

Bilimsel
madencilik
SCIENTIFIC MINING JOURNAL
DERGİSİ

TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını / The Publication of the Chamber of Mining Engineers of Turkey

EYLÜL **CİLT** **SAYI**
SEPTEMBER *VOLUME* *NUMBER*
2016 55 3

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Sunuş

- | | | |
|--|-----------|---|
| Cengiz Karagüzel
Oktay Şahbaz
Kenan Oğul
Ali Uçar | 5 | Artvin-Murgul Bölgesi Kompleks Cu-Zn Cevherinin Jameson Hücresi Kullanılarak Zenginleştirilebilirliğinin Araştırılması
<i>Investigation of Concentration of Complex Cu-Zn Ore in Artvin-Murgul Region by Using the Jameson Cell</i> |
| Hasan Hacıfazlıoğlu | 17 | Kömür Yıkama Tesis Atıklarının Susuzlandırılmasında Eski ve Yeni Teknolojiler
<i>Old and New Technologies in Dewatering of Coal Plant Slurries</i> |
| Ogün Ozan Varol | 27 | Bitlis ve Van İllerinde Pomza Madenciliğine Genel Bir Bakış
<i>A General Overview of Pumice Mining in Van and Bitlis Provinces</i> |
| Ersin Yener Yazıcı
Hacı Deveci | 35 | Atık Baskılı Devre Kartlarının Ekonomik Potansiyeli ve Çevresel Karakterizasyonu
<i>Economic Potential and Environmental Characterisation of Waste of Printed Circuit Boards</i> |

BİLİMSEL MADENCİLİK DERGİSİ
Scientific Mining Journal

TMMOB Maden Mühendisleri Odası adına sahibi /
Owner on behalf of the Chamber of Mining Engineers of Turkey: Ayhan Yüksel

Sorumlu yazı işleri müdürü / Responsible manager: Necmi Ergin

Yönetim yeri ve yazışma adresi / Correspondence address:
Selanik Cad. No: 19/4 06650 Kızılay-Çankaya / ANKARA - TURKEY

Tel: +90 312 425 10 80 / +90 312 418 36 57 • Fax: +90 312 417 52 90

e-mail: info@madencilik.org.tr / info@mining.org.tr
web: <http://www.madencilik.org.tr> / <http://www.mining.org.tr>

Yayın türü / Publication type: Yerel süreli yayın, 3 ayda bir yayımlanır / Local periodical, quarterly

Baskı yeri / Printed at: Korza Matbaası

Baskı Tarihi ve saati / Printing date: 29.09.2016 at 09:00

Basım adedi / Number of printed copy: 500

Sunuş

Bilimsel nitelikte bir madencilik dergisinin yayınlanmasına, Maden Mühendisleri Odası Yönetim Kurulu'nun 15 Temmuz 1960 tarihli toplantısında karar verildi. Söz konusu toplantıda alınan karar; "*mesleğin inkişafının temini ve meslektaşların fikirleri, makaleleri, ilmi çalışma ve aktarmaları yapmalarına imkân vermek üzere Oda'ca bir mecmua çıkartılmasına...*" şeklindeydi.

Söz konusu karardan yaklaşık 4 ay sonra Madencilik Dergisi'nin ilk sayısı yayınlandı.

Dergideki ilk makale, Ereğli'de kurulması planlanan demir-çelik fabrikasının kömür, demir, kireçtaşı, dolomit ve benzeri hammadde ihtiyacının memleketin nerelerinden ve ne şekilde karşılanabileceği konusunu işlemekteydi.

O tarihlerde Avrupa Müşterek Pazarı'na girme olasılığımız bugüne göre çok daha yüksekti. Girmemiz halinde yeni kurulmakta olan seramik sanayimiz üzerine muhtemel etkileri, derginin ele aldığı bir diğer konuydu.

Daha teknik düzeyde incelemeler de bulunmaktaydı: Cevherin kuyu veya silolardan konveyörlere intikalinde geliştirilen yeni usuller, madencilik ve jeoloji ilişkisi, sondaj kuyu mühendisliği, madenlerde kullanılan lâğım delik çapının verimlilik ve maliyetlere etkisi, Eskişehir'deki krom yataklarının işletmecilik bakımından incelenmesi... Tüm bu konulara, dergide yayınlanan bilimsel makalelerde son derece kapsamlı ve detaylı bir şekilde yer verilmişti.

Dört maden, bir metalurji ve bir seramik mühendisinden oluşan derginin ilk "neşriyat encümeni" âzaları bugün artık yaşamıyor. Ömer Hulusi Barutoğlu, Avni Kösematoğlu, Veli Aytekin, E. Zeki Aka, Ekrem Durucan ve Gami Dünder'ı saygıyla anıyoruz.

Dergi, yayına başladığı yıllardan itibaren, bilim ve teknolojiye pek çok gelişmenin tanığı oldu. Uzay ve uydu teknolojilerindeki gelişimi, telekomünikasyon devrimini, önce bilgisayarların sonra internetin baş döndüren serüvenini, nano-teknolojinin, biyo-teknolojinin, süper iletkenlerin yükselişini, aynı yıllardan itibaren çevre olgusuna ilişkin toplumsal bakıştaki değişimi adım adım izledi.

Söz konusu gelişmelerin madenciliğin her alanındaki bilim ve teknolojiye etkileri de, bu 56 yıl boyunca Madencilik Dergisi'nin her sayfasına yansdı.

56 yıl dile kolay...

Bilimsel bir dergiyi yarım asrı aşkın bir süre ayakta tutabilmenin ancak büyük bir çaba ve özveri ile mümkün olabileceğini teslim etmek gerekir. Bu bakımdan, Maden Mühendisleri Odası yönetimlerinde ve dergi yayın kurullarında bugüne kadar görev yapan tüm meslektaşlar takdirle anılmayı hak ediyorlar.

Bizden önceki editörler grubu, Haziran 2011 tarihinden itibaren 5 yıl süresince görev yaptı ve o tarihten itibaren 14 Madencilik Dergisi'ni başarıyla yayına hazırladı.

Gösterdikleri büyük çaba ve özveri nedeniyle Baş Editör Ahmet Hakan Onur ve editörler Gürkan Konaç, Mehmet Tanrıverdi, Doğan Karakuş ve Alper Gönen'e teşekkürü borç biliyoruz.

Yeni dönem yayın kurulu olarak amacımız yine aynı: “*maden mühendisliği mesleğinin gelişimine ulusal ve uluslararası düzeyde katkı sağlamak*”.

Bu amaçla, ülkemiz madencilik sektöründe bilimsel bilginin üretimi ve paylaşımında son derece önemli bir görev üstlenen Madencilik Dergisi'nin bilimsel niteliğini ve bilim dünyasındaki görünürlüğünü yükseltmek, böylelikle dergiden yapılacak atıf sayısını arttırmak öncelikli hedeflerimiz.

Bu bakımdan, derginin önemli veri tabanları tarafından taranmasına yönelik çalışmalara bu dönemde ağırlık vereceğiz. Bu çerçevede yayın kurulumuz tarafından yapılan planlamada, öncelikli hedef ULAKBİM ve nihai hedef ise Thomson Reuters Science Citation Index Expanded olarak belirlendi.

ULAKBİM veri tabanına başvuru 2016 yılı Aralık ayı içerisinde yapılacak. ULAKBİM tarafından bir yıl süresince yapılacak olan izleme sonrasında, Madencilik Dergisi'nin ULAKBİM veri tabanı tarafından kabul edilmesi durumunda, bir sonraki hedef Thomson Reuters Science Citation Index Expanded olacak. Buna ilişkin müracaat ise 2017 yılı Aralık ayında yapılacak.

Madencilik Dergisi'nin SCOPUS tarafından taranmasını sağlamaya ve ULAKBİM tarafından düzenlenmiş olan DERGİ PARK sistemine taşımaya yönelik başvuru süreçleri ise başlatıldı.

Daha önce sınırlı sayıda bastırılarak sadece kütüphanelere ve üniversitelerin maden bölümlerine gönderilen Madencilik Dergisi, bundan böyle “elektronik dergi” şeklinde de oluşturularak son derece geniş bir adres listesine elektronik posta ile iletilecek.

Ayrıca, derginin kolay erişilebilir olması amacıyla etkili bir web sitesi (<http://www.madencilik.org.tr> - <http://www.mining.org.tr>) hazırlandı. İçeriği önümüzdeki günlerde tamamlanacak olan web sitesinden; yazarlar, hakemler ve araştırmacılar için gerekli olan - yazım kuralları, rehber, etik kurallar, derginin tarandığı veri tabanları ve etki faktörü – gibi tüm bilgilere erişilebilecek. Bunların yanında; yazarlar ve hakemler için “Yayın İzleme Sistemi”, daha önce yayınlanan makalelerin elektronik kopyalarının bulunduğu bir “Arşiv Sistemi”, dergide hakemlik yapmak isteyenler için bir talep formu ve bilimsel etkinlik duyuruları da söz konusu web sitesinde yer alacak.

Dolayısıyla, Madencilik Dergisi, bu sayıyla birlikte yeni bir döneme girmekte. Bu yeni dönemde, derginin görünürlüğünün artırılması öncelikli hedef olarak belirlenmekte ve bu çerçevede elektronik ortamdaki varlığı önem kazanmakta. Böylelikle, derginin bilimsel değerinin, akademik saygınlığının ve güvenilirliğinin her sayıda biraz daha yukarıya taşınacağına ilişkin inancımızı belirtir ve bugüne kadar olduğu gibi bundan sonra da dergiye katkı sağlayacak olan ülkemiz bilim insanlarına, akademisyenlerine, araştırmacılarına saygılar sunarız.

Madencilik Dergisi Yayın Kurulu

Ankara / Ağustos 2016



Orijinal Araştırma / Original Research

ARTVİN-MURGUL BÖLGESİ KOMPLEKS Cu-Zn CEVHERİNİN JAMESON HÜCRESİ KULLANILARAK ZENGİNLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

INVESTIGATION OF CONCENTRATION OF COMPLEX Cu-Zn ORE IN ARTVİN-MURGUL REGION BY USING THE JAMESON CELL

Cengiz Karagüzel^a, Oktay Şahbaz^a, Kenan Oğul^b, Ali Uçar^{a,*}

^a Dumlupınar Üniversitesi, Müh. Fak., Maden Müh. Böl., KÜTAHYA

^b Ankara-İstanbul Yüksek Hızlı Tren Projesi 2.Etap Yapım Grup Müdürlüğü, Bozüyük/BİLECİK

Geliş Tarihi / Received : 18 Nisan / April 2016

Kabul Tarihi / Accepted : 8 Ağustos / August 2016

Anahtar Sözcükler:

Bakır-Çinko cevheri, serbestleşme, mekanik hücre flotasyonu, jameson hücre flotasyonu.

Keywords:

Copper - zinc ore, liberalization, mechanical flotation cells, jameson flotation cell.

ÖZET

Bu araştırmada Artvin-Murgul yöresi kompleks bakır-çinko cevherinin ilk defa Jameson flotasyon hücresi ile zenginleştirilmesi araştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında flotasyonu özellikle oksitlenme ve tane boyutundan dolayı sorunlu olan Doğu Karadeniz Bölgesi Akarşen ocağındaki ince taneli kompleks sülfürlü bakır-çinko cevheri çalışılmıştır. Cevher numunesinin mikroskobik incelemeleri sonucu, cevherin mineralojik bileşimi ve serbestleşme boyutu tespit edilmiştir. Cevherin serbestleşme boyutu mikroskobik çalışmalara ilaveten ve mekanik flotasyon yöntemiyle de kontrol edilerek Jameson hücresinde zenginleştirilebilen olanakları araştırılmıştır. Jameson hücresiyle tek kademede yapılan zenginleştirme deneyleri sonunda %2 Cu içeren cevherden %12 Cu içerikli ürün %79 verim ile kazanılabileceği görülmüştür.

ABSTRACT

In this research, the application of Jameson cell for the first time has been applied to Artvin – Murgul's copper zinc ore. In the frame of the present study, complex copper-zinc ore, obtained from the Eastern Blacksea Region, was difficult to float characteristics due to the oxidization and fine liberation size was examined. The mineralogical features and liberation size were determined in the study and performance of the Jameson cell for the sample has been figured out. According to results obtained from the one stage of flotation, the floating part having 12% Cu grade with the recovery of 79% was obtained from the sample having 2% Cu.

* ali.ucar@dpu.edu.tr

GİRİŞ

Bakır, insanlık tarihinde çok eski çağlardan beri kullanılmakta olup, günümüzde ise sanayinin temel hammaddeleri arasında yer alan önemli bir metaldir. Yüksek elektrik ve ısı iletkenliği özellikleri bakırı, endüstrinin vazgeçilmez girdisi haline getirmektedir. En geniş kullanım alanları; elektrik üretim ve iletimi ile ilgili tesislerde, inşaatta, ulaşım makine ve teçhizatındadır.

Dünyada bakır üretimi, sülfürlü ve oksitli bakır cevherlerinin madencilik yöntemleri ile çıkarılması ve zenginleştirilmesi ile yapılmaktadır. Flotasyon minerallerin yüzey özelliklerinin farklılığından yararlanılarak değerli minerallerin gang minerallerinden ayrılmasını sağlayan bir zenginleştirme yöntemi olarak günümüzde, bakır cevherinin zenginleştirmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Flotasyon, hidrofob minerallerin seçimli olarak üç fazlı (katı, sıvı ve hava) ortamdan hava kabarcıkları yardımıyla hidrofil tanelerden ayrılmasını sağlayan, fiziko-kimyasal bir zenginleştirme yöntemidir. Bu işlem genelde diğer zenginleştirme yöntemleriyle ekonomik olarak kazanılamayan ince boyutlu ve düşük tenörlü minerallerin zenginleştirilmesinde kullanılmakta olup, çok geniş bir uygulama alanına sahiptir. Flotasyon işleminde kullanılan aletler genel olarak iki farklı grupta toplanır. Bunlar; çalışma prensipleri farklı mekanik karıştırmalı flotasyon aletleri (klasik flotasyon hücresi vb.) ve hava ile karıştırmalı flotasyon aletleridir (klasik flotasyon kolonu, Jameson flotasyon hücresi vb.) (Finch, 1995; Jameson, 1991 ve Öteyaka, 1993).

Cevherlerin mineralojik yapısı, serbestleşme boyutu, kullanılan reaktifler ve aletlerin çalışma mekanizması flotasyon prosesinde önemli parametreler olup, flotasyon veriminde ve uygun flotasyon makinesi seçiminde etkili rol oynar. Bazı cevherler, özellikle sülfürlü metalik cevherler oldukça ince boyutta serbestleşmektedir. Bu cevherlerin (20-25 mikron altı) klasik flotasyon hücresinde zenginleştirilmesinde sorunlar yaşanmaktadır ve genellikle flotasyon randımanı düşük olmaktadır. Bu sorun, ince taneli cevherler için gerekli olan uygun küçük çaplı hava kabarcıklarının (0,4-1 mm) klasik flotasyon hücresinde oluşturulamamasından kaynaklanmaktadır. Bilindiği gibi flotasyonun mikro olaylarından biri olan çarpışma olayı tane çapı ile doğru, hava kabarcığı çapı ile ters orantılıdır. İnce taneli minerallerin flotasyonunda çarpışma olasılığının

artabilmesi için sistemde küçük çaplı hava kabarcıklarının oluşturulması gerekir. Klasik flotasyon hücrelerinde sistemin yapısından dolayı bu mümkün olmamaktadır. Dolayısıyla ince taneli minerallerin flotasyon verimi klasik flotasyon hücreleri ve klasik kolonlarda düşük olmaktadır (Öteyaka, 1993,1994; Yoon and Luttrell, 1989; Schulze, 1984).

Çalışma prensipleri ve dizaynı açısından diğer flotasyon makinelerinden farklılıklar gösteren Jameson hücresi; kompakt tasarımı ve oluşturduğu ince hava kabarcıkları sayesinde ince taneli minerallerin zenginleştirilmesinde kullanılan ve flotasyon performansı yüksek bir alet olarak göze çarpmaktadır (Gürsoy, 2007, Taşdemir et al., 2007, Şahbaz, 2006). Jameson Hücresi, flotasyonu sorunlu olan Jameson hücresi kömür, endüstriyel mineraller ve metalik cevherlerde başarıyla kullanılmaktadır. Dünya genelinde 300'ün üzerinde kullanım alanı bulunan aletin ülkemizde henüz endüstriyel çapta bir uygulaması bulunmamaktadır.

Çalışmaya konu olan kompleks Cu-Pb-Zn sülfür mineralleri genellikle çok ince boyutlarda serbestleşmektedir. Oldukça ince boyutlarda serbestleşen minerallerin klasik flotasyon hücrelerinde zenginleştirilmesinde tane boyutundan dolayı sorunlar yaşanmaktadır. Ayrıca bu tür cevherlerin açılan yeni yüzeyleri kısa sürede oksitlenmektedir. Bu nedenle sülfürlü cevherler için kinetiği hızlı olan flotasyon cihazlarının kullanılması zorunluluk haline gelmiştir. Bu çalışmada, Doğu Karadeniz Artvin- Murgul Akarşen Bölgesine ait kompleks sülfürlü Cu-Zn cevherinin mineralojisi, serbestleşme çalışmaları yapılarak, cevherin mekanik hücrede ve Jameson flotasyon hücresinde zenginleştirilebilme olanaklarını araştırılmıştır.

1. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

1.1. Malzeme ve Yöntem

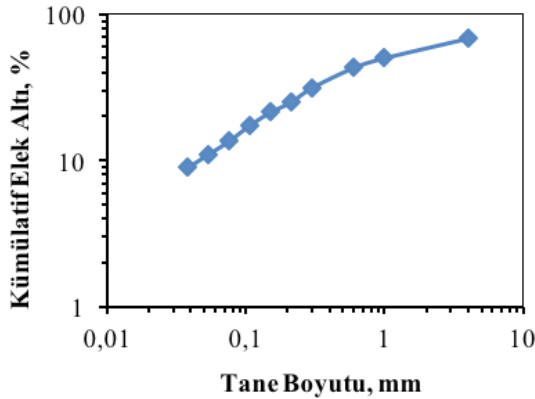
Çalışmalarda kullanılan numune, ETİ BAKIR A.Ş. nin Akarşen ocağından getirilen cevherin Murgul zenginleştirme tesislerinde 18 mm'nin altına kırılmasıyla elde edilen değirmen beslemesinden alınmış ve hava almayacak şekilde paketlenerek çalışmanın yapılacağı Dumlupınar Üniversitesi Maden Mühendisliği Cevher Hazırlama Laboratuvarı'na getirilmiştir. Numune yığın haline getirilerek birkaç kez harmanlanmıştır. Daha sonra numuneler konileme – dörtleme

yöntemi ve numune bölücü ile beş'er kilo olacak şekilde bölünmüş ve oksitlenmesini belli bir oranda önleyebilmek için hava almayacak şekilde çift numune poşetleriyle paketlenmiştir. Paketlenen numuneler derin dondurucuda deneylerde kullanılmak üzere saklanmıştır.

Elek analizi yapılan numunenin boyut dağılımı Şekil 1'de, kimyasal analizi de Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Deneysel çalışmalarda kullanılan numunenin kimyasal analizi

Bileşim	İçerik, %
Cu	2.12
Zn	3.33
Fe	28.59
S	32.79



Şekil 1. 18 mm'nin altına kırılmış numunenin tane boyut dağılımı

1.2. Minerolojik İncelemeler

Cevherden alınan el numunelerinin parlak kesitleri yapılarak cevher mikroskobunda incelenmiştir. Parlak kesitlerin mikroskobik incelemeleri Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Mineraloji Laboratuvarında yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda numunelerin fotoğrafları çekilmiş ve elde edilen görüntüler Foto 1-8'de verilmiştir.

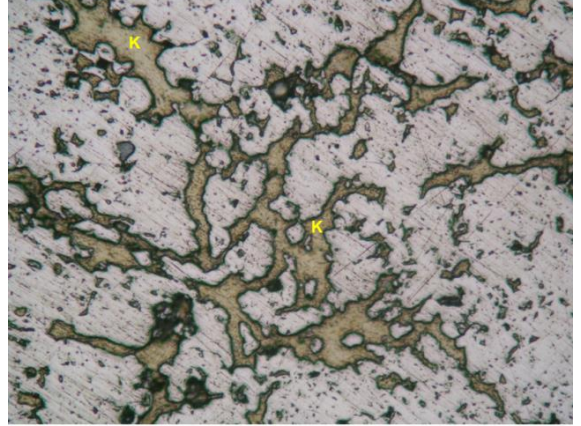


Foto 1. Kalkopirit damarları (kalınlık yaklaşık 15 µm) (K: Kalkopirit).

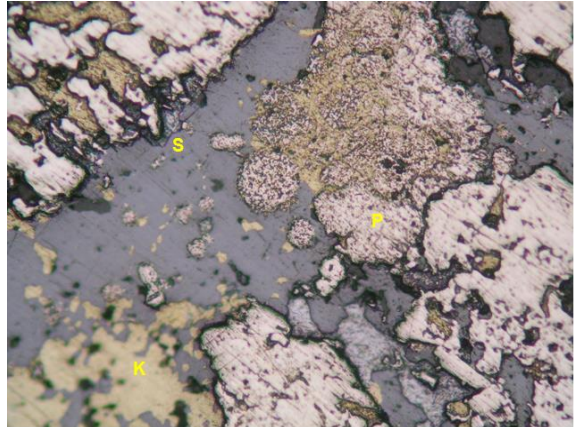


Foto 2. Hem sfaleriti hem de piriti ornatmış kalkopirit (K: Kalkopirit, S:Sfalerit, P: Pirit).

