

REFRAKTER AKOLUK Au-Ag CEVHERİNİN KARIŞTIRMALI DEĞİRMEN İLE İNCE ÖĞÜTÜLMESİ

Ultra-fine grinding of refractory Akoluk Au-Ag ore by stirred mill

Geliş (received) 25 Kasım (November) 2009; Kabul (accepted) 05 Ocak (January) 2010

Oktay CELEP (*)
İbrahim ALP (**)

ÖZET

Çoğunlukla kuvars, barit ve kaolinden oluşan Akoluk (Ordu) Au/Ag cevheri içerisinde az miktarda pirit, sfalerit ve stibnit gibi sülfürlü mineraller bulunmakta, altın ise nabit olarak küçük boyutlarda gang ve sülfürlü minerallerin içerisinde kapanım halinde bulunmaktadır. Önceki çalışmalarda refrakter özellik gösterdiği tespit edilen Akoluk altın-gümüş cevherinin ince öğütülmesinde etkili olan öğütme parametrelerin araştırılması bu çalışmanın amacını oluşturmaktadır. Öğütme çalışmaları laboratuvar tip dikey pinli karıştırırmalı değirmen ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada farklı boyutlarda çelik bilye ve kuvars ile yapılan öğütme deneylerinde farklı karıştırma hızlarında öğütme süresine göre tane boyu küçülmesi ve enerji tüketiminin değişimi incelenmiştir. Ayrıca enerji etkinliğini değerlendirmek amacıyla karıştırırmalı değirmendeki stres şiddeti ve sayısı ile tane boyutu ve tüketilen enerji miktarı arasındaki ilişki incelenmiştir. Çalışma sonuçları öğütme süresi ile enerji tüketiminin doğru orantılı olarak arttığı, tane boyutunun ise üssel olarak küçüldüğünü göstermektedir. Aynı sürelerde öğütme için karıştırma hızının azalması ve bilye boyutunun küçülmesi daha ince boyutlu ürün elde edilmesine sebep olurken, şarj oranının düşürülmesi daha iri boyutlu ürün alınmasına sebep olmuştur. Yaklaşık 5 µm (d_{90}) ürün tane boyutu; optimum olarak belirlenen bilye boyutu (3 mm) ve karıştırma hızında (750 dev./dk.) 5 dk. öğütme sonrasında elde edilmiştir. Yapılan çalışmalar Akoluk cevherinin istenilen ince tane boyutlarına dikey pinli karıştırırmalı değirmenler ile verimli bir şekilde öğütülebileceğini öngörmektedir. İnce öğütmenin cevher için liç öncesi ön işlem olarak kullanılabilirliğinin test edilmesi gerekmektedir.

Anahtar kelimeler: Refrakter Au/Ag Cevheri, İnce Öğütme, Karıştırırmalı Değirmen

ABSTRACT

Akoluk (Ordu) Au/Ag ore consisted of predominantly quartz, barite, kaolinite, and to a less extent, sulphide minerals such as pyrite, sphalerite and stibnite. Gold were present in native form and associated with sulphide minerals and gang minerals as fine particles. The aim of this study consist of the determining of grinding parameters to be effective on ultrafine grinding of Akoluk gold-silver ore determined its refractory characteristic in previous studies. Grinding tests were carried out in a laboratory scale pin-type vertical stirred mill. In this study, the energy consumption and particle size reducing are examined in accordance with grinding time depend on various stirring rate in grinding tests done by using different sized steel beads and quartz. Also, to evaluate energy efficiency, the relation among particle size and consumed energy amount with stress intensity and stress number occurred in stirred mill was investigated. The results showed that grinding time and energy consumption have increased in directly proportion and particle size has decreased as the exponential. In the same grinding period, the reduction of stirring rate and becoming smaller of ball size lead to finer-sized products to be obtained when reduction of charging rate lead to happen of the larger sized products. About 5µm (d_{90}) product particle sizes were obtained at ball size (3 mm) and stirring rate (750 rpm/min.) 5 minute grinding time determined as optimum. Experimental studies provided that grinding of Akoluk ore to desired ultrafine sizes by scale pin-type vertical stirred mill could be efficiently. The testing of ultrafine grinding availability as pretreatment prior to leaching for ore must be required.

Keywords: Refractory Gold-Silver Ore, Ultra Fine Grinding, Stirred Mill

(*) Araş.Gör., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Müh. Fakültesi, Maden Müh. Böl., TRABZON, ocelep@ktu.edu.tr
(**) Yrd. Doç. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Müh. Fakültesi, Maden Müh. Bölümü, TRABZON

1. GİRİŞ

Akoluk cevheri Ordu ilinin güneybatısında, volkanik sedimanter kayalar birimlerinden oluşan doğu pontitlerinin batısında yer almaktadır (MTA, 1993). Daha önce farklı araştırmacılar tarafından yapılmış çalışmalar sonucunda cevher minerallerinin pirit, stibnit, sfalerit, galen, markazit, zinkenit, orpiment, realgar, zinober olduğu belirlenmiştir. Gang mineralleri ise kuvars, barit, illit, kalsit, dolomit ve floritir (Yaylayı, 2000; Yaylalı ve Tüysüz, 2009). Cevherde altının; farklı büyüklükte (5-50 µm) ve %11-19 Ag içeren nabit altın şeklinde bulunduğu gözlenmiştir (Aslaner ve Ottemann, 1971). Altın saçınım halde kuvars gangi içinde bulunduğu gibi, sülfid damarcıklarında, özellikle zinkenitle (PbSb₂S₄) birlikte bulunmaktadır (Tüysüz ve Akçay, 2000). Akoluk cevherinin 24 saatlik siyanür liç testlerinde düşük metal kazanımları (% ≤47 Au ve % ≤19,2 Ag) elde edilmiş ve refrakter olarak tanımlanmıştır (Celep vd., 2009).

Refrakter altın cevherleri altın kazanımının düşük olması nedeniyle bir ön işlemin uygulanmasını gerektirmektedir (Gupta ve Mukherjee, 2000; Adams, 2005). Bu tür cevherlere siyanür ve oksijenin altın tanelerine temasını sağlayacak şekilde sülfid matriksini bozundurmaya amacıyla kavurma (Costa, 1997), basınç oksidasyonu (Dunn ve Chamberlain, 1997) ve bakteriyel oksidasyon (Iglesias ve Carranza, 1994) gibi ön işlemler uygulanmaktadır (La Brooy vd., 1994). Cevher örneklerinden hazırlanan parlak kesitlerden tane sayım yöntemiyle belirlenen altın tanelerinin yarısının 3µm den daha küçük olduğu görülmüştür (Celep vd., 2006 ve 2009). Altın tanelerinin çok küçük boyutlarda olması geleneksel öğütme ile yeterince serbestleşmemesine ve liç verimlerinin düşük olmasına sebep olmaktadır. Yapılan tanımlayıcı liç testlerinde altın ve gümüşün önemli bir kısmının sülfürlü mineraller ile birlikte bulunduğu belirlenmiştir (Celep vd., 2009). Bulgular; cevherin refrakterlik çözümü olarak ince öğütmenin etkisinin araştırılması öngörülmektedir.

