

SÜLFİD KONSANTRELERİNDEN MİKROORGANİZMALARLA SAFSIZLIKLARIN ATILMASI

A.S. ATKINS (*)

F. D. POOLEY (**)

R. N. SINGH (***)

G. SHRESTHA (**)

Çeviri : M. Zeki DOĞAN (****)

ÖZET

Hidro - metalurjik yöntem seçeneği olarak kullanılan, sülfid minerallerinin bakteriyel çökeltmesi tekniğine ilgi gitgide artmaktadır. Buna neden, alışılmış ergitme yöntemi sonucu ortaya çıkan sülfürün hava kirlenmesinde oynadığı önemli rolden kaynaklanmaktadır. Bu yüzden, arsenik içeren sülfidlerin bakteriyel oksidasyonu özel önem taşımaktadır. Arseniğin gazlaştırma yoluyla tamamen bünyeden çıkartılması pahalı bir yöntem olup; ayrıca, işlem sonucu ortaya çıkacak «arsenik trioksit»in oldukça zehirleyici bir madde olması nedeniyle sakıncalıdır. Bildiri, Enarjit'in bakteriyel oksitleştirilmesini anlatmakta ve prosesde pirit ilavesinin yararlarından söz etmektedir, ilaveten, pas arsenik, mikrobiyel çökeltme yolu ile konsantre mineralden ayrıştırılması -pratik uygulama örnekleri vererek- tartışılmaktadır.

(*) Department of Mining Engineering,- North Staffordshire Polytechnic, Stoke on Trent, Staffordshire, U.K.

(**) Reader, Department of Mineral Exploitation, University College, Cardiff, UK.

(***) Department of Mining Engineering, University of Nottingham, Nottingham, UK.

(****) Prof. Dr. Maden Müh. Bölümü, ODTÜ, ANKARA.

ABSTRACT

The increasing interest in bacterial leaching of sulphide minerals as an alternative hydro-metallurgical process has arisen primarily from the environmental aspect in preventing pollution from sulphur emissions associated with conventional smelting operations. In this context bacterial oxidation of arsenic bearing sulphides is of particular importance, as the complete removal of arsenic by volatilization is expensive and results in the production of arsenic trioxide which is highly toxic. The paper describes the mechanism of bacterial oxidation of enargite and the beneficial effects of pyrite additions. Examples of practical applications of removal of arsenic as a contaminant from mineral concentrates by microbial leaching are also discussed.

1. GİRİŞ

ABD yılda 1,4 milyon metrik ton bakır üretimi ile dünyada birinci sırayı almakta olup en yakın rakıpları yılda 1,1 milyon metrik tonla Şili ve 0,9 milyon metrik tonla SSCB'dir (1). Bakır metalinin büyük bir kısmı kalkopirit ($CuFeS_2$), kalkozin (Cu_2S) ve borrit (Cu_5FeS_4) gibi sülfid cevherlerden oldukça karmaşık metalurjik arıtma yöntemiyle üretilmektedir. Bu arıtma yöntemi cevherin bünyesindeki kükürtün bir kısmını atmak üzere yüksek fırın ya da reverber fırınında, kavurma ve sonra da elde edilen «mat»dan «Bessemer» ya da «Reverbe» konverterinde metalik bakır elde etmeyi kapsamaktadır. Pirometalurjik tesislerde izabe sonucu SO_2 gazı açığa çıktığından asit içeren yağmur oluşmakta ve bu da çevre sorunları yaratmaktadır. Kanada Ontario Sudbury'deki, Bakır ve Nikel İzabe tesisi dünyada en büyük SO_2 hava kirlenmesi kaynağıdır. 400 m. yükseklikteki baca yılda 1 milyon metrik ton SO_2 gazını atmosfere vermektedir. Diğer yandan İngiltere'de elektrik üretimi için yılda 85 milyon ton kömürün yakılmasından 1 milyon metrik ton SO_2 gazı meydana gelmektedir, bu da sorunun boyutunu göstermektedir (2).