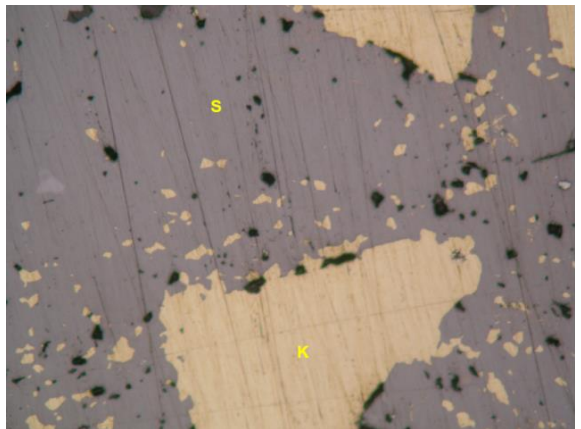


Foto 3. Kalkopirit tarafından ornatılmış sfalerit (K: Kalkopirit, S:Sfalerit)

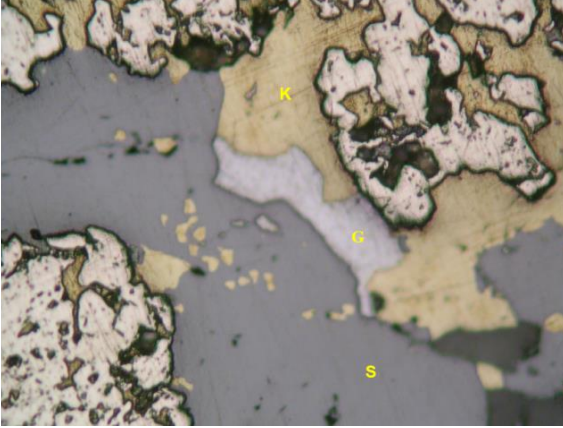


Foto 4. Galenit tarafından ornatılmış kalkopirit ve sfalerit (K: Kalkopirit, S:Sfalerit, G: Galenit)

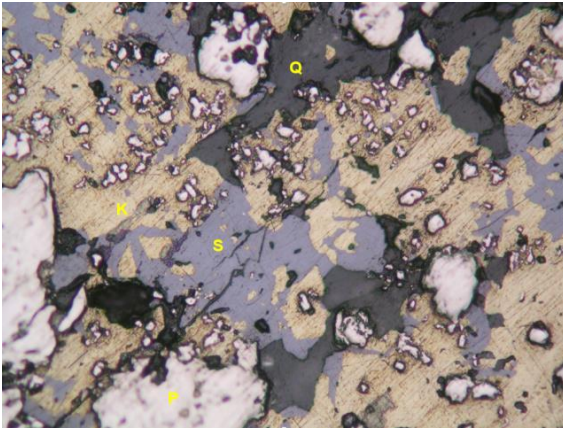


Foto 5. Sfalerit içerisinde hidrotermal kuvarslar (K: Kalkopirit, S:Sfalerit, Q: Kuvars)

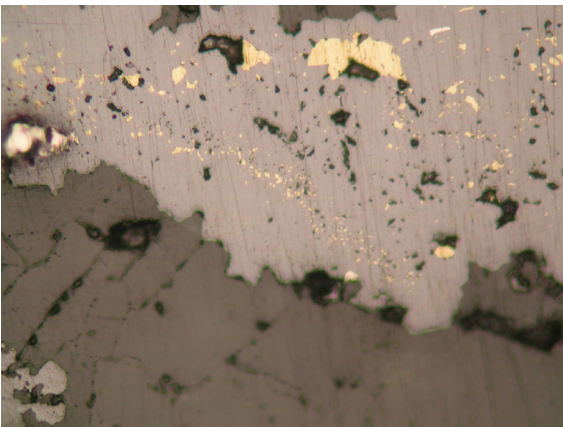


Foto 6. Saçınımlı olarak dağılmış küçük kalkopirit taneleri (1-3 µm civarında)

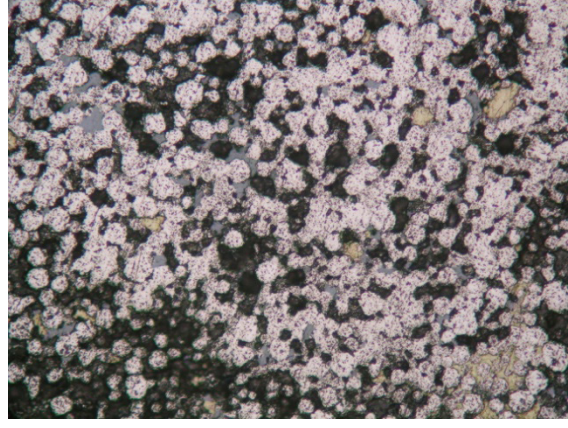


Foto 7. Düşük ısıda oluşmuş pirit küreleri (fromboidal) (Ortalama 20 µm)

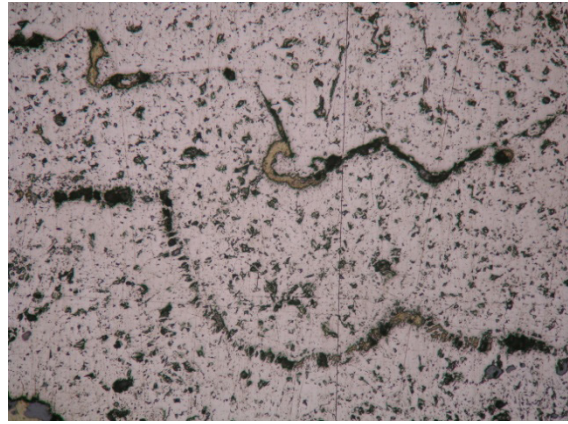


Foto 8. Kalkopirit ile zonlanmış pirit (Kalkopirit yaklaşık 10 µm)

1.3. Serbestleşme Çalışmaları

Cevherin serbestleşme boyutunun tespiti için, cevher numuneleri ilk önce çeneli kırıcıda daha sonrada merdaneli kırıcıda 1 mm nin altına indirilmiştir. Kırılan bu numune daha sonrada 30, 40, 50 ve 60 dakika sürelerde şartları aşağıda verilen laboratuvar tipi bilyalı değirmende öğütülmüştür.

Öğütme şartları;

Değirmenin çapı ve boyu: 19,5 x 20 cm

Katı oranı: %60 K

Bilya sayısı: 167 (değişik çaplarda)

Kritik hız: 102 d/d

Değirmen hızı: 90 d/d

Bilyalı değirmende değişik sürelerde öğütülen cevher numunelerinin tane boyut analizleri yapılmış ve ayrıca elek fraksiyonlarına ayrılmış her

bir boyuttan ayrı ayrı parlak kesitler hazırlanmıştır. Flotasyon yöntemiyle kazanılması düşünülen kalkopirit ve sfalerit minerallerinin serbestleşme derecesi belirlenmeye çalışılmıştır.

Farklı sürelerde (30, 40, 50 ve 60 dakika) öğütülmüş numunelerin -38 μ m fraksiyonlarının parlak kesitlerinin cevher mikroskop görüntüleri Foto 9-12'de verilmiştir.

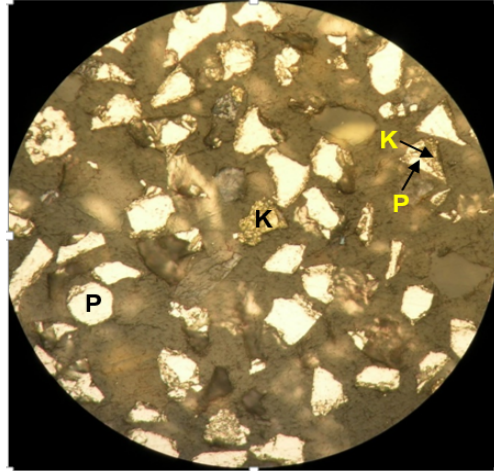
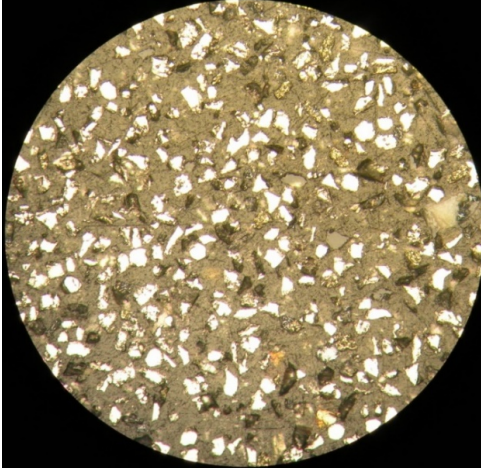


Foto 9. 30 dakika öğütülmüş cevherin -38+32 μ m boyut fraksiyonundaki parlak kesit görüntüsü (P: Pirit, S:Sfalerit, K:Kalkopirit; Büyütme Oranı: 20x ve 50x).

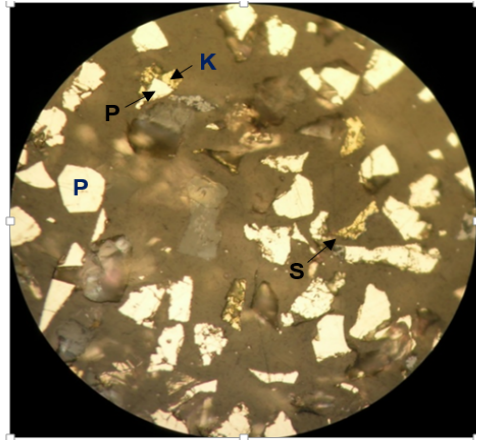
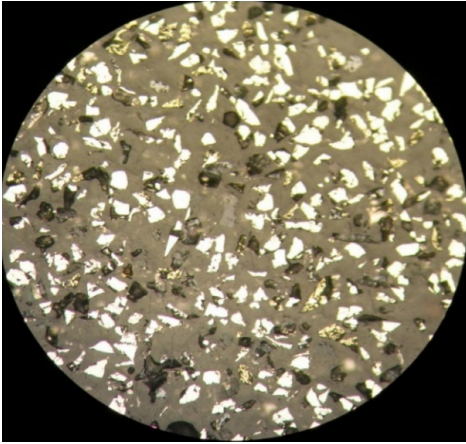


Foto 10. 40 dakika öğütülmüş cevherin -38+32 μ m boyut fraksiyonundaki parlak kesit görüntüsü (P: Pirit, S:Sfalerit, K:Kalkopirit; Büyütme Oranı: 20x ve 50x).

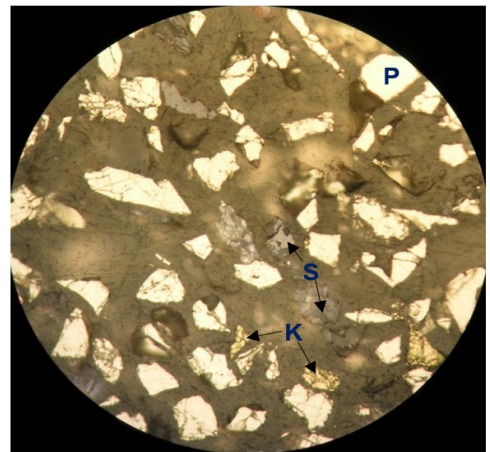
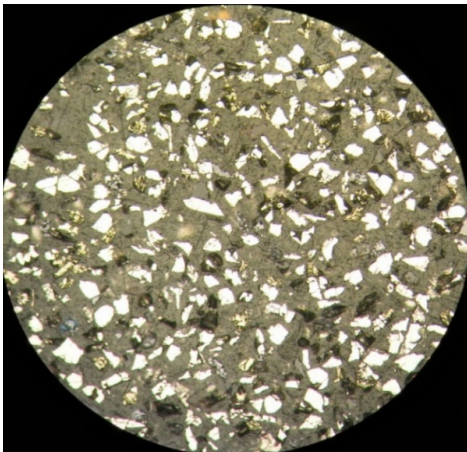


Foto 11. 50 dakika öğütülmüş cevherin -38+32 μ m boyut fraksiyonundaki parlak kesit görüntüsü (P: Pirit, S:Sfalerit, K:Kalkopirit; Büyütme Oranı: 20x ve 50x).

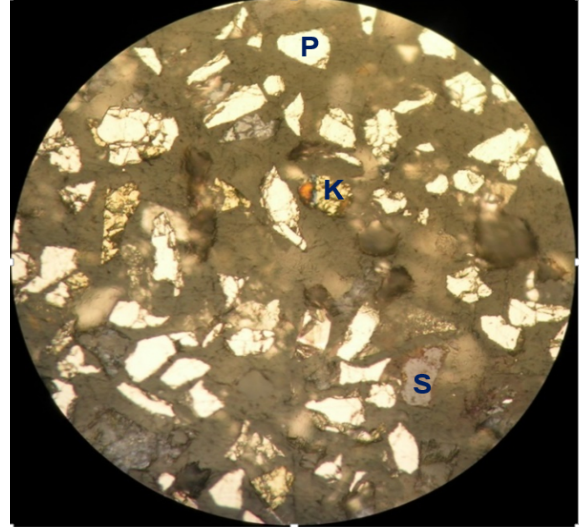
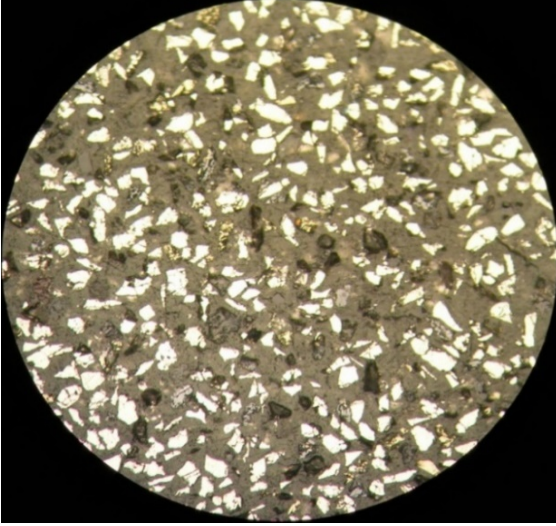
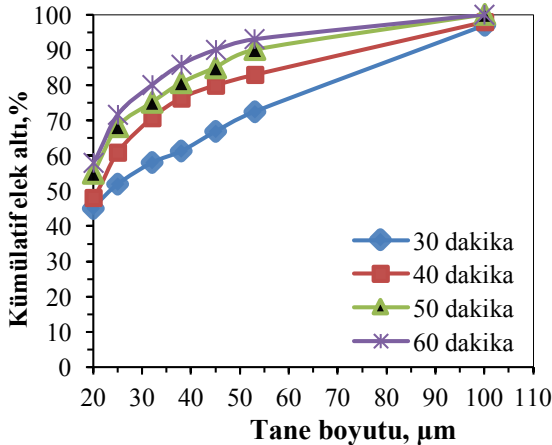


Foto 12. 60 dakika öğütülmüş cevherin -38+32 µm boyut fraksiyonundaki parlak kesit görüntüsü (P: Pirit, S:Sfalerit, K:Kalkopirit; Büyütme Oranı: 20x ve 50x).

Ayrıca farklı sürelerde (30, 40, 50 ve 60 dakika) öğütülmüş numunelerin tane boyut analizleri de yapılmış ve tane boyut dağılımları Şekil 2'de verilmiştir.

Şekil 2'deki sonuçlara göre; cevherin %80'inin elek altına geçtiği boyut olan d_{80} ; 30 dakikalık öğütme süresinde yaklaşık olarak 55 µm, 40 dakikalık öğütme süresinde 45 µm, 50 dakikalık öğütme süresinde ise 38 µm olduğu görülmektedir.



Şekil 2. Değirmende değişik sürelerde öğütülen cevherin tane boyut dağılımı

1.4. Flotasyon Deneşileri

Benzer cevher üzerinde yapılan araştırmalar (Ekmekçi et al., 2006; Hiçyılmaz and Altun, 2006; Pecina et al., 2006; Cytec) ve tesiste daha iri boyutlarda zenginleştirilen cevherde kullanılan reaktifler baz alınarak deneşsel çalışmalarda

aşağıdaki reaktifler kullanılmıştır.

Toplayıcı: Aerophine 3418A ve 3477
Bastırıcı: Sodyum metabisülfid ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$)
Sülfürleyici: Sodyumsülfür (Na_2S)
Dağıtıcı ve bastırıcı: Sodyum silikat (Na_2SiO_3)
Canlandırıcı: Bakır sülfat (CuSO_4)
Köpürtücü: AF 76-A
pH ayarlayıcı: CaO

Yukarıda yazılan reaktiflerden AF 76-A Cytec firmasından alınmış olup, diğeri de ETİ BAKIR A.Ş.'ye ait Murgul tesislerinden temin edilmiştir. Deneşlerde çeşme suyu kullanılmıştır.

1.5. Mekanik Flotasyon Hücresi

Mekanik flotasyon hücresinde zenginleştirme çalışmaları iki aşamada aşağıdaki sabit tutulan parametre şartlarında yapılmıştır.

Sabit tutulan parametreler:

Hücre kapasitesi: 2 L

Katı oranı: %30

pH: 11

Sodyum silikat: 500 g/t

Köpürtücü: 50 g/t

Koşullandırma süresi: 2+5

- İlk aşamada yapılan deneşler farklı öğütme sürelerinde elde edilen numunelerin toplu flotasyon ile bakır ve çinkonun birlikte alınması.
- İkinci aşamada ise, birinci aşamada elde edilen veriler doğrultusunda flotasyon hücre-

sinde selektif flotasyon deneyleri yapılmış ve daha sonraki aşama olan Jameson flotasyon hücresindeki çalışma parametreleri belirlenmiştir.

Yapılan bu deneysel çalışmaların temel amacı; Flotasyon için uygun reaktifleri belirlemek, ayrıca flotasyon süresinin verim ve tenör üzerine etkisini görmektir. Elde edilecek sonuçların Jameson hücresinde yapılacak çalışmalarda kullanılması uygun olacak ve iki aletin karşılaştırmasının yapılması sağlanacaktır.

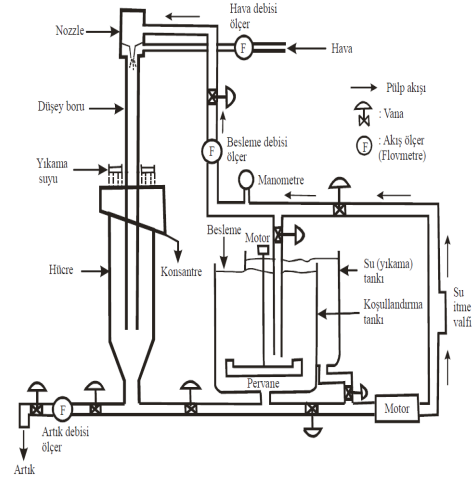
Deneysel çalışmalarda kullanılan numune öncelikle değirmende %60 katı oranı ve kireç ilave edilerek öğütüldükten sonra 2 Litrelik klasik flotasyon hücresi içine alınmıştır. Gerekli parametre ayarlamaları yapıldıktan sonra flotasyon işlemi yapılmıştır.

1.6. Jameson Flotasyon Hücresi

Flotasyon deneyleri, DPÜ Cevher Hazırlama Laboratuvarlarında bulunan Jameson Flotasyon Hücresinde (JFH) yapılmıştır (Şekil 3).

Şekil 3'te görülen deney setini oluşturan ekipmanlar aşağıda verilmiştir:

- Konsantre ve artığın ayrıldığı şeffaf hücre (Çap (200 mm)x boy (1000 mm)),
- Düşey boru (Şeffaf), (Çap (26 mm)x boy (1800 mm)),
- Nozul (paslanmaz çelik), (Çap 5 mm).
- Besleme tankı: 100 litre hacminde olup paslanmaz (çelik) malzemeden yapılmıştır.
- Yıkama suyunun beslendiği ve hücrenin çalışma koşullarının ayarlanmasında kullanılan 100 litre hacimli paslanmaz çelik tank
- Besleme ve yıkama suyu pompası,
- Pülp besleme basıncını ölçen bir manometre,
- Besleme ve artık debisini ölçmek için iki adet flowmetre,
- Hava debisini ölçmek için flowmetre,
- Besleme tankı üzerine monte edilmiş pülp karıştırma motoru.



Şekil 3. Laboratuvar boyutlu JFH Şematik Görünümü

Her deney başlangıcında koşullandırma yapmak için bazik ortamda öğütülen cevher mekanik flotasyon hücresine alınmıştır. Katı oranı %35 olacak şekilde su ilave edilerek önce pH ayarlanmıştır. Sonra gerekli reaktifler ilave edilip (köpürtücü hariç), 1650–1700 devir/dakikada 6 dk. koşullandırılmıştır. Belirlenen katı oranına (%2,5) göre besleme tankına şebeke suyu doldurulup, karıştırılarak ortamın pH'sı ayarlanmış ve gerekli köpürtücü ilave edilmiştir. Daha sonra koşullandırılmış numune besleme tankına boşaltılmıştır. Hücrenin üst kısmından konsantre gelmeye başladığı andan itibaren yaklaşık 1.5 dakika süreyle numune alınmıştır. Deney sonunda sistem durdurularak yüzen ve batan ürünlerin kimyasal analizleri yapılmıştır.

2. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

2.1. Mineralojik Ve Serbestleşme Çalışmaları

Mikroskopik incelemeler sonucunda;

- Öz biçimli piritlerden daha fazla konsantrik piritlerin olduğu;
- Piritleri çinkoblendin daha fazla ornattığı;
- Çinkoblendin içinde çok miktarda kalkopirit kapanımlarının varlığı;
- Çinko içerisinde hidrotermal kuvarsların olduğu
- Bazı piritlerde kırılma birkaç faz;
- Kataklastik dokulu pirit oluşumlarının olduğu;
- Çok nadir görülen galen varlığı;
- İnce boyutlu kalkopirit saçınımları saptanmıştır.

Ayrıca;

Kriptokristalen kuvarlar, hidrotermal kuvarlar, ayrılmış, killeşmiş feldispatlar, ayrılmış mineralli limonitler, karbonatlaşma, silisleşme, kalsedon, klorit, ince mikalar gibi gang mineralleri de saptanmıştır.

Özgür (1993) yaptığı çalışma ile Murgul madeninde saçınımlı cevher, stokverk cevher ve küçük cevher damarları olmak üzere üç tip cevherleşme saptamıştır. Bu üç tip cevherleşmede yaygın cevher minerali olarak pirit, kalkopirit, sfalerit, galen, fahlerz, arsenopirit, kovalin ve altın belirlenmiştir. Daha sonra yapılan çalışmalarla bu mineral parajenezlerine ek aksesuar mineral olarak aikinit, hessit, tetradimit ve klaustalit minerallerinin varlığı saptanmıştır (Zerener, 2005). Buna göre bölgedeki cevherleşmenin benzer olduğu benzer mineral oluşumlarından anlaşılmaktadır.

30, 40, 50 ve 60 dakika öğütme süreleri sonucunda elde edilen boyut fraksiyonlarının mikroskopik incelemeleri sonucunda kalkopirit tanelerinin değirmende daha çabuk ufalandıkları ve serbest kalkopirit tanelerinin genellikle ince fraksiyonlarda yoğun olarak bulunduğu tespit edilmiştir. İri boyutlarda ise (30 ve 40 dakika öğütme) serbest

kalkopirit tanelerinin daha az ve genellikle bağlı taneler şeklinde olduğu görülmüştür. Tane boyutu inceldikçe yani öğütme süresi arttıkça serbestleşmenin de arttığı tespit edilmiş fakat özellikle 38 µm boyutun altında şlam oluşumu arttığı için ve öğütme maliyetlerinden dolayı ve ayrıca bu boyutun altında yeterli serbestleşme olduğu için bu boyut öğütme boyutu olarak alınmıştır. Bunun yanında serbestleşme boyutu flotasyon yolu ile de tespit edilmeye çalışılmıştır.