Gelişen teknoloji ve farklı özellikteki malzemelerin kullanımına artan talepten dolayı değişik endüstri kollarında (plastik, seramik, boya, gıda ve kozmetik) ince (<100 µm), çok ince (<10 µm) veya ultra ince (<1 µm) olarak adlandırılan boyutlardaki malzemeye olan ihtiyaç giderek artmaktadır (Becher ve Schwedes, 1999; Fadhel

vd., 1999; Bokayni, ve Csöke, 2003; Jankovic vd., 2004). Bu gelişmelere bağlı olarak madencilik sektöründe de yüksek tenörlü cevherlerin tükenmesiyle birlikte tane boyutu çok ince olan düşük tenörlü cevherlerin ekonomik olarak değerlendirilmesi önem kazanmaya başlamıştır. Bu durum beraberinde malzemelerin daha ince boyutlara öğütülmesinin gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Madencilikte cevher hazırlama işlemlerinde bilyeli değirmenler ile cevherlerin çok ince boyutlara öğütülmesi ekonomik ve fiziksel olarak mümkün olmamaktadır. İnce öğütme için bilyeli değirmenlerde temel problem değirmenin kritik hızın üzerindeki hızlarda ince öğütmenin gerçekleşmemesidir. Ayrıca bilyeli değirmenlerde 20-90 mm boyutlarında bilye kullanıldığı için 20 µm'den daha ince öğütme gerçekleşmemektedir. Geleneksel tane boyutunun daha da altındaki (<75 mikron) tane boyutlarına ince öğütme yapabilmek için karıştırmalı ve titreşimli bilyeli değirmenler kullanılmaktadır. Bilyeli değirmenlerde elde edilen tane boyutu >10 µm iken karıştırmalı değirmen ile birim zaman ve hacimde açığa çıkan enerji miktarı çok yüksek olduğundan 10 µm' nin altında ekonomik öğütme yapılabilmektedir (Dikmen ve Ergün, 2004)

Cevher ve konsantrelerin öğütülmesi altın ve altın içeren minerallerin serbestleşmesi için gerekli olan bir işlemdir. Gerekli öğütmenin derecesi altının serbestleşme derecesine, altınla birlikte bulunan minerallerin yapısına ve uygulanacak zenginleştirme metoduna bağlıdır (Marsden ve House, 2006). Refrakter altın cevherlerinin siyanür liçiyile değerlendirilmesinde aşırı ince öğütmenin (<10 µm) kullanımı diğer ön oksidasyon işlemlerine alternatif olabilmektedir (Deschenes vd., 2005). Özellikle sülfür mineral matriksinde kapanım halde bulunan altının açığa çıkarılmasında kullanılan kavurma işlemine gerek kalmadan çevresel ve ekonomik kazanç sağlayacağı düşünülmektedir (Corrans ve Angove, 1991; Ellis, 2008). Aşırı ince öğütmenin amacı kapanım halinde bulunan çok küçük altın tanelerine liç reaktifinin temasını sağlamaktır. Bu amaçla değişik tipte karıştırmalı değirmenler bu alanda kullanılmaktadır (Celep ve Alp, 2008). Kalgoorlie Consolidated madeni (KCGM) kapasitesi 20 t/h olan iki aşırı ince öğütme devresinde refrakter altın cevherinin flotasyon konsantresini kavurmaya alternatif olarak değerlendirmektedir (Deschenes vd., 2005). Yatay karıştırmalı IsaMill değirmende aşırı ince öğütme için 6mm boyutunda silika kum öğütücü

ortam olarak kullanılmaktadır. Öğütme tane boyutu 11–12 mikron olmakta ve altın verimi % 75 den % 90' a çıkarılmaktadır (Ellis, 2008).

Karıştırmalı değirmenler 1920'lerde tasarlanmış olup sabit bir silindir ve eksenini üzerinde dönen bir rotordan oluşmaktadır. Günümüzde farklı tiplerde karıştırmalı değirmenler dizayn edilmiştir. Bunlar Tower mill, VertiMill, Isa mill, Svedala detritör, Sala agitated mill ve ANI-Metsoprotech SVM değirmenlerdir. Maxmill olarak adlandırılan değirmen tipinde ise gövde dönmekte ve gövde içinde bulunan bir plaka yardımıyla içerisindeki ortam karıştırılmaktadır (Hacıfazlıoğlu vd., 2007; Wang ve Forssberg, 2007; Wang ve Forssberg, 2008; Gao ve Holmes, 2008). Üretilen ilk ekipmanlar, düşük hızlarda çalışmakta (<6 m/sn) ve aşındırıcı olarak adlandırılmaktadırlar. İlerleyen yıllarda değirmen gövdesinin boy/çap oranının artmasına paralel olarak yüksek karıştırma hızına sahip değirmenler de geliştirilmiştir (Tüzün vd., 1995). Karıştırmalı değirmenler karıştırıcı tipine göre diskli, pinli ve halkalı olmak üzere üç şekilde adlandırılırlar. Bu değirmenler yatay veya dikey olarak ve yaş/kuru olarak uygulanmaktadırlar (Parry vd., 2006; Jankovic vd., 2008). Karıştırmalı değirmenlerin performansı değirmen boyutu, öğütücü ortam yoğunluğu-şekli-bileşimi, değirmen aşınması, karıştırma hızı, bilye yoğunluğu, bilye çapı ve şarj oranı, pulp yoğunluğu veya viskozite gibi pek çok faktöre bağlıdır (Zheng vd., 1996; Jankovic, 2001; Yue vd., 2006).

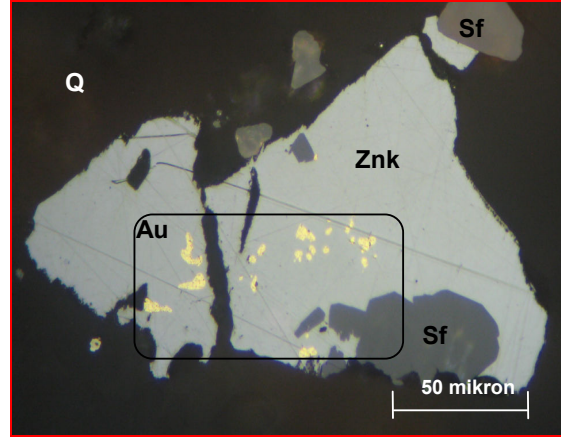
Bu çalışmada refrakter özelliğe sahip Akoluk (Ordu) altın-gümüş cevherinin karıştırmalı değirmende ince öğütülmesinde etkili olacak parametreler araştırılmış, tane boyutu üzerindeki performansları değerlendirilmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Malzeme