ABD bakır endüstrisi çevre sağlığı konusunda, Çevre Sağlığı Koruma Ajanlığı kurallarına uymak üzere 2 milyar dolar harcamada bulunmuştur. Bu da, her bir libre bakır üretim maliyeti olan 75 sent'in 15 sent'ini oluşturmaktadır. Bu harcamanın 120 milyon

doları «Inspiration Consolidation Copper», 239 milyon doları «Arasco», 411 milyon doları «Kennecott», 330 milyon doları «Phelps-Dodge» ve 260 milyon doları da «Anaconda» şirketi tarafından yapılmıştır. 1980 yılında «Anaconda» şirketi Montana izabe ve arıtma tesisini kapatmış ve konsantreyi Japonya'daki izabecilere satmaya karar vermiştir. Çevreyi kirletmemek için izabe tesislerinde yapılacak değişiklikler büyük masraflara neden olacağından, bu tutum diğer ABD bakır üreticileri için de söz konusudur (3).

Son zamanlarda hidrometalurjik yöntemlere ve özellikle çevre kirlenmesine neden olmadığından sülfid konsantrelerinin bakteriyel özütlenmesi konusuna ilgi artmıştır.

Mikrobiyolojik sistemle 200 ton/gün kapasiteli kalkopirit konsantresinden 1 libre bakır üretme maliyeti % 50 randımanla ve tek özütleme ile 24 sent/libre olup konvensiyonel izabe ve arıtma maliyeti ise 27 sent/libre 'dir (4). Ayrıca konsantre tenorlerinin yükseltilmesinde safsızlığa neden olan arzu edilmeyen metallerin seçmeli olarak arıtılmasında mikrobiyolojik özütleme yönteminin uygulanması önerilmiştir (5).

Arsenik içeren sülfidlerin bakteriyel oksidasyonu bu bakımdan önemli olup arsenik trioksidin (As_2O_3) beyaz toz ya da kurum olarak buharlaştırılması pahalı ve yüksek derecede zehirlidir. Başlıca arsenikli bakır mineralleri tenantit $[(Cu, Fe)_{12}As_4S_{13}]$ ve enarjit $(Cu_3As_4S_{14})$ alternatif bakır kaynağı olup, konvensiyonel olarak zenginleştirilen konsantrelerde arsenopiritle $(FeAsS)$ safsızlık ve yan ürün olarak üretilmektedir. Bununla birlikte Çizelge 1'de gösterilen, izabeciler tarafından uygulanan ceza maddeleri nedeniyle % 3'ten fazla arsenik içeren bir konsantrenin pazarlaması ekonomik bakımdan çok zordur.