2.2. Flotasyon Çalışmaları

2.2.1. Mekanik Flotasyon Hücresi

İlk aşama flotasyon deneylerinde numuneler 30, 40, ve 50 dakikalık öğütmeler yapılarak flotasyon hücresi için hazır hale getirilmiş ve bekletilmeden flotasyon deneyleri yapılmıştır. Yukarıda verilen ve sabit tutulan şartlar kullanılarak her öğütme süresinde eşit oranlarda (50:50) ancak farklı miktarlarda karıştırılan 3418A ve 3477 toplayıcılarının kullanılmasıyla deneyler yapılmıştır. Deneylerde konsantreler 30. saniye, 1. dakika, 2,5. dakika, 5. Dakika, 7,5. dakika ve 10. dakika süreleri ile alınmıştır (Çizelge 2-4).

Çizelge 2. 30 dakika öğütme süresinde toplayıcı miktarına göre kümülatif konsantr tenör ve verimleri

Deney no	Toplayıcı miktarı, g/t	Konsantr alma zamanı, dak.	% ,Kümülatif miktar	Kümülatif tenör		Kümülatif verim		
				%Cu	%Zn	%Cu	%Zn	
1	3418A 100 + 3477 100	konsantr	1	23,23	7,46	7,14	71,49	74,53
			2,5	42,75	5,07	4,78	89,44	91,90
			5	51,49	4,39	4,10	93,19	94,92
			7,5	57,32	4,03	3,74	95,33	96,44
			10	60,76	3,83	3,55	96,11	97,00
			Artık	39,25	0,24	0,17	3,89	3,00
			Besleme	100,00	2,27	2,1	100,00	100,00
			1	23,66	6,24	6,18	71,42	74,82
			2,5	39,07	4,50	4,41	85,06	88,23
			5	55,44	3,44	3,32	92,35	94,09
2	3418A 150 + 3477 150	konsantr	7,5	64,2	3,06	2,92	94,97	96,02
			10	69,42	2,86	2,72	96,01	96,71
			Artık	30,58	0,27	0,21	3,99	3,29
			Besleme	100,00			100,00	100,00
			0,5	14,00	8,22	7,90	61,12	63,40
			1	19,44	7,18	6,88	74,12	76,68
			2,5	31,36	5,26	4,97	87,60	89,39
			5	49,65	3,58	3,32	94,40	94,43
			7,5	58,58	3,09	2,85	96,25	95,65
			10	64,87	2,83	2,59	97,39	96,38
3	3418A 200 + 3477 200	konsantr	Artık	35,12	0,14	0,18	2,61	3,62
			Besleme	100,00			100,00	100,00

Çizelge 3. 40 dakika öğütme süresinde toplayıcı miktarına göre kümülatif konsantre tenör ve verimleri

Deney no	Toplayıcı miktarı, g/t	Konsantre alma zamanı, dak.	Kümülatif miktar, %	Kümülatif tenör		Kümülatif verim		
				%Cu	%Zn	%Cu	%Zn	
4	<u>3418A</u> 100 + <u>3477</u> 100	konsantre	0,5	13,67	9,15	8,36	55,62	55,01
			1	22,57	7,10	6,66	71,28	72,31
			2,5	43,16	4,68	4,41	89,86	91,63
			5	59,12	3,60	3,37	94,61	95,85
			7,5	67,28	3,22	3,00	96,31	97,22
			10	70,62	3,09	2,88	97,00	97,74
			Artık	29,38	0,23	0,16	3,00	2,26
			Besleme	100			100,00	100,00
			0,5	17,65	6,63	6,10	53,19	53,23
			1	27,31	5,96	5,62	74,01	75,84
5	<u>3418A</u> 150 + <u>3477</u> 150	konsantre	2,5	49,74	3,99	3,72	90,23	91,60
			5	64,42	3,24	3,00	94,90	95,59
			7,5	72,12	2,95	2,72	96,62	96,96
			10	74,74	2,86	2,63	97,13	97,38
			Artık	25,26	0,25	0,21	2,87	2,62
			Besleme	100			100	100
			0,5	19,04	5,85	5,55	51,30	52,91
			1	30,28	5,00	4,76	69,67	72,15
			2,5	51,16	3,69	3,48	86,98	89,09
			5	69,17	2,99	2,78	95,27	96,30
6	<u>3418A</u> 200 + <u>3477</u> 200	konsantre	7,5	76,72	2,76	2,55	97,56	98,11
			10	79,69	2,68	2,47	98,32	98,68
			Artık	20,32	0,18	0,13	1,68	1,32
			Besleme	100			100,00	100

Çizelge 4. 50 dakika öğütme süresinde toplayıcı miktarına göre kümülatif konsantre tenör ve verimleri

Deney no	Toplayıcı miktarı, g/t	Konsantre alma zamanı, dak.	Kümülatif miktar, %	Kümülatif tenör		Kümülatif verim		
				%Cu	%Zn	%Cu	%Zn	
7	<u>3418A</u> 100 + <u>3477</u> 100	konsantre	0,5	10,34	12,00	10,35	55,20	52,86
			1	18,41	9,27	8,30	75,91	75,50
			2,5	36,97	5,45	4,92	89,62	89,81
			5	51,34	4,20	3,76	95,88	95,49
			7,5	57,98	3,78	3,38	97,48	96,83
			10	63,15	3,49	3,12	98,03	97,27
			Artık	36,86	0,12	0,15	1,97	2,73
			Besleme	100	2,2	2,0	100,00	100,00
			0,5	9,64	7,97	7,23	33,14	30,76
			1	17,17	6,65	6,06	49,20	45,91
8	<u>3418A</u> 150 + <u>3477</u> 150	konsantre	2,5	32,26	5,27	5,02	73,34	71,41
			5	53,07	3,90	3,84	89,13	89,87
			7,5	62,97	3,45	3,41	93,57	94,76
			10	67,51	3,26	3,22	94,96	95,99
			Artık	32,49	0,36	0,28	5,04	4,01
			Besleme	100			100,00	100,00
			0,5	13,29	6,89	6,83	37,96	40,00
			1	23,89	6,21	5,74	61,51	60,41
			2,5	38,01	5,10	4,83	80,36	80,95
			5	56,74	3,94	3,74	92,78	93,58
9	<u>3418A</u> 200 + <u>3477</u> 200	konsantre	7,5	65,57	3,52	3,34	95,67	96,38
			10	71,34	3,28	3,10	97,03	97,60
			Artık	28,66	0,25	0,19	2,97	2,40
			Besleme	100			100,00	100,00

Çizelge 5. Selektif Cu ve Zn flotasyonu.

	Konsantre alma zamanı, dak.	% ,Kümülatif miktar	Kümülatif tenör		Kümülatif verim	
			Cu %	Zn %	Cu %	Zn %
Konsantre	Bakır	0,5	12,36	3,42	34,02	11,96
		1	9,29	3,44	56,55	26,56
		2,5	6,88	3,22	73,81	43,89
		5	5,65	3,09	86,43	59,98
		7,5	3,65	2,96	90,37	68,38
Konsantre	Çinko	0,5	1,31	5,35	3,40	17,65
		1	1,08	4,16	4,74	23,16
		2,5	0,88	3,27	5,93	27,84
		5	0,81	2,72	6,77	28,85
		7,5	0,76	2,47	7,00	29,09
	Artık	24,83	0,29	0,22	2,63	2,53
	Besleme	100,00	2,4	2,2	100,00	100,00

Çizelgelerden görüldüğü gibi tenör yönünden en iyi sonuçlar 50 dakika öğütme ve 3418A ve 3477 toplayıcılarından 100 er gr kullanılması durumunda elde edilmiştir. Bu durum aynı zamanda bu öğütme süresi ile elde edilen 38 µm nin altında serbestleşmenin büyük oranda gerçekleştiğini de doğrulamaktadır. İkinci aşamada selektif flotasyon yapılmış olup, yukarıda verilen sabit parametrelere ek olarak birinci aşamada tespit edilen 3418A ve 3477 toplayıcılarının

100 g/t olarak birebir kullanıldığı dozaj miktarı alınarak aşağıdaki farklı şartlarda deneyler yapılmıştır. Selektif flotasyonda ilk önce kalkopirit yüzdürülüp diğer mineraller bastırılmış sonrada sfalerit yüzdürülmüştür. Elde edilen deneysel sonuçlar Çizelge 5'de verilmiştir.

Kalkopirit yüzdürme şartları;

Sodyum metabisülfid (Sfaleriti bastırma):
3000 g/t

Sodyum sülfür (sülfürleyici): 150 g/t

Toplayıcı (Aerophine 3418A): 100 g/t

Köpürtücü: 50 g/t

Sodyum silikat: 500 g/t

Sfalerit yüzdürme şartları;

Bakır sülfat (sfalerit canlandırma): 200 g/t

Sodyum silikat: 500 g/t

Toplayıcı (Aerophine 3477): 100 g/t

Köpürtücü: 50 g/t

Çizelge 5 incelendiğinde seçimli flotasyonun birinci kademesinde kalkopiritin yüzdürülebildiği görülmektedir. Ancak yüzdürülen her üründe %3 civarında Zn görülmesi sfaleritin etkili bir şekilde

bastırılmadığını göstermektedir. Seçimli flotasyonun ikinci aşaması olan sfalerit flotasyonunda ise sfaleritin başarılı bir şekilde konsantre olarak alınabildiği gözlenmiştir

2.2.2. Jameson Flotasyonu

Bu çalışmada, JFH'inde bir çok parametre literatür çalışmaları dikkate alınarak sabit tutulmuştur (Gürsoy, 2007; Jameson, 1991; Şahbaz, 2010). Ancak yüzdürülecek tane boyutuna bağlı olarak değeri değişen ve verimi doğrudan etkileyen bias değerinin (negatif veya genellikle pozitif bias) flotasyona etkisi sistematik olarak incelenmiştir. Jameson flotasyon çalışmalarında sabit tutulan parametreler;

- Tane boyutu (d_{80}): 38 µm
- Kabarcık boyutu: 0,6 – 1,0 mm
- Köpürücü: AF 65 (20 g/t)
- Toplayıcı: Aerophine 3418A (100 g/t)
- pH: 11
- Koşullandırma süresi: 2; 4; 6 dk.
- Hücre hacmi: 29,3 lt.
- Besleme debisi: 11,5 lt/dk
- Atık debisi: 12,1, 12,7, 13,3 lt/dk
- Yıkama suyu debisi: 2 lt/dk
- Düşeyboru dalma derinliği: 50, 60 ve 70 cm.
- Jet uzunluğu: 6 cm.
- Besleme basıncı: ~110 kPa

- Hava hızı (V_h): 27 cm/sn,
- Dalma derinliği (d_h): 20 cm

Bias, artık debisi ile besleme debisi arasındaki fark olup, pozitif veya negatif değerine bağlı olarak köpük zonu oluşur. Pozitif bias değerinde köpük zonu vardır. Köpük zonunun derinliği ise yıkama suyunun debisine bağlı olarak değişir. Bias faktörü ise artık ve besleme debisi arasındaki farkın, yıkama suyu debisine oranıdır (Patwardhan and Honaker, 2000). Jameson flotasyon hücresinde flotasyon verimini etkileyen en önemli değişkenlerden biridir. Bias faktörü doğrudan hücredeki köpük derinliği ile ilişkilidir (Mohanty and Honaker, 1999; Patwardhan and Honaker, 2000).

$$J_b = (Q_A - Q_B) / Q_{wv}$$

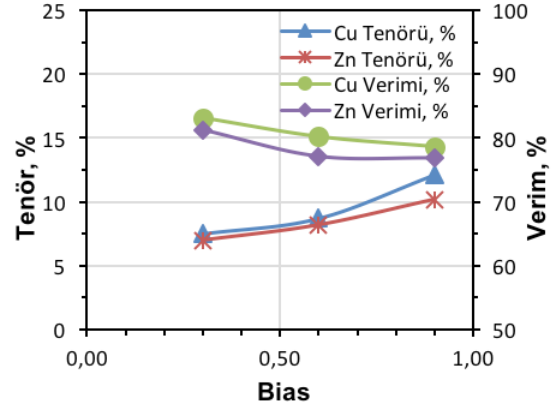
J_b : Bias faktörü

Q_A : Artık debisi (m^3/h)

Q_B : Besleme debisi (m^3/h)

Bias faktörü, gang minerallerinin konsantrasyonuna sürüklenmesine engel olmak amacıyla ince taneli minerallerin flotasyonunda ($-100 \mu m$) genellikle pozitif olmaktadır. İri taneli mineralleri flotasyonunda ise genellikle bias negatiftir (Oteyaka, 1993). Bu faktörün değeri arttıkça sürüklenme azalır ve konsantrasyon tenörü artar (Taşdemir, 2006). Bu nedenlerden dolayı bias faktörünün tenör ve randıman üzerine etkisini araştırmak üzere besleme debisi ve yıkama suyu debisi sabit tutulmuş, artık debisi değerleri ise değiştirilerek farklı bias faktörü değerinde flotasyon deneyleri yapılmıştır. Jameson flotasyon deneylerinde bias 0,30-0,90 arasında değişken parametre olarak araştırılmış olup, deney sonuçları Şekil 4'de verilmiştir.

Deneysel sonuçların verildiği Şekil 4 incelendiğinde; pozitif bias faktörünün artmasına bağlı olarak tenörler artmakta, buna karşın verimler azalmaktadır. Bakır tenörü açısından uygun bias faktörü değeri 0.9 olup, bu değeri sağlayan artık debisi ise 13.3 litre/dakika'dır. Bias faktörü 1 değerinin üzerinde olduğunda konsantrasyon akışı olmayacaktır. Değerin sifira yakın olduğu durumlarda ise konsantrasyon aşırı sürüklenme olmakta ve tenör çok düşük kalmaktadır. Uygun bir verim ve yüksek tenör elde edebilmek için 0.70-0.9 aralığında bias faktörü değerleri uygun olmaktadır.



Şekil 4. Bias faktörünün Cu – Zn verim ve tenörüne etkisi.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında flotasyonu özellikle oksitlenme ve tane boyutundan dolayı sorunlu Doğu Karadeniz Bölgesi ince taneli kompleks sülfürlü bakır-çinko cevherinin serbestleşme boyutu mikroskobik ve flotasyon yöntemiyle tespit edilerek flotasyon yöntemiyle zenginleştirilebilen olanakları araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir;

1- Mikroskobik çalışmalar sonucunda cevher numunesinin değerli mineral olarak çoğunlukla pirit, kalkopirit, sfalerit ve daha az olarak da galen, gang olarak ise kuvars, kloritler, mikalar, killeşmiş feldispatlar, mikalar, karbonatlar gibi mineraller ile karbonatlaşma ve silisleşme tespit edilmiştir.

2- Değişik sürelerde öğütülen cevherin mikroskop incelemeleri ve flotasyon deneylerine göre serbestleşme boyutu yaklaşık -38 mikrometre olarak saptanmıştır.

3- Mekanik flotasyon hücresi ile yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarına göre;

- 50 dakika öğütülmüş %2,2 Cu tenörlü numune-de toplayıcı olarak 3418A ve 3477'nin 100'er gr olarak kullanıldığı durumda ortalama olarak %80 verimde yaklaşık %9 bakır içeren konsantrasyon elde edilmiştir.

- Selektif flotasyonda Cu-Zn ayrımı yeterince gerçekleştirilememiştir.

4- Jameson flotasyon deneylerinde tane boyutu için önemli parametre olan bias faktörünün etkisi daha önce yapılan deneysel çalışmalar ve mekanik hücre çalışmaları ışığında araştırılmıştır. Buna göre;

- 0.9 bias faktörü değerinde yaklaşık %12 Cu tenörlü konsantre %79 verimle tek aşamada elde edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, 2012/01 No'lu Proje desteğinden dolayı Dumlupınar Üniversitesi BAP birimine, mineralojik çalışmalar sırasındaki yardımlarından dolayı Prof. Dr. Yaşar Kibici (Dumlupınar Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü) ve Yrd. Doç. Dr. Mithat Vıcıl (Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü)'a ve Jameson Flotasyon Hücresinin tasarımına yaptığı katkılardan dolayı Prof. Dr. Bahri Öteyaka (Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü)'ya teşekkürü bir borç bilmektedirler.

KAYNAKLAR

- Ekmekçi, Z., Can, N. M., Aslan, A., Bradshaw, D. J., 2006, "Relating the changes in froth structure to metallurgical performance in flotation using machine vision", XXIII International Mineral Processing Congress, vol. 1, pp 802-806.
- Finch, J.A., 1995, "Column Flotation: A Selected Review-Part IV: Novel Flotation Devices"; Minerals Engineering, Vol.8, No.6, pp.587-602.
- Hiçyılmaz, C. and Altun, N. E., 2006, "Electrochemical investigation of copper-DTPI interactions", Journal of Applied Electrochemistry, pp. 609-616.
- Jameson, G. J. and Manlapig, E. V., 1991, "Applications of the Jameson Cell, Column'91. Proceedings of an International Conference on Column Flotation", Sudbury. Ontario, pp.673-687.
- Gürsoy, H., 2007, "Jameson Flotasyon Hücresinde İnce Taneli Kompleks Bakır Cevherlerinin Zenginleştirilebilirliği", PhD Thesis, Eskişehir Osmangazi University.
- Öteyaka, B., 1993, "Modelisation d'une colonne de flottation şans zone d'ecume pour la separation de particules grossieres", PhD Thesis, Laval University, Canada.
- Öteyaka, B., 1994, "Efflot du taux de retention du gauz sur la stabilité des agregats buble-particule(s) pendant la flotasyon", Mines & Carieres, Les Techniques, vol 76, pp 245-248.
- Pecina, E. T.; Orrantia, E. and Uribe, A.; 2006, "Impact of copper and lead on the activation of pyrite in the presence of thiol collectors", International Journal of Materials and Product Technology (IJMPT), Vol. 27, No. 1/2, 2006.

Schulze, H. J., 1984, "Physico-chemical Elementary Processes in Flotation", Elsevier, Amsterdam.

Şahbaz, O., 2006, "Tunçbilek Termik Santral Cürufundaki Yanmamış Karbonun Jameson Flotasyon Kolonu ile Kazanımı", Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi.

Taşdemir, T., 2006, "Jameson Hücresinde Hold-Up'ın Modellenmesi ve Bazı Çalışma Parametrelerinin Flotasyon Verimine Etkisi", PhD Thesis, Eskişehir Osmangazi University.

Taşdemir, T., Öteyaka, B., and Tasdemir, A., 2007, "Air entrainment rate and holdup in the Jameson cell", Minerals Engineering, Vol.20 No.8,

Yoon, R. H.; Luttrell, 1989, "The effect of bubble size on fine particle flotation", Min. Process Extr. Metal. Rev., 5, 101.

Özgür, N., 1993, Volcanogenic massive sulfide deposits in the east pontic metalotect, Resource Geology Special Issue, No. 17, p. 180-185.

Zerener, M., 2005, Doğu Karadeniz Bölgesi Metalojenik Kuşağında Bulunan Murgul Masif Sülfid Yatağanın Hidrotermal Çözeltileri ve Gelişimi, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.

CYTEC, Mining Chemicals Handbook, Revised Edition.

Şahbaz, O., Modification of Downcomer in Jameson Cell and Its Effect on Performance. Ph.D. Thesis, Dumlupınar University, Department of Mining Engineering, Turkey, 2010.

Patwardhan, A. and Honaker, R.Q., 2000, Development of a Carrying-capacity Model for Column Froth Flotation, Int. Journal of Mineral Processing, V 59, pp 275-293.

Mohanty, M. K. and Honaker, R.Q., 1999, Performance Optimization of Jameson Flotation Technology for Fine Coal Cleaning, Minerals Engineering, Vol. 12.No.4, pp.367-381.



Derleme / Review

KÖMÜR YIKAMA TESİS ATIKLARININ SUSUZLANDIRILMASINDA ESKİ VE YENİ TEKNOLOJİLER

OLD AND NEW TECHNOLOGIES IN DEWATERING OF COAL PLANT SLURRIES

Hasan Hacıfazlıoğlu^{a, *}

^a İstanbul Üniversitesi, Müh. Fak., Maden Müh. Böl., İSTANBUL

Geliş Tarihi / Received : 22 Mart / March 2016

Kabul Tarihi / Accepted : 8 Ağustos / August 2016

Anahtar Sözcükler:

Susuzlandırma, Disk Filtre, Pres Filtre, Bant Filtre, Derin Konik Tikiner.

Keywords:

Dewatering, Disc Filter, Press Filter, Belt Filter, Deep Cone Thickener.

ÖZET

Kömür yıkama tesislerinden çıkan sulu şlam kömürlerin ekonomiye kazandırılabilmesi, yarattığı çevresel sorunların giderilmesi ve yıkama suyunun geri kazanılabilmesi için susuzlandırılması gerekmektedir. Kömür yıkama tesislerinde 1 ton tüvenan kömürün yıkanması için ortalama 2 ton su kullanılmakta ve bu su prosesin son aşamasında %1-3 katı oranı ile tikinere gönderilmektedir. Tikinere çöktürülen şlam kömürlerin katı oranı %35'e kadar çıkabilmekte ve suyun büyük bir bölümü tikiner yardımıyla geri kazanılabilmektedir. Şlam kömürün ileri derecede susuzlandırılması söz konusu olduğunda ise filtreler kaçınılmaz olarak kullanılmaktadır. Filtrelerle şlam kömürün nemi %15'lere kadar düşürülebilmektedir. Bu çalışmada, şlam kömürlerin susuzlandırılması için geliştirilmiş olan eski ve yeni teknoloji ekipmanlar tanıtılmıştır.

ABSTRACT

Dewatering is needed to gain economy slime coals discarded from coal washing facilities, remove the problems created for environment and recovery of washing water. Approximately 2 tons of water is needed to wash 1 ton raw coal in coal washing facilities and sent to thickener with 1-3% solid matter rating at the last phase of this process. Solid rating of coal precipitated in thickener could up to 35% and some part of water could recover by the help of thickener. When advanced dewatering is needed filters are used compulsorily. In filters humidity of slime coal can reduce up to 15%. In this research new and old technologic equipments introduced developed for dewatering of coal slimes.