Akoluk (Ordu) cevher yatağından yaklaşık 150 kg numune alınmıştır. Örnekler çeneli kırıcıda kırıldıktan sonra %80'i 15 µm olacak şekilde çubuklu değirmende öğütülmüştür. Cevher numunesinin kimyasal analizi ICP-AES (Atomic Emission Spectroscopy) ve NAA (Neutron Activation Analysis) ile yapılmıştır (Çizelge 1). Numunenin altın ve gümüş tenörleri sırasıyla 20,23 gr/ton Au and 220 gr/ton Ag olarak belirlenmiştir. Cevherin XRD incelemesi

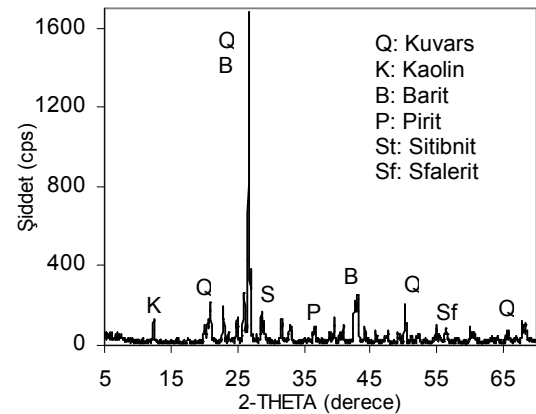
Rikagu D/max-III C X-Ray diffractometre ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). Altının bir kısmının süflürlü 1-10 mikron boyutunda minerallerle birlikte bulunduğu belirlenmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Zinkenit içerisinde altın saçılımı (40x10) (Au: Altın, Q:Kuars, Znk:Zinkenit, Sf: Sflerit).

Çizelge 1. Cevher numunesinin kimyasal analizi

Bileşik	İçerik (%)	Element	İçerik (ppm)
SiO ₂	52,15	Au	20,23
Al ₂ O ₃	4,71	Ag	220,00
Ba	17,10	As	261,80
Fe ₂ O ₃	1,28	Cu	472,70
CaO	0,14	Zn	%1,50
MgO	0,07	Pb	%0,43
Na ₂ O	0,04	Hg	>100
K ₂ O	0,38	Sr	%0,31
TiO ₂	0,80	Sb	%1,64
P ₂ O ₅	0,01	Ni	6,00
MnO	0,01	Zr	40,70
Cr ₂ O ₃	0,001	Cd	62,70
Top. S	6,89	Ga	8,50
Top. C	0,05	Mo	12,60
A.K.	4,60		



Şekil 2. Cevher örneğinin X-ışınları difraktogramı.

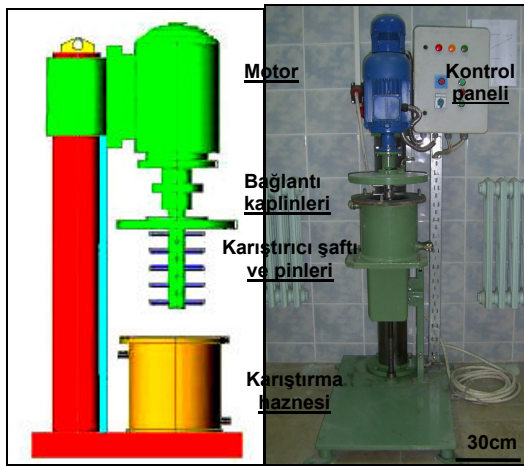
Cevherin XRD, kimyasal analiz, cevher mikroskopisi ve SEM-EDS analizlerine göre çoğunlukla barit, kuvars ve kaolin grubu kil minerallerinden, kalan diğer kısmın ise framboidal pirit, stibnit, sfalerit, galen, pirarjirit ve zinkenit gibi sülfürlü minerallerden oluştuğu görülmektedir (Çizelge 2).

Çizelge 2. Cevherin mineralojik analizi

Mineral	İçerik (%)
Kuvars	37,00
Kaolin	27,00
Barit	30,00
Sülfürlü mineraller (Pirit, Sfalerit, stibnit, zinkenit)	4,60

2.2. Yöntem

Öğütme deneylerinde laboratuvar ölçekte dikey pinli karıştırmalı değirmen kullanılmıştır (Şekil 3). Değirmen; öğütme haznesi, karıştırıcı şaft ve motoru, haznenin hareketini sağlayan motor ve kontrol şalterleri, elektrik sayacı ve hız değiştiricinin bulunduğu kontrol panelinden oluşmaktadır. Karıştırma şaftı eşit aralıklarla yerleştirilmiş 14 adet 16,4 Ø8,9 mm boyutlu silindirik kesitli pinlerden oluşmaktadır. Karıştırma şaftını maksimum 3000 dev./dk. da dönmesini sağlayan 2,2 kW gücünde bir motora sahiptir. Öğütmede enerji tüketimi karıştırma motoruna bağlı bir elektrik sayacıyla ölçülmüştür.



Şekil 3. Dikey pinli karıştırmalı değirmen.

Öğütme deneyleri farklı bilye boyutu (1, 3 ve 9,5 mm) ve -4+2 mm boyutunda granüle kuvars ile farklı öğütme sürelerinde (1, 3, 5, 10 ve 20 dk.) 750, 1000 ve 1250 dev/dk karıştırma hızında

yapılmıştır. Bilyelerin yoğunlukları 7,68 gr/cm³ ve granüle kuvarsın yoğunluğu 2,7 gr/cm³ dür. Öğütücü ortam şarjı değirmen hazne hacminin %80'i oranında seçilmiştir. Beslenen numune miktarı ise bilye boşluğunun %100 oranında dolduracak şekilde belirlenmiştir. Her bir öğütme deneyi için belirlenen sürelerde değirmenden pulp şeklinde numune alınmış ve tane boyut analizleri Malvern Mastersizer lazer tane boyut analiz cihazı ile 1,6 tane refraktif indeksinde, 5 dakika ultrasonik karıştırma süresinde ve 5 analiz tekrarının ortalaması alınarak yapılmıştır.

Değirmen içinde oluşacak olan stres şiddeti ve sayısı aşağıda verilen formüller yardımıyla hesaplanmaktadır (Dikmen ve Ergün, 2004; Celep vd., 2009).