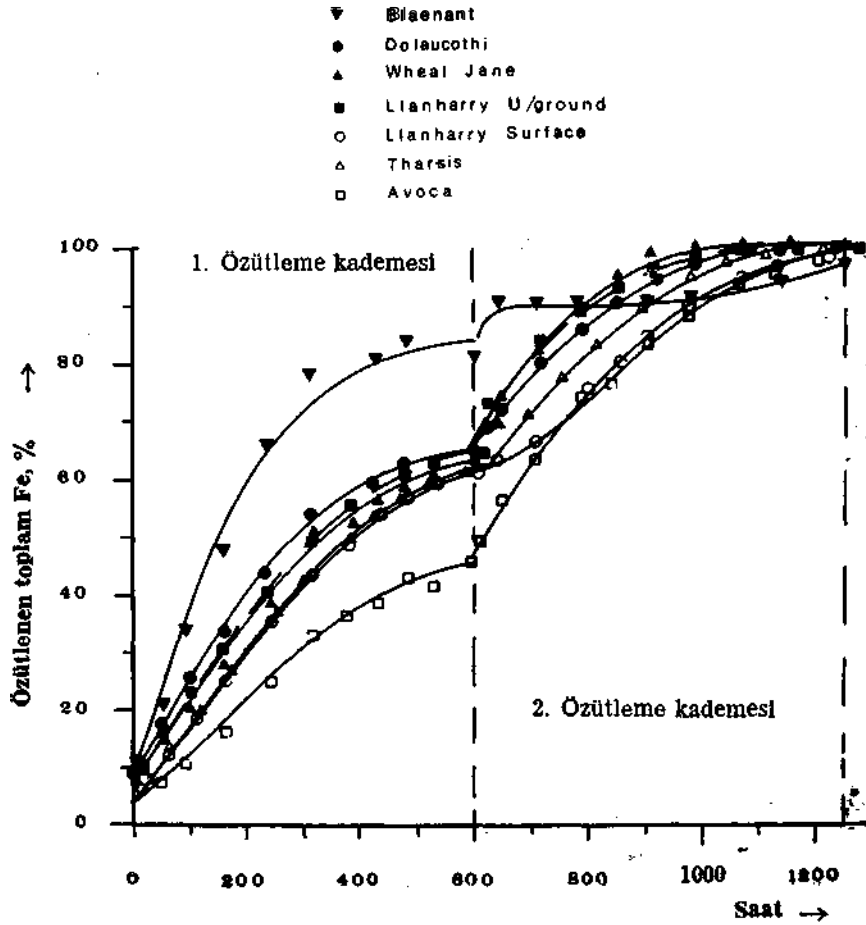
Çizelge 1 — Bakır Konsantrelerinde Değişik Arsenik içeriğine Uygulanan Cezalar.

Arsenik içeriği	Uygulanan Ceza
0,5 — 1,0	% 0,1 arsenik için 0,25 dolar
1,0 — 2,0	% 0,1 arsenik için 0,50 dolar
2,0 — 3,0	% 0,1 arsenik için 1,00 dolar
> 3,0	% 0,1 arsenik için 2,00 dolar

Bakır konsantrelerinde arsenik aşağıdaki nedenlerle sakıncalıdır.

Şekil 1, çeşitli jeolojik kökenli değişik pirit numunelerine ait 2 aşamalı özütleme sonucunu göstermektedir. Bu şekilde piritin bakterilerle oksitlenmesi sırasında fazla kükürtün varlığı nedeniyle sistemin düşük pH değeri tepkimeyi sınırlamaktadır (9,11).

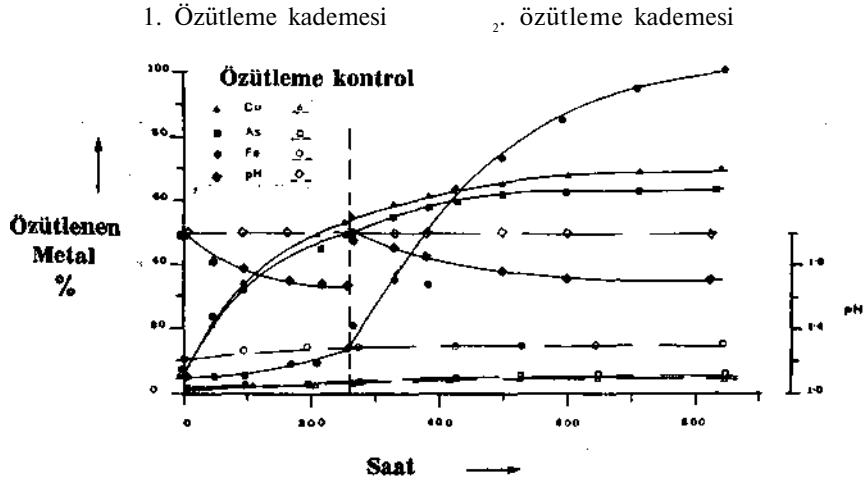
Grafikler piritin komple özütlenmesini göstermektedir. Tepkimeye girmeyen piriti içeren artık, çökelmiş ürünler ve bakteriyel hücreler yeniden- «-9 k» besiyerinde pH 2,0 de 600 saatlik birincil özütlemeden sonra çözeltiye alınmaktadır. Sonuçlar, özütleme aş-



