ise sülfür sülfür yüzdesi kullanılarak Eşitlik 3.2'ye göre hesaplanmış ve 0,469 kg CaCO<sub>3</sub>/ton bulunmuştur. NNP ve NP/APP oranı sırasıyla 242,031 kg CaCO<sub>3</sub>/ton ve 517,0 hesaplanmıştır. Standart NNP hesaplamasında olduğu gibi değiştirilmiş NNP >> 10 olması nedeniyle cevherin net asit üretme potansiyelinin olmadığı sonucuna varılmıştır. Standart NNP hesaplamasında olduğu gibi değiştirilmiş NP/NNP >> 3 olması aynı kanıyı oluşturmuştur.

Standart ABH ve değiştirilmiş ABH yöntemleri karşılaştırılınca rakam ve sonuçların aynı olmadığı görülmektedir. Standart NNP değeri değiştirilmiş NNP değerinden daha yüksek ancak standart NP/APP değerleri değiştirilmiş NP/APP değerinden daha düşük çıkmıştır. Farklılığın ana nedeni toplam kükürtün veya sadece piritik kükürtün dikkate alınmasıdır. Değiştirilmiş APP hesaplamasında sadece piritik sülfür dikkate alındığından numunenin asit üretim potansiyeli yaklaşık 10 kat daha düşük çıkmıştır. Sonuç olarak her iki hesaplama yöntemi numunenin asit üretme potansiyelinin düşük ancak nütürleştirme potansiyelinin yüksek olduğunu göstermiştir.

$$\text{Değiştirilmiş APP} = \text{Sülfür sülfür (\%)} \times 31,25 = 0,015 \times 31,25 = 0,469 \text{ kg CaCO}_3/\text{ton}$$

$$\text{Değiştirilmiş NP} = \frac{50 \times [(1 \times 15,3) - (0,5 \times 11,2)]}{2} = 242,5 \text{ kg CaCO}_3/\text{ton}$$

$$\text{Değiştirilmiş NNP} = 102,25 - 0,469 = 242,031 \text{ kg CaCO}_3/\text{ton}$$

$$\text{Değiştirilmiş NP/APP} = 242,5/0,469 = 517,0$$

#### 4.2.3 BC Araştırma Başlangıç Testi Sonuçları

BC araştırma başlangıç testi 10 g numune kullanılarak deneysel yöntemler bölümünde belirtildiği şekilde yapılmıştır. Pülp içerisine mikropipet yardımıyla H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisi ilavesi yapılmış ve pH 3,5'e sabitlenene kadar (4 saat sabit kalana kadar) ekleme devam etmiştir. Toplam 76,1 ml H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ilave edilerek hesaplamalar yapılmıştır. Bir ton cevherin tükettiği H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> miktarı Eşitlik 3.4'e göre 372,89 kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> bulunmuştur. Bir ton cevherin asit üretim potansiyeli



ise Eşitlik 3.5'e göre hesaplanmış ve 4,56 kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> bulunmuştur. Cevherin asit tüketiminin asit üretiminden çok daha fazla olduğu görüldüğünden cevherin asit üretmediği sonucuna varılmıştır.

$$\frac{1N \text{ sülfürik asit miktarı (ml)} \times 0,049 \times 1000}{\text{Örnek miktarı (gr)}} = \frac{76,1 \text{ (ml)} \times 0,049 \times 1000}{10}$$

$$= 372,89 \frac{\text{kg H}_2\text{SO}_4}{\text{ton cevher}}$$

$$\text{Asit üretim potansiyeli} = 0,149 \times 30,625 = 4,56 \text{ kg H}_2\text{SO}_4/\text{ton cevher}$$

Lapakko (1994), BC Araştırma Başlangıç testinden farklı olarak son titrasyon pH değerini 3,5 yerine 6,0 almıştır (Gül, 2014). Lapakko Testi adıyla da bilinen bu test ile, suyun drenaj kalitesi dikkate alınarak cevherin orijinal pH'ı ile pH 6 aralığında nötürleştirebildiği asit miktarı elde edilir. Numunenin pH 6'ya ulaşmak için 6,8 ml asit tükettiği görülmüş ve 1 ton cevherin asit tüketim miktarı 23,32 kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> hesaplanmıştır. Test sonucu, bu koşullarda cevherin asit tüketim potansiyelinin asit üretim potansiyelinden daha fazla olduğunu göstermiştir.

$$\frac{1N \text{ sülfürik asit miktarı (ml)} \times 0,049 \times 1000}{\text{Örnek miktarı (gr)}} = \frac{5,9 \text{ (ml)} \times 0,049 \times 1000}{10}$$

$$= 28,91 \text{ kg} \frac{\text{H}_2\text{SO}_4}{\text{ton}} \text{cevher}$$

#### 4.2.4 NAG Testi Sonuçları

NAG testi 2,5 g numune kullanılarak deneysel yöntemler bölümünde belirtildiği şekilde yapılmıştır. Numunenin H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ile reaksiyonu tamamlandıktan sonra pülp pH'ı 8,77 ve elektriksel iletkenliği 378,04 µS/cm olarak ölçülmüştür. Bu değerler pH 4,5 veya 7,0 değerlerinin üzerinde olduğu için pülpün NaOH titrasyonuna gerek kalmamıştır. Pülp süzüldükten sonra süzüntüde tekrar ölçümler yapılmış ve pH 7,58, elektriksel iletkenlik 267,11 µS/cm ölçülmüştür. Aynı nedenle pülp sıvısının NaOH titrasyonuna gerek kalmamıştır. Sonuçların daha iyi açıklanabilmesi için peroksit ilavesiz bir test yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Pülpün pH'ı 8,98 ve elektriksel iletkenliği 182,74 µS/cm, süzüntünün ise pH'ı 7,33 ve elektriksel iletkenliği 190,66 µS/cm ölçülmüştür.

NAG sonuçları numunenin net asit üretmediğini göstermektedir. Pirit, pirotit, arsenopirit ve kalkopirit minerallerinin pülp pH'ını 4,5'in altına, sfalerit, galen, bornit, kalkozit ve kovelin minerallerinin ise pülp pH'ını 4,5-7,0 arasına düşürebildikleri (Stewart, 2003) dikkate alınırsa numunenin bu mineralleri yeteri kadar içermedikleri veya önemli miktarda nötürleştirici

mineraller içerdiği anlaşılmaktadır. NAG testinin ABH testleriyle uyumlu sonuçlar verdiği görülmektedir.

### **4.3 Kaplarda Yapılan Statik Test Sonuçları**

Bu çalışmada, kaplarda yapılan testler atık havuzlarına benzetilerek hazırlanmıştır. Buharlaştırma ve sıvı örneği alımından dolayı pülpteki sıvı miktarı sürekli azaldığından ölçümler yaklaşık 17. haftada sonlandırılmıştır. Yöntemler bölümünde belirtildiği gibi her örnekten iki adet hazırlanmıştır. Genellikle ölçümlerin ortalamaları sonuç olarak sunulmuş ancak deneylerin tekrarlanabilirliklerini göstermek amacıyla bazı sonuçlar ayrı ayrı verilmiştir.