$$SI_m = R_b^3(\rho_m - \rho)V^2 \quad (1)$$

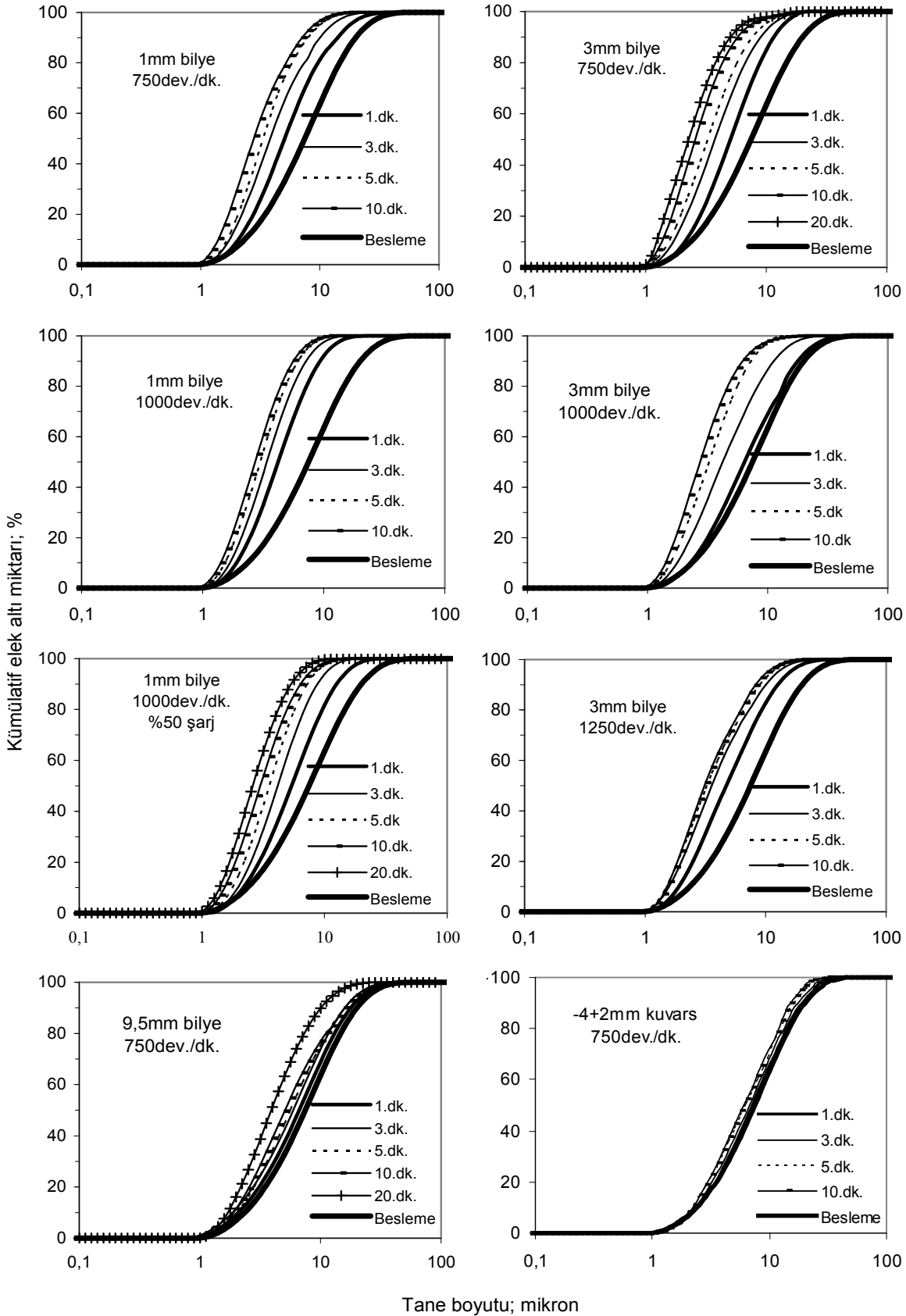
$$SN \propto n.t. \frac{\phi_b \cdot (1 - \varepsilon)}{(1 - \phi_b(1 - \varepsilon))c_v} \cdot \frac{x^3}{R_b^2} \quad (2)$$

Burada; R_b : öğütme ortam boyutu (m); ρ_m : öğütme ortam yoğunluğu (kg/m³); ρ : pulp yoğunluğu (kg/m³); V : karıştırıcı çevresel hızı (m/s); SI_m : öğütme ortamının stres şiddeti (Nm); C_v : katı konsantrasyonu (% hacimce); x : ortalama tane boyu (m); V_D : değirmen hacmi (m³); ϕ_b : dolum oranı (%); ε : bilyalar arası boşluk oranı (%); n : karıştırıcı devri (rpm), t : öğütme süresi (dk) dir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Öğütme süresinin etkisi

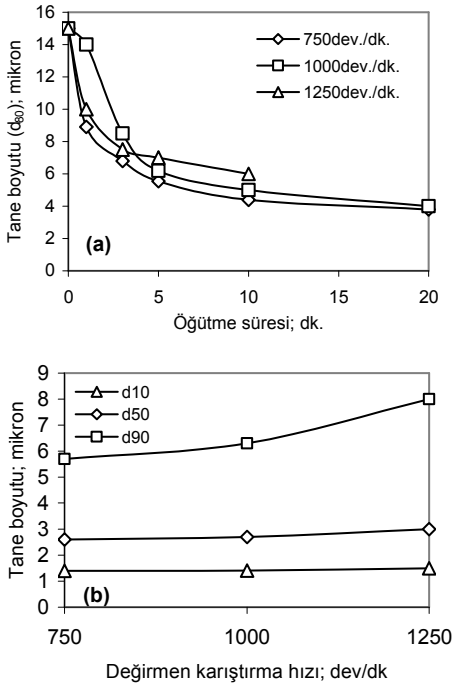
Akoluk refrakter tip altın-gümüş cevherinin karıştırmalı değirmende farklı bilye boyutları ile (1 mm, 3 mm, 9,5 mm ve -4+2 mm kuvars) ve farklı öğütme sürelerinde (1, 3, 5, 10 ve 20 dk.) öğütülmesi ile elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları Şekil 4' de verilmektedir. Öğütme süresi artıkça elde edilen ürünün tane boyutu azalmaktadır. Buna bağlı olarak da tüketilen enerji miktarı da artmaktadır. Enerji tüketimi ve ürün tane boyutu arasında optimum bir değerde öğütme yapmak gerekmektedir. Bununla birlikte karıştırma hızının artmasıyla da birlikte 10 dakika öğütmeden sonraki öğütme sürelerinde oluşan ince tanelerin aglomere olduğu görülmüştür. Bu durum 2,5 mikrondan ince tanelerin elastik davranıştan plastik davranışa geçmesiyle açıklanmaktadır (Hacıfazlıoğlu vd., 2007).



Şekil 4. Öğütme zamanının ürün tane boyutu üzerine etkisi (%35 katı, % 80 şarj, %100 doluluk)