Şekil 1. Değişik jeolojik kökenli pirit numunelerinin 2 kademeli bakteri özütlemesi.
Pttip yoğunluğu % 6 (Ağırlık/Hacım), Isı 35°C, Başlangıç, pH : 2,0 (Atkins, 1978).

malarında numune kaybını önlemek için matematiksel olarak düzeltilmektedir. Kontrol için özütleme artığının kimyasal analizi yaptırılmış, kütle balansı piritin komple oksitlenmesini doğrulamıştır.

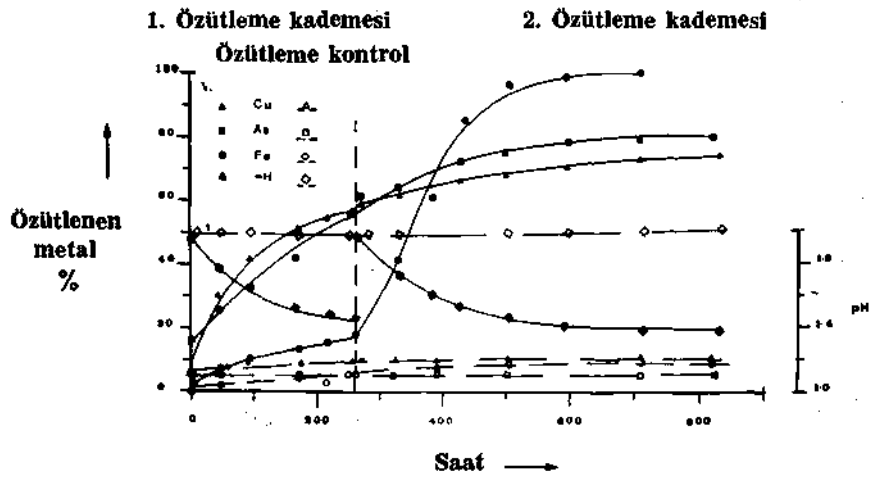
Şekil 2, % 2 (Ağırlık/Hacım) enarjit numunesinin bakteriyel oksitlenmesini göstermektedir. Burada, 2 kademeli özütleme kontrol deneyi karşılaştırılmış ve ancak saf sızlık olarak bulunan demirin komple özütlenmesinin olanaklı olduğunu göstermiştir. Asitlendirilmiş demir 3 sülfatla enarjitin çözeltiye alınması konusunu inceleme sırasında, piritin mevcudiyetinde demir 3 sülfat özütlemesinin enarjit oksitlenmesini hızlandırdığı gözlenmiştir (11).



Şekil 2. Enarjitin İM kademeli bakteri özütleme grafiği
PUP yoğunluğu % 2 (Ağırlık/Hacım), Isı 35°C, Başlangıç pH:2,0.

Sülfid minerallerinin bakteriyel oksitlenmesinde birçok araştırmacı, tamamlanmayan özütlemenin; tanelerin yüzeyinde sızdırmaz bir tabakanın oluşundan ileri geldiğini öne sürmektedir (12). Piritten başka sülfid minerallerin özütlenmesinde, genellikle çözeltideki demir katı halinde çöker ve Jarosit kompleks bileşimleri meydana gelir $[AFe_3(SO_4)_2(OH)_6]$ burada A, Na, K, Rb, NH_4 , Ag ve HsO olabilir.] ve komple özütlemeyi önler. Bununla birlikte, bazı durumlarda metal randımanını arttırmak üzere pirit ilavesi faydalı olup, kompleks biyokimyasal ortamı kontrol eder.