* hasanh@istanbul.edu.tr

GİRİŞ

Kömür yıkama tesislerinde su yoğun olarak kullanılmakta ve işlem sonrasında katı-sıvı karışımı ürünler elde edilmektedir. Katı-sıvı karışımlarında, katı tanecikler iri boyutlu (>0.3 mm) ise, susuzlandırma işlemi kolaylıkla yapılabilmektedir. İri boyutlu katılardan suyun uzaklaştırılması için genellikle “yüksek frekanslı elekler (HI-G Derrick, Banana screen vb.) “ya da elek sepetli santrifujler tercih edilmektedir. Nispeten daha ince tanelerin susuzlandırılmasında ise, solid-bowl tip dekantör santrifujler tercih edilmektedir. Çok ince boyutlu ($\sim 20\mu\text{m}$) şamlardan suyun giderilmesinde ise birkaç mikron gözenekli malzemelerle kaplanmış olan filtrasyon ekipmanları, yani filtreler kullanılmaktadır. Endüstriyel ölçekte filtrasyon işlemi genellikle 0.3 mm altındaki malzemelerin susuzlandırılması için kullanılır. Filtrasyon işleminde iki ortam arasındaki basınç farkından faydalanılır. Filtre dokusu; pamuk, yün, keten, jüt, naylon, ipek, cam elyaf, gözenekli karbon metaller, çelik teller, seramik ve diğer bir çok sentetik malzemeden (PP, PET, PA, PEEK, PVDF, E-CTFE) üretilebilmektedir. Filtre dokusunun cinsi ve geçirgenliği filtrasyonun başarısını önemli derecede etkileyen bir parametredir (İpekoğlu, 1994; Ateşok, 2009; Wills, 2006; Nittami vd., 2015). Diğer taraftan, filtrasyon öncesinde pülpün belli bir katı oranında ve belli bir sıcaklıkta olması istenir. Tesislerden genellikle %1-3 katı oranı ile çıkan şamlar filtrelere beslenmeden önce bir koyulaştırma ekipmanından (tikinerden) geçirilir. Tikinerden çıkan koyulaştırılmış pülpün (yada şlamın) katı oranı genellikle %30-35 arasındadır. Başka bir deyişle, pülp %65-70 su içeriğine sahiptir. Bu pülpün yoğunluğu 1.1 ton/ m^3 civarındadır (Ünlü vd., 2000). Son yıllarda geliştirilen bazı tikiner tipleri ile katı oranının %65'lere kadar çıkarılabileceği belirtilmektedir. Derin konik tikiner olarak bilinen koyulaştırma ekipmanı ile %35-45 nemli ürünlerin elde edilebileceği belirtilmektedir (Abbott, 1973; Slottee, 2005; Parekh, 2009; Outotec, 2015a). FCK'nin geliştirmiş olduğu bir susuzlandırma sisteminde ise tikiner yerine döner elek kullanılmaktadır. Koyulaştırılan malzeme vidalı presle susuzlandırılarak nihai ürün elde edilmektedir (FCK, 2015).

Kömür yıkama tesislerinde şlam terimi hidrosiklonun üst akımından alınan sulu çamur (slurry) için kullanılır. Bu sulu çamurun katı oranı çok düşük (%1-3) olduğu için önce bir kıvamaştırıcıya gönderilir. Burada katı oranı yükseltilecek şlam daha sonra ileri susuzlandırma için filtrasyon işlemine

tabi tutulur. Şlam malzemesinin içerisinde, yıkanan kömür tipine bağlı olarak gang-şist haricinde %30 ile %60 arasında kömür tozu bulunabilmektedir. Şamlar susuzlandırıldıktan sonra ya atık sahalarında depolanmakta ya da düşük kalorili yakıt olarak değerlendirilebilmektedir. Ülkemizde taşkömürü şamları susuzlandırılarak termik santrallerde yakıt olarak kullanılmaktadır. %40-45 kül ve %15-20 nem içeriğine sahip taşkömürü şamları orjinal bazda $3000-3500$ kcal/kg'lık bir ısı değere sahiptir. Linyit şamlarında ise bu kalori değeri biraz daha düşüktür.

Kömür yıkama tesislerinin temiz suya olan ihtiyacının artması, ekonomik nedenler ve çevresel hassasiyetlerle birlikte şamların susuzlandırılması artık bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu bağlamda, koyulaştırma ve filtrasyon işlemleri tesislerin vazgeçilmez faaliyetleridir. Bu çalışmada, özellikle çok ince boyutlu taneleri içeren katı-sıvı karışımlarından (yani şamlardan) suyun ve katının birbirinden ayrılabilmesi için geliştirilmiş olan eski ve yeni teknoloji susuzlandırma ekipmanları tanıtılmıştır.

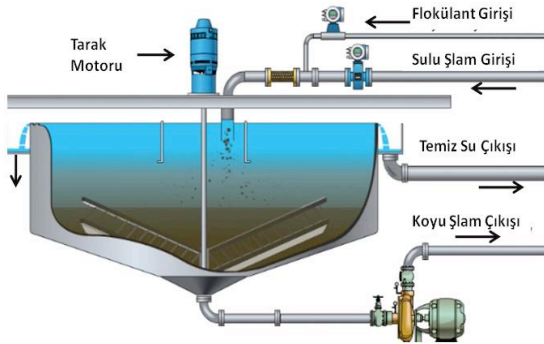
1. SUSUZLANDIRMA EKİPMANLARI

1.1. Klasik Tikiner (Koyulaştırıcı)

Tikiner; şamlı su içinde askıda bulunan katı maddelerin önemli bir kısmının çökmesi sonucu içinde yalnız koloidal parçacıkları kalan, kısmen temizlenmiş suyu bütün çevreden taşıyıp, suyun tekrar prosese dönmesini sağlayan, çöken iri parçaları eğik tabanındaki sıyrıcı tarafları ile merkez kısmına sürükleyip oradan bu çökeltinin ayrı olarak alınmasını sağlayan büyük çaplı silindirik şeklindeki ekipmandır. Kömür hazırlamada klasik tikinerlerin alt akımından genellikle %30-35 katı içerikli (%65-70 nemli) şlam alınmaktadır (Adalı, 2016). Şamların tane boyutları (d_{80}) yaklaşık $50-60$ μm civarında ve tesiste kullanılan hidrosiklonun çapına bağlı olarak değişmektedir.

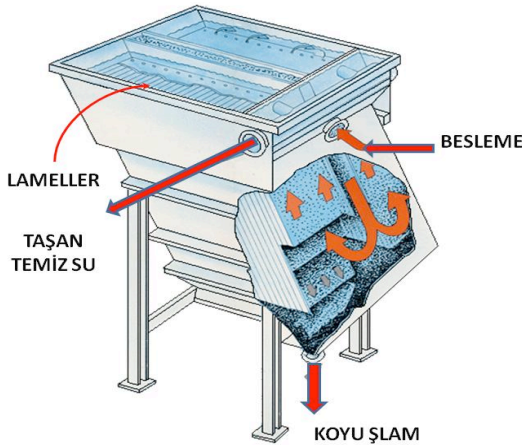
Klasik bir tikinerin (Şekil 1) kapasitesi kapladığı alana göre oldukça düşüktür. Bu bakımdan çöktürme kapasitesinin artırılması için ya flokülant kullanılmakta ya da tikiner içerisine eğik plakalar (lameller) yerleştirilmektedir. Şayet temizlenecek suda koloidal kil fazla yoksa sadece katyonik flokülant yeterlidir. Süspansiyonda kil fazla ise, önce katyonik flokülant ve birkaç dakika aralıklı olmak kaydıyla arkadan bir miktar anyonik flokülant ilave edilmesi suyun daha berrak alınmasını sağlamaktadır. Kömür yıkama tesislerinde katı

madde ton başına genellikle 15-60 gr flokülant tüketilmektedir (Keskin, 1986). Tikinerlerdeki çöktürme işlemlerinde, çeşitli yüzey aktif maddeler ve koagülantlar da kullanılabilir.



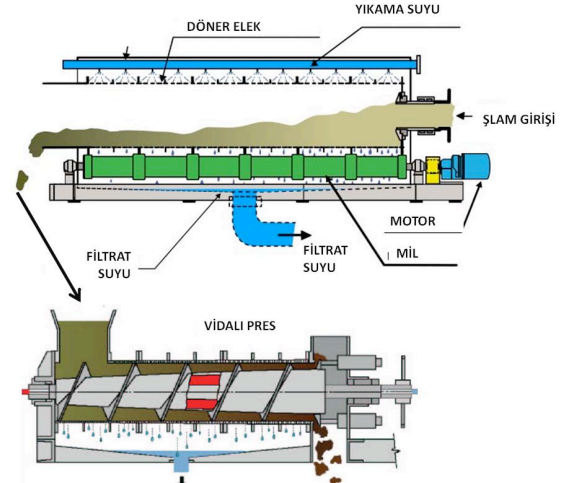
Şekil 1. Klasik tikinerin görüntüsü

Şekil 2'de gösterilen lamelli tikinerin kapasitesi klasik tikinere göre daha yüksektir. Tikiner içerisine yerleştirilen eğik plakalar (lameller) yardımı ile hem efektif çökme alanı artırılmakta hem de katı tanelerin çökme mesafesi azaltılmaktadır. Bu sayede kapasite önemli ölçüde artmaktadır. Klasik tikinerin kapladığı alanın sadece %20'si kadarlık bir alanda benzer kapasiteyi sağlayabilmektedir. Ayrıca, lamelli tikinerde (Şekil 2) herhangi bir sıyrıcı tarak ya da palet sistemi gibi hareketli bir aksam olmaması önemli bir avantajdır (Ateşok ve Kangal, 2012).



Şekil 2. Lamelli tikinerin görüntüsü

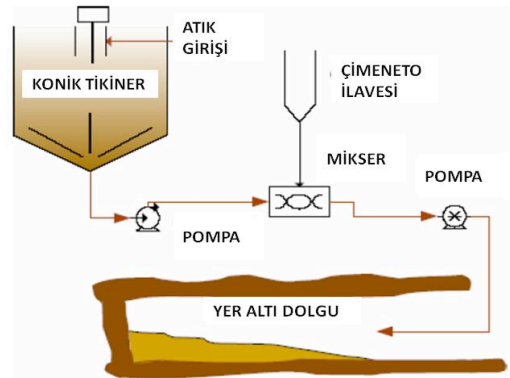
FKC firmasının geliştirmiş olduğu bir diğer susuzlandırma sisteminde ise tikiner yerine döner elek kullanılmaktadır. Bu döner elekte koyulaştırılan pülp daha sonra vidalı pres ile sıkıştırılarak %35-45 nemli nihai ürünler haline getirilmektedir. Burada döner elek tikiner görevi görmektedir, vidalı pres filtre olarak kullanılmaktadır (Şekil 3). Daha çok biokatıların ve lifli çamurların suyunun giderilmesinde kullanılmaktadır (FCK, 2015).



Şekil 3. Döner elekli tikiner ve vidalı pres ile susuzlandırma işlemi

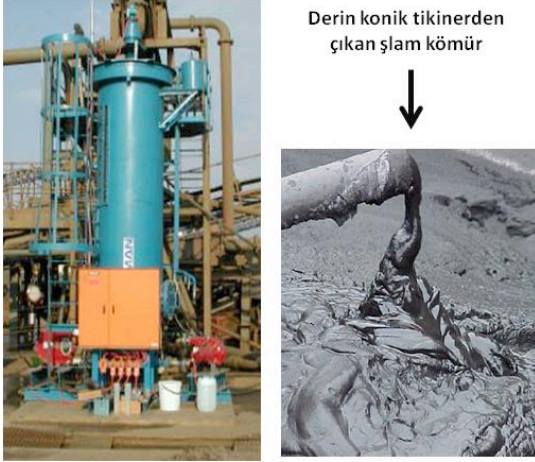
1.2. Derin Konik Tikiner (Koyulaştırıcı)

Derin konik tikiner ya da macun tikineri olarak bilinen bu koyulaştırıcı 1960'larda alüminyum, bakır, çinko ve kurşun madenlerinden çıkan ve AMD (asidik maden drenajı) oluşturan zararlı atıkların yeraltında depolanabilmesi için geliştirilmiş olan ve macun dolgu teknolojisi sisteminde kullanılan bir tikiner tipidir. Macun dolgu teknolojisi (*paste backfill technology*) olarak bilinen bu yöntemde, maden atıkları önce derin konik tikiner ile mümkün olduğunca susuzlandırılmakta ve çimento gibi bir bağlayıcı ile karıştırıldıktan sonra yeraltına pompalar vasıtasıyla iletilmektedir (Şekil 4). Derin konik tikinerin en önemli avantajı, alt akımdan yüksek katı oranlı şamlar vermesi ve sistemde filtrasyon gibi zahmetli ve pahalı bir işleme ihtiyaç duyulmamasıdır (FLS-midth, 2015a). Kömür şamlarının susuzlandırılmasında %50 ile %65 katı oranlı ürünler elde edilebileceği bazı araştırmacılar tarafından belirtilmiştir (Parekh, 2009; Slotte, 2010).



Şekil 4. Macun dolgu teknolojisinde derin konik tikiner ve yardımcı ekipmanlarının görüntüsü

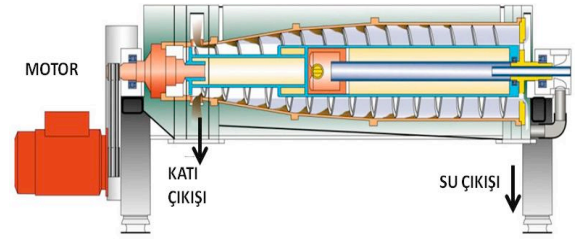
Şekil 5'de gösterilen derin konik tikineri klasik tikinlerden ayıran en önemli fark; yüksekliğinin çapına göre daha büyük olmasıdır. Öyle ki, konik tikinlerin yükseklikleri çaplarının 2-3 katı olabilmektedir. Bu sayede üstten daha temiz su alınırken, alttan daha yüksek katı oranlı şlam alınabilmektedir. Tikiner içerisinde daha yüksek kalınlıkta bir sediment tabakası oluşmakta ve bu durum şlamın daha fazla sıkışıp daha susuz bir forma gelmesini sağlamaktadır (Wills, 2006; Slotte,2010).



Şekil 5. Derin konik tikiner ve çıkan macun şlam

1.3. Dekantör Santrifuj

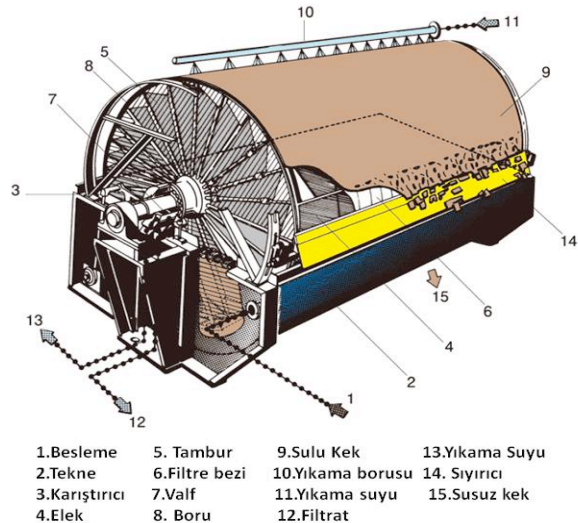
Santrifujlerde katı-sıvı ayrımı, katı ile sıvı arasındaki yoğunluk farkına dayanır. Taneler, merkezkaç kuvvetinin etkisi ile yerçekiminin birkaç katı ivmelere maruz bırakılarak sudan ayrılırlar. Dolayısıyla santrifujler, yerçekimi ivmesi ile çöktürülemeyen çok ince tanelerin ayrılabilirdiği gravite cihazlarının bir uzantısı olarak düşünülebilir. Genel olarak santrifujler; sepetli, tüp ve konveyör tip (dekantör) olmak üzere üçe ayrılırlar. Sepetli ve tüp tipi santrifujler 0.5mm'den daha iri boyutlu tanelerin susuzlandırılması için kullanılırken, konveyör tipli olanlar (Solid bowl ya da screen bowl adıyla bilinir) şlamın susuzlandırılması için kullanılabilir (Ateşok, 2009). Ancak 10 mikronun altındaki taneleri yeterince tutamaması nedeni ile filtreler kadar etkili değildir. Dekantörler (Şekil 6) filtre yerine kullanılacak ekipmanlar değildir. Öyle ki, klasik filtreler 1 mikrona kadar taneleri tutulabilmektedir. Aşınmaların ve enerji tüketimlerinin fazla olması ve düşük yakalama oranları (%90-95 solid capture) nedeni ile şlam susuzlandırmada dekantör tercih edilmemektedir. Daha çok, -500 + 10 mikron tane boyutlu ürünlerinin susuzlandırılmasında kullanılmaktadır.



Şekil 6. Dekantör santrifujün görüntüsü

1.4. Vakumlu Tambur Filtre

Silindirik şekilde delikli metalik malzemeden yapılmış olan tamburun üzeri filtre bezi ile sarılmıştır. Tambur pülpün içerisine verildiği bir tank içinde yavaş bir hızla (0.1-1 dev/dak.) döner. Tambur pülpün içinde bulunduğu tankta iken, tamburun içine doğru vakum oluşturularak pülp emilir ve bezin üzerinde bir kek tabakası oluşur. Keki ayırma işlemi bez altına verilen basınç ve ayırıcı bıçaklar yardımıyla yapılır. TTK Amasra işletmesinde toz kömür tambur filtre ile susuzlandırılmakta ve %25-35 nemli ürünler elde edilmektedir. Kek tabakasının kalınlığının artması ve filtre bezinin gözeneklerinin tıkanması durumunda elde edilen ürünün nem içeriği artmaktadır. Tambur filtrelerin çapları 1-3 m, boyları 1-6 m arasında değişir ve çap-boy arttıkça kapasiteleri artar (Ateşok ve Kangal, 2012). 1 m²'lik bir filtrasyon alanında saatte ortalama 0.3 ton kömür susuzlandırılabilir. Bu filtreler sürekli çalıştığı için kapasiteleri yüksektir.



Şekil 7. Tambur filtrenin görüntüsü

1.5. Vakumlu Disk Filtre

Disk filtrenin çalışma prensibi, tambur filtrenin çalışma prensibine benzer. Burada filtre bezi çeşitli sayıdaki metalik levhalardan yapılmış disklerin etrafına sarılmıştır. Disk filtreler, pülpün içinde bulunduğu tank içerisinde dönerek filtrasyonu gerçekleştirir (Şekil 8). Oluşan kekin filtre yüzeyinden sıyırılması disk filtrelerde biraz daha zordur. Disk filtrelerin diğer filtrelere göre en önemli avantajı sürekli çalışması ve aynı boşluk için kapasitesinin daha yüksek olmasıdır. Kömür yıkama sektöründe şlam susuzlandırma için en çok kullanılan filtre türü disk filtre ve lehvalı pres filtredir. Çizelge 1’de disk filtre ile pres filtre karşılaştırılmıştır. Buna göre; disk filtrelerde filtrasyon basıncı 2 bar ile sınırlı iken, pres filtrelerde 15 bar’a kadar çıkabilmektedir. Zonguldak havzasındaki tesislerden elde edilen verilere göre; disk filtre şlamaların nemini %25’e kadar düşürebilmekte iken, lehvalı pres filtre nemi %20’ye kadar düşürebilmektedir.

Son yıllarda, disk filtrelerin filtrasyon basıncını arttırmanın yolları araştırılmış ve 7 barlık basınçta süzme yapabilen hiperbarik disk filtreler tasarlanmıştır. Hiperbarik (basınç odalı) sistemler daha sonra tambur ve bant filtrelere de uyarlanmıştır. Yüksek basınçlarda, sürekli çalışabilen bu filtrelerin ilk yatırım ve işletme maliyetleri yüksektir. Ancak %15 gibi oldukça düşük nemli ürünler verebilmektedir (Hand, 2000; Yoon, 2006; Drummond et al., 2015). Çin, Doğu Avrupa ve Rusya’da pek çok uygulaması mevcuttur. Hiperbarik disk filtre Şekil 9’da, hiperbarik bant filtre Şekil 10’da gösterilmiştir. Ayrıca, bu filtrelerde filtrasyon ortamının sıcaklığı 250 °C’ye kadar çıkarılabilmekte ve daha etkili filtrasyon yapılabilmektedir (Andritz, 2015).

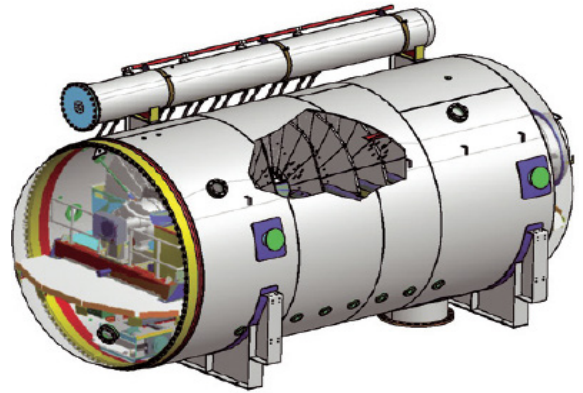
Disk filtrelerdeki yeni eğilim, filtre bezi yerine mikro gözenekli seramiklerin kullanılmasıdır. Seramik filtrelerin enerji tüketimleri bezli disk filtrelere göre daha düşük ve filtre bezi maliyeti bulunmamaktadır. Ancak, seramik filtrelerde de zamanla mikro gözeneklerin tıkanma sorunu oluşabilmektedir. Gözeneklerin tıkanması durumunda daha ince kek tabakası oluşmakta ve filtrenin süzme kapasitesi düşmektedir. Ayrıca, ürün nemi artmaktadır. Bu sorunu çözmek için son yıllarda ultrasonik göz yıkamalı seramik disk filtreler geliştirilmiştir (Outotec,2015b).