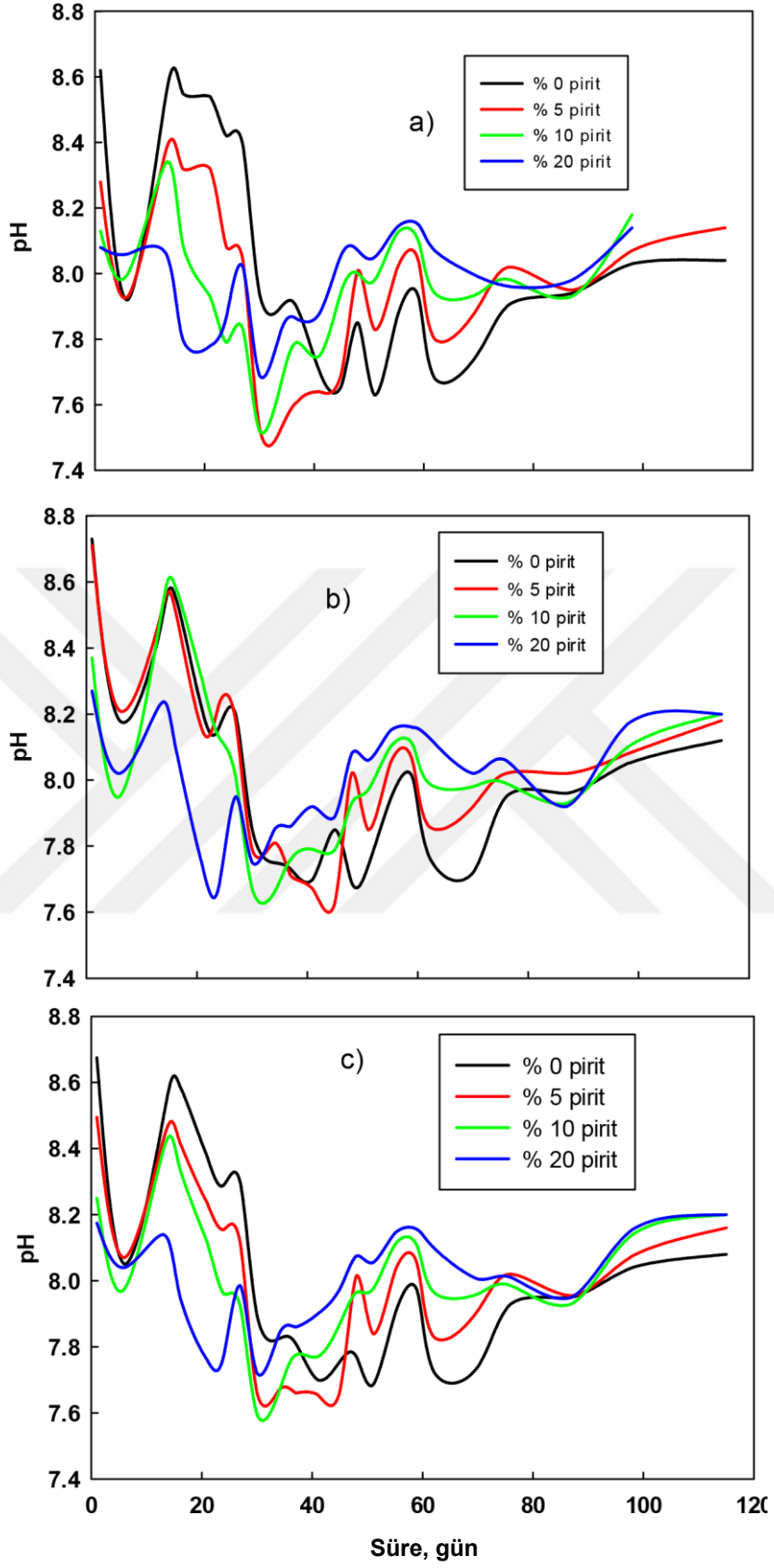
#### **4.3.1 pH ve Elektriksel İletkenlik Sonuçları**

Ortamın pH'ı, elektriksel iletkenliği ve ortamdaki çözülmüş iyon (metal ve sülfat iyonları vb) derişimi asidik maden sularının en önemli göstergelerinden biridir. pH'ın düşük olması asitlik nedeniyle drenaj suyunun kalitesini düşürdüğü gibi ortamda asit üreten bakterilerin yaşamasına, çoğalmasına ve dolayısıyla AMD şiddetinin artmasına neden olur. Bu nedenle ortamın pH değeri AMD çalışmaları kapsamında hep ölçülmektedir. Elektriksel iletkenlik ise sıvı içerisindeki iyonların derişimi ile ilgilidir ancak iletkenlik pek çok faktöre bağlı olduğundan tek başlarına suyun kalitesini göstermemektedir. Bununla beraber elektriksel iletkenlik ölçümleri ile ortamdaki olası değişiklikler gözlenebilmektedir.

Piritsiz ve ağırlıkça % 5, 10 ve 20 pirit içeren pülplerin zamanla ölçülen pH değerleri Şekil 4.4'de verilmiştir. Deneylerin tekrarlanabilir olduğunu göstermek için ikişerli hazırlanan örneklerin sonuçları Şekil 4.4a ve 4.4b'de, ortalama değerleri ise Şekil 4.4c'de sunulmuş ve aynı örneklerden benzer sonuçların alındığı görülmüştür. Sonuçlar pH'ın 8,6-7,6 arasında değiştiğini ancak düzenli bir değişimin olmadığını göstermektedir. Pirit içeren numunelerin başlangıç pH değerleri düşük iken zamanla pH değerlerinin piritsiz numunelere yaklaştığı ve yaklaşık olarak pH 8,1-8,2 aralığında sabitlendiği görülmektedir. Düzenli bir değişim olmaması numunelerin karmaşık yapıda olmasından yani içerisinde çok farklı minerallerin bulunmasındandır. Bilinen statik testler, asiti üreten ve nötrleştiren minerallerin birbirlerine göre çözünme hızları arasındaki farkları dikkate almadıklarından (Lapakko and Antonson, 2002; Yörükoğlu ve Karadeniz, 2003) uzun sürede elde edilen bu veriler cevheri oluşturan minerallerin tepkime veya bozunma hızlarında farklılık olduğunu ortaya koymaktadır. Karıştırmanın yapılmadığı ortamlarda farklı türdeki minerallerin hava ve su ile tepkime sürelerinin farklı olduğu ve denge durumuna ancak uzun sürelerde ulaşabilecekleri görülmektedir.

Goto vd (2016) su/agrega/pirit karışımını inceledikleri çalışmada farklı miktarlardaki piritin ortam pH'ına etkisini incelemiştir. Kesintisiz olarak kompresör ile ortama havanın verildiği koşullarda piritin olmadığı ortamın pH'ı 30 gün sonunda 8,2 olurken, ağırlıkça % 5 pirit ilavesi ortamın pH'ını 3,0'a düşürmüştür. Sonuçlar oksijenin veya havanın piritin oksidasyonunda çok önemli rol oynadığını göstermektedir.

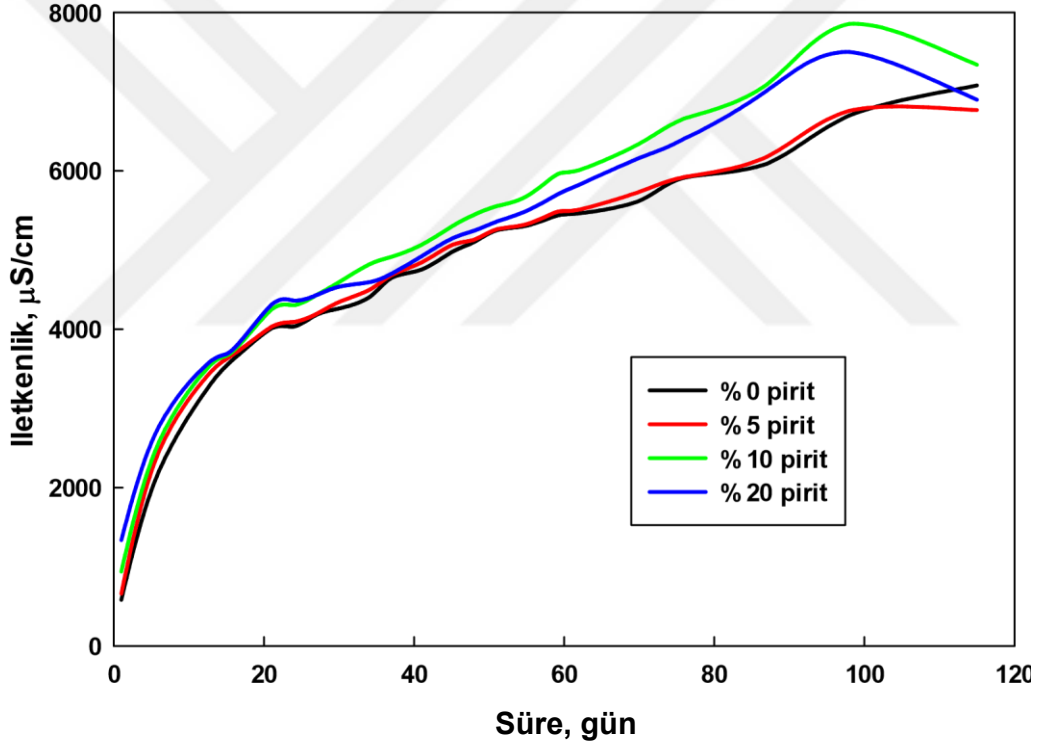




Şekil 4.4: Pülp pH'sının zamanla değişimi (a: birinci kaplar, b: ikinci kaplar ve c: ortalama)

Zamana karşı ölçülen elektriksel iletkenlik değerlerinin ortalaması Şekil 4.5’de verilmiştir. Sıvı içerisine geçen iyonların miktarı zamanla arttığından bütün numuneler için elektriksel iletkenliklerinin arttığı da görülmektedir. Artış hızı ilk üç haftada yüksek olmuş ve sonra artış yavaşlamıştır. Piritsiz ve % 5 pirit içeren numunelerden kısa veya uzun sürelerde yaklaşık aynı sonuçların alındığı görülmektedir. Numunelerin başlangıç değerleri birbirlerine çok yakın iken % 10 ve % 20 pirit ilaveli numunelerde iletkenlik biraz daha fazla olmuş ancak 14. haftadan sonra yavaşça düşmeye başlamıştır.