Enarjit mineralinin özütlenmesine pirit ilâvesinin etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Enarjit minerali kristal yapısında fazla kükürt içermektedir. Şekil 3, sentetik karışım olan 2 gram enarjit, 1 gram Tharsis piritinin pH 2'de bakteriyel oksitleme sonuçlarını göstermektedir. Sentetik karışıma 2 kademe bakteriyel özütleme uygulanmış ve aynı koşullarda bakterisiz kontrol deneyi ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 3. Enarjit (2 gram) ve pirit (1 gram) karışımının 2 kademe bakteriyel özütleme grafiği.
Isı 35°C, Başlangıç pH : 2,0.

iki deneyin sonuçları Çizelge 2'de özetlenmiştir.

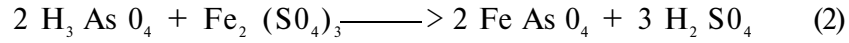
Çizelge 2 — Enarjitin Bakteriyel Oksitlenmesi.

Numune	Bakteriyel Oksitlenme (%)			Bakterisiz Kontrol (%)		
	Cu	As	Fe	Cu	As	Fe
Enarjit (2 gram)	70,3	62,5	100,0	5,5	4,5	15,8
Enarjit/pirit (2g) (1g)	74,2	80,0	100,0	10,53	8,0	5,3

Pirit ilavesiyle bakır çözünürlüğü % 4, diğer yandan arsenik çözünürlüğü % 17,5 artmaktadır. Ehrlich (8), enarjitin bakteriyel oksitlenmesi sırasında arsenik kısmının bakıra göre oksitlenmeye daha uygun olduğunu kaydetmiştir. Dutrizac ve MacDonald (11) enarjitin ferrik iyonu ile özütlenmesinde, enarjit kristalinin bakır ve arsenik elementleri, yaklaşık olarak aynı oranda çözeltiye geçtiğinden geriye kalan artıktaki bakır ve arsenik yönünden zenginleşme olmamaktadır.

Enarjit numunesinde % 3,58 Fe'in safsızlık olarak varlığı alınan sonuçların yorumunu zorlaştırmaktadır. Ehrlich (8) bakteriyel özütleme etüdünde kullandığı enarjit numunesinde % 11,2 Fe'in varlığını kaydetmiştir.

Çözeltide demirin bulunması, demirin arsenat olarak çökmesi 2 No.lu denklemde ifade edilmektedir.



Ferrik iyonları, ferrik sülfatın hidrolizi sırasında da çökebilirler ve muhtemelen jarosit kompleksi oluşur. Dutrizac ve MacDonald (11), bakır sülfid ilavesinin enarjitle tepkimeye gireceğinden hatalı sonuçlar vereceğini bildirmektedir.

Tepkimeye girmemiş enarjitin yeniden süspansiyonu faydalı sonuçlar vermekte, bakır özütlenmesinde artışlar oluşmaktadır.

3. BAKIR KONSANTRELERİNDE SAFSIZLIK OLARAK BULUNAN ARSENİK'İN BAKTERİYEL ÖZÜTLEME İLE ARITILMASI

3.1. Portekiz Bakır Konsantresi

Konvansiyonel pirometalurjik yöntemi uygulayarak kalkopirit - arsenopirit'ten ibaret olan bakır konsantresinde (1/2 - 6 As içeren), arsenik içeriğini azaltmak üzere bakteriyel koşullandırma işlemi uygulanmıştır. Deneylerde kullanılan Portekiz Konsantresi % 1,51 ile % 2,6 arasında As içeren —Çizelge 3'de görülen— 5 numuneden ibarettir.

Çizelge 3 — Portekiz Sülfid Konsantreleri Kimyasal Analizleri

Portekiz Konsantreleri	Mineralojik Kompozisyon	Metal (%) Ağırlık			
		Zn	Cu	Fe	As
Kons. 1	Kalkopirit (Cu Fe s ₂)	4,42	22,4	26,6	2,08
Kons. 2		—	28,87	34,79	1,51
Kons. 3		6,6	26,5	26,0	2,49
Kons. 4	Arsenopirit (Fe As S)	6,4	26,0	28,25	2,53
Kons. 5		6,25	25,0	31,25	2,6

Numuneler aynen olduğu gibi kullanılmış, yani flotasyon reaktifleri ya da rutubet giderilmemiştir. Deneyler, konsantrede köpüklenmeyi azaltmak için 5 ve 20 litre kapasiteli özel türbinli karıştırıcılardan ibaret olan, hava ile karıştırmalı «Pachuca», tipi reaktörlerde yapılmıştır.