3.2. Karıştırma hızının etkisi

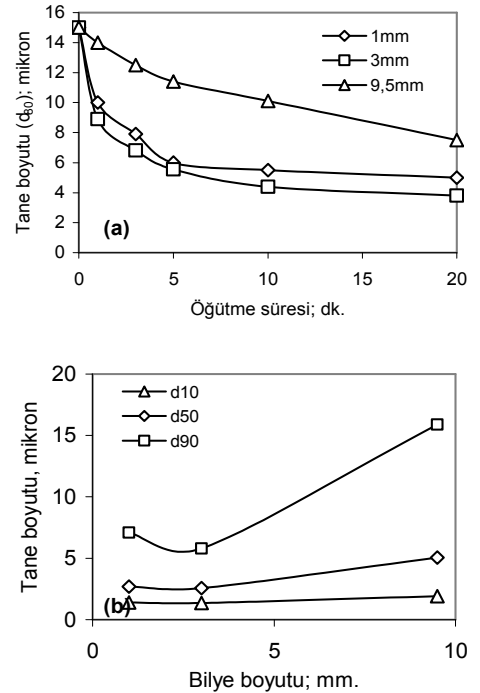
Karıştırmalı değirmenlerde karıştırma hızının artmasıyla elde edilen ürünün tane boyutu küçülmekte ve değirmenin harcadığı güç artmaktadır. Böylece değirmenin birim hacminde harcanan özgül enerji miktarında bir artış olduğu görülmektedir. Bunun sonucunda istenen ürün tane boyutuna daha kısa sürede ulaşmakta ve değirmen kapasitesinde artış gerçekleşmektedir. Buna karşın yüksek hızlarda endüstriyel ölçekte tasarımdaki güçlükler nedeniyle optimum bir hız seçimi gerekmektedir (Gao ve Forssberg, 1993). Yapılan öğütme deneylerinde 750, 1000 ve 1250 dev/dk. karıştırma hızında elde edilen tane boyut değerleri Şekil 5'de verilmektedir. Deneyler 3 mm boyutunda bilye ve 10dk. öğütme süresi ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre karıştırma hızının azaltılması ile birlikte d_{10} ve d_{50} değerlerinde çok az bir azalma olurken, d_{90} değerinde 8 μm den 5 μm ' e bir azalma olmuştur. Karıştırma hızının artmasına bağlı olarak öğütme etkinliği tanelerin bağlarının kopmasıyla sağlanabilmektedir. Ancak optimum hız aşıldığında kullanılan fazla enerjiye rağmen değirmen içinde oluşan sanrifüjün etkisiyle karıştırma hızının artışı elde edilen tane boyutu üzerinde olumlu etkiye sahip olmamıştır (Orumwense, 1992).



Şekil 5. a) Değirmen karıştırma hızının ürün tane boyutu üzerine etkisi ve b) $d_{10,50,90}$ değerlerinin karşılaştırılması (10dk. öğütme zamanı, 3mm bilye, % 80 bilye şarj, %35 katı, %100 doluluk).

3.3. Ortam boyutu ve özelliğinin etkisi

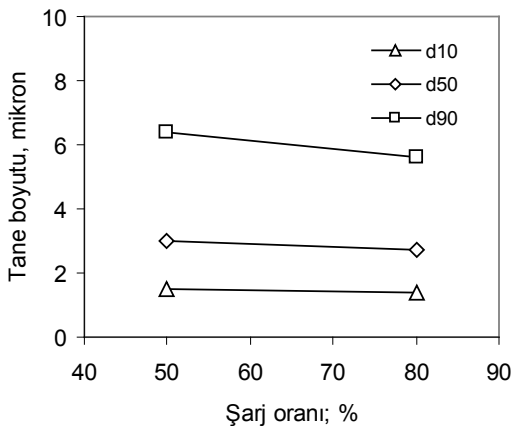
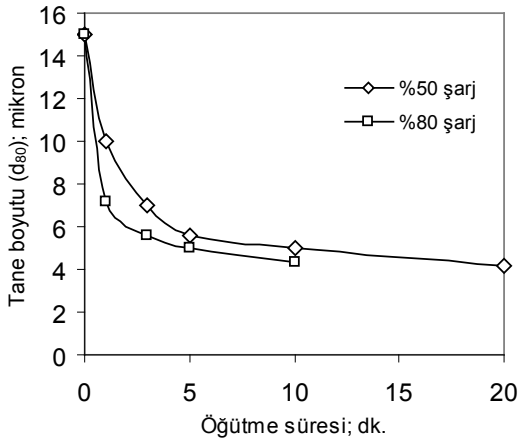
Karıştırmalı değirmenlerde kullanılan bilye boyutu elde edilen ürünün tane boyutunu etkileyen önemli bir parametredir. Yapılan çalışmalarda bilye boyutu 9,5 mm den 3 mm küçüldükçe ürün tane boyutu azalmaktadır. 1mm bilye kullanıldığında ise 3mm ye göre daha iri tane boyutları elde edilmiştir. 1mm bilye çapı 3mm ye göre yeterince büyük olmadığından elde edilen ürün boyutu üzerinde daha az etkili olmuştur. Ortam boyutu beslemedeki en iri taneyi kırabilecek kadar yeterince büyük olmalıdır. Belli bir tane boyutundan küçük bilye kullanıldığında beslemedeki iri taneleri öğütmemektedir. Bilye boyutu ile tane boyutu arasındaki optimum oranın 7:1 ile 20:1 arasında olması gerekmektedir (Gao vd., 2006; Lichter ve Davey, 2006; Mankosa vd., 1989; Yue ve Klein, 2006). Ayrıca bilyelerin yoğunluğu azaldıkça (cam, otojen malzeme vb.) yüksek yoğunluklu bilyelere (çelik, demir vb.) oranla öğütme etkinliği azalmaktadır. Yapılan deneylerde 750 dev/dk karıştırma hızında 1, 3 ve 9,5 mm bilye boyutunda 10 dk. öğütme sonunda elde edilen ürünlerin d_{50} boyutları sırasıyla 2,7 μm , 2,5 μm ve 5 μm iken d_{90} boyutları 7,1 μm , 5,8 μm ve 15,8 μm olmaktadır (Şekil 6).



Şekil 6. a) Bilye boyutunun ürün tane boyutu üzerine etkisi ve b) $d_{10,50,90}$ değerlerinin karşılaştırılması (10dk. öğütme zamanı, 750dev/dk karıştırma hızı, %35 katı).

3.4. Değirmen şarj oranının etkisi

Düşük karıştırma hızı ve iri besleme kullanıldığı zaman geleneksel öğütmelerde şarj oranı yaklaşık % 40 iken karıştırmalı değirmenlerde değirmen hacminin % 80'i kadar olması daha iyi öğütme enerjisi sağlmasına neden olmaktadır (Gao ve Forsberg, 1993). Bununla birlikte aşırı öğütme ortamı kullanımı fazla ortam ve karıştırıcı aşınmasına neden olacağı için aşırı öğütme ortamı kullanımından kaçınılmaktadır. Yapılan deneylerde şarj oranını artırılması tane boyutunda bir azalmaya neden olduğu görülmektedir (Şekil 7). %80 şarj oranı kullanıldığında daha ince tane boyutlarına daha kısa öğütme sürelerinde ulaşıldığı görülmektedir. Şarj oranının artmasıyla birlikte aynı öğütme sürelerinde elde edilen ürünlerin d_{10} , d_{50} ve d_{90} değerlerinde azalma gerçekleşmiştir.



Şekil 7. a) Bilye şarj oranının ürün tane boyutu üzerine etkisi ve b) $d_{10,50,90}$ değerlerinin karşılaştırılması (10dk öğütme zamanı, 750dev/dk karıştırma hızı, %35 katı, %100 doluluk).