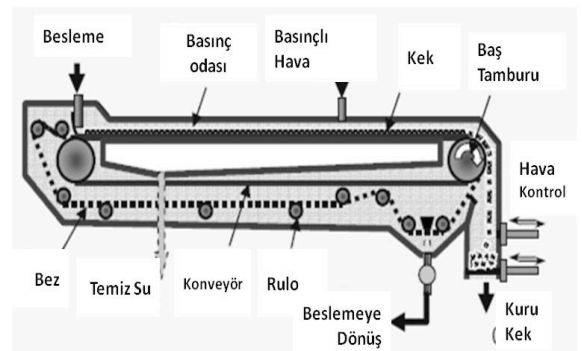
Şekil 8. Vakumlu disk filtrenin görüntüsü

Çizelge 1. Vakum disk filtre ile lehvalı pres filtrenin karşılaştırılması

Vakum Disk Filtre	Lehvalı Pres Filtre
1-2 bar’lık vakumla filtrasyonu yapar	10-15 bar’lık basınçla filtrasyonu yapar
Sürekli çalıştığı için birim kapasite daha yüksek	Kesikli çalıştığı için birim kapasite daha düşük
Bakım-onarım ve işletim maliyeti yüksek	Bakım-onarım ve işletim maliyeti düşük
Düşük nem giderimi	Yüksek nem giderimi
İşçilik az, kek alma otomatik	İşçilik fazla, kek alma genelde manuel
Kek ince taneli, pülverize yakmaya uygun	Kek topak halinde, pülverize yakma için ilave dağıtma işlemi



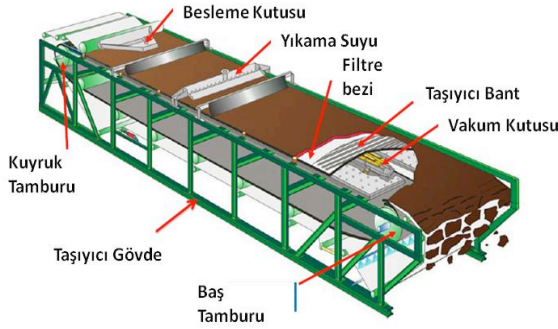
Şekil 9. Hiperbarik disk filtre



Şekil 10. Hiperbarik bant filtre

1.6. Vakumlu Bant Filtre

Özellikle Avustralya'da bitümlü kömür atıklarının susuzlandırılması için kullanımı son yıllarda yaygınlaşmıştır. Ancak çok killi malzemelerde bez tıkanmakta ve bez yıkama problemi doğmaktadır. Bu bakımdan çok killi ve çok ince malzemeler için uygun değildir. Daha çok, hidrometalurjik işlem sonrası elde edilen ürünlerin susuzlandırılmasında ve asit-alkali süzme işlemlerinde, ters akışlı yıkama sisteminin olması nedeniyle özellikle tercih edilmektedir (Wills, 2006). Basit yapıda olması, sürekli çalışması ve düşük işletim maliyeti başlıca avantajlarıdır. Çok fazla yer kaplaması ve düşük nem giderim oranları ise başlıca dezavantajlarıdır. Bu filtrelerde besleme katı içeriği %1.5'e kadar düşebildiği için tikiner kullanılmasına çoğu zaman gerek kalmamaktadır. Emek bor işletmesinde borik asidin yıkanması ve susuzlandırılması amacıyla vakumlu bant filtre kullanılmaktadır.



Şekil 11. Vakumlu bant filtre

1.7. Bant Pres Filtre

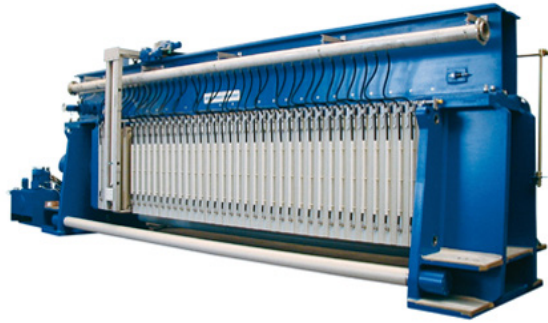
Bu filtre tipinde, lastik bant yerine süzme yapabilen özel bir bez bulunur. Pülp bu bez üzerine dökülür ve özel bir sistemle 2 rulo arasında 2 bara kadar sıkıştırılır. Sürekli çalışabilmesi en önemli avantajı olup, fazla yer kaplaması ve bakım onarım işlerinin zahmetli olması en önemli dezavantajlarıdır. Ayrıca filtre bezelerinde yırtılmalar meydana gelebilmektedir. Bant filtrelere besleme katı oranı 5 mikronun üzerinde olmalıdır. Bu tip filtrelerde bezlerin tıkanma sorununu çözmek için basınçlı havadan veya yıkama suyundan faydalanılabilmektedir. Daha çok lifli belediye çamurlarının susuzlandırılmasında uygulaması bulunmaktadır.



Şekil 12. Bant pres filtresinin görüntüsü

1.8. Lehvalı Pres Filtre

Bir çift oluklu ray içinde birbiri ardına monte edilmiş levha ve çerçevelerden oluşmaktadır. Levhaların yüzeyi kamaralı olup, levhadan bir filtre bezi ile ayrılmaktadır. Genellikle hidrolik olarak sıkıştırılan iki levha arasında filtrasyon işlemi gerçekleştirilir. Bazı pres filtrelerde borular içerisinden buhar geçirilerek filtre edilecek sıvı ısıtılır ve sıvının vizkozitesi düşürülerek daha yüksek bir filtrasyon hızı elde edilebilir. Kek boşaltma sistemi genellikle manuel olup, son yıllarda otomatik kek boşaltma ve otomatik bez yıkamalı pres filtreler geliştirilmiştir (Diemme, 2016).



Şekil 13. Lehvalı pres filtreler

1.9. Membranlı Pres Filtre

Yatay hareketli plakalardan oluşan bu filtre tipinde önce filtre bezi ile kaplı olan plakalar arasına pülp gönderilmekte ve daha sonra pülpü çevreleyen membran su veya basınçlı hava ile sıkıştırılarak filtrasyon yapılmaktadır (FLsmith, 2015b). Lehvalı pres filtrelere göre daha düşük nemli ürünler vermesi ve sürekli çalışması en önemli

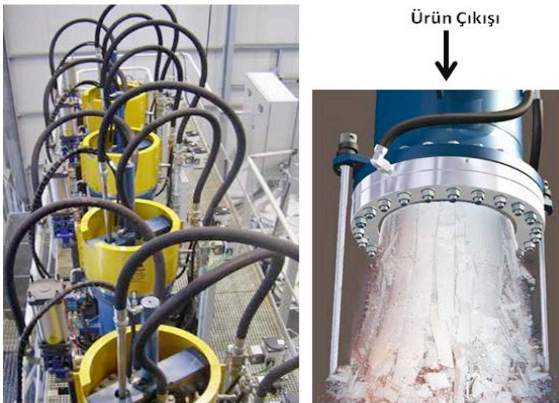
avantajlarıdır. İlk yatırım maliyeti lehvalı pres filtreler göre daha yüksektir. Filtrasyon basıncı 16 bar'a ve en büyük filtrenin toplam filtrasyon alanı 252 m²'ye kadar çıkabilmektedir (Outotec-Larox, 2015).



Şekil 14. Membranlı pres filtre

1.10. Tüp Tipi Pres Filtre

Klasik lehvalı pres filtrelerde pülpe uygulana basınç 10 ile 20 bar arasında iken, tüp pres filtrede esnek bir membran yardımıyla 140 bar'a kadar basınç uygulanabilmektedir. Bu basınç sayesinde çok yüksek susuzlandırma oranları elde edilebilmektedir. Özellikle, birkaç mikron boyutlu kil minerallerinin susuzlandırılması için en ideal susuzlandırma aygıtıdır (Ateşok ve Kangal, 2012). Kesikli çalışması ve kapasitesinin düşük olması en büyük dezavantajıdır. Metso firmasının ürettiği tüp tipi pres filtre Şekil 15'de gösterilmiştir. Filtrasyon basıncının 102 bar olduğu durumda, %19 nemli şlam kömür keki verebileceği belirtilmektedir (Metso, 2016).



Şekil 15. Tüp tipi pres filtre ve ürün çıkışı

1.11. Jeotekstil Filtre

Şekil 16'da gösterilen jeotekstil filtre özel bir tip kumaştan imal edilir. Tüp ya da torba haline getirilmiş bu kumaşın içerisine sulu şlam pülpu beslenir. Zamanla iç basınç artar ve su kumaşın dışına çıkarken katı şlam torba içinde kalır.



Şekil 16. Jeotekstil filtre ile susuzlandırma işlemi

Torba içerisinde kalan malzemenin katı oranı genellikle %65 ile %70 aralığındadır. Diğer filtre tiplerinde olduğu gibi katıların %99'una yakın bir kısmı tüp içerisinde tutulabilmektedir (Tencate, 2015). Kumaşların tek kullanımlık olması ve ülkemizde üretilmemesi nedeniyle işletme maliyetleri klasik filtreler göre daha yüksektir.

Yukarıda bahsedilen susuzlandırma ekipmanları dışında; Shoe rotary press, membranlı basınç filtre (pneumapres), bezli santrifujler ve elektro akustik susuzlandırma gibi yöntemlerde bulunmaktadır (Parekh, 2009). Kömür şlamlarının susuzlandırılması için kullanılan eski ve yeni teknoloji ekipmanların tipik performans değerleri Çizelge 2'de özetlenmiştir.

Çizelge 2. Kömür şamlarının susuzlandırılması için kullanılan ekipmanların tipik performans değerleri ve ortalama susuzlandırma maliyetleri

Susuzlaştırma Ekipmanının Adı	Besleme Katı Oranı (%)	Ürün Nemi* (%)	Yaklaşık İşletme Maliyet** (\$ / ton)
Klasik Tikiner	1-5	70-75	<0.1
Derin Konik Tikiner	1-5	45-50	<0.1
Çöktürme Havuzu	1-5	70-75	<0.1
Dekantör santrifuj	1-20	30-35	~1.0-2.0
Vakumlu Disk Filtre	5-50	25-30	~1.0-2.0
Vakumlu Tambur Filtre	5-50	25-30	~1.0-2.0
Vakumlu Bant Filtre	1.5-50	20-25	~1.0-2.0
Lehvalı Pres Filtre	1-50	20-25	~1.0-2.0
Membranlı Pres Filtre	1-50	15-20	~2.0-3.0
Bant Pres Filtre	1-50	25-30	~1.0-2.0
Jeotekstil Filtre	5-50	25-30	~3.0-6.0
Hiperbarik Vakum Filtre	5-50	15-20	~2.0-3.0
Tüp Pres Filtre	5-50	15-20	~2.0-3.0

**Kömürdeki kil oranı arttıkça artar. Linyit şamlarında ürün nem değerleri daha yüksek olacaktır.

*Tane boyutu incelidikçe yaklaşık maliyet artar. Değerler $d_{80}=63\mu\text{m}$ için alınmıştır.

SONUÇLAR

Filtre seçiminde dikkate alınması gereken en önemli faktör, susuzlandırılacak malzemenin tane boyutudur. Ortalama tane boyutu 10 mikronun altında ise mutlaka basınç tipi filtreler tercih edilmelidir. Burada tavsiye edilebilecek ekonomik filtre türü lehvalı pres filtredir. Eğer çok düşük nem oranları isteniyorsa tüp pres filtre tercih edilebilir. Nispeten daha iri boyutlu ($d_{50}>10\mu\text{m}$) tanelerde ise, kapasitelerinin yüksek olması nedeniyle sürekli çalışan vakum bant filtre ya da vakum disk filtre tercih edilebilir. Disk filtrelerin kapasitesi tambur filtrelere göre daha yüksektir.

Deniz seviyesinden çok yüksek yerlerde vakum tipi filtreler tercih edilmemelidir. Yükseklik arttıkça makinenin oluşturabileceği vakum değeri düşeceği için filtrasyonun başarısı da azalmaktadır. Diğer taraftan, pülp sıcaklığı da filtrasyonun başarısını önemli derecede etkiler. Yeni teknoloji filtrasyon ekipmanlarında pülpün

40-60 °C'e ısıtılıp sisteme verildiği görülmektedir. Soğuk iklimlerde filtrasyon başarısının azalacağı gerçeği unutulmamalıdır.

Filtrasyon alanının ve filtre ortamının geçirgenliğinin artması ile birlikte daha düşük nemli ürünler elde edilir. Bu bakımdan, mümkün olduğunca yüksek filtrasyon alanlarında (ya da ince kek kalınlıklarında) ve yüksek geçirgenliğe sahip filtre bezleri ile çalışılmalıdır. Sürekli çalışan bir filtrede, 1 m²'lik bir filtrasyon alanında, ortalama 250 kg katının (%20 katı beslemeli) susuzlandırılabilmesi gerçeği unutulmamalıdır. Örneğin, saatte 10 ton şlam susuzlandıracak bir filtrenin minimum filtrasyon alanı 40 m² olmalıdır.

Sürekli çalışan filtrelerin kapasitesi, kesikli çalışan filtrelere göre daha yüksektir. Yüksek kapasiteli tesislerde sürekli sistemler tercih edilmelidir. Diğer taraftan, tercih edilen filtrelerin yapısının basit ve işletme maliyetinin düşük olması gerekir.

Şlam susuzlandırma işlemlerinde, şamların ag-

lomere edilerek filtreye beslenmesi gerekir. Aksi takdirde, birkaç mikronluk taneler filtre bezini tıkar ve süzme verimini düşürür.

Susuzlandırma uygulamalarında dikkat edilmesi gereken bir diğer husus ise, şlam kömürün içeriğinde bulunan kil oranıdır. Killler kendi hacimlerinin en az 2 katı oranında suyu adsorbe edebilme yeteneğine sahiptir. Bu bakımdan şlamın kil içeriği arttıkça, elde edilen kekin nem içeriği de artar. Yüksek oranda kil içeren şlamlarda yüksek vakum ya da yüksek basınç kuvvetleri üretebilen filtreler kullanılmalıdır.

Sonuç olarak, filtrasyonun başarısını etkileyen pek çok faktör bulunmaktadır. Bu faktörler topluca ele alınmalı ve uygun filtre seçimi yapılmalıdır. Aksi takdirde istenilen kapasiteye ya da istenilen kek nem değerlerine ulaşılabilmek mümkün olmayacaktır.

KAYNAKLAR

Adalı, 2016. Konvansiyonel tikinerler, Adalı Makina San., Katalog. www.adalimakina.com.tr

Andritz, 2015. Hyperbaric disc filter - HBF Andritz Separation, Austria, <http://www.andritz.com/>

Ateşok, G. 2009. Kömür Hazırlama ve Teknolojisi, YMGV Yayını, İstanbul.

Ateşok, G. ve Kangal, M. O. 2012. Susuzlandırma ve Kurutma, YMGV, İstanbul.

Abbott, J. 1973. "Coal preparation plant effluent disposal by means of deep cone thickeners", 6th International coal preparations congress, Paris.

FCK, 2015. Conventional Rotary Screen Thickener (RST) <http://www.fkcscrewpress.com/>

Drummond, B., Mackinnon, W., Sorensen, C. 2015. Application of the hyperbaric disc filter for fine coal product dewatering, <http://www.acps.com.au>.

Diemme, 2016. Automat Filter Press <http://www.water.bilfinger.com/applications/industrial-filtration/filter-presses/automat-filter-press/>

Hand, P.E. 2000. Dewatering and drying of fine coal to a saleable product. COALTECH 2020.

Keskin, Y. 1986. Kömür Hazırlama Yöntemleri, Zonguldak.

FLSmidth, 2015a. EIMCO® Deep Cone® Paste Thickeners. Minerals Processing Technology Center FLSmidth Salt Lake City, Inc.

FLSmidth, 2015b. Pneumapress Automatic Pressure Filters.

Metso, 2016. Tube press, <http://www.metso.com>

Nittami, T., Uematsu, K., Nabatame, R., Kondo, K.

Takeda, M., Matsumoto, K. 2015. Effect of compressibility of synthetic fibers as conditioning materials on, dewatering of activated sludge, Chemical Engineering Journal 268; 86–91.

İpekoğlu, Ü., 1994. Susuzlaştırma, Cevher Hazırlama El Kitabı, 15, 389-423.

Outotec, 2015a. Thickening Technologies: Paste Thickeners, <http://www.outotec.com/>

Outotec, 2015b. Outotec Larox® Ceramic Filters, <http://www.outotec.com/>

Outotec-Larox, 2015. Outotec Larox® PF filters., <http://www.outotec.com/>

Parekh, B. K. 2009. Dewatering of fine coal and refuse slurries-problems and possibilities, Procedia Earth and Planetary Science, 621–626.

Slottee, S. 2010. Paste Thickeners for Coal Preparation Plants. Report. pp.7.

Tencate, 2015. Geotube® Dewatering Technology, <http://www.tencate.com>.

Yoon, R.H. 2006. Advanced coal coal cleaning and recovery, US-India Coal Working Group Meeting, April 4-5.

Wills, 2006. Mineral Processing Technology, Publisher: Elsevier Science & Technology Books.



Derleme / Review

BİTLİS VE VAN İLLERİNDE POMZA MADENCİLİĞİNE GENEL BİR BAKIŞ

A GENERAL OVERVIEW OF PUMICE MINING IN VAN AND BITLIS PROVINCES

Ogün Ozan Varol^{a,*}

^a Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Müh. Fak., Maden Müh. Böl., VAN

Geliş Tarihi / Received : 27 Haziran / June 2016

Kabul Tarihi / Accepted : 8 Ağustos / August 2016

Anahtar Sözcükler:

Pomza, Bitlis, Van, Maden

ÖZET

Bu derleme çalışması kapsamında genel olarak pomza kayasının genel özellikleri sunulmuş olup, ülkemizde bulunan toplam pomza rezervinin %50'den fazlasının Bitlis ve Van illerinde olduğuna dikkat çekilmiştir. Sertliği Mohs sertlik skalasında 5-6, özgül ağırlığı 1-2 gr/cm³ olan pomzanın inşaat ve tarım sektöründen, kimya endüstrisine kadar uzanan çeşitli kullanım alanları mevcuttur. Pomzanın basit madencilik yöntemleriyle işletilebilmesi ayrı bir artı değer katmaktadır. Bu kadar çok rezerve sahip olan bu iki ilimizde bilinçsiz madencilik çalışmaları neticesinde pomza rezervlerinden mümkün olan yüksek verim alınamamakta ve bu rezervler verimsiz bir şekilde harap edilmektedir. Çalışmada bahsi geçen Van ve Bitlis illerinde pomza madenciliğine yeteri kadar önem verilmesi durumunda bölge ve ülke ekonomisine katkıları son derece büyük olacaktır.

ABSTRACT

In this literature study, the general characteristics of pumice stone are presented and the fact that more than 50% of total pumice reserve in our country exists in Bitlis and Van provinces is emphasized. Pumice with a hardness of 5-6 in accordance with the Mohs hardness scale and a specific gravity of 1-2 gr/cm³ has a variety of application areas ranging from construction and agriculture sectors to chemical industry. Mining with simple methods is an additional advantage of pumice. The maximum mining yield cannot be achieved and the pumice reserves are severely destroyed due to improper mining operations across both provinces with very high reserves. In case sufficient attention is paid to pumice mining in Van and Bitlis provinces,

Keywords:

Pumice, Bitlis, Van, Mining

* oguzozanvarol@yyu.edu.tr

GİRİŞ

Van ve Bitlis illerinin jeolojik yapısından dolayı dikkate değer miktarda pomza rezervleri mevcuttur. Bölgedeki yoğun volkanik faaliyetler neticesinde oluşan pomza yatakları bölgenin önemli maden rezervlerini oluşturmaktadır.

Pomza terimi köken olarak İtalyanca bir sözcüktür. Farklı dillerde farklı olarak adlandırılmaktadır. Örneğin; Fransızca'da Ponce, İngilizce'de orta tane büyüklüğünde Pumice, doğal olarak ince taneli olanlara Pumicite denmektedir. Türkçe'de ise süngertaşı, topuk taşı, nasır taşı gibi çeşitli şekillerde adlandırılmaktadır (Özkan ve Tuncer, 2001).

Volkanik olaylar sonucu oluşmuş ve boşluklu, süngerimsi bir yapıya sahip olan pomza taşı oluşumları, volkanik faaliyetlerin bulunduğu dünyanın birçok bölgesinde bulunmaktadır. Ülkemiz, bu kayaç oluşumu ve ekonomik olarak değerliliği bakımından, dünyada önemli bir yere sahiptir. Özellikle, Orta Anadolu ve Doğu Anadolu'nun bazı illerinde, oldukça geniş pomza oluşumlarına rastlamak mümkündür. Bu iller arasında, Kayseri, Nevşehir, Niğde, Bitlis ve Van, önemli bir yeri oluşturmaktadır (Gündüz, 1998).

Oluşumu sırasında bünyedeki gazların ani olarak bünyeyi terk etmesi ve ani soğuması nedeniyle, makro ölçekten mikro ölçeğe kadar sayısız gözenek içerir. Gözenekler arası genelde bağlantısız boşluklu olduğundan, geçirgenliği düşük, ısı ve ses yalıtımı oldukça yüksektir. Pomza kendisine özgü bazı özellikleri ile benzer volkanik camsı kayaçlardan (perlit, obsidyen, vb.) ayrılır. Bunlardan rengi, gözenekliliği ve kristal suyunun olmaması ile pratik olarak farklılık göstermektedir. Sertliği Mohs skalasına göre 5-6'dır (Anon, 2001).

Pomza ilk olarak Hristiyanlıktan çok önce Yunanlılar ve daha sonra da Romalılar tarafından kullanılmıştır. Eski Yunanlılar ve Romalıların görkemli yapılarının birçoğunda hala gözlemlenebilmektedir. Roma duvarlarının inşaatında ve daha pek çok anıtsal yapılarda kullanılmıştır. A.B.D.'de kalıplaştırılmış pomza California'da 1851 yılından beri inşaatlarda kullanılmaktadır. Bu tarihten 1963 yılına kadar A.B.D.'deki pomza endüstrisi 15 eyalette 103 işletmeye kadar genişlemiştir. San Francisco yakınlarındaki Mercet Gölü'nde aşındırıcı pomza olarak kullanılmak üzere 1983'te 70 bin m³ kadar üretilmiştir. Pomza, çimento ile karıştırılarak Los Angeles su kemerinin yapımında 1908'den

1918'e kadar kullanılmıştır. A.B.D.'de hafif-yalıtımlı beton agregası olarak 1935'te kullanılmaya başlanmış ve kullanım oranı bundan sonra da düzenli bir artış göstermiştir (Özkan ve Tuncer, 2001). Pomzanın kendi başına bir bağlayıcı özelliği olmadığından, ancak öğütülmüş halde kalsiyum hidroksitle reaksiyona girip bağlayıcı özelliğe sahip olan bir puzolanik madde olarak bağlayıcı aktivitesinin yüksek oluşu sebebi ile pomza ve portland çimentoları ile karıştırılarak çeşitli yapılarda kullanılmaktadır (Özkan ve Tuncer, 2001).

1. FİZİKSEL VE KİMYASAL ÖZELLİKLER

Pomza, asidik (Şekil 1) ve bazik pomza (Şekil 2) olmak üzere iki kısma ayrılabilir.