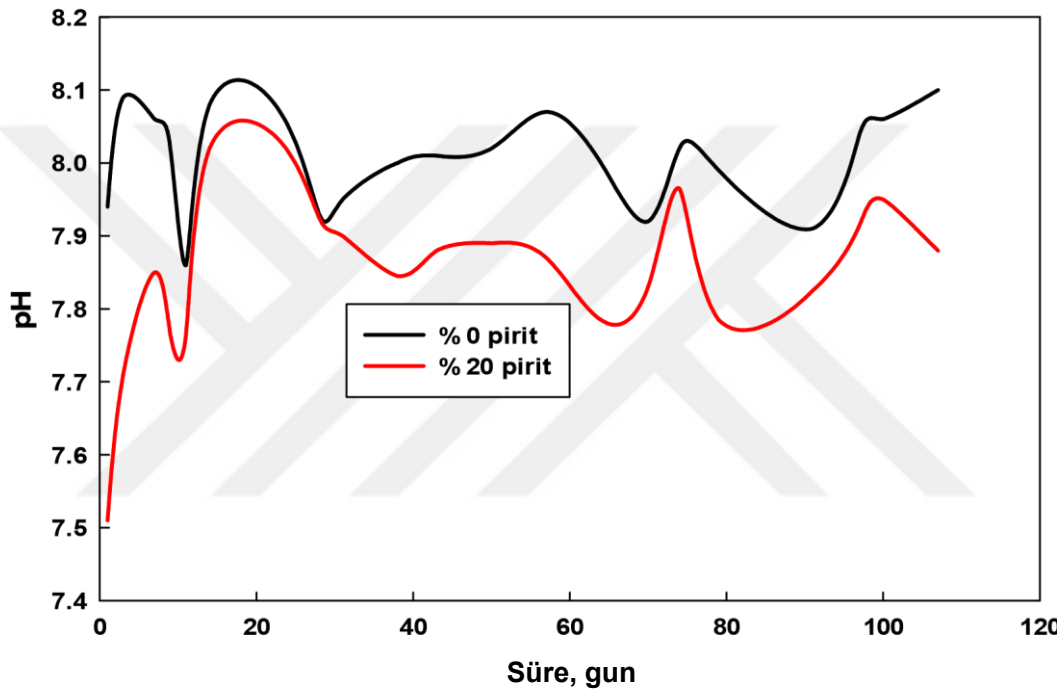
Goto ve diğ. (2016) su/agrega/pirit karışımını inceledikleri çalışmada farklı miktarlardaki piritin ortamın elektriksel iletkenliğine etkisini incelemiştirlerdir. Aynı koşullarda yapılan ölçümlerde ortamın elektriksel iletkenliğininin 20 gün boyunca sürekli arttığı sonra sabitlendiği görülmüştür. Ancak karışımda pirit miktarı arttıkça ortamın elektriksel iletkenliğindeki artış çok daha fazla olmuştur.



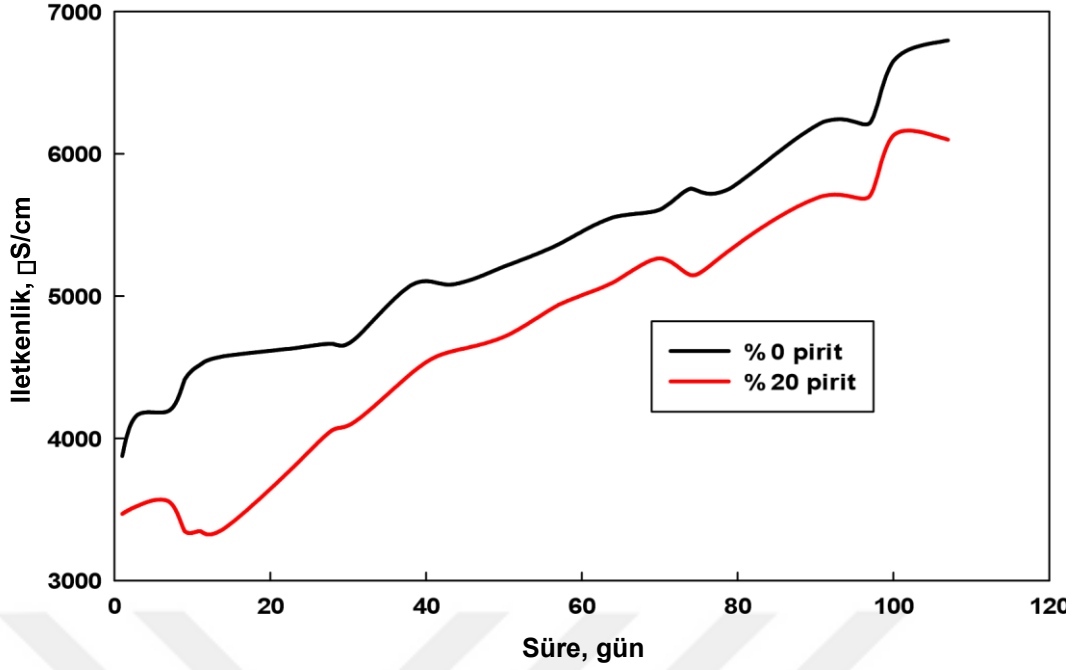
Şekil 4.5: Pülün elektriksel iletkenliğinin zamanla değişimi (ortalama değerler).

Kaplarda yapılan statik testlerin tekrarlanabilirliği ve öğütülmüş piritin etkisini görmek için katkısız ve ağırlıkça % 20 pirit katkılı ikişer numune daha hazırlanmıştır. Numunelerin hazırlama ve ölçümler aynı şekilde gerçekleştirilmiştir. Ortamın pH ve elektriksel iletkenlik değişimleri ortalama değerler olarak sırasıyla Şekil 4.6 ve 4.7’de verilmiştir.

Pirit içeren numunelerin pH değerlerinin piritlessiz numunelere göre biraz daha düşük kaldığı görülmektedir. Pirit katkısız örneğin pH'ının 7,9 ile 8,1 arasında, pirit katkılı örneğin ise 7,5 ile 8,0 arasında değişmiştir. Şekil 4.6 dikkatle incelendiğinde, 24 saat (bir gün) sonra yapılan ilk ölçüm hariç, iki örneğin pH farkının ancak 0,1-0,3 civarında kaldığı görülmektedir. Şekil 4.4 ve Şekil 4.6 karşılaştırıldığında genel olarak sonuçların tekrarlanabilir olduğunu ve piritin bu koşullarda pH değişimine fazla katkı yapmadığı anlaşılmaktadır. Şekil 4.7 incelendiğinde ise numunelerin elektriksel iletkenliğinin genel bir artış gösterdiği ancak katkısız numunenin elektriksel iletkenliğinin pirit katkılı numuneye göre biraz daha (200  $\mu$ S/cm civarında) yüksek olduğu görülür.



Şekil 4.6: Pülp pH'sının zamanla değişimi (ince pirit kullanılmıştır).