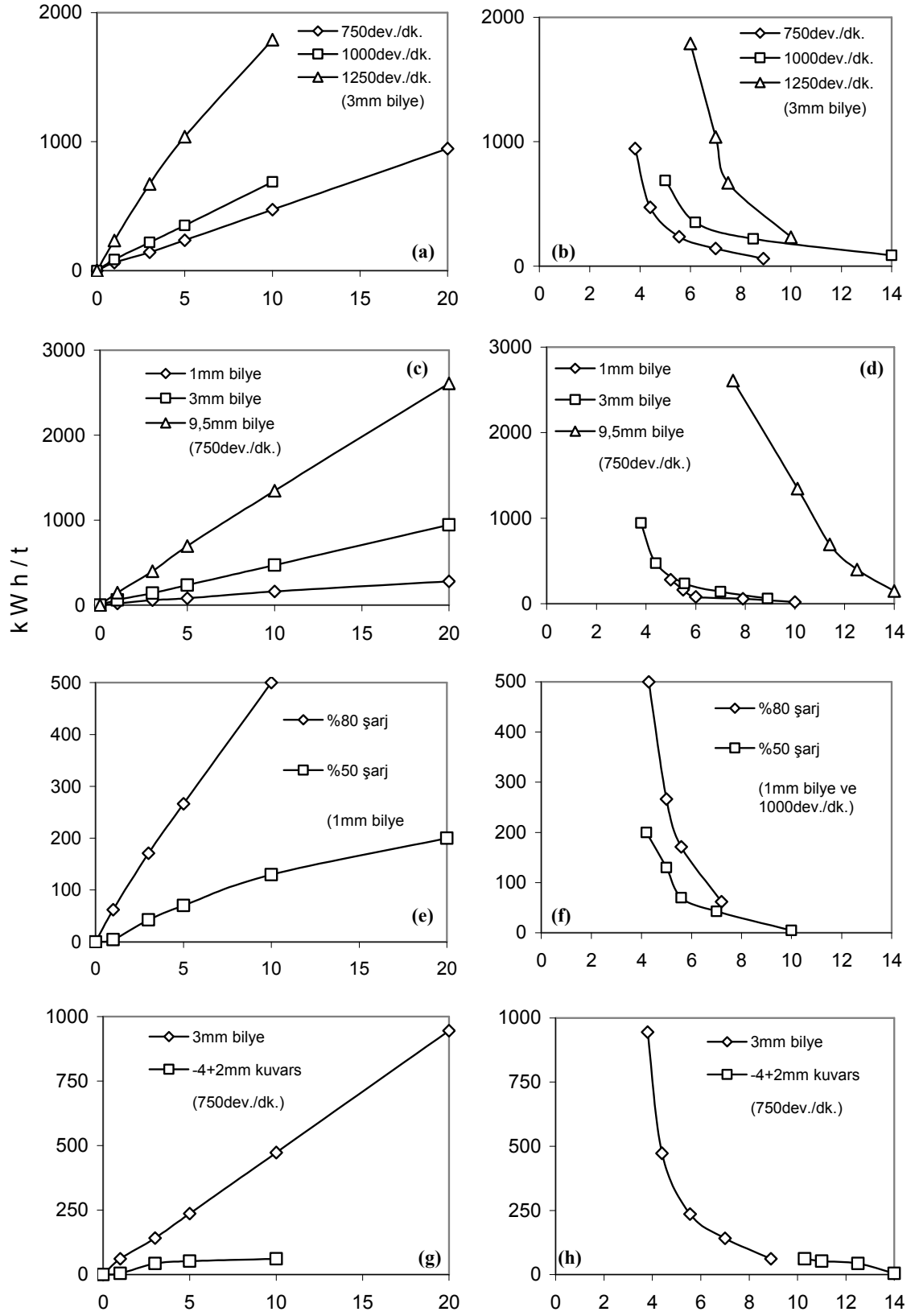
3.5. Enerji Tüketimi

Karıştırmalı değirmende harcanan enerjinin büyük bir bölümü bilye yükünü hareket ettirmek için kullanılır. İri bilyelerin değirmen içerisindeki hareketi ince bilyelere göre daha zor olmakta ve bilye boyutu arttıkça tüketilen enerji miktarı da artmaktadır (Hacıfazlıoğlu vd., 2007; Zheng vd., 1996). Şekil 8'de bilye boyutuna, şarj oranına, öğütücü ortam cinsine ve karıştırma hızına bağlı olarak farklı öğütme sürelerinde elde edilen ürünlerin d_{80} boyutlarına göre harcanan enerji miktarları görülmektedir. 3 mm bilye boyutunda karıştırma hızının artmasıyla birlikte tüketilen enerji miktarına bağlı olarak elde edilen ürünlerin d_{80} boyutlarında azalma olmaması, düşük karıştırma hızında daha ince ürün elde edilmiştir (Şekil 8a,b).

750 ve 1000 dev./dk. karıştırma hızlarında d_{80} 5 μ m den sonra artan enerji tüketimine rağmen tane boyutunda azalma olmamıştır. İri bilye kullanıldığında harcanan enerji miktarı artarken, ince bilye kullanıldığında daha ince ürünler elde edilmiştir (Şekil 8c,d). 9,5 mm bilye kullanıldığında tüketilen enerji miktarı 3mm bilye kullanıldığındakinden %80 daha fazla olması karşın elde edilen ürün tane boyutu d_{80} değerleri 1 mm ve 3 mm bilyeye göre daha iri kalmıştır. Bu durum iri bilyelerin ince bilyelere göre değirmen içindeki hareketinin daha zor olmasından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte 3 mm bilye ile elde edilen ürün d_{80} tane boyutları 1 mm ye göre daha ince olmuştur.

Değirmen öğütücü ortam şarj oranını artışıyla birlikte enerji tüketimi artarken aynı enerji tüketimine daha yüksek şarj oranında daha ince ürün elde edilmiştir (Şekil 8e,f). Öğütücü ortam olarak yoğunluğu düşük olan kuvars kullanıldığında aynı boyuttaki bilyeye göre harcanan enerji daha düşük olmaktadır. -4+2 mm boyutunda kuvars ile yapılan öğütme deneyinde harcanan enerji oldukça düşük olmasına karşın elde edilen ürün tane boyutu d_{80} değeri 3 mm bilye kullanıldığındaki değerden yüksek olmuştur (Şekil 8g,h).

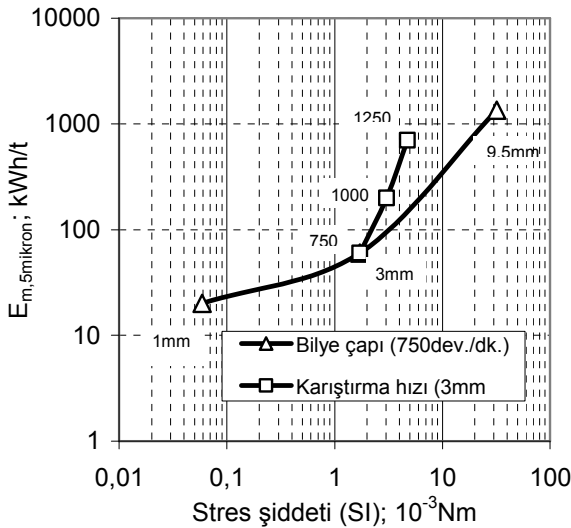
Enerji tüketimi tane boyutu ilişkisi incelendiğinde belli bir enerji sarfiyatından sonra ürün tane boyutunda azalmanın gerçekleşmediği görülmektedir. Bu durum öğütme esnasında oluşan ince tanelerin miktarının artmasına bağlı olarak ortamın viskozitesinin artışından kaynaklanmaktadır. Artan viskozite öğütme performansını olumsuz etkilemektedir.