Şekil 1. Asidik Pomza (<http://www.mustafatunc.biz/pomza>).



Şekil 2. Bazik Pomza (<http://www.mustafatunc.biz/pomza>).

- Asidik Pomza: Beyaz ve kirli beyaz renktedir (Şekil 1). Mohs skalasına göre sertliği 5-6 olup, yoğunluğu 0.5-1 gr/cm³tür.
- Bazik Pomza: Bazik Pomza (Scoria): Kahve-

rengi veya siyah olup daha ağırdır (Şekil 2). Sertliği 5-6, yoğunluğu ise 1-2 gr/cm³tür.

Asidik ve bazik pomzanın kimyasal içerikleri Çizelge 1'de yaklaşık değerler olarak sunulmuştur.

Çizelge 1. Asidik ve bazik pomzaların genel kimyasal özellikleri (Efe, 2011).

Pomza Türü	Asidik Pomza	Bazik Pomza
SiO ₂	%70	%45
Al ₂ O ₃	%14	%21
Fe ₂ O ₃	%2.5	%7
CaO	%0.9	%11
Na ₂ O+K ₂	%9	%8
MgO	%0.6	%7
Kızdırma Kaybı	%3	%1

TS 3234 (1983) standartlarına göre pomza; birbirine bağlantısız boşluklu, sünger görünümü silikat esaslı, birim hacim ağırlığı genellikle 1 gr/cm³ 'ten küçük, sertliği Mohs skalasına göre yaklaşık 6 olan ve camsı doku gösteren volkanik bir doğal hafif agregadır. Pomza taşı agregası yaklaşık %70 boşluk içermektedir.

2. POMZANIN KULLANIM ALANLARI

Pomzanın günümüzde kullanımı geçmişe oranlar günden güne gelişmekte ve çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Pomza, günümüzde inşaat, kimya ve kozmetik sektörüne kadar çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Ülkemizde pomza rezervlerinin bolluğuna rağmen, inşaat ve tekstil sektöründe diğer sektörlerle oranla daha fazla kullanım alanı bulabilmektedir. Diğer sektörlerde kullanımı yeni yeni yaygınlaşmaktadır. Buna rağmen inşaat ve tekstil sektörlerinde kullanılan pomzanın yeterli olduğu söylenemez (Akin ve Akin, 2013).

Pomzanın başlıca kullanıldığı sektörleri;

- İnşaat sektörü
- Tekstil sektörü
- Tarım sektörü
- Kimya sektörü

- Diğer endüstriyel sektörler olarak sıralayabiliriz.

2.1. İnşaat Sektörü

Ülkemizde ve dünyada pomzanın en çok kullanıldığı sektör inşaat sektörüdür. Ülkemizde üretilen pomzanın %80' i iç piyasada inşaat sektöründe hafif beton agregası olarak kullanılmaktadır. Pomza, perlitin kullanıldığı alanların hemen hemen tümünde kullanılabilir. Perlit gibi genişletmek için enerji ve yatırım gerektirmedikinden, inşaat sektöründe son yıllarda kullanımını hızla artmaktadır. Pomzadaki bu artışın en somut örneği normal kum ve çakılın 1/3 – 2/3 'ü kadar yoğunluğa sahip olmasıdır. Benzer bir durum pomza ile yapılan betonlarda da görülmektedir. Pomza ile yapılan betonun normal betondan hafif olması sebebiyle zaman ve işçilikten tasarruf sağlanmaktadır. Ayrıca zemin mekaniği açısından, temele iletilen yükler dikkate alındığında %17 civarında inşaat demirinden tasarruf sağlanır. Pomzanın ısı iletkenlik katsayısı dikkate alındığında, normal betondan 6 kat daha fazla izolasyona sahip olduğu görülmüştür (Gündüz, 1998).

2.2. Tekstil Sektörü

Ülkemizde pomzanın yaygın olarak kullanıldığı diğer bir sektör tekstil sektördür. Tekstil alanında pomza özellikle kot taşlama işlemi olarak adlandırılan, kot kumaşlarının renginin açılması amacıyla ülkemizde yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Tekstil sektöründe kullanılacak olan pomzanın fiziko – kimyasal olarak bazı şartları taşıması gerekmektedir. Tekstil sektöründe kullanılacak pomzanın özelliklerini sıralayacak olursak;

- Demiroksit, sodyumoksit ve potasyumoksit gibi yabancı madde içermemeli eğer içeriyorsa kumaşı bozmayacak düzeyde olmalıdır.
- Pomza orta sertlikte olmalı ve kırılıp ezilmelidir.
- Kuru, çok gözenekli ve yuvarlatılmış olmalıdır.
- Rengi beyaz olmalı ve yoğunluğu suyun yoğunluğundan düşük olmalıdır.
- Kot kumaşlarını çizmemesi açısından içerisinde pomzadan sert mineral bulunmamalıdır.
- Su emme miktarı, istenilen düzeyde olmalıdır (Akin ve Akin, 2013).

2.3. Tarım Sektörü

Pomza karıştırılan toprakta hava ve su geçirgenliği düzenlenmekte, infiltrasyonu (sızma) arttırmakta ve evaporasyonu (buharlaşma) düşürmektedir. Bu yüzden pomza konulan toprakta bitkiler için faydalı su kapasitesi iyi düzeyde olmaktadır. Pomza içeren toprakta, bitki gelişimi iyileşmekte ve verimi artmaktadır. Bu özelliği ile pomza, sulu tarım bitkilerinin az sulanarak yetiştirilmesine olanak sağlamaktadır. Pomza inorganik bir mineral olduğundan bünyesinde tarım için zararlı olan yabancı ot tohumu ve hastalık barındırmamaktadır. Uygulama yapılan toprakta tuzluluğu arttırmamaktadır. Pomza, ayrıca karıştırıldığı toprakta mikroorganizma faaliyetlerini artırır. Pomza doğal haliyle kullanılmasından, diğer toprak düzenleyicilere göre daha ekonomik olduğundan ve nakliyesi rahat olduğundan dolayı tarım sektöründe kendine yer bulmuştur (Tunçez, 2007).

2.4. Kimya Sektörü

Günümüzde pomza aşağıda sunulan kimya sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır;

- Tarım ilaçları ve kibrit sanayiinde taşıyıcı olarak,
- Gübre sanayiinde gübrenin topaklaşmasının önlenmesinde,
- Diş macunlarında ve dişçilikte parlatma keki ve tozu olarak,
- Birçok sektörde absorban malzeme olarak,
- Temizlik ve deterjan sanayiinde katkı malzemesi olarak,
- Pürüzlü kaplamada ses izole edici duvar boyası olarak ve motifli boya için astar macunu düzeltme işlemlerinde kullanılır (Kabaş, 2007).

2.5. Diğer Endüstriyel Sektörler

- Kuyumculuk, metal, cam ve plastik sanayinde aşındırıcı olarak,
- TV tüpleri, elektronik devre ve çiplerin üretiminde hassas temizleme maddesi olarak,
- Asfalt kaplamalarda (özellikle sıcak iklimin hakim sürdüğü bölgelerde) yüzeye bitüm kusmayı engelleyici katkı maddesi olarak,
- Karayollarında buzlanmaları kontrol altına almadaki,

- Dekoratif ve yalıtımlı, hafif tavan kaplama malzemelerinin imalinde kullanım imkanı bulmaktadır (Öz, 2007).

3. DÜNYADA VE TÜRKİYE'DE POMZA KAYNAKLARI

Dünya genelinde tespit edilen pomza kaynakları yaklaşık olarak 18 milyar m³ civarındadır. Pomza yataklarının yer aldığı ülkelerin başında ABD, Türkiye ve İtalya gelmektedir. Türkiye'deki pomza kaynağı ise yaklaşık olarak miktarı 2,8 milyar m³ civarındadır. Buna göre Türkiye'deki pomza kaynakları, Dünya pomza kaynaklarının yaklaşık olarak %15,8'ine karşılık gelmektedir. Pomza üretiminde dünyada birkaç ülke söz sahibidir. İtalya ve Türkiye en fazla pomza üretimi yapan ülkelerdir. İtalya 2000-2007 yılları arasındaki dönemde üretimde ilk sırada yer alırken, Türkiye 2008-2011 yılları arasındaki dönemde üretimini artırarak ilk sıraya yerleşmiştir. Örneğin, 2010 yılında Türkiye'nin, Dünya pomza üretimindeki payı %23 iken (4.000.000 m³), İtalya'nın %17'dir. Bu ülkeleri Yunanistan, İran, Suriye, Şili ve Suudi Arabistan takip etmektedir (Dinçer vd. 2015).

Türkiye'de bulunan pomza kaynakları Çizelge 2'de sunulmuştur.

Çizelge 2. Türkiye Pomza Kaynakları (Köse ve ark., 1997).

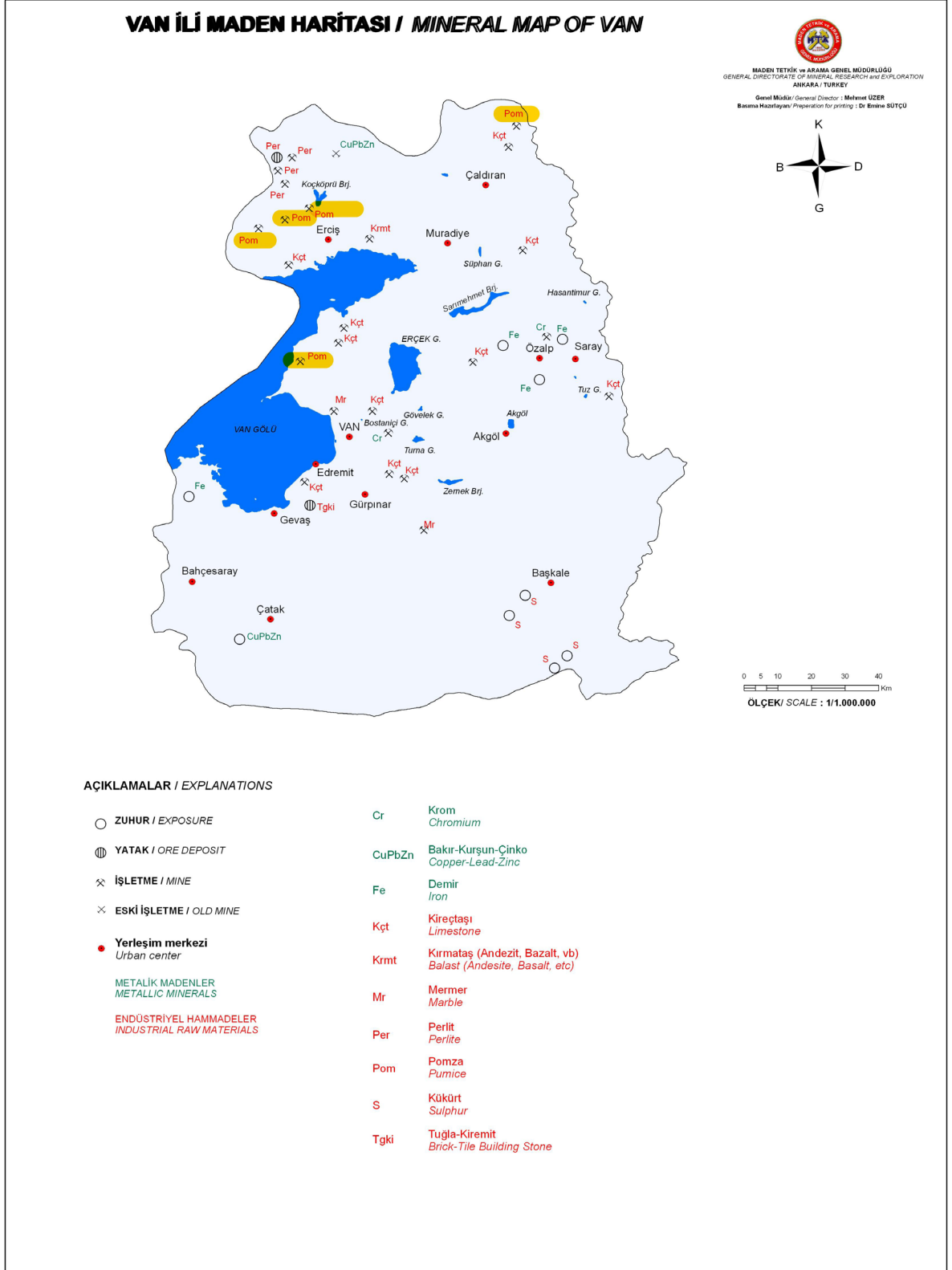
Yeri	Pomza Kaynakları Miktarı (m ³)
Nevşehir-Avanos-Ürgüp	400.412.834
Kayseri-Talas-Tomarza	724.651.251
Bitlis-Tatvan	110.000.000
Bitlis-Ahlat	210.000.000
Van-Erciş-Kocapınar	154.625.000
Diğer	242.860.000
Toplam	2.613.975.085

4. VAN İLİ POMZA KAYNAKLARI

Van ili sahip olduğu jeolojik yapı gereği önemli pomza yataklarına ev sahipliği yapmaktadır. Pomza yatakları özellikle Erciş ilçesinde yoğunlaşmıştır. Kocapınar sahasında yaklaşık 20 milyon m³ pomza kaynağı bulunmaktadır. İlçedeki

diğer pomza kaynakları Ekiciler Köyü ve Kırkpınar Köyü mevkiğinde yer almaktadır. Ayrıca Merkez ilçe-Mollakasım Köyünde de yaklaşık 1

milyon m³ kaynağa sahip pomza yatakları bulunmaktadır (<http://www.mta.gov.tr/>). Şekil 3'te Van ilinde bulunan pomza yatakları gösterilmiştir.

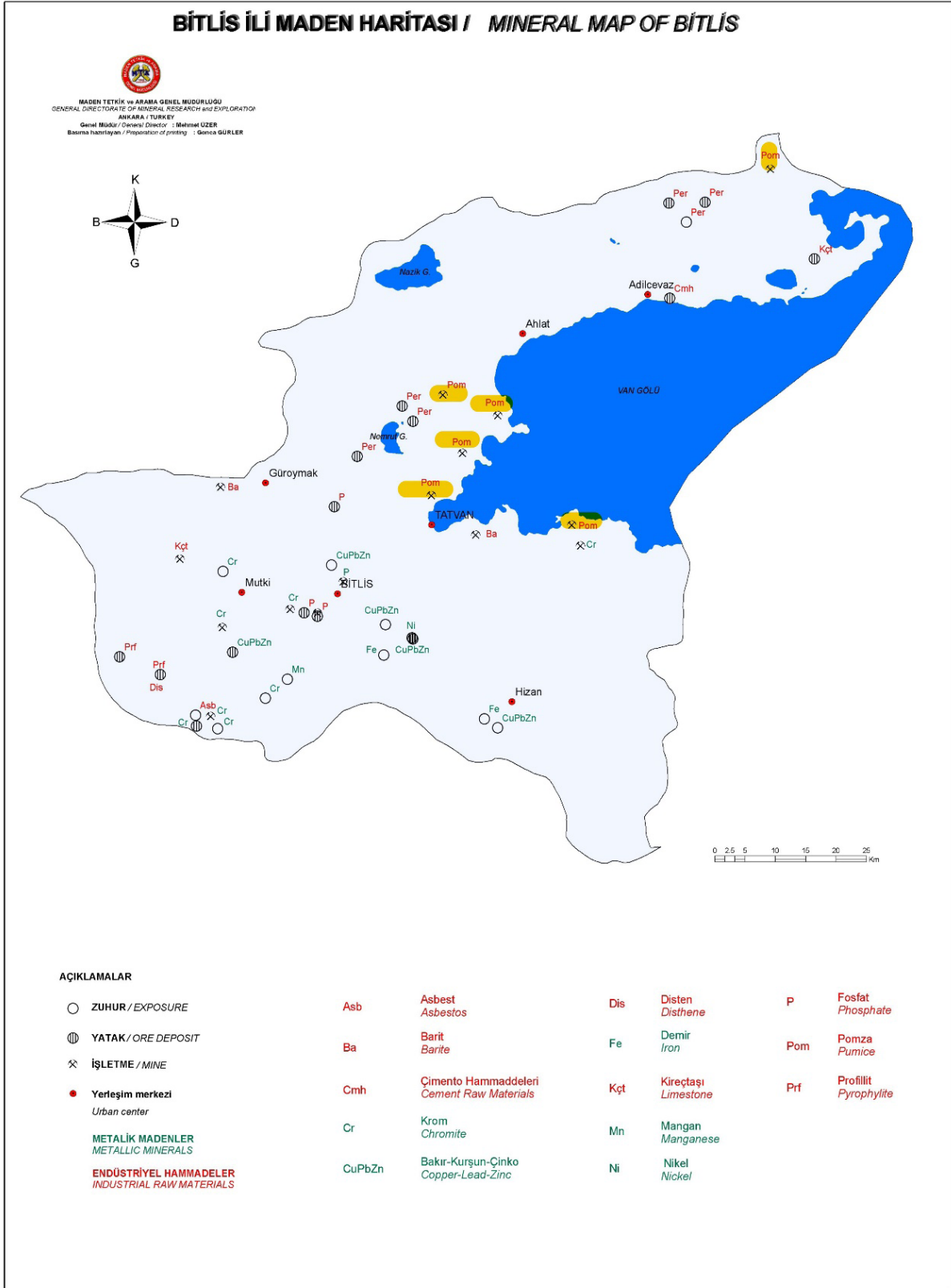


Şekil 3. Van ili maden haritası (MTA Genel Müdürlüğü, 2010)

5. BİTLİS İLİ POMZA KAYNAKLARI

Bitlis ili, Doğu Anadolu Bölgesinde yer almakta

olup, engebeli bir topoğrafyaya sahiptir. Ahlat ovasıyla, bir düzlük gibi Bitlis'in kuzeydoğusundan Van Gölüne doğru uzayan, Rahva ovasın-



Şekil 4. Bitlis ili maden haritası (MTA Genel Müdürlüğü, 2010)

dan başka büyük düzlüklere rastlanmaz. Sanayisi yok denecek kadar az olan Bitlis ilinde, "gıda ürünleri ve içecek imalatı", madencilik ve taş ocakçılığı ve bitkisel üretim sektörleri öne çıkmaktadır. Madencilik ve taş ocakçılığı sektöründe, süsleme ve yapı taşları ocakçılığı alt sektörü ön plandadır.

Bitlis ili bulunduğu jeolojik yapısı gereği ve volkanik bir alan üzerinde kurulu olması nedeniyle özellikle pomza yatakları bakımından önemli potansiyele sahiptir. Söz konusu yataklar ilde, Tatvan ilçesinde yer almakta olup, 81.500.000 m³ iyi kalitede ve kısmen yıkama işlemi gerektirmeyen pomza yatakları bulunmaktadır (<http://www.mta.gov.tr/>).

Maden İşleri Genel Müdürlüğü'nün (MİGEM) kayıtlarına göre Bitlis ilinde 2015 itibari ile aktif olarak çalışan toplam 45 pomza sahası mevcuttur.

Şekil 4 de Bitlis ilinde mevcut olan pomza yatakları gösterilmiştir.

SONUÇLAR

Ülkemiz volkanik dağlar bakımından oldukça zengin bir ülkedir. Özellikle Van ve Bitlis özelinde volkanik olayların fazlalığı nedeniyle birçok pomza yatağı bulunmaktadır. Pomzanın kullanım alanlarına bakıldığında azımsanmayacak kadar fazla kullanım alanı olduğu görülmektedir. Özellikle Van gibi deprem kuşağında yer alan şehirlerde pomzanın inşaat sektöründe yaygınlaşmasını sağlamak gerekmektedir. Çünkü pomza betonda agrega olarak kullanıldığında temele iletilen yük azalmakta ve % 17'ye kadar varan oranda inşaat demirinden tasarruf sağlanmaktadır. Pomza ısı yalıtımında yaklaşık olarak % 6 oranında avantaj sağlamaktadır. Bu özelliğinden dolayı Van ve Bitlis gibi kış mevsimlerinin sert ve uzun geçtiği yerlerde kullanımının artmasıyla ısı yalıtımı probleminin önüne geçilmiş olacaktır.

Pomzanın tekstil sektöründe kullanımının yaygınlaşması ile Van ilinde kurulan Tekstil Kent ile beraber il ekonomisine getirileri yüksek olacaktır.

Zengin olan pomza kaynaklarının kullanımına inşaat, tekstil, tarım, kimya ve diğer sektörlerde kullanımına teşvik edilmesi gerekmektedir. Ancak pomza kaynaklarının değerlendirilmesi sırasında madencilik işlemlerinin rastgele yapılmasına özen gösterilmelidir. Üretim işlemleri maden mühendislerinin nezaretinde, Maden Kanununa ve İş Güvenliği Mevzuatı'na uygun

bir şekilde yapılmalıdır. Çünkü madenlerin bilinçsizce işletilmesi çevre kirliliği yaratmakta ve ayrıca erozyon gibi geri dönüşü çok zor olan doğa olaylarına neden olabilmektedir. Pomza özelinde bahsedilen madencilik işlemlerinin bilinçsiz bir şekilde yapılmaması, Maden Kanununa ve İş Güvenliği Mevzuatı'na uygun olarak Maden Mühendislerinin nezaretinde yapılması diğer tüm madenler işletilirken de göz önünde bulundurulması gereken en önemli hususların başında gelmektedir.

Van ve Bitlis illerinde pomza madenciliğine yeterli düzeyde önem verilmesi için gerekli girişimler yapılmalı ve yatırımcılar teşvik edilmedir. Pomza kullanımını arttıkça özelde bölge ekonomisine genelde ise ülke ekonomisine getirisi önemli derecede büyük olacaktır.

KAYNAKLAR

Akın, G., Akın, M. 2013. Pomzanın Özellikleri, Kullanım Alanları ve Üretiminde Yaşanan Sorunlar. II. Uluslararası Ahlat - Avrasya Bilim, Kültür ve Sanat Sempozyumu.

Anon. 2001. Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Yapı Malzemeleri, S: 3-23, DPT Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Yapı Malzemeleri Çalışma Grubu Raporu. Cilt III, Ankara.

Diğer, İ., Orhan, A., Çoban, S. 2015. Pomza Araştırma ve Uygulama Merkezi Fizibilite Raporu. Nevşehir.

Efe, T. 2011. Edremit Travertenleri ve Van Gölü Kuzeyinde Yüzeyleyen Pomzaların Çimento Sektöründe Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, S 147.

Erişim: <http://www.mustafatunc.biz/pomza> (Erişim Tarihi: 02/06/2016)

Gündüz, L. 1998. Pomza Teknolojisi, Cilt 1, 285 s, Isparta.