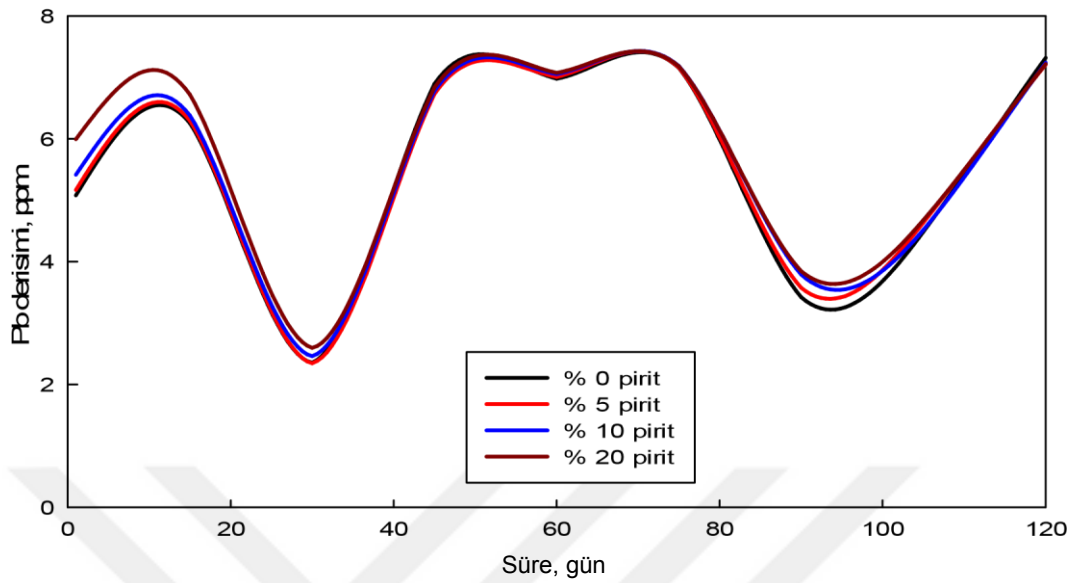


Şekil 4.7: Pülpün elektriksel iletkenliğinin zamanla değişimi (ince pirit kullanılmıştır).

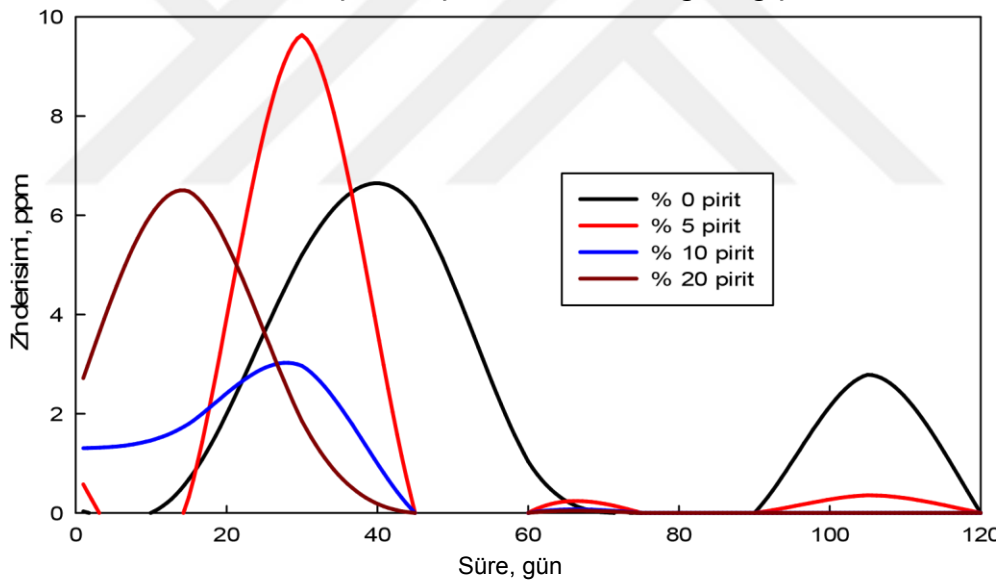
#### 4.3.2 Pülp Sıvısında Metal İyonları Derişiminin Zamanla Değişimi

Her pülp örneğinden ilk 24 saatten sonra düzenli aralıklarla 8 sıvı örneği alınmış ve sıvı örneklerde metal iyonlarının derişimlerinin zamanla değişimi incelenmiştir. Numune içerisinde bulunabilen ve AMD'ye katkı yapan önemli elementler olarak Pb, Zn, Fe, Al, Mn ve Mg analizleri yapılmıştır. Al derişimi cihazın belirleme (tayin) sınırının altında kaldığından hep sıfır olarak ölçülmüştür. Kurşun (Pb), çinko (Zn), demir (Fe), mangan (Mn) ve magneziyum (Mg) derişimlerinin ortalama değerleri sunulmuştur. Şekil 4.8-4.12'de görüldüğü gibi metallerin derişimlerinde zamana bağlı olarak önemli değişiklikler olmuştur. Ham atığın % 0,84'ünü temsil eden kurşunun su içerisindeki derişiminde önemli artma ve azalma olsa da derişimin 8 ppm'in altında kaldığı görülmektedir (Şekil 4.8). Pirit katkısının kurşun derişime belirgin bir katkısı olmamıştır. Numune içerisinde daha fazla bulunan (% 7,80) çinkonun derişiminde de zamana bağlı olarak önemli değişiklikler görülmüş ancak derişim 10 ppm'in altında kalmıştır (Şekil 4.9). Demir derişiminde zamana bağlı önemli bir derişim olmadığı ve derişimin 1,4 ppm'in altında kaldığı görülmektedir (Şekil 4.10). Fe içeriği % 3,23 olan numune içerisine pirit ilaveleri yapılmasına rağmen çözeltide demir oranını artmaması piritin mevcut koşullarda ve çalışılan sürede bozunmadığını göstermektedir. Kurşun ve çinko içeriklerine benzer şekilde mangan içeriğinde de zamana bağlı olarak düzenli bir derişme görülmemektedir (Şekil 4.11). Mn derişimi düşük olup 6 ppm'in altında kalmıştır. Diğer metallerin aksine magneziyum derişiminde ise zamanla hep artış görülmüştür (Şekil 4.12). Derişimdeki artış ilk üç hafta boyunca hızlı daha

sonra ise yavaş olmuş ve derişim 11 ppm'e kadar çıkmıştır. Magneziyumun genellikle dolomitten geldiği ve AMD oluşumunu engelleme yönünde katkı yapması beklenmektedir.

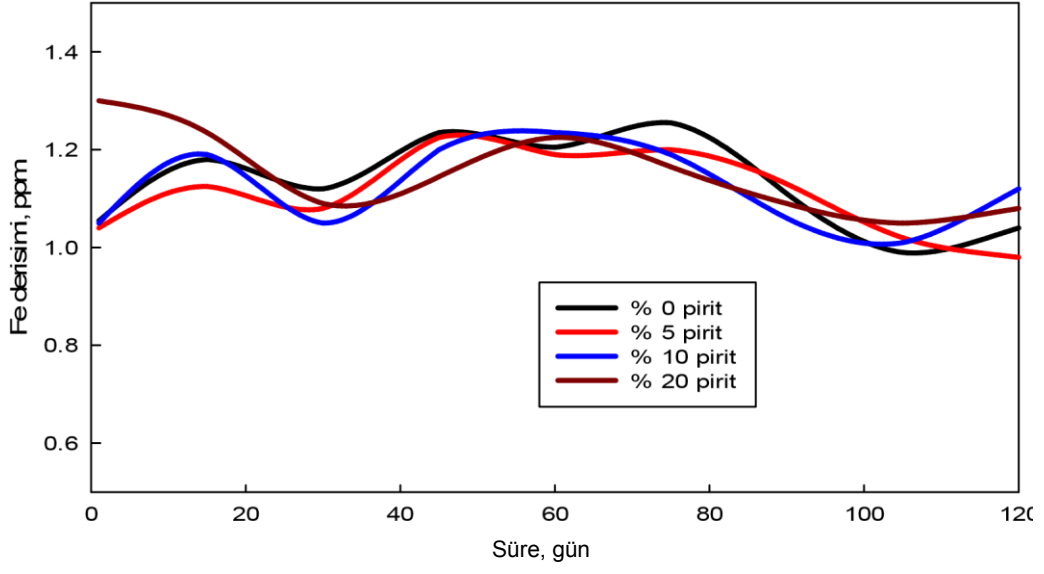


Şekil 4.8: Kurşun derişiminin zamana bağlı değişimi.