Çizelge 4, bakır konsantre üzerinde üretilmiş bakterilerle 200 gram konsantre içeren 5 litre «Pachuca» reaktöründe yapılan birinci seri deneyleri göstermektedir. Sonuçlar; artıktaki arsenik miktarının % 2,08 den % 0,56 ya düşürüldüğünü ve bakır çözünürlüğünün ancak % 4 olduğunu, bunun da hidrometalurjik yolla kazanılabileceğini belirtmiştir.

ikinci deney benzer koşullarda birinci deneyden elde olunan bakteri içeren özütleme çözeltisinin % 10'u ile başlatılmış ve 7 gün süreyle yapılmıştır. Sonuç birincinin benzeri olmuş ve arseniğin % 80'i ve bakırın ancak % 4'ü çözeltilmiştir.

% 8 ve % 16 (Ağırlık/hacim) katı konsantrasyonunda yapılan deneylerde, bakteriyel özütleme sonucu kalan artık flote edilerek bakır konsantresi tenörü yükseltilmiştir. Bu şekilde artıktaki Cu tenörü % 30'a çıkartılmış ve arsenik içeriği % 0,17'ye düşürülmüştür, % 16 katı konsantrasyonunda artık numunesi ikiye bölünmüş, bir fraksiyonu pH 4,2'de ve ikinci fraksiyon pH 11,5'de flote edilmiştir. Asit ortamda bakteriyel koşullanmadan sonra kalkopirit kolayca yüzmüş diğer yandan pirit bastırılmıştır. Sonuçlar Çizelge 4'de özetlenmiştir.

Çizelge 4 — Değişik Katı Konsantrasyonunda Portekiz Bakır Konsantresiyle Yapılan «Pachuca»
özütleme Deney Sonuçları

Katı Konsantrasyonu % (Ağırlık/Hacim)	Özütleme Süresi (gün)	Eklenen Özütleme Çözültisi	Özütlenen Metal						Artık Ağırlığı tGram)	Artıktaki Metal % tenörü		
			Cu		Fe		As			Cu	Fe	As
			gr/lt	%	gr/lt	%	ffr/lt	%				
4	9	Bakteri % 10	0,39	4,3	0,95	8,9	0,64	76,4	175	25	26,3	0,58
4	7	(hacim/hacim)	0,41	4,1	1,45	12,7	0,65	78,0	171	25,2	26,5	0,57
		% 10 (H/H)	1,04	5,6	2,73	12,13	1,15	69,2	Yüzdürülmüş * F_1 210 ** F_2 51 Artık 74	30,35	30,0	0,17
16	7	% 10 (H/H)	1,28	3,3	4,28	9,4	2,7	80,0	pH 4'de Yüzdürülmüş * F_1 227 ** F_2 77,6 Artık 44 pH 11.5 de Yüzdürülmüş *** Kons. 2055 Artık 113	31,5	35,13	0,48
										29,25	33,75	0,34
										25,5	31,25	0,80
										31,88	35,0	0,21

(*) Doğal pH da yüzdürülmüş

(**) $1 \text{ ml } \% 2 \left(\frac{\text{Ağırlık}}{\text{Hacim}} \right)$ Potasyum Amil Ksantatla flote edilmiş (KAX)

(***) $4 \text{ mi } \% 2 \left(\frac{\text{Ağırlık}}{\text{Hacim}} \right)$ Potasyum Amil Ksantatla flote edilmiş; pH, CaO ilavesiyle ayarlanmıştır.