Kabaş, N. G. 2007. Modifiye Edilmiş Pomza ile Ağır Metal Uzaklaştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, S 78.

Köse, H., Pamukçu, Ç., Yalçın, N., Seçer, T. 1997. Pomza ve Yapı Malzemesi Olarak Kullanım Olanakları. 2. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 16-17 Ekim 1997, İzmir, Türkiye.

MİGEM 2016 Maden İşleri Genel Müdürlüğü, Bitlis Pomza İşletme Ruhsat Kayıtları.

MTA 2010. Bitlis İli Maden ve Enerji Kaynakları, <http://www.mta.gov.tr/>

MTA 2010. Van İli Maden ve Enerji Kaynakları, <http://www.mta.gov.tr/>

Öz, E. 2007. Nevşehir Dolaylarında Yüzeyleyen Asidik Pomzanın Hafif Beton Agregası Olarak Kullanılabilirliği. Çukurova Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, S 63.

Özkan, Ş. G., Tuncer, G. 2001. Pomza Madenciliğine Genel Bir Bakış. 4. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 18-19 Ekim 2011, İzmir, Türkiye.

TS 3234/T1 1983 Bimsbeton yapım kuralları, karışım hesabı ve deney metotları. TSE, Ankara.

Tunçez, F. D. 2007. Şeker Fabrikası Atık Çamurları ve Pomzanın Toprak İyileştirici Olarak Kullanılması. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, S 93.



Orijinal Araştırma / Original Research

ATIK BASKILI DEVRE KARTLARININ EKONOMİK POTANSİYELİ VE ÇEVRESEL KARAKTERİZASYONU¹

ECONOMIC POTENTIAL AND ENVIRONMENTAL CHARACTERISATION OF WASTE OF PRINTED CIRCUIT BOARDS

Ersin Yener Yazıcı^{a,*}, Hacı Deveci^a

^a Hydromet B&PM Araştırma Grubu, Cevher-Kömür Haz. Anabilim dalı, Maden Müh. Böl., Karadeniz Teknik Üniversitesi, TRABZON

Kabul Tarihi / Accepted : 8 Ağustos / August 2016

ÖZET

Anahtar Sözcükler:

E-atık, geri dönüşüm/kazanım, liç, karakterizasyon

Atık elektrikli ve elektronik eşyalar (AEEE veya e-atık) zararlı organik ve inorganik maddeler içermektedir. Diğer taraftan AEEE, yüksek temel (özellikle Cu) ve değerli metal (Au, Ag ve Pd) içerikleri nedeniyle önemli bir ikincil kaynaktır. Bu atıkların uygun şekilde yönetilmemesi hem ekonomik kayıplara yol açmakta hem de evsel atıklarla birlikte depolanması durumunda çevre kirliliğine neden olabilmektedir. AEEE'deki ağır ve değerli metallerin önemli bölümü atık baskılı devre kartlarında (ABDK) bulunmaktadır. Bu çalışmada, ABDK'nın temel ve değerli metal içeriğine bağlı olarak ekonomik potansiyeli ortaya konulmuştur. Ayrıca, atık bilgisayarlardan toplanan ABDK'ya (%18,5 Cu, 86 g/t Au, 694 g/t Ag ve 97 g/t Pd) çevresel karakterizasyon testleri uygulanmıştır. TCLP testi (Toxic Characteristic Leaching Procedure) sonuçlarına göre ABDK, yüksek kurşun (Pb) salınımı nedeniyle "zararlı atık" sınıfındadır. SPLP (Synthetic Precipitation Leaching Procedure) ve EN 12457-2 (European Standard Leaching Test) testlerinde de bazı metallerin (Ba/Al/Pb/Cu) yüksek salınım gösterdiği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, AEEE yönetiminde atık depolama yerine geri dönüşüm/kazanım süreçleri ile metallerin kazanılmasının en uygun çözüm olduğunu göstermektedir.

ABSTRACT

Keywords:

E-waste, recycling/recovering, leaching, characterization

Waste electrical and electronic equipments (WEEE or e-waste) contain hazardous organic and inorganic substances. On the other hand, WEEE is an important secondary resource due to its base (mainly Cu) and precious metals (Au, Ag and Pd) content. Improper management of this waste stream leads to economic losses as well as environmental pollution if disposed in landfills with municipal wastes. The major part of heavy and precious metals in WEEE is present in waste of printed circuit boards (WPCB). This study highlights the economic potential of WPCB with regards to its base and precious metal content. In addition, environmental characterisation procedures were tested using WPCB (18.5% Cu, 86 g/t Au, 694 g/t Ag and 97 g/t Pd) collected from obsolete computers. TCLP test (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) results showed that WPCB should be classified as "hazardous waste" due to high lead (Pb) concentration in the leachate. In the SPLP (Synthetic Precipitation Leaching Procedure) and EN 12457-2 (European Standard Leaching Test) tests, some metals (Ba/Al/Pb/Cu) also determined to be highly solubilised. These results indicated that recovery of metals from WEEE through recycling/recovery processes is the most suitable route for proper management compared with disposing these wastes in landfills.

¹ Türkiye 24. Uluslararası Madencilik Kongresi (IMCET 2015) bildiriler kitabında yayınlanmıştır.

* eyazici@ktu.edu.tr

1. ATIK ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK EŞYALARIN (AEEE) EKONOMİK POTANSİYELİ

Özellikle son yıllarda, artan çevresel kaygılara ve doğal kaynakların hızla tükenmesine bağlı olarak atıkların, çevresel etkisi en düşük ve ekonomik yönden en yüksek fayda sağlayacak şekilde yönetimi giderek daha da önem kazanmaktadır. Atık elektrikli ve elektronik eşyalar (AEEE veya e-atık), atıl duruma gelen ve/veya kullanım ömrü dolan elektrikli ve elektronik eşyaların (TV, bilgisayar, yazıcı, baskılı devre kartları vs.) ürün sahipleri tarafından hurdaya ayrılması ile ortaya çıkan ve %3-5 büyüme hızıyla Avrupa'da en hızlı büyüyen atık türüdür (Bertram vd., 2002; EC, 2006).

AEEE, içerdiği temel ve değerli metaller ile önemli bir ekonomik potansiyele sahiptir. Farklı AEEE türlerinin metal içerikleri ve metal fiyatları göz önüne alınarak yapılan değerlendirmeler AEEE'nin ekonomik değerinin önemli bölümünü değerli metaller (Ag, Au ve Pd) ve ikinci olarak da bakır (Cu) oluşturduğunu ortaya koymuştur (Yazıcı, 2012; Tuncuk vd., 2012). AEEE'nin içerdiği metal (Cu, Fe, Ni vb.) ve özellikle değerli metallerin (Au, Ag, Pd vb.) önemli bölümü baskılı devre kartlarında bulunmaktadır (Goosey ve Kellner, 2002). Çizelge 1'de atık baskılı devre kartlarının (ABDK) içerdiği malzemeler ve tipik oranları sunulmuştur. Farklı ABDK türlerinin temel ve değerli metal içerikleri Çizelge 2'de görülmektedir. Buna göre (Çizelge 1 ve 2), cevherler ile kıyaslandığında ABDK genel olarak daha yüksek oranda temel ve değerli metal içermektedir. ABDK'nın altın içeriğine göre sınıflandırılması Çizelge 3'de sunulmuştur. ABDK'nın altın içeriği arttıkça ekonomik değeri de yükselmektedir. Altın içeriği 400 g/ton'dan fazla ise "çok yüksek", 50 g/ton'dan düşük ise "çok düşük" olarak sınıflandırılmaktadır. ABDK'daki altın, devre kartı üzerindeki yarı iletken, pin ve konnektörlerde bulunmaktadır (WRAP, 2014). Ancak, yüksek maliyetleri sebebiyle baskılı devre kartlarında daha az oranda değerli metal kullanmaya yönelik araştırmalar sürmektedir (Goosey ve Kellner, 2002). Eski nesil kişisel bilgisayarların (PC) altın içeriği, bilgisayar başına 4 g Au'dan 1 g'a gerilemiştir (Widmer vd., 2005).

Çizelge 1. ABDK'nın içerdiği malzemeler ve tipik oranları (Namias, 2013).

Malzeme	Miktar (%)
Fiberglas	45-50
Bakır	15-20
Bileşenler / Entegre devreler	10-25
Değerli metaller	0,4
Pb,Sn,diğer baz metaller	≈5-30

Çizelge 2. Farklı ABDK türlerinin metal içerikleri (Hagelüken, 2006a; Deveci vd., 2010; Yazıcı ve Deveci, 2009).

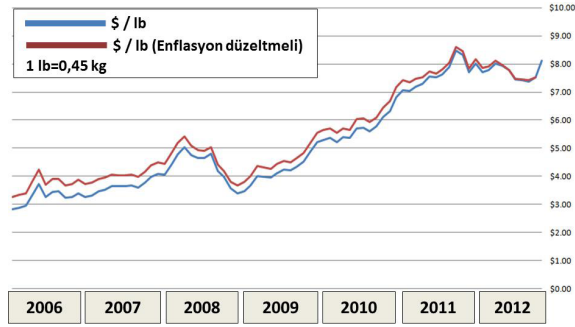
ABDK türü	Fe	Cu	Al	Pb	Ni	Sn	Ag	Au	Pd
	%					g/ton			
ABDK-PC(1)	7	20	5	1,5	1	2,9	1000	250	110
ABDK-PC(2)	3,6	15,5	4,9	3,9	0,2	4,3	380	6	0
ABDK-TV(1)	28	10	10	1	0,3	1,4	280	20	10
ABDK-TV(2)	0,04	9,2	0,75	0,003	0,01	0,72	86	3	3,7
Cevher	25	0,5	30	5	0,5	0,5	200	1	-

Çizelge 3. ABDK'nın altın içeriğine göre sınıflandırılması (Hagelüken, 2006b; Umicore, 2015).

İçerik/Sınıf	Altın (g/ton)	ABDK türü
Çok yüksek	>400	Ana sunuculardaki devre kartları, bazı cep telefonları vb.
Yüksek	200-400	PC kartları, bazı cep telefonları vb.
Orta	100-200	
Düşük	50-100	TV kartları, monitör kartları, hesap makineleri vb.
Çok düşük	<50	

Baskılı devre kartlarının altın içeriğinin azalmasına karşın metal fiyatlarına bağlı olarak ABDK'nın ekonomik değeri yükselme eğilimindedir (Şekil 1), ancak Eylül 2011'den itibaren fiyatlar daha istikrarlı seyretmektedir. Mayıs 2012'de ekonomik değeri yaklaşık 18 \$/kg ABDK'dır (42 TL/kg, 05.01.2015 kuruna göre). Şekil 1'deki veriler "orta sınıf" PC kartlarının metal içeriklerine göre hesaplanmış net değerlerdir. Geri kazanım süreci ile ilgili herhangi bir faaliyete ait (metal ekstraksiyonu, nakliye, örnekleme, analiz, eritme, rafinasyon, proses kayıpları, yatırım geri dönüşü

ve Be/Bi/Ni gibi elementler için cezalar) maliyetleri kapsamamaktadır.



Şekil 1. Baskılı devre kartlarının yıllara göre ekonomik değeri (Resource Recycling, 2015).

1.1. Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların (AEEE) Çevresel Etkisi ve Yasal Düzenlemeler

AEEE'nin zararlı organik (alev geciktiriciler vb.) ve inorganik (Hg, Pb vb.) maddelerin yanı sıra ekonomik değeri yüksek temel (özellikle Cu) ve değerli metaller (Ag, Au ve Pd gibi) içermesi nedeniyle doğrudan bu atıkların yönetimini düzenleyen yasal düzenlemeler yapılmaktadır. Evsel atıklarla depolanarak bertaraf edilen AEEE'nin Hg, Cd ve Pb kirliliğine neden olduğu bildirilmiştir (Öztürk ve Ayberk, 2008; Widmer vd., 2005). Fishbein (2002), ABD'deki evsel atıklar içindeki kurşun kirliliğinin ikinci büyük kaynağının ABDK olduğunu bildirmiştir. Toprak kirliliğinin yanı sıra, AEEE'deki ağır metaller, yağmur sularının etkisiyle çözünerek yeraltı ve yüzey sularının da kirlenmesine sebep olabilmektedir (Kaya ve Sözeri, 2007; Öztürk ve Ayberk, 2008; Widmer vd., 2005).

AEEE'lerin çevresel zararlarını azaltmak amacıyla Avrupa Komisyonu, yayınladığı 2002/95/EC sayılı "Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment (RoHS) (Elektrikli ve Elektronik Eşyalarda Bazı Zararlı Maddelerin Kullanımının Sınırlandırılması)" yönergesiyle elektrikli ve elektronik eşyaların üretim sürecinde altı madde (Pb, Cd, Hg, Cr(VI), polibromürlü bifenil ve polibromürlü difenil eter) kullanımını kısıtlamıştır (EC, 2003a). Bu yönerge, son olarak 2011/65/EU sayılı yönerge ile güncellenmiştir (EU, 2011). Avrupa Komisyonu, 2003 yılından itibaren yürürlükte olan "Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) (2002/96/EC sayılı, Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyalar)" yönergesini (EC, 2003b)

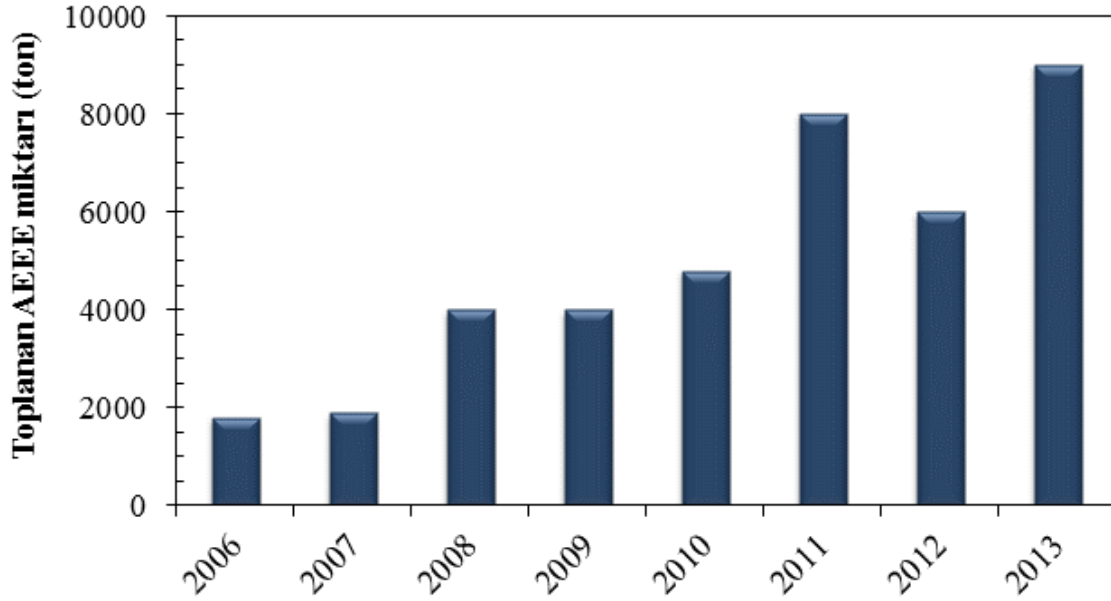
2012/19/EU sayılı yönerge ile güncellenmiştir (EU, 2012). Ancak, bütün çalışmalara rağmen, AEEE'nin geri dönüşüm oranı henüz düşük seviyelerdedir. Büyük bir kısım (%80-85) atık depolama alanlarına depolanmaktadır (Babu vd., 2007; Hadi vd., 2015). İngiltere'de ABDK'nın (50.000 ton/yıl) sadece %15'i geri kazanım işlemlerine tabi tutulmaktadır (Goosey ve Kellner, 2002).

Avrupa Birliği'nin yönergeleriyle uyumlu olarak, Ülkemizde de T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından öncelikle "Elektrikli ve Elektronik Eşyalarda Bazı Zararlı Maddelerin Kullanımının Sınırlandırılmasına Dair Yönetmelik" 30.05.2008 tarihinde yayımlanmış ve 30.05.2009 tarihinde yürürlüğe konulmuştur (Resmi Gazete, 2008). Ancak, söz konusu yönetmelik (Resmi Gazete, 2008) 22.05.2012 tarihinde yayımlanan "Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği" ile yürürlükten kaldırılmıştır (Resmi Gazete, 2012). Bu yönetmeliğe göre belediyelerin yükümlü olduğu temel konular şunlardır:

- AEEE'lerin etkin bir biçimde diğer atıklardan ayrı toplanmasını sağlamak,
- Yönetmelikte belirtilen hedeflere uygun olarak toplama merkezleri kurarak AEEE'lerin toplanmasını sağlamak ve kurulan getirme merkezlere ilişkin olarak halkı bilgilendirmek,
- Toplanan evsel AEEE'leri işleme tesislerine göndermek.

Aynı yönetmeliğe göre elektrikli ve elektronik eşya (EEE) üreticilerinin sorumlu olduğu bazı maddeler ise aşağıda sıralanmıştır:

- Üreticiler EEE'lerin üretim, ürün temini, ürün geliştirme, AR-GE ve tasarım faaliyetlerinde yönetmelik kapsamındaki zararlı maddelerin kullanımından kaçınmak veya alternatif maddeleri kullanmak için gerekli çalışmalarını yapmak,
- Yönetmelikte belirtilen geri dönüşüm ve geri kazanım oranlarının sağlanması ve atıkların azaltılması amacıyla, EEE'lerin tasarımı ve üretimi sırasında, ürünlerin kolayca parçalanmasını, ayrıştırılmasını, yeniden kullanımını, geri dönüşümünü ve geri kazanımını kolaylaştıracak malzeme ve parçaları kullanmak,
- Belediyeler ve dağıtıcılar tarafından toplanan evsel AEEE'lerin; toplama merkezlerinden veya dağıtıcılardan başlamak üzere nakliye maliyetlerini karşılamak, lisanlı tesislerde işlenmesini sağlamak, işleme imkânının bulun-



Şekil 2. Ülkemizde 2006-2013 yılları arasında toplanan AEEE miktarı (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2015).

maması durumunda bertarafı için bir sistem kurmak ve maliyetleri karşılamak,

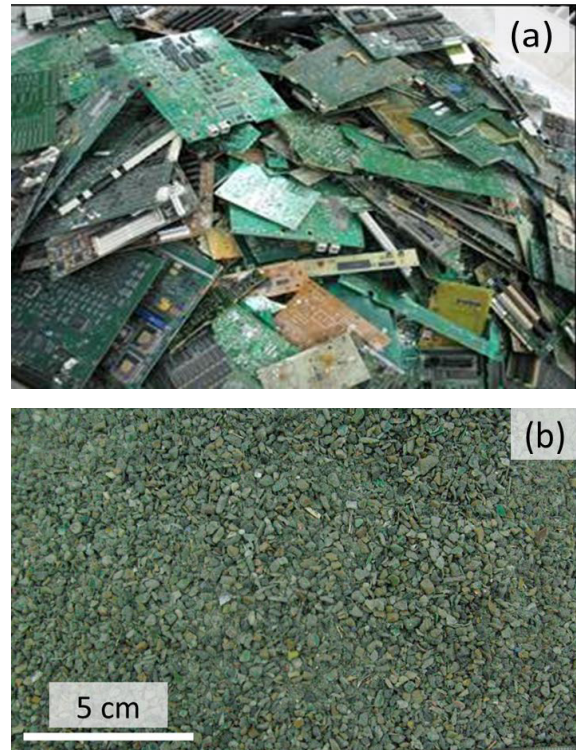
- Evsel olmayan AEEE'lerin toplanması, işlenmesi ve bertaraf edilmesi amacıyla bir sistem kurmak.

Ülkemizde yıllara göre (2006-2013) toplanan AEEE miktarı Şekil 2'de sunulmuştur. Buna göre, 2006-2013 yılları arasında toplanan AEEE miktarı 1800 ton'dan 9000 ton'a yükselmiştir (Şekil 2). Ülkemizdeki toplanan AEEE'lerin yönetimi genel olarak atıkların toplanması, temel bileşenlerine ayrıştırılması ve ekonomik değeri yüksek malzemelerin (ABDK gibi) yurt dışına ihracını kapsamaktadır. Ülkemizde AEEE geri dönüşüm oranının halen %1-2 gibi çok daha düşük seviyelerde olduğu belirtilmiştir (Kartal, 2015). Bu çalışmada, ABDK'nın "zararlı atık" durumunu ortaya koymak ve bu atıkların evsel atıklarla depolanması durumunda yeraltı/yerüstü su kaynaklarının kirliliğine neden olabilecek zararlı metalleri belirlemek amacıyla ABDK'ya standart karakterizasyon testleri uygulanmıştır.

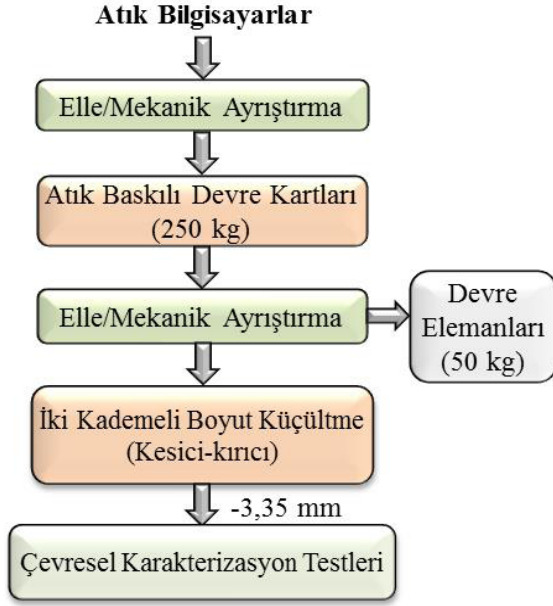
2. MALZEME VE YÖNTEM

Atıl duruma gelmiş ve depolanmış olarak bulunan atık bilgisayar, monitör, modem vb. elektronik cihazlardan el ve gerekli yardımcı aletler (tornavida, keski vb.) yardımıyla sökülerek ~250 kg ABDK toplanmıştır. Daha sonra, toplanan ABDK üzerinde bulunan kolayca sökülebilir devre elemanları ayrıştırılmıştır (Şekil 3a). Bileşenleri ayrıştırılmış ABDK (~200 kg), dört bıçaklı bir döner

kesici-kırıcı (rotary cutting shredder) kullanılarak, iki kademeli boyut küçültme işlemine tabi tutulmuştur. ABDK, birinci kademede -8 mm, ikinci kademede -3,35 mm tane boyutuna ufaltılmıştır (Şekil 3b). Deneysel çalışmalarda uygulanan akım şeması Şekil 4'de gösterilmiştir.