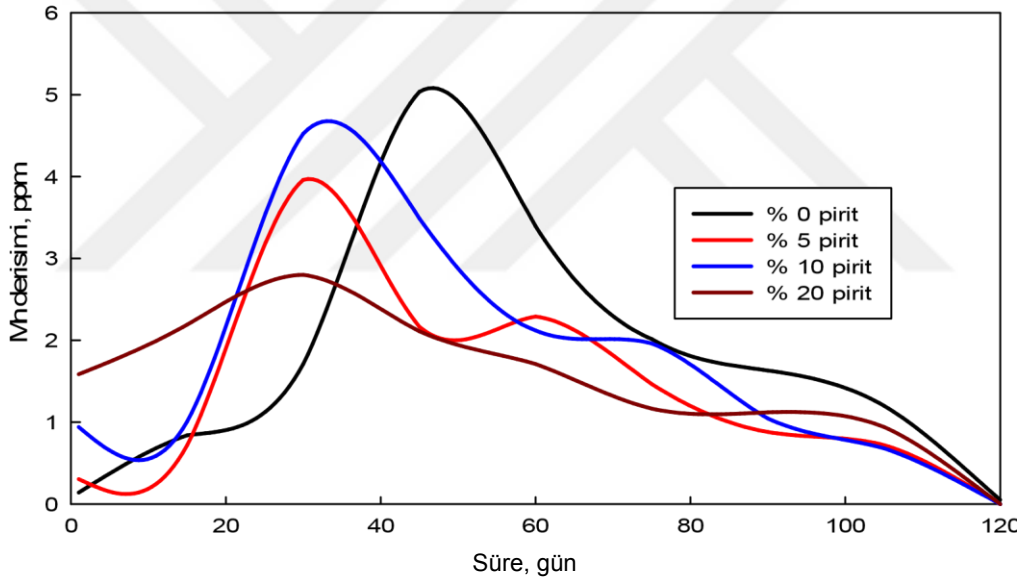


Şekil 4.9: Çinko derişiminin zamana bağlı değişimi.

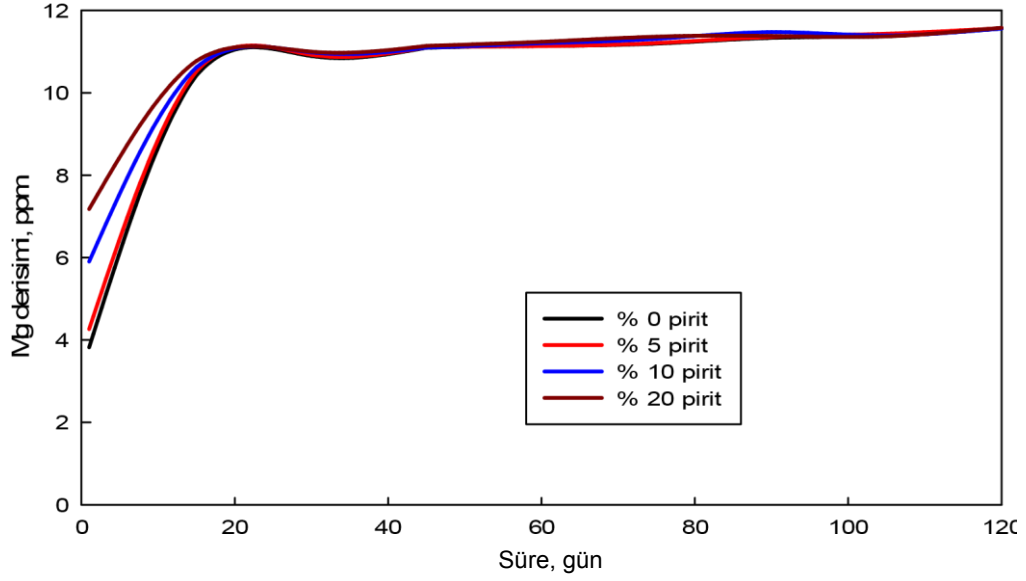




Şekil 4.10: Demir derişiminin zamana bağlı değişimi.



Şekil 4.11: Mangan derişiminin zamana bağlı değişimi.



**Şekil 4.12:** Magneziyum derişiminin zamana bağı değişimi.

Metal derişimlerdeki değişmelerin esas nedeninin minerallerin su içerisinde zamanla çözölmelerinden ve yine zamanla su içerisinde bulunan başka iyonlarla ( $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{OH}^-$  gibi) tepkimeye girip çökelmelerinden kaynaklandığı düşünölmektedir. Özellikle numune içerisinde bulunan dolomit ve kalsit gibi karbonatlı minerallerin su içerisinde sülfürlü ve silikatlı minerallere göre daha hızlı bozunması beklenmektedir. AMD oluşumuna en önemli katkıyı yapan pirit minerallerinin (Anıl, 2014) çalışılan ortam koşullarında ve sürede bozunarak AMD oluşumuna önemli bir katkı yapmadığı düşünölmektedir. Wels ve diğ. (2013) AMD oluşturma potansiyeline sahip atıklar üzerinde yaptıkları çalışmalarda, atık içerisinde hava (veya oksijen) dolaşımının piritin oksidasyonuna çok etki yaptığını ve AMD oluşumunu önemli artırdığı sonucuna varmışlardır. Moricz ve diğ. (2012) ortamda nötürleştirici minerallerin bulunması durumunda, bu minerallerin asitliği önlendikleri, metalik minerallerin oksitlenmesini yavaşlattıkları ve çöktürme ile ortamda metal iyonlarını azalttıklarını belirlemişlerdir. Sıvı örneklerdeki bazı metal iyon derişimlerinin düşük görülmesi ve analizlerin doğruluğunu test etmek nedenleriyle aynı sıvı örnekleri İnönü Üniversitesi, Kimya bölümünde bulunan bir AAS cihazı ile tekrar test edilmiştir. Yapılan Pb, Zn, Al, Fe, Mn ve Mg analizlerinde sıvı numunelerde yine Al içeriğine rastlanmamıştır. Diğer analiz sonuçları EK Şekil 1-5’de verilmiştir. Farklı AAS cihazlarından alınan metal derişimleri sonuçlarında farklılıklar tespit edilmiştir. IBTAM AAS analizlerinde olduğu gibi pirit içeren ve içermeyen numune sıvılarında düzenli bir değişim görülmemektedir. Bu analizlerde, Pb ve Fe derişimleri daha düşük, Mg derişimleri daha yüksek, Zn ve Mn derişimleri ise yakın çıkmıştır.

### 4.3.3 Katıların Karakterizasyonu

Sabit kaplarda test sonrasında kalan katı numunelerin Elementel, XRF, XRD ve ICP analizleri yapılmıştır. Statik testler sonrası numunenin C, H, N ve S içerikleri Çizelge 4.4’de verilmiştir. Test sonrası katı atıklarda az miktarda C ve H ve önemli miktarda S artışı görülmektedir. Kükürt analizlerinde (Çizelge 4.5) artışın önemli miktarda piritik sülfürden kaynaklandığı görülmektedir. Kükürt analizi sonuçları katı atıklarda bozunmalar meydana geldiğini ancak az miktarda bulunan piritik sülfürün bozunmadan fazla etkilenmediğini göstermektedir. Numune içerisinde sülfür miktarının az olması ölçümlerde bazı hatalara yol açabileceği de düşünülmektedir.

**Çizelge 4.4:** Piritsiz numunenin elementel analizi.

| Element adı                   | % C   | % H   | % N | % S   |
|-------------------------------|-------|-------|-----|-------|
| Ham numune                    | 8,668 | 0,119 | -   | 0,149 |
| Statik testler sonrası numune | 8,844 | 0,177 | -   | 0,282 |

**Çizelge 4.5:** Ham numunenin ortalama kükürt analiz değerleri.

| Toplam Sülfür, % |       | Sülfat Sülfür, % |       | Piritik Sülfür (Fark), % |       |
|------------------|-------|------------------|-------|--------------------------|-------|
| Önce             | Sonra | Önce             | Sonra | Önce                     | Sonra |
| 0,149            | 0,282 | 0,134            | 0,253 | 0,015                    | 0,029 |

Sabit kaplarda test sonrasında kalan katı numunelerin XRF sonuçları Çizelge 4.6’da verilmiştir. Test öncesi ve sonrası değişimler Çizelge 4.2 ile karşılaştırılarak aynı çizelgede parantez içerisinde verilmiştir. Test öncesi ve sonrası içeriklerin yüzdeleri incelendiğinde Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> derişiminde (% 1.27) artış olurken diğer içeriklerin derişimlerinde azalmalar görülmüştür. Genel olarak azalmanın miktarcı fazla olan CaO (% 0,5), MgO (% 0,23) ve Zn (% 0,24) bileşenlerinde olduğu görülmektedir. Bu bileşenlerin uzun sürelerde minerallerden ayrılıp su fazına geçtikleri söylenebilir. Kızdırma kaybında görülen azalma özellikle karbonatlı minerallerin testler sırasında bozunduğuna işaret etmektedir.