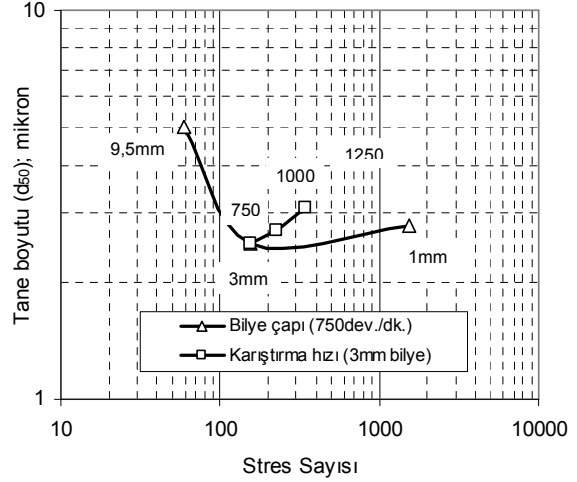
Şekil 8. Öğütme süresine ve d_{80} boyutları bağlı olarak a,b) Karıştırma hızı; c,d) Şarj oranı; e,f) Bilye boyutu; g,h) öğütücü ortam cinci ile enerji tüketimi arasındaki ilişki (%35 kati, %100 doluluk).

3.6. Öğütme etkinliği: Stres şiddeti ve stres sayısının belirlenmesi

Karıştırmalı değirmenlerde öğütmenin gerçekleşmesi iki koşula bağlıdır. Bunlar, değirmen içinde birim zamanda meydana gelen çarpışma sayısı (stres sayısı=SN) ve her çarpışmada açığa çıkan enerji miktarıdır (stres şiddeti=SI). Karıştırmalı değirmenlerde düşük stres şiddeti taneleri kırmaya yeterli olmadığından ya daha fazla enerji kullanılmalı ya da stres sayısı artırılmalıdır. Stres yoğunluğunun artmasıyla ürün inceliği bir noktaya kadar azalmakta ve bu optimum noktadan sonra artmaktadır (Jankovic, 2001; Kwade, 1999). Refrakter tip Akoluk cevherinin karıştırmalı değirmende öğütülmesiyle elde edilen stres şiddeti-harcanan enerji ve stres sayısı-üretilen tane boyutu arasındaki ilişkiler Şekil 9 ve 10'de verilmektedir. Şekil 9'a göre bilye çapı arttıkça artan stres şiddetine bağlı olarak aynı tane boyutuna ulaşmak için harcanan enerji miktarında artmaktadır. Bununla birlikte daha düşük stres sayısı ve buna bağlı olarak daha iri tane boyutları elde edilmiştir (Şekil 10). Karıştırma hızının artışıyla birlikte yüksek enerji tüketimleriyle daha yüksek stres şiddetleri elde edilmiştir. Ancak daha yüksek stres sayısı elde edilmesine rağmen elde edilen ürünün tane boyutu daha iri kalmaktadır. Artan karıştırma hızına bağlı olarak artan stres şiddeti-sayısına rağmen değirmen içinde oluşan santrifüjden dolayı daha ince ürün elde edilememiştir.



Şekil 9. Bilye çapı ve karıştırma hızına bağlı olarak stres şiddeti ve gerekli enerji miktarı arasındaki ilişki (5 mikron tane üretmek için)



Şekil 10. Bilye çapı ve karıştırma hızına bağlı olarak stres sayısı ve ürün tane boyutu arasındaki ilişki (10dk. öğütme süresi)

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, refrakter özellikle Akoluk (Ordu) cevherinin dikey pinli karıştırmalı değirmende öğütülmesinde değirmen karıştırma hızı ve süresi, bilye boyutu, öğütücü ortam cinsi ve şarj oranının etkisi araştırılarak optimum öğütme parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. Öğütme süresi arttıkça tane boyutu azalmakta ve buna bağlı olarak da tüketilen enerji miktarı da artmaktadır. Karıştırma hızının ve bilye boyutunun azaltılması daha ince boyutlu ürünlerin elde edilmesine neden olurken şarj oranının azalması ile birlikte elde edilen ürünlerin d_{90} değeri artmaktadır. 3mm bilye boyutu ve 750dev./dk. karıştırma hızı optimum parametre olarak belirlenmiş olup 5 dakika öğütme sonrasında 236kWh/ton enerji tüketimiyle elde edilen ürünün d_{90} tane boyutu yaklaşık 5 μm olarak gerçekleşmiştir.

Bilye çapı arttıkça artan stres şiddetine bağlı olarak aynı tane boyutuna ulaşmak için harcanan enerji miktarında artmaktadır. Bununla birlikte daha düşük stres sayısı ve buna bağlı olarak daha iri tane boyutları elde edilmiştir. Karıştırma hızının artışıyla birlikte yüksek enerji tüketimleriyle daha yüksek stres şiddetleri elde edilmiştir. Ancak daha yüksek stres sayısı elde edilmesine rağmen elde edilen tane boyutu daha iri kalmaktadır.

Elde edilen ince tane boyutu verileri refrakter özellikteki cevher için uygulanacak olan iç

prosesleri öncesinde ince öğütmenin ön işlem olarak kullanılabilceğini öngörmektedir. Altın madenciliğinin hızla arttığı ülkemizde, refrakter tip cevherlerin değerlendirilmesi gündeme gelmektedir. Bu alanda ön işlem olarak başarılı bir şekilde kullanılan ve diğer yöntemlere göre önemli avantajlar sağlayan çok ince öğütmenin önümüzdeki yıllarda önem kazanacağı öngörülmektedir. İnce öğütme sonrasında yapılan siyanür ile altın kazanımı çalışmaları daha sonraki yayında detaylı bir şekilde sunulacaktır. Çalışma sonuçlarının olumlu sonuçlanması durumunda kavurma gibi pahalı ve sorunlu yöntemlere göre daha kullanışlı bir alternatif geliştirilmiş olacaktır.

BİLGİLENDİRME

Yazarlar numunelerin sağlanmasında özverisinden dolayı Yüksek Mühendis Hüseyin YILMAZ'a ve MTA'ya, sağladığı destek nedeniyle K.T.Ü. Bilimsel Araştırma Fonuna teşekkürlerini borç bilir.

KAYNAKLAR

Adams, M.D., 2005; "Advances in gold ore processing", *Developments in Mineral Processing* 15, Elsevier.

Aslaner, G. ve Ottemann, J., 1971; "Native gold appearance occurred in Toktamış zinkenite veins", MTA, Ankara, (yayınlanmamış).

Becker, M. ve Schwedes, J., 1999, "Comminution of ceramics in stirred media mills and wear of grinding beads", *Powder Technology*, **105**, 374–381.