Şekil 3. (a) Baskılı devre kartları ayrılmış AEEE; (b) İki kademeli boyut küçültme uygulanmış ABDK (-3,35 mm)



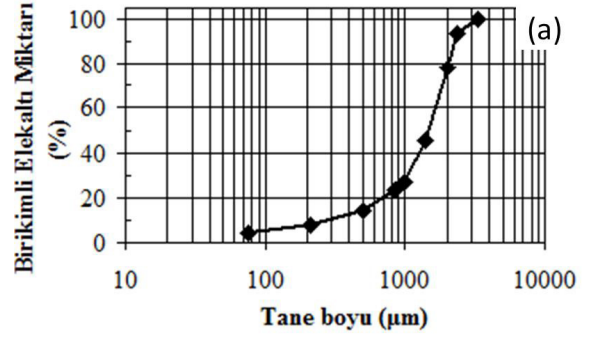
Şekil 4. Uygulanan akım şeması.

2.1. Fiziksel ve Kimyasal Karakterizasyon

Boyut küçültmeye tabi tutulmuş ABDK'nın (-3,35 mm) tane boyut dağılımını belirlemek amacıyla elek analizi yapılmıştır (Şekil 5). Eleme işlemi, standart ASTM elekleri kullanılarak kuru olarak gerçekleştirilmiştir. Buna göre, ABDK'nın %80'i 2,1 mm (d_{80}) ve %27'si 1 mm'nin altındadır. ABDK'nın metal içerikleri Çizelge 4'de sunulmuştur. XRD analizi, ABDK'daki kurşun ve kalayın bir bölümünün alaşım (lehim) halinde bulunduğunu doğrulamıştır (Şekil 6).

2.2. Çevresel Karakterizasyon

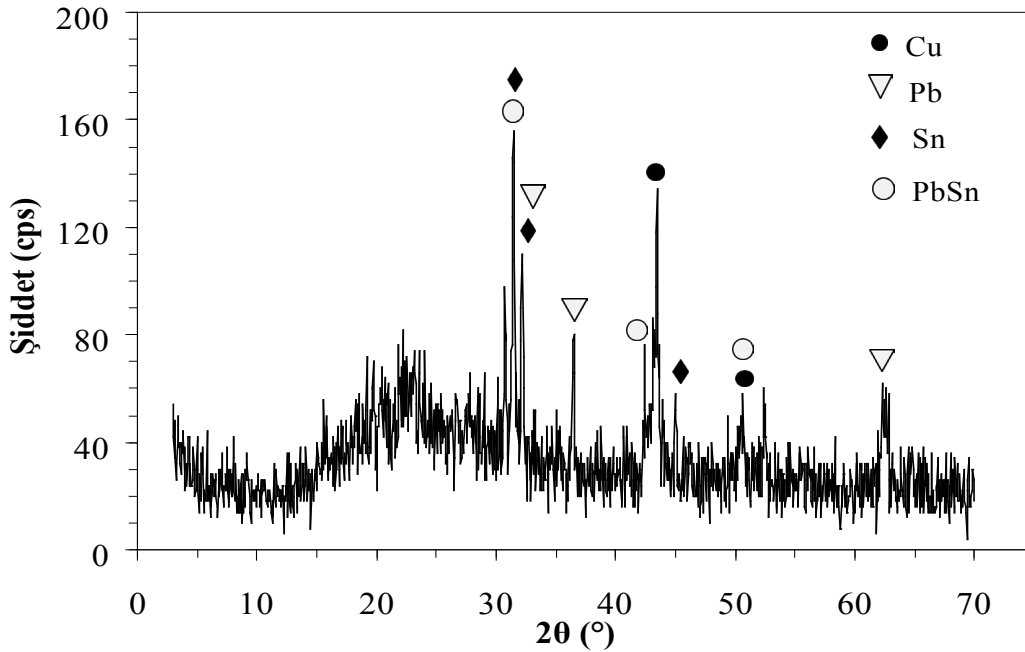
Atıkların çevresel açıdan karakterizasyonu için TCLP (Toxic Characteristic Leaching Procedure), SPLP (Synthetic Precipitation Leaching Procedure) ve EN 12457-2 testleri uygulanmıştır. USEPA (Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı) tarafından geliştirilen TCLP, AEEE dahil olmak üzere birçok atık malzemenin farklı metallerden kaynaklanan çevresel etkilerini belirlemek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu test, katı atıkların "zararlı atık" sınıfına ait olup olmadığını belirlemek için tercih edilmektedir (Townsend, 2002). SPLP (USEPA testi) ve EN 12457-2 (Determination of Leachability by Water) sırasıyla asidik yağmur suyu ve su etkisi altında atıklardan zararlı bileşenlerin salınımını öngören testlerdir (Townsend, 2002; EC, 2003c; Townsend vd., 2003).



Şekil 5. (a) ABDK'nın (-3,35 mm) tane boyut dağılımı, (b) -3,35+2,36 mm fraksiyonuna ait stereomikroskop görüntüsü

Çizelge 4. ABDK'nın kimyasal analizi

Metal	İçerik
Cu (%)	18,5
Fe (%)	2,05
Al (%)	1,33
Pb (%)	2,66
Ni (%)	0,43
Sn (%)	4,91
Au (g/ton)	86
Ag (g/ton)	694
Pd (g/ton)	97



Şekil 6. ABDK'nın X-ışını difraksiyonu (XRD) profili

Avrupa Birliği tarafından standart kabul edilen EN 12457-2 (European Standard Leaching Test) testinde ekstraksiyon çözeltisi olarak saf su kullanılmaktadır. Uygulanan testler ve koşulları Çizelge 5'de sunulmuştur. Analizler, İndüktif eşleşmiş plazma-atomik emisyon spektrometresi (ICP-AES, Spectro Genesis) ile yapılmıştır.

2.2.1. TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) Testi

TCLP testi -9,5 mm boyutlu malzemelere uygulanır. Bu çalışmada, -3,35 mm boyutundaki ABDK kullanılmıştır. Bu testlerde kullanılacak ekstraksiyon çözeltisi (extraction fluid) standart prosedüre uygun olarak hazırlanmıştır (USEPA, 1997). Testlerde, ekstraksiyon çözeltisi-1 (1 litrede 5,7 mL asetik asit ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OOH}$) ve 64,3 mL 1 N NaOH; pH $4,93 \pm 0,05$) kullanılmıştır. Sıvı:kati oranı 20:1 olacak şekilde kati malzeme (10 g) ve ekstraksiyon çözeltisi-1 (200 mL) polipropilen (PP) kapaklı şişelere ilave edilmiştir. Şişelerin kapakları sıkıca kapatıldıktan sonra şişeler 30 dev/dk hızda 18 saat süreyle karıştırmaya tabi tutulmuştur (Şekil 7). Karıştırma süresi sonun-

da, sıvı kısım filtrasyon (0,8 μm selülöz nitrat filtre, Sartorius) ile ayrılmıştır. Berrak çözültiden 50 mL alınmış ve 1 N HNO_3 ilave edilerek <pH 2'ye ayarlanmıştır. Çözültiden metal analizleri yapıncaya kadar örnekler buzdolabında (4°C) saklanmıştır. Testler iki tekrarlı yapılmış olup sonuçların ortalaması sunulmuştur.



Şekil 7. Çevresel karakterizasyon testlerinde kullanılan deney düzeneği

Çizelge 5. Uygulanan çevresel karakterizasyon testleri ve koşulları

Yöntem	Ekstraksiyon çözeltisi	pH	Tane boyutu (mm)	Sıvı: Kati oranı
TCLP	Asetik asit/Sodyum hidroksit	$4,93 \pm 0,05$	<9,5 mm	20:1
SPLP	Sülfürik ve nitrik asit	$4,20 \pm 0,05$	<9,5 mm	20:1
EN 12457-2	Saf su	$\sim 7,0$	<4 mm	10:1

2.2.2 SPLP (Synthetic Precipitation Leaching Procedure) Testi

SPLP testinde kullanılacak ekstraksiyon çözeltisi, ağırlıkça 60:40 oranında $H_2SO_4:HNO_3$ karışımının saf suya pH $4,20 \pm 0,05$ olacak şekilde ilave edilmesiyle hazırlanmıştır (USEPA, 1997). SPLP testlerinde, TCLP testlerinde verilen prosedür (Bölüm 2.2.1) uygulanmıştır. SPLP testi sonuçları, Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliğinde (Resmi Gazete, 2004) belirtilen su kalite sınıflarına göre değerlendirilmiştir.

2.2.3. EN 12457-2 (European Standard Leaching Test) testi

Bu testte ekstraksiyon çözeltisi olarak saf su kullanılmış ve sıvı:kati oranı 10:1 olacak şekilde ayarlanmıştır. Diğer testlerde kullanılan düzene (Şekil 4) kullanılmış, polipropilen (PP) şişeler (iki tekrarlı) 30 dev/dk hızda 24 saat süreyle karıştırılmıştır. Karıştırma işleminden sonra uygulanan prosedür TCLP testi ile aynıdır. Sonuçlar, EN 12457-2 sınır değerlerine göre değerlendirilmiştir (EC, 2003b).

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

TCLP testine ait sekiz metalin (Ag, As, Ba, Cd, Cr, Hg, Pb ve Se) salınımları Çizelge 6'da sunulmuştur. Bu sonuçlara göre, sadece kurşun (Pb) salınımının test için verilen sınır değerlerin üzerinde (≈ 92 kat) olduğu bulunmuştur (Çizelge 6). Diğer metallerde de bir miktar salınım gözlenmiş, ancak, derişimler sınır değerlerin altında kalmıştır. Buna göre ABDK, yüksek kurşun (Pb) salınımı nedeniyle "zararlı atık" konumundadır.

Çizelge 6. TCLP testi sonuçları

Element	Derişim (ppb)	TCLP için sınır değerler (ppb) ^a
Ag	- [*]	5000
As	21,2	5000
Ba	3647	100000
Cd	30,7	1000
Cr	13	5000
Hg	1,52	200
Pb	458611	5000
Se	- [*]	1000
Son pH	5,07	

^aUSEPA, 1997^{*} Tayin sınırının altında

Benzer bir çalışmada, Yang (1993), TCLP testi-ne göre, TV devre kartlarının ve bazı ekran tüplerinin (CRT) Pb, Zn ve Cd metalleri yönünden zararlı atık sınıfına girdiğini bulmuştur. McPherson (2005), çeşitli atık bilgisayar parçalarının (anakart, ses kartı, video kartı vb.), yüksek metal (Pb, Ag, Ba, Cd ve Cr) salınımlarına sahip olduğu için (TCLP) zararlı atık olarak değerlendirilmesi gerektiğini belirtmiştir. Li vd. (2006), kişisel bilgisayar parçalarını (anakart, işlemci, entegre devre vb.) kullanarak TCLP testi uygulamış ve kurşun (Pb) salınımının yasal sınırdan (5 mg/L) 30-100 kat daha fazla olduğunu bulmuştur. Yazıcı vd. (2010), elemanlı ABDK kullandığı TCLP testinde, Pb salınımının yasal sınıra göre ≈ 41 kat daha yüksek olduğunu bildirmiştir. Görüldüğü gibi, birçok araştırmada, ABDK'nın (ve genel olarak AEEE'nin) zararlı atık sınıfına girdiği belirlenmiştir. Literatürdeki çalışmalarda özellikle Pb salınımının diğer metallerle göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Kurşunun temel kaynağı, ABDK'da kullanılan kurşunlu lehimdir (elektronikte Sn/Pb=63/37) (Townsend, 2002). Townsend vd. (2008), kurşun içeren (Sn-Pb) ve içermeyen (Sn-Bi-Ag, Sn-Ag-Cu, Sn-Bi-Cu ve Sn-Cu) lehimlerin kullanıldığı farklı devre kartlarına SPLP testi uygulamış ve Pb içermeyen lehimlerin kullanıldığı kartların Pb-lehimli kartlara göre daha yüksek (3,8-71 kat) Cu salınımına sahip olduğunu bildirmiştir.

EN 12457-2 testlerinde sınır değerlerden daha yüksek Ba, Cu ve Pb salınımları kaydedilmiştir (Çizelge 8). Bu testte ekstraksiyon çözeltisi olarak saf su kullanılmaktadır. Bu sonuçlara göre (Çizelge 8), oksitleyici olmayan koşullar altında dahi önemli oranda metal salınımı gerçekleşmektedir. Yazıcı vd. (2010), devre elemanlı ABDK'da aynı metallerin (Ba, Cu ve Pb) sınır değeri aştığını belirtmiştir.

Çizelge 7. SPLP testi sonuçları ve su kalite sınıfları

Element	Derişim (ppb)	Su Kalite Sınıfları (ppb)		
		I ^a	II ^b	IV ^c
Ag	- *	-	-	-
Al	1137	300	300	>1
As	13,7	20	50	>100
Ba	501	1000	2000	>2000
Cd	- *	3	5	>10
Cr	- *	20	50	>200
Cu	37,1	20	50	>200
Co	2,4	10	20	>200
Fe	8,9	300	1000	>5000
Hg	- *	0,1	0,5	>2
Ni	- *	20	50	>200
Pb	124	10	20	>50
Se	- *	10	10	>20
Son pH	8,51			

^a Yüksek kaliteli su; ^b Az kirlenmiş su; ^c Çok kirlenmiş su (Resmî Gazete, 2004) *Tayin sınırının altında

Çizelge 8. EN12457-2 testi sonuçları ve sınır değerler

Element	Derişim (ppb)	Sınır değerler (ppb) ^a
Ag	- *	-
Al	3213	-
As	- *	25
Ba	610	300
Cd	- *	5
Cr	- *	70
Cu	104	100
Co	- *	-
Fe	- *	-
Hg	- *	2
Ni	7,4	40
Pb	175	50
Se	- *	7
Son pH	8,54	

^a EC, 2003c *Tayin sınırının altında

ABDK'dan metallerin yüksek salınımı, AEEE yönetiminde atık depolamanın önemli seviyede çevresel kirliliğe neden olabileceğini göstermektedir. Bu nedenle, hem ekonomik hem de çevresel açıdan en uygun atık yönetimi seçeneğinin geri dönüşüm/kazanım olduğu sonucuna varılmaktadır.

SONUÇ

Atık elektrikli ve elektronik eşyaların (AEEE veya e-atık) zararlı organik/inorganik maddeler içermesi, diğer taraftan temel/değerli metal yönünden zengin olmaları nedeniyle en uygun şekilde yönetilmeleri hem ekonomik açıdan hem de çevresel açıdan önem arz etmektedir. AEEE'deki temel ve değerli metallerin önemli bölümü atık baskılı devre kartlarında (ABDK) bulunmaktadır. ABDK'nın ekonomik değeri özellikle altın içeriğinin artmasına bağlı olarak yükseltmektedir.

AEEE'nin evsel atıklarla depolanması durumunda yeraltı/yerüstü sularının kirlenmesi söz konusu olabilmektedir. Bu nedenle, atıl duruma gelen bilgisayarlardan toplanan ABDK'nın (%18,5 Cu, 86 g/t Au, 694 g/t Ag ve 97 g/t Pd) çevresel etkilerinin değerlendirilmesi amacıyla standart test prosedürleri uygulanmıştır. TCLP testinde kurşun (Pb) salınımının sınır değerlerin ≈92 kat üzerinde olduğu, bu nedenle ABDK'nın, yüksek kurşun (Pb) salınımı nedeniyle "zararlı atık" sınıfında olduğu belirlenmiştir. SPLP testinde sınır değerleri aşan metaller Al, Pb ve Cu olarak belirlenmiştir. Ekstraksiyon çözültisi olarak saf su kullanılan EN 12457-2 testlerinde (oksitleyici olmayan koşullar) sınır Ba, Cu ve Pb metallerinin yüksek salınım gösterdiği bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar, AEEE yönetiminde atık depolamanın su kirliliğine neden olabileceğini ve buna dayanarak AEEE'nin geri dönüşüm/kazanım

süreçleriyle değerlendirilmesinin en uygun seçeneği olduğu ortaya çıkmaktadır.

TEŞEKKÜR

Desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a (109M111 no'lu proje) teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Babu, B.R., Parande, A. K. ve Basha, C. A., 2007. Electrical and electronic waste: a global environmental problem, *Waste Management & Research*, 25, 4, 307-318.

Bertram, M., Graedel, T. E., Rechberger, H., Spataro, S., 2002. The contemporary european copper cycle: waste management subsystem, *Ecological Economics*, 42, 1-2, 43-57.

Deveci, H, Yazıcı, E. Y., Aydın, U., Yazıcı, R. ve Akçil, A.U., 2010. Extraction of copper from scrap TV boards by sulphuric acid leaching under oxidising conditions, *Going Green-CARE INNOVATION*, no: 045, Viyana.

EC, 2003a. Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (RoHS). Official Journal L 037.

EC, 2003b. Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on waste electrical and electronic equipment (WEEE), Joint Declaration of the European Parliament, The Council and the Commission Relating to Article 9, Official Journal L 037.

EC, 2003c. European Council decision establishing criteria and procedures for the acceptance of waste at landfills, 2003/33/EC, L 11/27.

EC, 2006. Implementation of waste electric and electronic equipment directive in EU 25. European Commission (EC), Directorate-General Joint Research Center, Institute for Prospective Technological Studies, Technical Report Series, Ed.: Savage, M., Ogilvie, S., Slezak, J., Artim, E.

EU, 2011. Directive 2011/65/EU of the European Parliament and of the Council of 8 June 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (RoHS) (güncelleme), Official Journal L 174.

EU, 2012. Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 8 June 2011 on waste electrical and electronic equipment (WEEE) (güncelleme). Official Journal L 197.

Fishbein, F.K., 2002. Waste in the Wireless World:

The challenge of cell phones. INFORM Inc., Mayıs, 103 s.

Goosey, M., Kellner, R., 2002. A scoping study: end-of-life printed circuit boards, Intellect and the Department of Trade and Industry, 10 s.

Hadi, Pejman, Meng Xu, Carol S. K. Lin, Chi-Wai Hui, Gordon McKay. 2015. Waste Printed Circuit Board Recycling Techniques and Product Utilization, *J.of Hazard. Mater.*, 283, 234-243.

Hagelüken, C. 2006b. Recycling of electronic scrap at umicore precious metals refining, *Acta Metallurgica Slovaca*, 12, 111-120.

Hagelüken, C., 2006a. Improving metal returns and eco-efficiency in electronics recycling - a holistic approach for interface optimisation between pre-processing and integrated metals smelting and refining, International Symposium on Electronics and the Environment (ISEE), USA, 218-223.

Kartal, A., 2015. Atık elektrikli ve elektronik eşyaların belediyelerde toplanması ve uygulamaları, Atık Yönetimi Sempozyumu, 26-29 Ocak.

Kaya, M. ve Sözeri, A., 2007. Elektronik Atık (E-Atık) Geri Dönüşümü/Kazanımı, *AB Sürecinde Türkiye'de Katı Atık Yönetimi ve Çevre Sorunları Sempozyumu (TÜRKAY)*, Mayıs, İstanbul.

McPherson, D. T., 2005. Hazard Assessment of E-Waste From Desktop Computers, Doktora Tezi, Jackson State University, USA.

Namias, J. 2013. The Future of Electronic Waste Recycling in the United States: Obstacles and Domestic Solutions. MSc Thesis, Columbia University.

Öztürk, T., Ayberk, S., 2008. E-atıkların genel atık profili içindeki yerinin belirlenmesi, *Çevre Sorunları Sempozyumu*, 564-568, Kocaeli.

Resmi Gazete, 2004. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Karar: 2004/8289, Sayı: 25687.

Resmi Gazete, 2008. Elektrikli ve Elektronik Eşyalarda Bazı Zararlı Maddelerin Kullanımının Sınırlanmasına Dair Yönetmelik, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Sayı: 26981.

Resmi Gazete, 2012. Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Sayı: 28300.

Resource Recycling. 2015. Printed Circuit Board Prices Tumble. [Http://resource-recycling.com/node/2813](http://resource-recycling.com/node/2813).

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2015. Türkiye'de Atık Yönetimi, Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, Atık Yönetimi Dairesi Başkanlığı, Atık Yönetimi Sempozyumu, Ocak.

Townsend, T G., Jang, Y-C. ve Tolaymat, T., 2003.

A guide to to use of leaching tests in solid waste management decision making, The Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management (University of Florida, USA) için hazırlanmış rapor, 03-01 (A), 31 s.

Townsend, T., Musson, S., Dubey, B. ve Pearson, B., 2008. Leachability of printed wire boards containing leaded and lead-free solder, *Journal of Environmental Management*, 88, 4, 926–931.

Townsend, T.G., 2002. Evaluation of Leaching Test Results of Lead-Free Solders, Abt. Associates Inc. için hazırlanmış rapor, 10 s.

Tuncuk, A., Stazi, V., Akcil, A. Yazıcı, E.Y., Deveci, H., 2012. 'Aqueous Metal Recovery Techniques from E-Scrap: Hydrometallurgy in Recycling'. *Minerals Engineering* 25,1, 28–37.

Umicore. 2015. Electronic Scrap- Materials We Treat, <http://www.preciousmetals.umicore.com/recyclables/eScrap/MaterialsWeTreat/>.

USEPA, 1997. Test Methods for evaluating solid waste - physical chemical methods. U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Washington, www.epa.gov/SW-846/main.htm.

Widmer, R., Oswald-Krapf, H., Sinha-Khetriwal, D., Schnellmann, M. ve Böni, H., 2005. Global perspectives on e-waste, *Environmental Impact Assessment Review*, 25, 5, 436–458.

WRAP, 2014. Techniques for Recovering Printed Circuit Boards (PCBs). by H.McCoach, C.White, C.Laundon, IMT002-016. Waste&Resources Action Programme (WRAP), 45 s.

Yang, G. C. C., 1993. Environmental threats of discarded picture tubes and printed circuit board, *Journal of Hazardous Materials*, 34,2, 235–243.

Yazıcı, E. Y. 2012. Elektronik Atıklardan Metallerin Fiziksel ve Hidrometalurjik Yöntemlerle Geri Kazanımı, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.

Yazıcı, E. Y., Deveci, H., 2009. E-atıklardan Metallerin Geri Kazanımı, *Madencilik*, 48, 3–18.

Yazıcı, E. Y., Deveci, H., Alp, I., Akcil, A.U. ve Yazıcı, R., 2010. Characterisation of computer printed circuit boards for hazardous properties and beneficiation studies, Int. Mineral Processing Congress (IMPC), 4009-401, Avustralya.