Sabit kaplarda test sonrasında kalan katı numunelerin ICP-OES sonuçları ise Çizelge 4.7’de verilmiştir. Test öncesi ve sonrası değişimler Çizelge 4.3 ile karşılaştırılarak aynı çizelgede parantez içerisinde verilmiştir. Çizelge 4.7 incelendiğinde Fe (% 1,83) ve S (%2,01) derişimlerinde artış olurken diğer içeriklerin derişimlerinde azalmalar görülmüştür. Genel olarak

azalmanın miktarca fazla olan Ca (% 0,66), Zn (% 0,24), Mg (% 0,18) ve K (% 0,11) bileşenlerinde olduğu görülmektedir. Kızdırma kaybında görülen azalma özellikle karbonatlı minerallerin testler sırasında bozunduğuna işaret etmektedir. Bu bileşenlerin uzun sürelerde minerallerden ayrılıp su fazına geçtikleri söylenebilir. Genel olarak elementel, sülfür, XRF ve ICP-OES analizlerinin uyumlu olduğu görülmektedir.

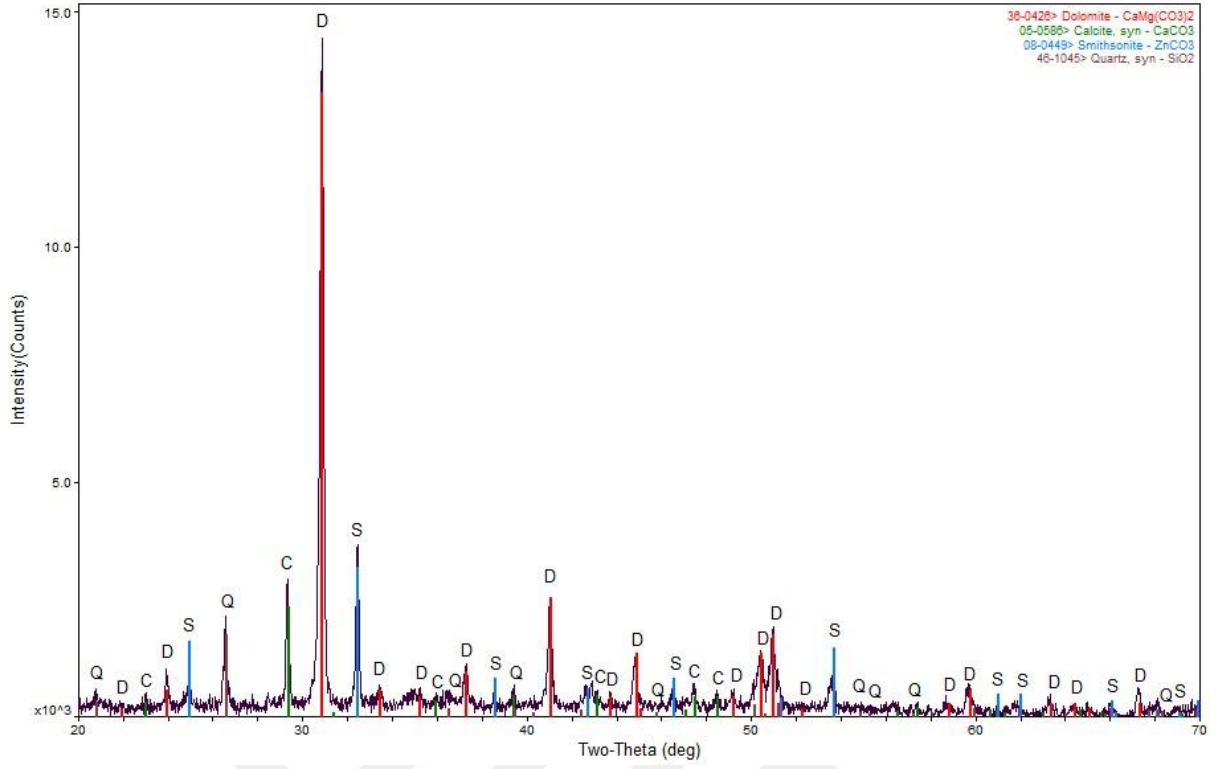
**Çizelge 4.6:** Test sonrası katı numunenin XRF analizi (değişimlerdeki değişim miktarı parantez içerisinde verilmiştir).

| Pb, %               | Zn, %           | SiO <sub>2</sub> , % | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , % | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , % | CaO, %          | MgO, %          |
|---------------------|-----------------|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------|-----------------|
| 0,83<br>(-0,01)     | 7,46<br>(-0,24) | 12,69 (-<br>0,15)    | 4,79<br>(-0,11)                    | 5,90<br>(+1,27)                    | 20,35<br>(-0,5) | 9,40<br>(-0,23) |
| K <sub>2</sub> O, % | MnO, %          | TiO <sub>2</sub> , % | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %  | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , % | Ba, %           | LOI, %          |
| 1,49<br>(0,03)      | 0,30<br>(-0,01) | 0,58<br>(0,01)       | 0,18<br>(-0,01)                    | 0,01<br>(0)                        | 0,57<br>(-0,03) | 29,90<br>(-2,0) |

**Çizelge 4.7:** Test sonrası katı numunenin ICP-OES analizi (değişimlerdeki değişim miktarı parantez içerisinde verilmiştir).

| Pb, %           | Zn, %           | Fe, %           | Ca, %             | Mg, %           | Al, %             | Mn, %           | Ni, %           |
|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| 0,80<br>(-0,04) | 7,34<br>(-0,46) | 5,06<br>(+1,83) | 14,19 (-<br>0,66) | 5,43<br>(-0,18) | 2,63<br>(0)       | 0,23<br>(-0,01) | 0,003<br>(0)    |
| Na, %           | Cu, %           | Cr, %           | Co, %             | P, %            | Cd, %             | K, %            | S, %            |
| 0,14<br>(0,02)  | 0,003<br>(0)    | 0,008<br>(0)    | 0,001<br>(0)      | 0,008<br>(0)    | 0,023<br>(-0,001) | 1,23<br>(-0,11) | 2,72<br>(+2,01) |

Test sonrası katı numunenin XRD analizi yapılmış ve sonuçlar Şekil 4.11’de sunulmuştur. Test öncesi (Şekil 4.2) ve sonrası XRD pikleri incelendiğinde ana piklerde önemli değişiklikler görülmemektedir. Test süresince minerallerin bozunmalarının ancak düşük seviyede (ppm düzeyinde) kaldığı göz önüne alınırsa bu bozunmaların XRD piklerini gözle görülür düzeyde etkilemesi beklenmemektedir. Kapların üstlerinin tamamen açık olmaması dolayısıyla karışımın hava ile daha az temas etmesi, kaplarda herhangi bir karıştırma yapılmaması ve sıvının tükenmesinden dolayı deneylerin ancak 17 hafta sürdürülebilmesi gibi nedenler az bozunmanın nedenleri arasında gösterilebilir.