3.2. Güney Amerika Cevherinin İşlenmesi

Diğer bir örnek olarak Güney Amerika kompleks sülfid cevheri verilebilir. Burada cevher; pirit (FeS_2), arsenopirit (Fe As S), enarjit ($\text{Cu}_3 \text{As S}_4$) ve eser miktarda sfalerit (ZnS) içermektedir.

Bu cevhere konvansiyonel yöntemler uygulanarak, % 10 arsenikli bir bakır konsantresi elde edilebilir.

İlk deneyler % 2 (Ağırlık/hacim) katı konsantrasyonunda kesikli kaplarda yapılmış ve pH : 1,8'de tutulmuştur. Nötr koşullarda oksijensiz ortamda 750°C'da 1 saat süre ile % 100 kavrulmuş (dead roasted) numune aynı koşullarda bakteriyel olarak özütlenmiştir. Sonuçlar Çizelge 5'de görülmektedir; Isı işlemi görmüş numunede % 94 bakır çözülmüştür.

Çizelge 5 — Güney Amerika Cevherinin Kesik **Kaplarda Yapılan** Bakteriyel özütleme Sonuçları

Numune	Kavurmadan Sonra Ağırlık kaybı (°/o)	özütlenen Metal (%)		
		Zn	Cu	Fe
Normal	—	53,8	19,0	11,7
75°C'da 1 saat kavrulmuş	13,0	67,2	93,9	74,9

x-ışınlarında incelenen ısı işlemi görmüş numunede kavurma ile tetrahidrit $[(\text{Cu}, \text{Fe})_{12} \text{Sb}_4 \text{S}_{13}]$ ve bornit ($\text{Cu}_5 \text{Fe S}_4$) oluştuğu gözlemlenmiş ve sonra da bakır çözünürlüğü artmıştır.

Güney Amerika cevheri ile «Pachuca» reaktörlerinde yapılan ters akımlı bakteriyel özütleme deney sonuçları Çizelge 6'da özetlenmiştir. Kesik kaplarda yapılan deneylerden alınan sonuçlar, «Pachuca» tipi reaktörlerde tekrarlanmıştır.

Bu da önceden kavurma ile cevher çözünürlüğünü arttırmanın endüstriyel çapta uygulanmasının olanaklı olabileceğini göstermiştir.

Çizelge 6 — Güney Amerika Cevherinin Ters Akım özütleme Sonuçları

Numune	Ağırlık (Gram)	Metal (% Ağırlık)			özütlenen Metal %			Doymuş özütlenen Çözelti (gr/lt)		
		Zn	Cu	Fe	Zn	Cu	Fe	Zn	Cu	Fe
Beslenen										
Cevher	170	0,22	7,88	37,5						
Artık 1	32,4	0,125	4,3	15,0	100	89,4	74,1	0,3	7,0	26,0
Artık 2	52,91	0,4	0,7	22,5	96,5	100,0	77,2	0,2	6,5	33,0
Artık 3	67,95	0,075	5,0	33,75	90,0	73,5	63,9	63,9	6,4	22,0

(750°C'da 1 saat kavrulmuş numune)
Pülp yoğunluğu : % 10 (Ağırlık/hacim) pH = 1,8
Kavrulduktan sonra ağırlık kaybı : % 13
Özütleme süresi : 7 gün,

4. SONUÇLAR

a) Enarjit (bakır-arsenik) konsantresinin iki kademeli bakteriyel oksitlenmesi sonucu, bakırın % 70'inin ve % 3,78 Fe olarak bulunan tamamının çözeltilmeye alınması olanaklıdır. Mineral kristal yapısında fazla kükürt olmasına karşın piritle karşılaştırıldığında komple çözeltilmeye alınma olanaklı olmamıştır. Jarosit kompleksi meydana geldiğinde bu da mineralin çevresini kaplamış ve bakırın komple çözeltilmeye alınmasını önlemiştir.

b) Enarjitin bakteriyel özütlenmesinde pirit ilavesi faydalı olmuş, bakırın çözünürlüğünü % 4 ve arseniğin çözünürlüğünü % 17,5 artırmıştır.