Bokayni, L. ve Csöke, B., 2003, "Preparation of clean coal by flotation following ultra fine liberation", *Applied Energy*, **74**, 349–358.

Celep O., Alp İ., 2008; "Karıştırmalı değirmenler ile ince öğütmenin refrakter altın cevherlerine uygulanabilirliğinin incelenmesi", *Madencilik Dergisi*, **47(3)**, 15-26.

Celep O., Alp İ., Deveci H., Vıçıl M., 2009; "Characterization of refractory behaviour of a complex gold/silver ore by diagnostic leaching", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **19**, 707-713.

Celep O., Alp İ., Türk T., 2009; "İnce öğütme teknolojisinde karıştırmalı ortam değirmenleri ve cevher hazırlamadaki uygulamaları", *İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi*, **21(2)**, 61-73.

Celep O., Alp İ., Deveci H., Yılmaz T., 2006; "The investigation of gold and silver recovery from Akoluk (Ordu -Turkey) ore", *International Conference of Modern Management of Mine Producing, Geology and Environmental Protection, SGEM 2006, Bulgaristan*, pp251-258.

Corrans, I.J. ve Angove, J.E., 1991; "Ultra fine milling for the recovery of refractory gold", *Minerals Engineering*, **4(11)**, 763-776.

Costa, M.C., 1997; "Hydrometallurgy of gold: new perspectives and treatment of refractory sulphide ores", *Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii*, **63**, 63-72.

Deschenes, G., McMullen, J., Ellis, S., Fulton, M. ve Atkin, A., 2005; "Investigation on the cyanide leaching optimization for the treatment of KCGM gold flotation concentrate-phase1", *Minerals Engineering*, **18**, 832-838.

Dikmen, S. ve Ergün, Ş.L., 2004; "Karıştırmalı bilyalı değirmenler", *Madencilik Dergisi*, **43(4)**, 3-15.

Dunn, J.G. ve Chamberlain, A.C., 1997, "The recovery of gold from refractory arsenopyrite concentrates by pyrolysis-oxidation", *Minerals Engineering*, **10(9)**, 919-928.

Ellis, S., 2008, "Ultra fine grinding- a practical alternative to oxidative treatment of refractory gold ores", <http://www.isamill.com>.

Fadhel, H.B., Frances, C. ve Mamourian, A., 1999, "Investigations on ultra-fine grinding of titanium dioxide in a stirred media mill", *Powder Technology*, **105**, 362–373.

Gao, M.W. ve Holmes, R., 2008; "Developments in fine and ultrafine grinding technologies for the minerals industry", http://www.iom3.org/divisions/mining_technology/fine.pdf

Gao, M.W. ve Forsberg, E., 1993; "A Study on The of Effect of parameters in stirred ball milling", *Int. J. Miner. Process*, **37**, 45-59.

- Gao, M., Holmes, R. ve Pease, J., 2006, "The latest developments in fine and ultrafine grinding technologies", XXIII International Mineral Processing Congress, İstanbul, 30-37.
- Gupta, C.K. ve Mukherjee, T.K., 2000; "Hydrometallurgy in extraction processes", Volume I, Boston.
- Hacıfazlıoğlu, H, Pilevneli, C.C. ve Toroğlu, İ., 2007; "Dikey pinli karıştırmalı değirmende armutçuk kömürünün kuru öğütülmesi ve bilye boyutunun ürün inceliğine etkisi", Madencilik Dergisi, **(46)1**, 33-41.
- Iglesias, N. ve Carranza, F., 1994; "Refractory gold-bearing ore: A review of treatment methods and recent advances in biotechnological techniques", Hydrometallurgy, **(34)**, 383-395.
- Jankovic, A., 2001, Media stress intensity analysis for vertical stirred mills, Minerals Engineering, **14(10)**, 1177-1186.
- Jankovic, A, Valery, W. ve Davis, E., 2004, Cement grinding optimisation, Minerals Engineering, **17**, 1075-1081.
- Jankovic, A., 2008; "A Review of regrinding and fine grinding technology-The Facts and Myths", <http://www.metsominerals.com>.
- Kwade, A., 1999, "Wet comminution in stirred media mills – research and its practical application, Powder Technology, **105**, 14-20.
- La Brooy, S.R., Linge, H.G. ve Walker, G.S., 1994; "Review of gold extraction from ores", Minerals Engineering, **7(10)**, 1213-1241.
- Lichter, J. ve Davey, G., 2006; "Selection and sizing of ultrafine and stirred grinding mills", Advances in Comminution, Kawatra S. (ed.), Society for Mining, Metallurgy and Exploration.
- Mankosa, M.J., Adel, G.T. ve Yoon, R.H., 1989, "Effect of operating parameters in stirred ball mill grinding of coal", Powder Technology, **59(4)**, 255-260.
- Marsden, J.O. ve House, C.L., 2006; "The chemistry of gold extraction", Society for Mining Metallurgy and Exploration.
- MTA, 1993; Türkiye altın-gümüş envanteri, No:198, Ankara.
- Orumwense, O.A. ve Forssberg, E., 1992; "Super-fine and ultra-fine grinding-a literature survey", Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, **11(1-2)**, 107-127.
- Parry, J., Klein, B. ve Lin, D., 2006; "Comparison of ultrafine grinding technologies", XXIII International Mineral Processing Congress, İstanbul, 177-183.
- Tüzün, M.A., Loveday, B.K. ve Hindle, A.L., 1995, "Effect of pin tip velocity, ball density and ball size on grinding kinetics in a stirred ball mill", International Journal of Mineral Processing, **43**, 179-191.
- Tüysüz, N., Akçay, M., 2000, "Doğu Karadeniz Bölgesindeki altın yataklarının karşılaştırılmalı incelenmesi", Cumhuriyetin 75. Yıldönümü Yerbilimleri ve Madencilik Kongresi Bildiriler Kitabı, MTA, Ankara, 625-645.
- Wang, Y. ve Forssberg, E., 2007, "Enhancement of energy efficiency for mechanical production of ultra fine and ultra-fine particles in comminution", China Particuology, **5**, 193-201.
- Wang, Y. ve Forssberg, E., 2008; "International overview and outlook on comminution technology", <http://pure.ltu.se>.
- Yaylayı, G., 2000; "Akoluk (Ulubey - Ordu) epitermal altın mineralizasyonunun hidrotermal alterasyonu, jeolojisi ve jeokimyası", Yüksek lisans tezi, K.T.Ü., Trabzon, 150 sayfa.
- Yaylalı, G. ve Tüysüz, N., 2009; "Statistical evaluation of the geochemical data from Akoluk epithermal gold area (Ulubey-Ordu), NE Turkey", Geophysical Research Abstracts, **11**, 615.
- Yue, J. ve Klein, B., 2006, Effects of bead size on ultrafine grinding in a stirred bead mill, Advances in Comminution, Society for Mining, Metallurgy and Exploration.
- Zheng, J., Haris, C.C. ve Samasundaran, P., 1996; "A study on grinding and energy input in stirred media mills", Powder Technology, **86(2)**, 171-178.