**Şekil 4.13:** Test sonrası ham numunenin XRD analizi

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Cevher atıkları risk seviyelerine göre kontrol edildiklerinden atıkların özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada Görgü (Malatya) kurşun-çinko cevher atıklarının kimyasal ve mineralojik özellikleri belirlenmiş, AMD oluşturma potansiyeli tespit edilmiş ve AMD açısından en önemli mineral olan piritin etkisi araştırılmıştır. Statik AMD testleri ve sabit kaplarda yapılan testler bir birlerini doğrular nitelikte olmuş ve aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

1. Karbonat mineralleri açısından oldukça zengin ve piritik kükürt içeriği açısından çok fakir olan atık AMD oluşturma potansiyeline sahip değildir. Ayrıca, AMD oluşturma açısından en önemli mineral olan piriti belli oranlarda tolere edebilmiştir.
2. Atığın çamur testi pH 8,01 olarak ölçülmüş ve AMD oluşturmak için oldukça yüksek olduğu görülmüştür.
3. Standart ABH testleri sonucunda  $NNP = 641,25 \text{ kg CaCO}_3/\text{ton}$  ve  $NP/APP = 137,61$  hesaplanmıştır.  $NNP \gg 10$  ve  $NP/APP \gg 3$  olduğundan atığın AMD oluşturma potansiyeline sahip olmadığı sonucuna varılmıştır.
4. Değiştirilmiş ABH testleri sonucunda  $NNP = 242,031 \text{ kg CaCO}_3/\text{ton}$  ve  $NP/APP = 517,0$  hesaplanmıştır. Aynı şekilde,  $NNP \gg 10$  ve  $NP/APP \gg 3$  olduğundan atığın AMD oluşturma potansiyeline sahip olmadığı sonucuna varılmıştır.
5. BC Başlangıç testi atığın asit tüketiminin ( $372,89 \text{ kg H}_2\text{SO}_4/\text{ton}$  cevher) asit üretiminden ( $4,56 \text{ kg H}_2\text{SO}_4/\text{ton}$  cevher) çok daha fazla olduğunu göstermiştir.
6. NAG testleri sonucunda pH 8,77 ölçülmüş ve  $\text{pH} > 4$  veya  $\text{pH} > 7$  olduğundan atığın net asit üretmediği sonucuna varılmıştır.
7. Atık ve su karışımının olduğu sabit kaplarda yapılan statik testlerde ortamın pH'nın 8,6-7,6 aralığında değiştiği, değişimin düzenli olmadığı ancak 17. haftada pH'nın 8,0'a gerilediği görülmüştür.
8. Ortamın elektriksel iletkenliğinin ise zamanla arttığı ve yaklaşık  $1500 \mu\text{S}/\text{cm}$ 'den yaklaşık  $7500 \mu\text{S}/\text{cm}$ 'ye yükseldiği görülmüştür.
9. Sabit kaplarda yapılan deneylerde çözünme dolayısıyla bazı metal iyonların ortama geçtiği belirlenmiş ancak derişimlerinde düzenli bir değişimin olmadığı anlaşılmıştır. Sonuçlar, çözünme ve reaksiyonlar sonucu çökelmenin beraberce gerçekleştiğine işaret etmiştir.
10. Ham atık numunesi ve sabit kaplarda yapılan testlerde kalan numunelerin XRD analizleri karşılaştırıldığında ana piklerde önemli değişimler olmadığı görülmüş ve çalışılan koşullarda minerallerin bozulmalarının ancak düşük seviyede kaldığı sonucuna varılmıştır.

- 11.** Standart AMD testleri sonuçları atığın AMD oluşturma potansiyelinin olmadığını ve pirit ilavesinin atığın AMD oluşturma potansiyeline önemli bir katkı yapmadığını göstermiştir.
- 12.** Sabit kaplarda yapılan testlerde su içerisindeki minerallerin bozunmalarının ve ortamdaki metal iyonu derişimlerinin az olmasının nedenleri karışımın hava ile daha az temas etmesi, kaplarda herhangi bir karıştırma yapılmaması ve sıvının tükenmesinden dolayı deneylerin kısa sürede (17. haftada) bitmesi ile açıklanmıştır.

## **ÖNERİLER**

- 1.** Deneyde kullanılan sıvı ve katı miktarları değiştirilip laboratuvar şartlarında daha uzun zamanlarda kap içerisindeki iyon derişimleri ve ortamın pH'ı incelenebilir.
- 2.** Kap içerisindeki numune ile pirit karışımına karıştırma işlemi ve dışarıdan hava cihazı ile hava verilip kap içerisindeki süreç tekrardan gözlemlenebilir.
- 3.** Bütün testlere belli oranlarda pirit eklenerek atığın pirit toleransı belirlenebilir.

## KAYNAKLAR

- Akçıl, A. U., Koldaş, S.,** 2006. Acid Mine Drenage (AMD): Causes, treatment and case studies, *Journal of Cleaner Production*, 14, 1139-1145.
- Anıl, M.,** 2014. Parajenezlerinde Sülfürlü Mineraller İçeren Maden Yataklarında Oluşabilecek Asit Kaya (Maden) Drenajlarının Çevresel Etkileri, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29 (1), 1-26.
- Banks, D., Younger, P., Arnesen, RT,** 1997. Mine-water chemistry: the good, the bad and the ugly. *Environmental Geology*, 32, 157–174.
- Doğrul Demiray, A.,** 2017. *Artvin ili polimetalik maden sahaları örneğinde asit maden drenajı oluşumunu ve çevresel etkilerini kontrol eden jeokimyasal süreçler*, Doktora tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
- Dokuzlar, A.,** 2019. *Adana ili, Saimbeyli ilçesi, Kaburluk mevkiinde bulunan demir cevherleşmesinin asit maden drenajı oluşumuna yönelik kestirimlerinin araştırılması*. Çukurova Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Adana.
- Dold, B.,** 2014. *Evaluation of acid mine drainage formation in sulphidic mine tailings*. *Minerals*, 4 (3), 621-641.
- Ergüler, K. G.,** 2012 Sülfürlü bir maden sahasında asit maden drenaj oluşum potansiyelinin belirlenmesi ve modellenmesi, Doktora tezi, Dumlupınar Üniversitesi.
- Ergüler, K. G., Ergüler, Z. A., Akçakoca, H., Uçar, A.,** 2014. The effect of column dimensions and particle size on the results of kinetic column test used for acid mine drainage (AMD) prediction, *Minerals Engineering*, 55, 18-29.
- Ergüler, Z. A., Ergüler, K., G.,** 2015. The effect of particle size on acid mine drainage generation: Kinetic column tests, *Minerals Engineering*, 76, 154-167.
- Gitari, W. M., Petrik, L. F., Etchebers, O., Key, D. L. Okujeni, C.,** 2008. Utilization of fly ash for treatment of coal mines wastewater: Solubility controls on major inorganic contaminants, *Fuel*, 87, 2450-2462.
- Goto, H., Silva Braga, V., Capraro, A. P. B., Medeiros, M. H. F., Bragança, M. O. G. P., Portella, K. F., Oliveira, I. C.,** 2016. Physicochemical evaluation of oxidation of diabase aggregates with sulfide minerals: influence of particle size, pH of the medium and pyrite concentration, *Journal of Building Rehabilitation*, 1 (8), 1-10.
- Gül, S.,** 2014. Balıkesir/Balya Pb-Zn maden atık sahasının biyojeokimyası ve asidik maden drenajı oluşumuna etkilerinin araştırılması, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.



**Hmidi, N.**, 1997. *Stabilization of reactive tailings to prevent acid mine drainage using coldbond agglomeration*. Yüksek Lisans Tezi, Laurentian University, Sudbury, Ontario, Canada.

**Jang, A., Kim, I. S.**, 2000. Solidification and stabilization of Pb, Zn, Cd and Cu in tailing wastes using cement and fly ash, *Minerals Engineering*, 13 (14-15), 1659-1662.

**Jennings, S. T., Jacobs, J. A.**, 2014. Overview of acid drainage prediction and prevention, 207216. (Acid mine drainage, rock drainage and acid sulfate soils: Causes, assessments, prediction and recommendation Editors: J. Jacobs, A., Lehr, J. H., Testa, S. M.), John Wiley & Sons, New Jersey, ABD. ISBN 978-0-470-48786-0.(Kitap)

**Johnson, D. B., Hallberg, K. B.**, 2005. Acid mine drainage remediation options: a review, *Science of the Total Environment*, 338 (1-2), 3-14.

**Kahramanoğlu, K., Taşkın M.M., Özdemir Ş.** 2015., Asit Maden Drenajı Karakterizasyonu ve Uygumaları Türkiye 24. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi, 14-17 Nisan, Antalya(Kongre)

**Karadeniz, M.**, 2008. Sülfürlü Madenlerin Sorunu ve Çözümü: Asit Maden Drenajı. TMMOB, Maden Mühendisleri Odası Yayınları. Yayın no: 146, ISBN 978-9944-89-600-9.

**Karadeniz, M.**, 2010. Sülfürlü madenlerin çevre sorunu: asit maden drenajı, MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni, 10, 36-43.