c) Konvansiyonel izabe yönteminden önce bakır-arsenik konsantresine uygulanan bakteriyel özütleme ile arsenik 9 günde % 2,6 dan % 0,6 ya düşürülmüş ve bakır çözünürlüğü yalnız % 4'de kalmıştır. Çözeltilmeye geçen bu bakırın da hidrometalurjik yolla kazanılması olanaklıdır. Benzer sonuç, daha önceki bakteriyel çözeltilmenin % 10'u alınmak suretiyle elde edilmiş ve özütleme süresi 7 güne indirilmiştir. Bu sonuç endüstriyel uygulama bakımından önemlidir. Zira bakteri üretme pahalı olup çok metal çözünürlüğü optimal üretimle birlikte olmaktadır.

d) Özütleme sonucu kalan artığın flotasyonu ile bakır tenoru % 30'a çıkartılmış ve arsenik % 17'de kalmıştır. Bakteriyel özütlemeyen sonra kalkopirit asit ortamda kolayca yüzdürülmüş diğer yandan pirit bastırılmıştır.

e) % 10 arsenik içeren kompleks bir bakır sülfid cevherinin 750°C da 1 saat süreli ısı işlemi bakteriyel özütlemeyen önce çok verimli olmuştur. Kesikli kaplarda yapılan özütleme deneylerinde % 94 bakır çözünürlüğü elde edilmiştir.

f) 2 litrelik «Pachuca» reaktörlerinde alınan sonuçlar kesikli kaplarda alınan sonuçlara yakın olmuş ve bu da büyük çaplı uygulamanın tasarımına yararlı olmuştur.

KAYNAKLAR

1. Mining Journal, Vol. 296, No. 7586, Jan. 1981, pp. 17-18.
2. HINRICHSON, D., «A Beautiful Death» Sweden Now Vol. 16, No. 3, 1982.
3. Mining Journal, Vol. 296, No. 7592. Feb. 1982, pp 25-26.
4. LAWRENCE, R.W., BRUYNESTEYN, A., and HACK, R.P., «Recent Developments in the Bioleaching of Sulphide Concentrates», International Union of Pure and Applied Chemistry, Aug. 1981.
5. PINCHES, A., «Bacterial Leaching of an arsenic-bearing sulphide concentrate». Leaching and Reduction in Hydrometallurgy Edited by AR Burkin, Published by the Institution of Mining and Metallurgy 1975, 44 Portland Place, London W1N, 4BR, England pp. 28-35.
- 6- Mining Journal, Vol. 299, No. 7678, Oct. 1982
7. EHRLICH, H.L., «Bacterial Action on Orpiment», Economic Geology, Vol. 59, 1963, pp. 991-994.
8. EHRLICH, H.L., «Bacterial Oxidation of Arsenopyrite and Enargite», Economic Geology, Vol. 59, pp. 1306-1312, 1964.
9. POLKIN, S.I., KARAVATKO, G.I., TAUZHMYANSKAYA, A.Z., and PANIN, V.V., «Bacterial selective extraction of Arsenic and copper from oxidized sulphide tin concentrates», 9 th International Minerals Processing Congress, Prague, 1970, pp. 347-353.
10. ATKINS, A.S., «Studies on the Oxidation of Sulphide Minerals (Pyrite) in its presence of Bacteria». Metallurgical Applications of Bacterial Leaching and Related Microbiological Phenomena, Chapter 21, Published by Academic Press, 1978, pp. 403-427.
11. DUTRIZAC, J.E., and MACDONALD, R.S.C., «The kinetics of dissolution of Enargite in acidified ferric sulphate solutions», Can. Met. Quart, Vol. 11, No. 3, 1972, pp. 469-476.
12. ROMMAN, R.J., and BENNER, B.R., «The dissolution of copper concentrates», Min. Sei. Eng., Vol. 5, No. 1, 1973, pp. 3-24.