**Karadeniz, M.**, 2011. *Balıkesir-Balya Kurşun-Çinko Madeni Flotasyon Artıklarının Asit Maden Drenajı Oluşum Potansiyelinin Derinliklerle Değişiminin Araştırılması*, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.

**Karagüzel, C., Ören, Ö., Şahbaz, M., Cameren, Ö., Demir, U., Şahbaz, O.**, 2020. Prediction of acid mine drainage potential of dump sites by using static tests: an application on lignite mine, *Arabian Journal of Geosciences*, DOI: 10.1007/s12517-020-06220-x.

**Kelebek, G.**, 2007. *Gümüşköy (Ulukışla-Niğde) Curuflarının asit maden drenajı oluşturma potansiyeli ve çevreye etkisinin incelenmesi*, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

**Lapakko, K. A.**, (1994). Comparison of Duluth Complex Rock Dissolution in the Laboratory and Field. *International land Reclamation and Acid Mine Drainage Conference and Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage*.

**Lapakko, K. A.**, 2002. Metal Mine Rock and Waste Characterization Tools: An Overview, International Institute for Environment and Development, No:67.(

**Lapakko, K. A., Antonson, D. A.**, 2002. Drainage pH, acid production and acid neutralization for Archean greenstone rock. SME Annual Meeting, 25-27 February, Phoenix Arizona, USA.

**Lawrence, R., Day, S.**, 1997. Short course on chemical prediction techniques for ARD. 4. International conference on acid rock drainage, May 31, 1997, Vancouver, BC, Kanada.

- Leiva, E, Cayazzo, M, Davila, L, Torres, M, Ledezma, C.,** 2021. Acid Mine Drainage Dynamics from a Paste Tailing Deposit: Effect of Sulfate Content on the Consistency and Chemical Stability after Storage. *Metals*, 11 (6), 860. <https://doi.org/10.3390/met11060860>
- Lottermoser, B. G.,** 2010. Mine Wastes Characterization, Treatment and Environmental Impacts, Chapter 2: *Sulfidic Mine Wastes*, 43-115, Springer, Third Edition, ISBN 978-3-64212418-1.
- Miller, S. D., Murray, G. S.** (1988). Application of Acid Base Analysis to Wastes from Base Metal and Precious Metal Mines, In: *Mine Drainage and Surface Mine Reclamation*, 29-32.
- Misra, M., Yang, K., Mehta, R. K.,** 1996. Application of fly ash in the agglomeration of reactive mine tailings, *Journal of Hazardous Materials*, 51, 181-192.
- Moricz, F., Madai, F, Walder, I. F.,** 2012. Pyrite oxidation under circumneutral pH conditions, *GeoScience Engineering*, 1, 111-116.
- Morin, K. A., Hutt, N. M.,** 1997. *Environmental Geochemistry of Minesite Drainage; Practical Theory and Case Studies*. Canada.
- Mpofu, K., Mushiri, S., Nyoni, K.,** 2014. Acid mine drainage and its treatment, *International Journal of Research in Engineering and Applied Science*, 4 (1), 12-26.
- Özçelik, G. A. S.,** 2007. *Prediction techniques of acid mine drainage: A case study of a new poly-metallic mine development in Erzincan-İliç, Turkey*. Doktora Tezi, METU, Ankara.
- Sahoo, P.K, Kim, K., Equeenuddin, S. M., Powell, M. A.,** 2013. Current approaches for mitigating acid mine drainage. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 226 (1), 1-32.
- Schoonen, M. A. A., Harrington, A. D., Laffers, R., Strongin, D. R.,** 2010. Role of hydrogen peroxide and hydroxyl radical in pyrite oxidation by molecular oxygen. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74 (17), 4971-4987.
- Sharkey, W. S., Baker, P. J.,** 2009. Agglomeration for the treatment of acid mine drainage, US Patent 2009/0114606 A1.
- Sharkey, W. S., Baker, P. J.,** 2010. Agglomeration for the treatment of acid mine drainage, US Patent 7,784,620 B2.
- Skousen, J. G., Ziemkiewicz, P. F., McDonald, L. M.,** 2019. Acid mine drainage formation, control and treatment: Approaches and strategies, *The Extractive Industries and Society*, 6 (1), 241-249.
- Skousen, J., Jacobs, J. A.,** 2014. Stream characterization for acid mine drainage, 105-118, (*Acid mine drainage, rock drainage and acid sulfate soils: Causes, assessments, prediction and*

recommendation Editors: J. Jacobs, A., Lehr, J. H., Testa, S. M.), John Wiley & Sons, New Jersey, ABD. ISBN 978-0-470-48786-0

**Sobek, A.A., Schuller, W.A., Freeman, J.R., Smith, R.M.,** 1978. Field and Laboratory Methods Applicable to Overburdens and Minesoils. Environmental Protection Technology Series, United States Environmental Protection Agency, EPA-600/2-78-054, Washington

**Şanlıyüksel Yücel, D., İleri, B.,** 2020. Antropojenik Kaynaklı Metal Kirliliğinin Çevresel Etkilerinin Azaltılmasında Uçucu Kül Kullanımı, Türkiye Jeoloji Bülteni, 63, 43-56, doi: 10.25288/tjb.593416

**Stewart, W., Miller, S., Smart, R., Gerson, A., Thomas, J., Skinner, W., Levay, G., Schumann, R.,** 2003. Evaluation of the Net Acid Generation (NAG) Test for Assessing the Acid Generating Capacity of Sulfide Minerals. In: Proceedings of the Sixth International Conference on Acid Rock Drainage, Cairns, Australia. s. 617-625.

**Taylor, J., Pape, S., Murphy, N.,** 2005. A summary of passive and active treatment technologies for acid and metalliferous drainage (AMD), V. Australian Workshop on Acid Drainage, 29-31 August 2005, Fremantle, Western Australia.

**Topçu, Y.,** 2012. Pasa Yönetiminde Bütüncül Yaklaşım ve Asit Maden Drenajı, SEKTÖRDEN HABERLER BÜLTENİ, 43, 41-45

TS 329 ISO 157, 1966. Kömür- Kükürt türlerinin tayini.

USA-EPA, 1994. Technical Dokument: Acid Mine Drainage Prediction, U.S. Environmental Protection Agency, Office of solid Waste, Special Waste Branch, 401 M Street, SW, Washington DC.

USDA, 1993. Acid mine drainage form impact of hard rock mining on the national forests: A management challenge. USDA Forest Services, Program Aid 1505:12.

**Warhurst, A., Noranha, M. L.,** 1999. Environmental policy in mining-Corporate strategy and planning for closure, CRC Press, Lewis Publishers, London.

**Wels, C., Lefebvre, R., Robertson, A. M.,** 2013. An overview of prediction and control of air flow in acid-generating waste rock dumps, VI. International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), 14-17 Temmuz 2003, Cairns, Queensland, Avustralya.

**Yeheyis, M. B., Shang, J. Q., Yanful, E. K.,** 2009. Long-term evaluation of coal fly ash and mine tailings co-placement: A site-specific study, *Journal of Environmental Management*, 91, 237-244.

**Yörükoğlu A., Karadeniz M,** 2003. Asit maden drenajı kestirim yöntemlerinin karşılaştırılması, Türkiye 18. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi, 10-13 Haziran 2003, Antalya, 125-131. ISBN 975-395-606-1

## URL ADRESLERİ

**URL1:** [https://www.msa.vic.gov.au/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0027/6696/EES-Referral-2013-08Nowa-Nowa-Iron-Project-Attachment-6\\_Geochemical-Assessment.pdf](https://www.msa.vic.gov.au/__data/assets/pdf_file/0027/6696/EES-Referral-2013-08Nowa-Nowa-Iron-Project-Attachment-6_Geochemical-Assessment.pdf)

**URL2:** <http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2013/01/1.16.1b.pdf>

**URL3:** [http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/1.20.1\\_PredictionManual.pdf](http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/1.20.1_PredictionManual.pdf)



## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Basri BAŞARAN

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2022, İnönü Üniversitesi, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı,

### MESLEKİ DENEYİM:

- Ağustos 2016-Mart 2021, Daimi nezaretçi, Edeler Hazır Beton LTD.ŞTİ
- Mart 2021,Proses Mühendisi, Koza Altın İşletmeleri A.Ş (Devam)